

Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz

- Pflanzenernährung -

---

# **Einfluss von Bodenhilfsstoffen auf die Wasserhaltekapazität bewässerter Böden**

**Dissertation**

zur Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften

(Dr. agr.)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

**Dipl.-Ing. agr. Jens Wester**

aus Esterwegen

Bonn 2018

**Referent: Prof. emerit. Dr. Heiner E. Goldbach**

**Korreferent: PD Dr. Gerhard Welp**

**Tag der mündlichen Prüfung: 23. November 2018**

**Gewidmet meiner Mutter**

## Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Dissertation war es, den Einfluss von Bodenhilfsstoffen auf die Wasserhaltekapazität (WHK) von Böden mit unterschiedlichen Bewässerungssystemen zu untersuchen. Um die Wirkung dieser Stoffe in der Kombination mit einer unterirdischen Tropfbewässerung („Hydrip“-System) zu testen, wurden unterschiedliche Labor- und Pflanzenversuche durchgeführt. Darüber hinaus wurde in weiteren Versuchen eine Auswahl an flüssigen BHS eingesetzt, um ihre Wirkung auf das Pflanzenwachstum zu untersuchen. Des Weiteren wurde bei zwei unterschiedlichen Unterflur-Tropfbewässerungssystemen das Wurzeinwachsen, das die Funktionalität des Tropfers einschränken kann, getestet.

Um die WHK zu ermitteln, wurde eine Methode nach „Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.“ (kurz BGK) leicht modifiziert. Die Bestimmung erfolgte für die reinen Substrate und für vier unterschiedliche Aufwandmengen der BHS (30, 10, 3 Gew.-% und Herstellerempfehlung) in drei unterschiedlichen Bodengemischen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass bei mineralischen Substraten signifikante Erhöhungen der WHK nur mit sehr hohen Aufwandsmengen erreicht wurden. Organische Substrate konnten bereits mit geringeren Mengen eine Steigerung erzielen. In unseren Versuchen zeigten Axis, Geohumus, Kokosfaser und Torf die stärkste Steigerung der WHK. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass diese Zunahme in Bodensystemen viel geringer ist als die Wasseraufnahmefähigkeit der Stoffe bei destilliertem Wasser.

Die Kombination aus festen Hilfsstoffen und unterirdischer Tropfbewässerung wurde auf die Wasser- und Nährstoffversorgung bei Welschem Weidelgras (*Lolium multiflorum*) in einem Gefäßversuch (Kick-Brauckmann), in Bodensystemen mit Spargel in einem Treibhaus und einem Weinbauversuch in Portugal untersucht.

Sowohl im Spargel als auch im Weinbau konnte mit Hilfe des „Hydrip“-Systems eine Verringerung der Sickerwasserbildung gegenüber einer konventionellen oberirdischen Tropfbewässerung erzielt werden. Trotz einer reduzierten Bewässerungswassermenge von ca. 30 % beim Spargel und 70 % beim Wein wurden erhöhte Wassergehalte in den umliegenden Bodenschichten mit dem verlegten Schlauch eingebettet in Alginit gemessen. Beim Spargel wirkte sich die gute Wasserversorgung in der Wurzelzone negativ auf den Ertrag aus (20 % weniger Stangenspargel). Beim Wein hingegen konnten weder in Bezug auf den Ertrag noch auf die Qualität Unterschiede gegenüber der oberirdisch bewässerten Variante festgestellt werden.

In Rhizoboxen konnte gezeigt werden, dass die Wurzeln von Maispflanzen in Richtung der Wasseraustrittslöcher der unterirdisch verlegten Tropfschläuche wachsen. Ein Einwachsen von Weidelgraswurzeln in unterschiedlichen Tropfbewässerungssystemen konnte ebenfalls beobachtet. Tropfer mit und ohne Wurzelschutzbarriere zeigten ein ähnlich starkes Einwachsen. Eine totale Einschränkung der Funktionalität der Tropfer konnte während der Versuchsdauer von 20 Wochen nicht nachgewiesen werden. Ein vollständiger Funktionsverlust der Tropfer konnte nur bei Weinrebenwurzeln erfasst werden.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden flüssige BHS auf ihre vom Hersteller behaupteten positiven Effekte auf das Pflanzenwachstum untersucht. Es konnten keine signifikanten Unterschiede für die Nährstoffverfügbarkeit und den Ertrag zwischen den Behandlungen und der Kontrolle unter den experimentellen Bedingungen feststellen werden.

Die Verwendung des „Hydrip“-Bewässerungssystems kann den Einsatz von Bewässerungswasser, zumindest im Weinbau, signifikant reduzieren. Wir können keine Aussage über die Beständigkeit dieses Systems über mehrere Jahre machen. BHS können helfen, die WHK unter bestimmten Bodenbedingungen zu steigern und in Kombination mit einem wassersparenden, unterirdischen Bewässerungssystem dazu beitragen, die Nachfrage an Bewässerungswasser deutlich zu reduzieren. Weitere Versuche im Gewächshaus und im Feld sind erforderlich, um die Langlebigkeit dieser kombinierten Systeme zu bewerten.

## Summery

The objective of this thesis was to investigate the influence of soil conditioners (BHS) on the water holding capacity (WHC) of soils in combination with different irrigation systems. To test the effect of these compounds with sub-surface drip irrigation (“Hydrip”-System), different laboratory and plant tests were carried out. In addition, further experiments were carried with a variety of liquid BHS to test their effects on plant growth. Furthermore, two different sub-surface drip irrigation systems were tested for the ingrowth of roots which could negatively affect its functionality.

To assess the WHC, we slightly modified a method acc.to the “Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.” (2006). The determination was carried out for the pure substrates and for three different application rates of the BHS (30, 10 and 3 wt.-%) in three different soil mixtures. The results showed that mineral substrates increase the WHC significantly only at very high application rates. Organic substrates may increase the WHC at lower ratios. In our experiments, Axis, Geohumus, coconut fiber and peat showed the strongest increase of WHC. It has to be pointed out, though, that the increase in soil systems is much lower than the water absorption capacity of the compounds for distilled water.

The combination of solid BHS and subsurface drip irrigation were examined for water and nutrient supply on Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) in a pot experiment (Kick-Brauckmann), and in soil systems with asparagus in a greenhouse and an experimental vineyard in Portugal.

For both, asparagus and grape wine the hydrip system reduced leaching compared to conventional above-ground drip irrigation. Despite a reduction of the irrigation by approximately 30 % for asparagus and 70 % in the vineyard, water contents around the drip system with Alginit were higher in the surrounding soil layers. The good water supply in the root zone, though, had a negative effect on the yield of the asparagus (20 % less asparagus spears), whereas there was no measurable effect, neither on grape yield nor quality compared to the above-ground irrigation.

It was shown in rhizoboxes, that root growth of maize plants was oriented towards the water outlet of the subsurface irrigation tube. There was an ingrowth of ryegrass roots into the different drip irrigation systems. Dripper with and without root barrier showed a similarly strong ingrowth. A total reduction in dripper functionality was not observed during the experimental period of one year. A complete blockage of the drippers was only monitored for grape roots.

In a further set of experiments, liquid BHS were tested for the claimed positive effects on plant growth. We could not detect any significant differences for nutrient availability and yield between treatments and control under our experimental conditions.

The use of hydrip-irrigation system can significantly reduce the need for irrigation water, at least in viniculture. We cannot, though, make statements on the long term stability of the system over several years. BHS may help to increase the WHC under certain soil conditions, and in combination with water saving subsurface irrigation systems, these may help to significantly reduce the demand for irrigation water. Further tests in the greenhouse and field are required to assess the long term stability of these combined systems.

---

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1</b>	<b><i>Einleitung und Zielsetzung</i></b> .....	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Hintergrund</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b><i>Wissensstand</i></b> .....	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>Die Ressource Wasser</b> .....	<b>6</b>
2.1.1	Wasserfußabdruck (WFA).....	7
2.1.2	Bewässerung in der Landwirtschaft .....	8
2.1.3	Bewässerungstechnik .....	9
<b>2.2</b>	<b>Bodenhilfsstoffe</b> .....	<b>11</b>
2.2.1	Gesetzliche Grundlage .....	11
2.2.1.1	Deutschland .....	11
2.2.1.2	Österreich .....	13
2.2.1.3	Schweiz .....	15
2.2.1.4	England .....	17
2.2.1.5	EU-Düngemittelrecht .....	17
2.2.2	Ähnliche Begriffe.....	17
2.2.3	Internationale Bezeichnungen.....	18
2.2.4	Physikalisch-chemische Eigenschaften .....	19
2.2.4.1	Bodenstruktur .....	20
2.2.4.2	Organische Substanz .....	21
2.2.4.3	Bodenwasserhaushalt .....	22
2.2.4.4	Kationenaustauschkapazität.....	23
2.2.4.5	Bodenacidität.....	24
2.2.5	Bodenhilfsstoffe auf dem Markt .....	25
2.2.5.1	Klassifizierung der Bodenhilfsstoffe.....	25
2.2.5.2	Hersteller von Bodenhilfsstoffen .....	26
2.2.5.3	Kuriositäten auf dem Markt.....	26
2.2.6	Auswahl der untersuchten Bodenhilfsstoffe .....	28
2.2.6.1	Feste Bodenhilfsstoffe.....	28
2.2.6.2	Flüssige Bodenhilfsstoffe .....	33
<b>3</b>	<b><i>Material und Methoden</i></b> .....	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Bodenhilfsstoffe und Bodensubstrate</b> .....	<b>39</b>
3.1.1	Methode zur Bestimmung der Wasserhaltekapazität [WHK] von festen Bodenhilfsstoffen und Bodensubstraten.....	40
3.1.1.1	Schüttdichte [RD <sub>FS</sub> ].....	40

---

3.1.1.2	Wassergehalt [WG].....	40
3.1.1.3	Volumenzunahme nach Wassersättigung [Vz] .....	40
3.1.1.4	Wasserhaltekapazität [WHK] .....	41
3.1.2	Bestimmung der Kationenaustauschkapazität (KAK) .....	42
<b>3.2</b>	<b>Gefäßversuch: Kombination aus Unterflurbewässerung und Bodenhilfsstoff.....</b>	<b>43</b>
3.2.1	Versuchssubstrat und -pflanzen .....	43
3.2.2	Nährstoffgehalte im Bodengemisch .....	43
3.2.3	Aufwandmenge der Bodenhilfsstoffe.....	44
3.2.4	Versuchsdesign/-durchführung .....	45
3.2.5	Analyse der Pflanzenproben .....	47
<b>3.3</b>	<b>Gefäßversuch: Wirkung der flüssigen Bodenhilfsstoffe.....</b>	<b>47</b>
<b>3.4</b>	<b>Versuch mit Rhizoboxen .....</b>	<b>49</b>
3.4.1	Aufbau der Versuchsgefäße.....	49
3.4.2	Versuchsdurchführung .....	50
<b>3.5</b>	<b>Wurzeleinwachstest.....</b>	<b>50</b>
3.5.1	Versuchsdesign/-durchführung .....	50
3.5.2	Aufbau der verwendeten Tropfschläuche .....	52
3.5.3	Auswertung .....	53
<b>3.6</b>	<b>Gewächshausversuch in Herongen: Spargel .....</b>	<b>54</b>
3.6.1	Anlegen der Versuchspartellen .....	54
3.6.2	Steuerung der Bewässerung.....	57
3.6.3	Überwachung der Bodenfeuchte.....	57
3.6.3.1	Tensiometer .....	58
3.6.3.2	TDR-Messgerät.....	59
3.6.4	Pflanzenbonitur und Ertragshebung .....	60
<b>3.7</b>	<b>Freilandversuch im Weinbau: Almeirim, Portugal.....</b>	<b>61</b>
3.7.1	Überwachung der Bodenfeuchte: TDR-Messgerät.....	63
3.7.2	Ermittlung der Qualität und Quantität der Weintrauben/-beeren .....	64
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>65</b>
<b>4.1</b>	<b>Modifizierte Methode zur Bestimmung der Wasserhaltekapazität .....</b>	<b>65</b>
4.1.1	Methodenvergleich am Beispiel der Bodensubstrate Uedorfer Gemisch, Meckenheimer Krume und Quarzsand und der Substrate Geohumus und Torf.....	67
4.1.2	Maßeinheit der WHK: Volumenprozent vs. Gewichtsprozent.....	68
<b>4.2</b>	<b>Ergebnisse der WHK-Analyse .....</b>	<b>69</b>
4.2.1	Schüttdichte, Wassergehalt und Volumenzunahme .....	69
4.2.2	WHK-Vergleich der reinen Substrate in Volumen- und Gewichtsprozent .....	72
4.2.3	Einfluss der Aufwandmenge auf die max. WHK .....	74

---

4.2.4	Einfluss der Bodenart auf die Aufwandmenge der BHS .....	78
4.2.5	Max. WHK: Aufwandmenge der Bodenhilfsstoffe nach Herstellerangabe .....	80
4.2.6	Kationenaustauschkapazität.....	83
4.2.7	Der ökonomische Aspekt: Kostenkalkulation.....	84
<b>4.3</b>	<b>Kick-Brauckmann-Gefäßversuch.....</b>	<b>86</b>
4.3.1	Untersuchung des überschüssigen Gießwassers.....	86
4.3.2	Frischmasse-Ertrag des Pflanzenmaterials .....	88
4.3.3	Trockenmasse-Ertrag des Pflanzenmaterials .....	89
4.3.4	Relativer Wassergehalt der Pflanzen.....	91
4.3.5	Nährstoffentzug der Pflanzen .....	93
<b>4.4</b>	<b>Effekt von flüssigen Bodenhilfsstoffen auf den Pflanzenertrag und der Nährstoffverfügbarkeit .....</b>	<b>95</b>
4.4.1	Trockenmasse-Ertrag und Wassergehalt des Pflanzenmaterials .....	95
4.4.2	Gehalt an ausgewählten Makroelementen .....	97
<b>4.5</b>	<b>Rhizoboxen: Vergleich von Wurzelsystemen .....</b>	<b>98</b>
<b>4.6</b>	<b>Wurzeleinwachstest.....</b>	<b>99</b>
4.6.1	Visuelle Auswertung.....	101
4.6.2	Bewertung der Tropfer .....	104
<b>4.7</b>	<b>Ober- und unterirdische Bewässerung im Spargel .....</b>	<b>106</b>
4.7.1	Klimatische Bedingungen im Gewächshaus.....	106
4.7.2	Bewässerungsmenge und -intervalle im Spargelanbau .....	108
4.7.3	Kontrolle der Bodenfeuchtigkeit mit Tensiometer .....	109
4.7.4	Wasserverteilung im Boden: mobile TDR-Messsonde.....	110
4.7.5	Pflanzenaufwuchs .....	113
4.7.6	Krankheitsbefall.....	115
4.7.7	Spargelertrag.....	116
<b>4.8</b>	<b>Weinbauversuch in Portugal .....</b>	<b>118</b>
4.8.1	Wassergehalte und -verteilungen im Boden.....	118
4.8.2	Qualität und Quantität der Weintrauben.....	120
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....</b>	<b>122</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>127</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>139</b>

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abb. 1:	Wasserverbrauch und Weltbevölkerung 1900 bis 2025.....	1
Abb. 2:	Wasserressourcen global .....	6
Abb. 3:	Globale Wassernutzung nach Sektoren.....	7
Abb. 4:	Bodenarten und –eigenschaften .....	20
Abb. 5:	Die molekulare Struktur eines Montmorillonit Minerals .....	24
Abb. 6:	schematischer Aufbau eines Kick-Brauckmann-Gefäßes .....	45
Abb. 7:	Versuchsaufbau im Gewächshaus.....	46
Abb. 8:	Aufbau einer Rhizobox .....	49
Abb. 9:	Schematische Darstellung eines Kick-Brauckmann-Gefäßes .....	51
Abb. 10:	Aufbau eines Tropfers der Firma Eurodrip® (Typ GR) .....	52
Abb. 11:	Aufbau eines Tropfers der Firma Netafim® (Typ UniRam AS).....	52
Abb. 12:	Versuchsplan des Gewächshauses .....	54
Abb. 13:	Schematischer Querschnitt der Pflanzreihen der „Hydrip“-Variante .....	55
Abb. 14:	Vergleich der beiden Verlegetechniken .....	56
Abb. 15:	Sonnenbrand an Spargelpflanzen und Gegenmaßnahme .....	56
Abb. 16:	Aufbau und Funktion eines Tensiometers.....	58
Abb. 17:	Installation eines Tensiometers.....	59
Abb. 18:	Positionierung der Glasfaserrohre pro Variante und Wiederholung .....	60
Abb. 19:	Versuchsanlage in Almeirim, Portugal .....	61
Abb. 20:	Installation der letzten Versuchsvariante .....	63
Abb. 21:	Installation der Glasfaserrohre zur TDR-Messung .....	64
Abb. 22:	Methodenvergleich zur Max. Wasserhaltekapazität [Gew.-%] der drei Versuchssubstrate .....	67
Abb. 23:	Vergleich der Methode der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. und der modifizierten Methode .....	68
Abb. 24:	Volumenzunahme [ml] des Geohumus in Abhängigkeit von drei unterschiedlichen Flüssigkeiten (Leitungswasser, dest. Wasser und 0,01 M, 0,05 M und 0,5 M CaCl <sub>2</sub> -Lösung) .....	71
Abb. 25:	Vergleich der durchschnittlichen max. Wasserhaltekapazitäten in [Vol.-%] und [Gew.-%] der drei Versuchssubstrate und der festen Bodenhilfsstoffe in reiner Form .....	74

---

Abb. 26: Vergleich der durchschnittlichen Wasserhaltekapazität in [Gew-%] des Uedorfer Gemisches mit den drei unterschiedlichen Aufwandmengen (30, 10 und 3 %) der verschiedenen Bodenhilfsstoffe .....	76
Abb. 27: Vergleich der durchschnittlichen Wasserhaltekapazität in [Vol-%] des Uedorfer Gemisches mit den drei unterschiedlichen Aufwandmengen (30, 10 und 3 %) der verschiedenen Bodenhilfsstoffe .....	78
Abb. 28: Abhängigkeit der Bodenart und der Aufwandmenge von <b>Alginit</b> auf die WHK von Bodensubstraten .....	79
Abb. 29: Abhängigkeit der Bodenart und der Aufwandmenge von <b>Kokosfaser</b> auf die WHK von Bodensubstraten .....	80
Abb. 30: Wasserhaltekapazität [Gew.-%] in Abhängigkeit unterschiedlicher Aufwandmengen von Perlit (0, 3, 10, 30 und 100 Gew.-%) im Uedorfer Gemisch.....	81
Abb. 31: Wasserhaltekapazität [Vol.-%] in Abhängigkeit unterschiedlicher Aufwandmengen von Perlit (0, 3, 10, 30 und 100 Gew.-%) im Uedorfer Gemisch.....	81
Abb. 32: Vergleich der durchschnittlichen Sickerwassermenge der einzelnen Versuchsvarianten des 1. und 2. Versuchsjahres .....	87
Abb. 33: Vergleich des gesamten Frischmasse-Ertrages [g FM/Topf] der unterschiedlichen Varianten .....	89
Abb. 34: Vergleich des gesamten Trockenmasse-Ertrages [g TM/Topf] der unterschiedlichen Varianten .....	90
Abb. 35: Vergleich der relativen Wassergehalte [%] der Varianten der einzelnen Schnitte.....	92
Abb. 36: Vergleich der durchschnittlichen Nährstoffentzüge [g/Topf] der ausgewählten Versuchsvarianten in Abhängigkeit von 6 Ernteterminen .....	94
Abb. 37: Durchschnittlicher Gesamttrockenmasse-Ertrag der Varianten mit den flüssigen Bodenhilfsstoffen (zwei unterschiedliche Aufwandmengen) und einer Kontrollvariante .....	95
Abb. 38: Durchschnittlicher relativer Wassergehalt der geernteten Pflanzen der Varianten mit den flüssigen Bodenhilfsstoffen (zwei unterschiedliche Aufwandmengen) und einer Kontrollvariante .....	97
Abb. 39: Vergleich des Wurzelsystems von Maispflanzen ( <i>Zea mays</i> ) bei unterschiedlicher Bewässerungsart .....	99

---

Abb. 40: Querschnittsbilder vom Tropfer ohne Wurzelbarriere, ohne Alginit und 12-wöchiger Wachstumsphase (Eurodrip GR).....	101
Abb. 41: Längsschnitt vom Tropfer mit Wurzelbarriere, ohne Alginit und 20-wöchiger Wachstumsphase (Netafim UniRam AS).....	102
Abb. 42: Quer- und Längsschnitt vom Tropfer mit Wurzelbarriere im Weinbauversuch, Portugal (Netafim UniRam AS) .....	103
Abb. 43: Vergleich zweier Bodenkerne aus der Variante mit dem Tropfer der Firma Eurodrip® ohne Alginit.....	104
Abb. 44: Temperaturverlauf für das Jahr 2012, Gewächshaus Herongen .....	107
Abb. 45: Luftfeuchtigkeit im Jahr 2012, Gewächshaus Herongen .....	107
Abb. 46: Vergleich der vertikalen (bis 100 cm Tiefe) und horizontalen (bis 40 cm Reihenabstand) Wasserverteilung der Varianten Hydrip und Oberflur im 2. Anbaujahr (2012).....	112
Abb. 47: Vergleich der durchschnittlichen Triebzahl [Triebe/Pflanze] unterschiedlicher Messpunkte (im 1. und 2. Anbaujahr) in Abhängigkeit der beiden Bewässerungsvarianten .....	114
Abb. 48: Vergleich des durchschnittlich höchsten Triebes [Triebe/Pflanze] unterschiedlicher Messzeitpunkte (im 1. und 2. Anbaujahr) in Abhängigkeit der verschiedenen Bewässerungssysteme und -varianten .....	114
Abb. 49: Vergleich des Spargelertrages der Varianten Hydrip und Oberflur in der 1. Erntewoche. ....	117
Abb. 50: Vergleich des Spargelertrages der Varianten Hydrip und Oberflur in der 2. Erntewoche. ....	117
Abb. 51: Vertikale Wasserverteilung bis 900 mm Bodentiefe an unterschiedlichen Messzeitpunkten .....	119

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tab. 1:	Vergleich der Verfahren .....	10
Tab. 2:	Kationenaustauschkapazitäten in mval/g Boden .....	23
Tab. 3:	Übersicht der verwendeten festen Bodenhilfsstoffe mit Aufwandmenge nach Herstellerangabe und dem aktuellen Preis (Feb. 2013) .....	29
Tab. 4:	Zusammensetzung der verwendeten festen Bodenhilfsstoffe nach Herstellerangaben .....	32
Tab. 5:	Übersicht der verwendeten flüssigen Bodenhilfsstoffe (Produkt, Hersteller und Zusammensetzung) mit Aufwandmenge nach Herstellerangabe und dem aktuellen Preis (Stand Feb. 2013) .....	33
Tab. 6:	Bodeneigenschaften der „Uedorfer Krume“ und „Meckenheimer Krume“ .....	39
Tab. 7:	Makronährstoffe.....	43
Tab. 8:	Nährstoffgehalt und –zufuhr [g/Topf] der Mikronährstoffe Kalium, Phosphor, Magnesium und Natrium des Uedorfer Gemisches. ....	44
Tab. 9:	Aufwandmenge [Vol.-% und g/Depot] nach Herstellerempfehlung der verwendeten Bodenhilfsstoffe .....	44
Tab. 10:	Aufwandmenge der untersuchten Präparate pro Topf für die Varianten „nach Herstellerangabe“ und „100-fach höhere Dosierung“ .....	48
Tab. 11:	Bewertungsskala und –kriterien für die Beurteilung der Wurzeleinwuchsstärke .....	53
Tab. 12:	Auflistung der Versuchsvarianten mit zugehöriger Behandlung, Bewässerungsart und Aufwandmengen .....	62
Tab. 13:	Durchschnittswerte der Schüttdichte [ $RD_{FS}$ ], des Wassergehaltes [ $WG_{FS}$ ] und der maximalen Volumenzunahme [ $V_z$ ] der untersuchten Substrate .....	69
Tab. 14:	Theoretisch ermittelter Effekt auf die Wasserhaltekapazitäten [Gew.- und Vol.-%] des Uedorfer Gemisches durch den Einsatz der festen Bodenhilfsstoffe und der empfohlenen Aufwandmengen der Hersteller in Gew.- und Vol.-%.....	82
Tab. 15:	Potentielle Kationenaustauschkapazität (KAK) .....	84
Tab. 16:	Kosten (€/ha) ausgewählter fester Substrate in Abhängigkeit der aktuellen Preise (Stand: Feb. 2013) und den Aufwandmengen (kg/m <sup>2</sup> ) .....	85
Tab. 17:	Durchschnittliche Entzüge [mg/Topf] der Elemente Kalium, Phosphor, Magnesium und Natrium an zwei Ernteterminen .....	98
Tab. 18:	Bewertung der Einwuchsstärke (12 Wochen Wachstumsphase).....	105

---

Tab. 19: Bewertung der Einwuchsstärke (20 Wochen Wachstumsphase).....	105
Tab. 20: Übersicht über Wasserverbrauch der beiden Varianten, der Sprinkleranlage und des gesamten Gewächshauses (in m <sup>3</sup> ) .....	109
Tab. 21: Messwerte der Tensiometer der unterschiedlichen Varianten an unterschiedlichen Terminen (in hPa) .....	110
Tab. 22: Qualitätsparameter, Beerengewicht und Traubenertrag der unterschiedlichen Varianten .....	121

# 1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

## 1.1 Hintergrund

Der nachhaltige Umgang mit der Ressource Wasser muss vor allem im landwirtschaftlichen Sektor eine übergeordnete Rolle einnehmen. Mit stetig wachsender Weltbevölkerung steigt die Nachfrage an Lebensmitteln und somit auch an Wasser (siehe Abb. 1). Die Zahl der bewässerten Nutzflächen (global) hat sich seit 1950 um das Dreifache erhöht (NENTWIG 2005; FAO 2010). Auf diesen Flächen werden gegenwärtig ca. 40 % der weltweiten Nahrungsmittel erzeugt (CHMIELEWSKI 2011). Um die steigende Nachfrage nach Nahrungsmitteln zu decken, müssten laut heutiger Prognosen der Anteil an bewässerten Flächen bis zum Jahre 2025 um mindestens 20-30 % ansteigen (WORLD ECONOMIC FORUM 2008; BRUINSMA 2009).

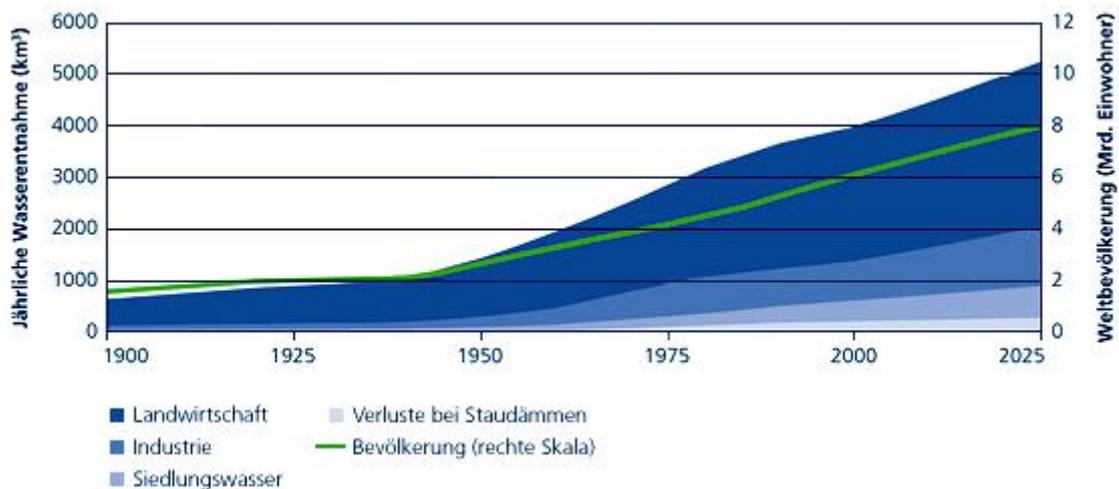


Abb. 1: Wasserverbrauch und Weltbevölkerung 1900 bis 2025 (nach Daten FAO 2007 und UN 2006)

Das Bevölkerungswachstum wird in vielen Ländern zu einer erhöhten Landnutzungsintensität führen. Dabei sind die Produktionsverfahren auf solchen intensiv bewirtschafteten Flächen auf ein hohes Ertragsniveau ausgerichtet. Hinzu kommen die Auswirkungen des Klimawandels. In diesem Zusammenhang muss das Wasser als begrenzender Produktionsfaktor angeführt werden (ANTER ET AL. 2009). Neben Temperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentration gehört die Wasserverfügbarkeit zu den wichtigsten Klimaparametern. Selbst in Ländern mit humidem Klima, wie z.B. Deutschland, zeigte sich in den letzten Jahren der Klimawandel in der Umverteilung der jährlichen Niederschlagsmengen. Immer häufiger kommt es zu Extremwettersituationen, die sich in

Form von Wasserknappheit im Sommer und erhöhter Niederschlagsmenge im Winter zeigen. Eine Wasserknappheit kann zweierlei Bedeutungen haben:

1. Die Pflanzen haben kein Wasser zum Wachstum.
2. Die Landwirte haben kein Wasser zum Bewässern.

In Deutschland hat der Landwirt im Normalfall genug Wasser zum Beregnen. In südlichen Ländern hingegen gelten oftmals beide Formen der Wasserknappheit. Um auf diese Wasserknappheitssituationen zu reagieren und die Stabilisierung des hoch ausgerichteten Pflanzenertrags zu sichern, ist eine Anpassungsreaktion im Bewässerungslandbau erforderlich. Laut CHMIELEWSKI (2011) kann „der Wasserbedarf in der Landwirtschaft sowohl durch effizientere Technologien der Bewässerung als auch durch standortangepasste und wasserschonende Bewirtschaftung weiter optimiert werden“.

Die Effizienzsteigerung der Wassernutzung kann durch die Anwendung von modernen Bewässerungstechnologien wie Tropfbewässerung (siehe Kap. 2.1.3) erreicht werden. Das Funktionsprinzip der Tropfschläuche gewährleistet eine gezielte und gleichmäßige Ausbringung des Wassers. Gegenüber konventionellen Methoden (Oberflächenbewässerung und Beregnung) konnten Einsparungen von bis zu 90 % erzielt werden (WOLFF & GLEICK 2002). Die Verbreitung bzw. der Einsatz von Tropfbewässerung beschränkt sich auf Sonderkulturen, hochwertigen Kulturen und Kulturen mit langer Standzeit. Die Tropfbewässerungsanlagen werden hauptsächlich im Obst- (Erdbeeren, Himbeeren, Johannisbeeren) und im Gemüsebau (Einlegegurken, Spargel, Kartoffeln), aber auch immer mehr im Wein- und Hopfenanbau eingesetzt. Je nach Pflanzenkultur werden die Tropfschläuche unter- oder oberirdisch verlegt. (PASCHOLD 2010)

Ähnlich wie in der Industrie findet im landwirtschaftlichen Sektor ebenfalls ein ständiger technischer Weiterentwicklungsprozess statt. Existierende und neue Bewässerungskonzepte und -techniken werden kombiniert und/oder optimiert. Als Beispiel kann hier die mobile Tropfbewässerung angeführt werden. Dieses Bewässerungssystem setzt sich aus einer Linearberegnungsmaschine (z.B. Pivotregner) und Tropfschläuchen zusammen. Momentan wird diese Technik noch erprobt. (SOURELL 2009; MICHEL & SOURELL 2014)

Eine weitere innovative Idee in der Weiterentwicklung der Tropfbewässerung stammt von der Firma Hydrip aus Österreich. Bei ihrem System werden geeignete Tropfschläuche, die beim Verlegen mit sogenannten Bodenhilfsstoffen ummantelt werden, unterirdisch verlegt. Der Einsatz der Bodenhilfsstoffe soll in erster Linie die Wasserspeicherung im Bereich des Tropfers/Tropfschlauches erhöhen und damit die Versickerung verringern. Zusätzlich sollen

sie das Wurzelwachstum fördern, um die Wasseraufnahme der Pflanzen zu verbessern. Der Einsatz von sogenannten flüssigen Bodenhilfsstoffen soll das Bodenleben und somit ebenfalls das Wurzelwachstum begünstigen. Die Ausbringung in den Boden dieser Stoffe könnte mit Hilfe des Tropfbewässerungssystems erfolgen. Neben der Förderung des Wurzelwachstums sollen sie laut Herstellern besonders ertragsfördernd auf die Kulturpflanzen wirken. Alle eingesetzten Stoffe sind ökologisch unbedenklich und können organischer oder mineralischer Herkunft sein. Die Verwendung von einem unterirdischen Bewässerungssystem, auch ohne Bodenhilfsstoff, bringt noch zusätzliche Vorteile mit sich:

- Minimierung des Krankheitsdruckes (oberirdisches Pflanzenmaterial bleibt trocken);
- sehr geringe Evaporation (kein Oberflächenwasser durch die Bewässerung);
- erhebliche Energieeinsparungen (geringer Betriebsdruck);
- gezielte Applikation von Flüssigdüngern im Wurzelraum.

Momentan treten noch Probleme mit dem Einwuchs von Pflanzenwurzeln in die Tropflöcher auf. Dieses Einwachsen kann zum einen zum Ausfall vereinzelter Tropfer, zum anderen aber auch zum Verstopfen ganzer Schläuche führen. Die Folge wäre eine ungleichmäßige Wasserverteilung im Boden. Auf dem Markt gibt es bereits verschiedene Systeme/Methoden zur Verhinderung des Wurzeleinwuchses in Tropfer. Auf der einen Seite bieten Hersteller Tropfer mit mechanischer Barriere (z.B. Netafim UniRam AS) an und auf der anderen Seite werden unterschiedliche chemische Lösungen angeboten. Der Einsatz von Trifluralin, ein stark- und schnellbindendes Bodenherbizid (GROVER 1991), hat sich stark etabliert. Die Anwendung von Trifluralin erfolgt auf drei unterschiedlichen Weisen (RUSKIN & FERGUSON 1998; SUAREZ-REY ET AL. 2006; KENDZIA & ROTH-KLEYER 2008):

- Applizierung des Trifluralins direkt über die SDI;
- Trifluralin im Kunststoff des Tropfers (z.B. Rootguard<sup>®</sup>) oder
- Applizierung des Trifluralins über die SDI durch einen langsam freisetzenden Filter (z.B. Techfilter).

Aber auch das Benetzen der Tropfschläuche vor und während des Verlegens war anfangs weit verbreitet (SCHWANKL ET AL. 2008). Aufgrund von zahlreichen Untersuchungen von Trifluralin wurde 2007 die Zulassung von der EU widerrufen (2007/629/EG) und daher z.B. in Deutschland und Österreich nicht mehr zugelassen. Aus diesem Grund bieten einige Hersteller bereits Alternativen an. Sie imprägnieren die Membrandeckel der Tropfer mit Kupferoxid (z.B. Netafim) oder stellen komplette Tropferteile aus elementarem Kupfer (z.B. Rainbird) her. Aber wie erfolgreich sie funktionieren, ist noch nicht wirklich erforscht.

Inwiefern die eingesetzten Bodenhilfsstoffe im „Hydrip“-System dem Einwachsen ebenfalls entgegenwirken können, muss ebenfalls noch untersucht werden. Durch eine um den Tropfschlauch permanent erzeugte Wasserblase wäre dies durchaus denkbar, da Pflanzenwurzeln einem Feuchtegradienten (STÜTZEL ET AL. 2004) entgegenwachsen. Eine dauerhafte Durchfeuchtung der umliegenden Bodenschichten des Schlauches könnte das Wachstum der Wurzeln in die Tropfer somit verhindern.

Im Rahmen des EU-Projektes „NILE“ (New Irrigation systems with Low und Efficient water use in agriculture) wurde dieses modifizierte unterirdische Tropfbewässerungssystem der Firma Hydrip mit Hilfe von unterschiedlichen Labor-, Freiland- und Gewächshausversuchen näher untersucht.

## **1.2 Zielsetzung**

Das Ziel der vorliegenden Dissertation war es, den Einfluss von Bodenhilfsstoffen auf die Wasserhaltekapazität von bewässerten Böden bei Unterflur-Tropfbewässerung (kurz SDI = „Subsurface Drip Irrigation“) zu untersuchen. Dabei lag der Fokus auf der Analyse der wasserspeichernden Eigenschaft (v.a. Wasserhaltekapazität) von festen Bodenhilfsstoffen. Um die Wirkung dieser Stoffe in der Kombination mit der unterirdischen Tropfbewässerung zu testen, wurden unterschiedliche Labor- und Pflanzenversuche durchgeführt. Ebenfalls wurde eine Auswahl an flüssigen Bodenhilfsstoffen in einem weiteren Versuch auf ihre Wirkung auf das Pflanzenwachstum (oberirdische Massebildung) untersucht.

### **Folgende Hypothesen wurden aufgestellt:**

1. Die Höhe der Wasserhaltekapazität von festen Bodenhilfsstoffen und Bodenhilfsstoff-Bodengemischen hängt von ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften und somit von ihrer Zusammensetzung ab. Der Grad der Steigerung im Gemisch ist von der Aufwandsmenge abhängig.
2. Der Einsatz von festen Bodenhilfsstoffen mit einem unterirdischen Bewässerungssystem erzielt bei temporärem Trockenstress gegenüber einer konventionellen oberirdischen Tropfbewässerung erhöhte Frisch- und Trockenmasseerträge bei unterschiedlichen Kulturarten. Die Applikation von flüssigen Bodenhilfsstoffen steigert zusätzlich den Pflanzenertrag.
3. Bodenhilfsstoffe minimieren das Einwachsen von Wurzeln in die Tropflöcher der unterirdisch verlegten Bewässerungsschläuche. Sogenannte festinstallierte

„Wurzelbarrieren“ in den Tropfeinheiten einiger Hersteller unterstützen diesen Effekt.

4. Das „Hydrip“-System eignet sich vor allem für Dauerkulturen wie Spargel und Wein. Trotz erheblichen Wassereinsparungen bleiben die Qualität und der Ertrag gegenüber den üblichen Bewässerungssystemen erhalten.

## 2 WISSENSSTAND

### 2.1 Die Ressource Wasser

Süßwasser ist eines der wichtigsten Ressourcen unserer Erde, obwohl sie zu ca. 70 % mit Wasser bedeckt ist. Mehr als 97 % des globalen Wassers (siehe Abb. 2) entfallen jedoch auf salzige Ozeane. Der Anteil an Süßwasser macht ca. 2,5 % der weltweit vorhandenen Wassermenge aus. Von diesem Süßwasservorkommen kann wiederum ca. 30 % in Form von Grundwasser für die Landwirtschaft (Nahrungsmittelproduktion) und der Trinkwasserversorgung direkt genutzt werden. Die Menge an Süßwasser aus Seen, Flüssen und Feuchtgebieten beträgt weniger als 1 %. Das restliche Süßwasser, ca. 70 %, ist in Eis, Schnee und Permafrost eingeschlossen und kann somit zur Lebensmittelproduktion und zum Konsum nicht verwendet werden. (SHIKLOMANOV & RODDA 2003)

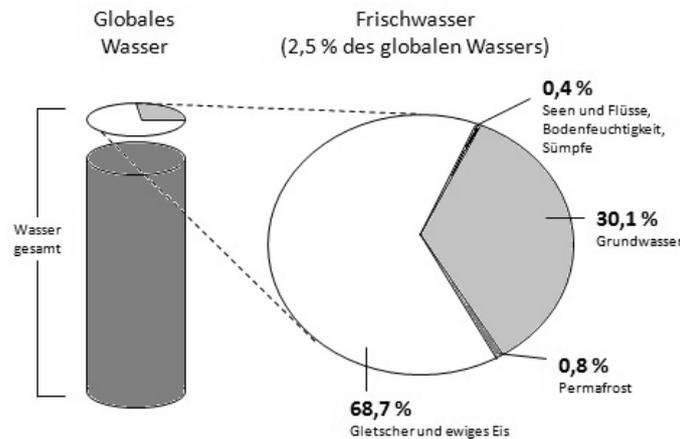


Abb. 2: Wasserressourcen global (Eigene Darstellung nach Daten aus SHIKLOMANOV 1993)

Der nachhaltige Umgang mit dem Süßwasser muss ein festes Ziel unserer heutigen und auch zukünftigen Gesellschaft sein. Das Thema der „Wasserknappheit“ wird durchaus nicht mehr ausschließlich in der Wissenschaft bearbeitet, sondern findet immer mehr Aufmerksamkeit in der Politik und im Handel. In Diskussionen der Öffentlichkeit ist bereits von einer eintreffenden weltweiten Wasserkrise die Rede (BASTIAN ET AL. 2008). Um die Ernsthaftigkeit dieses Themas zu verdeutlichen, werden an dieser Stelle drei Zitate repräsentativ angeführt:

- 1) „Zu Beginn des 21. Jahrhunderts steht die Erde mit ihren vielfältigen und reichen Lebensformen einschließlich mehr als sechs Milliarden Menschen vor einer ernsthaften Wasserkrise.“ (UNESCO 2003)
- 2) „In 2030, 47 % of world population will be living in areas of high water stress.“ (OECD 2009)
- 3) „Die Kriege des 21. Jahrhunderts werden nicht um Öl, sondern um Wasser geführt werden.“ (BOUTROS BOUTROS-GHALI 1986)

Auf Grundlage dieser Gedanken muss ein Umdenken der gesamten Weltbevölkerung stattfinden. Dabei steht vor allem der landwirtschaftliche Sektor im Fokus, da dort global das meiste Wasser eingesetzt wird (siehe Abb. 3). Von Land zu Land kann sich die Wassernutzung der Sektoren Landwirtschaft und Industrie stark unterscheiden.



Abb. 3: Globale Wassernutzung nach Sektoren (Quelle: UNESCO 2003)

### **2.1.1 Wasserfußabdruck (WFA)**

Im Zusammenhang mit Landwirtschaft und Wasserknappheit muss der Begriff „virtuelles Wasser“ angeführt werden, der durch den Geograf John Antony Allen Mitte der 1990er Jahre erheblich geprägt wurde. Diese Definition beschreibt den Wasserverbrauch für den gesamten Herstellungsprozess eines Nahrungsmittels oder eines Verbrauchsgutes (ALLAN 1998, HOEKSTRA ET AL. 2011). Aus diesem Grundgedanken entstand das Konzept des Wasserfußabdruckes (WFA), das von Hoekstra der Universität Twente entwickelt wurde (HOEKSTRA 2003). Der WFA ist ein Indikator für die direkte und indirekte Verwendung von Süßwasser (CHAPAGAIN & HOEKSTRA 2004). Die direkt verbrauchte Wassermenge bezieht sich dabei auf den durch Trinken, Kochen, Duschen und Waschen tatsächlichen Verbrauch (in DE bei  $\varnothing$  124 l/Kopf und Tag, WWF 2009). Der indirekte Wasserverbrauch (= virtuelles Wasser) bezieht sich auf die Wassermenge, die zum Beispiel in Bezug auf die

Landwirtschaft für die Herstellung von einem Kilogramm Weizen (von der Aussaat bis zur Ernte) benötigt wird. Zusammenfassend besteht der Wasserfußabdruck eines Menschen aus dem direkten und indirekten Wasserverbrauch, wobei auch externes Wasser, das durch importierte Produkte in ein Land geführt wurde, berücksichtigt werden muss. So kommt ein deutscher Staatsbürger momentan auf einen WFA von durchschnittlich 4000 Liter Wasser pro Tag (SONNENBERG ET AL. 2009). Um dieses virtuelle Wasser genauer zu definieren, unterteilte HOEKSTRA dieses Wasser in grünes und blaues Wasser (MEKONNEN & HOEKSTRA 2011). In Bezug auf in der Landwirtschaft hergestellte Produkte bedeuten diese beiden Begriffe folgendes:

Grünes Wasser beschreibt die Menge Regenwasser, die im Boden gespeichert wurde und der Pflanze im Laufe ihres Wachstums zur Verfügung stand.

Blaues Wasser wird als Bewässerungswasser definiert, das aus Oberflächen- und Grundwasser stammt. Ebenfalls ein Bestandteil ist die zugeführte Niederschlagsmenge durch Versickerung ins Grundwasser oder Abfluss in Flüsse.

Häufig wird neben dem grünen und blauen noch das graue virtuelle Wasser angeführt. Dieses sagt aus, wie viel Wasser benötigt wird, um Wasserverschmutzungen zum Beispiel durch Düngung auf ein umweltverträgliches Maß zu neutralisieren (HOEKSTRA et al. 2009).

Der globale WFA für zum Beispiel 1 Kilogramm Weizen beträgt durchschnittlich zwischen 1150 und 2000 Liter (HOEKSTRA & HUNG 2003; OKI ET AL. 2003; ZIMMER & RENAULT 2003). Die tatsächlichen Wassermengen hängen zum einen von der jeweiligen Region/Nation und zum anderen von zahlreichen Faktoren wie zum Beispiel Wassernutzung, Niederschlagsmenge, Stand der Technik (z.B. in der Bewässerungstechnik oder Düngetechnik) etc. ab. Der Handlungsansatz kann in der Landwirtschaft nur in Form von einer Senkung des blauen und des grauen Wassers erfolgen. Die Beeinflussung von Niederschlagsmengen (= grünes Wasser) ist nicht gegeben.

### ***2.1.2 Bewässerung in der Landwirtschaft***

Problematisch ist die Wasserverschwendung im Bewässerungslandbau. Bezogen auf die weltweite Ackerfläche von 1,4 Milliarden Hektar (bund.net 2013) werden heute über 300 Millionen Hektar dauerhaft bewässert bzw. sind mit Bewässerungstechnik dauerhaft ausgerüstet. Zum Vergleich waren es 1970 nur rund 170 Millionen Hektar. Das macht einen Anstieg von fast 80 %. Die FAO (2011a) prognostiziert bis 2050 einen weiteren Anstieg um 11 %. Zurzeit werden auf diesen 20 % der Gesamtackerflächen zudem über 40 % aller

Agrargüter produziert (SUPPER 2003). Der Großteil dieser Flächen wird mit einer uneffektiven Bewässerungstechnik betrieben. Der Grund für den Einsatz von solchen Systemen sind fehlende Anreize für einen sparsamen Umgang mit Wasser, vor allem in der Landwirtschaft. In vielen Ländern werden die Wasserpreise subventioniert und somit die Kosten nicht an den Landwirt weitergetragen. Oftmals sind an den Wasserentnahmestellen nicht einmal Zähleruhren angebracht, so dass der reale Verbrauch von Grund- und Oberflächenwasser nur lückenhaft festgehalten wird (WWF 2009).

In Deutschland fällt die Bewilligung einer Bewässerungsanlage unter das deutsche Wasserecht, das sich aus Wasserhaushalts- und Wasserwegerecht zusammensetzt. Die Entscheidungsebene teilen sich Bund und Länder. Seit 2010 ist ein entsprechendes eigenständiges Wasserhaushaltsgesetz des Bundes in Kraft getreten. Die einzelnen Länder passen ihre Wassergesetze diesem nun an. Alle eintretenden Regelungen, egal ob durch den Bund oder den Ländern, müssen mit den EU-Richtlinien übereinstimmen. (KNOPP 2010; DROST & ELL 2013)

In den meisten Fällen gibt es bei Anträgen für einen Brunnenbau keine Probleme, solange dieser nicht in einem Naturschutzgebiet oder Ähnlichem erfolgen soll. Somit spielt der Wasserpreis momentan in Deutschland für die Landwirte nur eine untergeordnete Rolle.

### ***2.1.3 Bewässerungstechnik***

Um im Landwirtschaftssektor den Wasserverbrauch zu senken, muss eine Optimierung der Bewässerungstechnik vollzogen werden. Als Vergleichsparameter unterschiedlicher Systeme wird die Wassereffizienz (= Wirkungsgrad des Wassers) angeführt, die die Beziehung zwischen dem Wasserbedarf und dem Aufbau von Trockenmasse einer Kulturpflanze darstellt (HATFIELD ET AL. 2001). Diese Wasserproduktivität (PASSIORA 2006) bildet somit den Nutzungsgrad eines bestimmten Wassereinsatzes, der aus dem Quotient Ertrag Biomasse und Evapotranspiration ( $\text{kg/m}^3$ ) errechnet wird. „Der Wirkungsgrad der Bewässerung ist vor allem von der Art und Anlage der Bewässerung abhängig, daneben jedoch auch vom Klima, von den Bodeneigenschaften und von der Topografie“ (SUPPER 2003). Aktuelle Verfahren zur Bewässerung können in drei Gruppen zusammengefasst werden: Oberflächenbewässerung, Beregnung und Tropfbewässerung. Die Tab. 1 zeigt den Vergleich der drei genannten Verfahren. In Bezug auf die Wassereffizienz sind starke Unterschiede zwischen den Verfahren zu verzeichnen. Die Unterschiede innerhalb eines Verfahrens hängen von der eingesetzten Technik ab, die hier aber nicht weiter beschrieben werden soll. Neben den zahlreichen äußeren

Einflussbedingungen muss zudem eine optimale Bewässerungssteuerung gefahren werden. Dabei sollte insbesondere auf den Bewässerungszeitpunkt und die Menge geachtet werden, um zum Beispiel Sicker- und Verdunstungsverluste zu reduzieren.

Tab. 1: Vergleich der Verfahren (verändert nach GRUDZINSKI 2003)

	Oberflächenbewässerung	Beregnung	Tropfbewässerung
Verdunstungsverluste	hoch	hoch	gering
Versickerungsverluste	mittel	gering	gering
Wassereffizienz	30-50 %	60-80 %	80-95 %
Systeme	Stauverfahren: Becken- oder Furchenbewässerung; Flutungsverfahren	Reihenregner; teilmobile oder mobile Beregnungsmaschinen	ober- oder unterirdisch verlegt
Mögliche Kulturarten	alle; Beckenbewässerung jedoch nur für stauwassertolerante Arten, z.B. Reis	alle	hauptsächlich Dauerkulturen z.B. Wein Oliven, Obst, aber auch Gemüse

In Bezug auf nachhaltige Bewässerung könnten einige Bewässerungsanlagen auf Tropfbewässerung umgestellt werden, da sie eine Wassereffizienz von 80 bis 95 % aufweisen (vgl. Tab. 1). Die Voraussetzung für eine Umstellung ist jedoch die Kulturart. Momentan liegt der Marktanteil dieser Bewässerungsart bei ca. 1 % (TILLMANN ET AL. 2004). Trotz hoher Investitionskosten ist ein deutlicher Aufwärtstrend zu sehen. Die Tropfbewässerung liefert zudem noch positive Nebeneffekte wie zum Beispiel die Senkung von Energiekosten (Betriebsdruck < 1,5 bar) und des grauen virtuellen Wassers durch gezielte Düngung, vor allem bei unterirdisch verlegten Schläuchen (MOSLER 1998). Diese Düngung kann in Form von Düngersuspensionen mit Hilfe eines Dosatrons erfolgen. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen zum einen in der gezielten Applikation der Stoffe direkt an die Wurzel der Pflanzen und zum anderen eine daraus resultierende Abnahme der Aufwandmenge. Eine Düngung würde nur bei Bedarf durchgeführt werden, die Anzahl der Düngezeitpunkte sind variabel. Bei unterirdisch verlegten Tropfschläuchen kann es jedoch nach einiger Zeit zum Verstopfen durch Wurzeln kommen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, bieten einige Hersteller von Tropfschläuchen bereits Tropfer mit Wurzelbarrieren an (siehe Kap. 3.5).

## **2.2 Bodenhilfsstoffe**

In diesem Kapitel wird eine Definition anhand der gesetzlichen und der physikalisch-chemischen (bodenphysiologischen) Grundlage vollzogen.

Der Begriff „Bodenhilfsstoffe“ wird im internationalen Vergleich unterschiedlich definiert, so dass oftmals sprachverwandte Ausdrücke wie Bodenverbesserer, Bodenhilfsmittel oder Bodenaktivator in diesem Zusammenhang verwendet werden. Diese Vielfalt an Definitionen erschwert die Markttransparenz solcher Produkte erheblich. Wie jedoch auch die Düngemittel unterliegen die Bodenhilfsstoffe dem Düngemittelrecht und erlangen dadurch ihre gesetzlichen Richtlinien zur Bestimmung ihrer Zugehörigkeit, die anhand von Wirkung und Zusammensetzung abgrenzt sind. Unter dem Begriff Bodenhilfsstoff werden feste wie flüssige Präparate zusammengefasst.

Eine gesetzliche Definition erfolgt anhand des Düngemittelrechts, das zwischen Düngemittel und Bodenhilfsstoff einen klar definierten Unterschied festsetzt. Vor allem für Hersteller werden dadurch der Vertrieb und die Kennzeichnung streng geregelt. Sie unterliegen beim Handeln mit den betroffenen Produkten diesen juristischen Vorschriften.

### **2.2.1 Gesetzliche Grundlage**

Im deutschsprachigen Raum (Deutschland/Österreich/Schweiz) unterliegen Bodenhilfsstoffe, wie bereits zuvor erwähnt, dem Düngemittelrecht. In den drei Ländern werden die Bodenhilfsstoffe jedoch noch im Detail unterschieden. Eine allgemeine Regelung über Bodenhilfsstoffe in der EU-Düngemittelverordnung gibt es momentan nicht.

#### **2.2.1.1 Deutschland**

Das deutsche Düngemittelgesetz vom 15. November 1977 (ANONYM 1997) gibt folgende Definition:

*„1. Düngemittel: Stoffe, die dazu bestimmt sind, unmittelbar oder mittelbar Nutzpflanzen zugeführt zu werden, um ihr Wachstum zu fördern, ihren Ertrag zu erhöhen oder ihre Qualität zu verbessern; ausgenommen sind Stoffe, die überwiegend dazu bestimmt sind, Pflanzen vor Schadorganismen und Krankheiten zu schützen oder, ohne zur Ernährung von Pflanzen bestimmt zu sein, die Lebensvorgänge von Pflanzen zu beeinflussen, sowie Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate, Pflanzenhilfsmittel, Kohlendioxid, Torf und Wasser;*

*2. Wirtschaftsdünger: tierische Ausscheidungen, Gülle, Jauche, Stallmist, Stroh sowie ähnliche Nebenerzeugnisse aus der landwirtschaftlichen Produktion, auch weiterbehandelt,*

die dazu bestimmt sind, zu einem der in Nummer 1 erster Teilsatz genannten Zwecke angewandt zu werden;

2a. *Sekundärrohstoffdünger: Abwasser, Fäkalien, Klärschlamm und ähnliche Stoffe aus Siedlungsabfällen und vergleichbare Stoffe aus anderen Quellen, jeweils auch weiterbehandelt und in Mischungen untereinander oder mit Stoffen nach den Nummern 1, 2, 3, 4 und 5, die dazu bestimmt sind, zu einem der in Nummer 1 erster Teilsatz genannten Zwecke angewandt zu werden;*

3. *Bodenhilfsstoffe: Stoffe ohne wesentlichen Nährstoffgehalt, die den Boden biotisch, chemisch oder physikalisch beeinflussen, um seinen Zustand oder die Wirksamkeit von Düngemitteln zu verbessern, insbesondere Bodenimpfmittel, Bodenkrümler, Bodenstabilisatoren, Gesteinsmehle sowie Stoffe mit wesentlichem Nährstoffgehalt, die dazu bestimmt sind, in geringen Mengen zur Aufbereitung organischen Materials zugesetzt zu werden;*

4. *Kultursubstrate: Pflanzenerden, Mischungen auf der Grundlage von Torf und andere Substrate, die den Pflanzen als Wurzelraum dienen, auch in flüssiger Form;*

5. *Pflanzenhilfsmittel: Stoffe ohne wesentlichen Nährstoffgehalt, die dazu bestimmt sind, auf die Pflanzen einzuwirken.“*

In erster Linie wird im Düngemittelgesetz zwischen Dünger (1 und 2) und Hilfsmitteln (3, 4 und 5) unterschieden, die sich vor allem auf Grund der Nährstoffgehalte voneinander abgrenzen. Bei den Hilfsmitteln wird zwischen Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln differenziert, wobei der Verwendungszweck der ausschlaggebende Faktor ist. Die Verwendung von Pflanzenschutz- und Pflanzenstärkungsmitteln regelt das Pflanzenschutzrecht.

Des Weiteren regeln die Vorgaben der Düngemittelverordnung (DüMV) das gewerbsmäßige Inverkehrbringen von Bodenhilfsstoffen (ANONYM 2012) und die Düngeverordnung (DüV) die Anwendung dieser Stoffe und Mittel nach den Grundsätzen der fachlichen Praxis (ANONYM 2006).

Ein wesentliches Kriterium für die Zulassung der Bodenhilfsstoffe ist der Gehalt der Nährelemente Stickstoff, Phosphor, Kalium, Schwefel, Kupfer und Zink sowie an basisch wirksamen Bestandteilen, die einen bestimmten Gehalt nicht übersteigen dürfen (N: 1,5%; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 0,5%; K<sub>2</sub>O: 0,75%; S: 0,3%; Cu: 0,03%; Zn: 0,5%; CaO: 30%). Ebenso darf bei einer üblichen (empfohlenen) Aufwandmenge eine gewisse Nährstofffracht nicht überschritten

werden (N: 50 kg/ha; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 30 kg/ha; K<sub>2</sub>O: 50 kg/ha; S: 15 kg/ha CaO: 500 kg/ha). Zudem werden Höchstmengen für bestimmte Fremd- und Schadstoffe festgelegt.

Bei den Höchstgehalten an Nährstoffen gibt es eine gewisse Überschneidung mit den Mindestgehalten an Nährstoffen in organischen und organisch-mineralischen Düngemitteln. Diese liegen bei Dreinährstoffdüngern bei 1% N, 0,3% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und 0,5% K<sub>2</sub>O. Der Gesetzgeber lässt demnach bei nährstoffreichen Bodenhilfsstoffen bzw. nährstoffarmen in organischen und organisch-mineralischen Düngemitteln eine gewisse Entscheidungsfreiheit. Limitierend wirkt hier jedoch die Nährstofffracht bei der empfohlenen Aufwandmenge.

Im Anhang der DÜMV (2012) befindet sich eine Liste der zugelassenen Haupt- und Nebenbestandteile, für die im Einzelnen weitere Vorgaben und Hinweise gemacht werden. So dürfen beispielsweise synthetische Polymere zur Verbesserung der Wasserhaltefähigkeit von Böden ab dem 01.01.2017 nur dann eingesetzt werden, wenn „sämtliche Bestandteile und das Endprodukt sich um mindestens 20 % in zwei Jahren abbauen“ (ANONYM 2012). Überdies werden für die Bestandteile Anwendungsbeschränkungen und -vorgaben gemacht. So kann beispielsweise die Nutzung des Hilfsstoffs auf geschlossene Systeme (z.B. Dachbegrünung, Pflanzcontainer) oder auf bestimmte Kulturen beschränkt werden (z.B. „Keine Anwendung auf landwirtschaftlich genutztem Grünland“ bei Nutzung von tierischen Nebenprodukten).

Grundsätzlich dürfen Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate und Pflanzenhilfsmittel nur in den Verkehr gebracht werden, wenn „sie bei sachgerechter Anwendung die Fruchtbarkeit des Bodens, die Gesundheit von Menschen, Tieren und Nutzpflanzen nicht schädigen und den Naturhaushalt nicht gefährden“ und für die Herstellung „als Ausgangsstoffe nur Stoffe verwendet worden sind, die einen pflanzenbaulichen, produktions- oder anwendungstechnischen Nutzen haben“ oder „dem Bodenschutz sowie der Erhaltung und Förderung der Fruchtbarkeit des Bodens dienen“. (ANONYM 2012)

Es werden jedoch keine Nachweise über den Nutzen der Hilfsstoffe verlangt. Eine Überprüfung des Nutzens ist für den Verbraucher im Rahmen seiner Möglichkeiten oft nicht möglich.

### **2.2.1.2 Österreich**

In Österreich werden Bodenhilfsstoffe im Bundesgesetz über den Verkehr mit Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (ANONYM 1994) definiert.

„§ 1. (1) Düngemittel sind Stoffe, die Pflanzennährstoffe enthalten und dazu bestimmt sind, unmittelbar oder mittelbar Pflanzen zugeführt zu werden, um deren Wachstum zu fördern, deren Qualität zu verbessern oder deren Ertrag zu erhöhen.

(2) Zu den Düngemitteln gehören auch Wirtschaftsdünger, das sind tierische Ausscheidungen, Stallmist, Gülle und Jauche sowie Stroh und ähnliche Reststoffe aus der pflanzlichen Produktion, denen keine Nährstoffe zugesetzt wurden und auf welche die Begriffsbestimmung des Abs. 1 zutrifft. Bearbeitete Wirtschaftsdünger sind Wirtschaftsdünger, die durch chemische oder technische Verfahren oder Kompostierung verändert wurden. Das Verdünnen mit Wasser, das Belüften, das Durchmischen sowie das mechanische Zerkleinern gelten nicht als Bearbeitung. Den Wirtschaftsdüngern gleichgestellt sind unbehandelte Rinden, die zur sachgerechten Düngung auf forstlich genutzten Böden bestimmt sind.

§ 2. (1) Bodenhilfsstoffe sind Stoffe ohne wesentlichen Gehalt an pflanzenaufnehmbaren Nährstoffen, die den Boden biotisch, chemisch oder physikalisch beeinflussen, um seinen Zustand oder die Wirksamkeit von Düngemitteln zu verbessern, insbesondere Bodenimpfmittel, Bodenkrümler, Bodenstabilisatoren, Gesteinsmehl, Nitrifikationshemmer, Torf, Rinden und Rindenprodukte.

(2) Kultursubstrate sind Pflanzenerden, Mischungen auf der Grundlage von Torf und andere Substrate, auch in flüssiger Form, die den Pflanzen als Wurzelraum dienen, selbst wenn sie einen geringen Nährstoffgehalt aufweisen.

(3) Pflanzenhilfsmittel sind Stoffe ohne wesentlichen Nährstoffgehalt, die dazu bestimmt sind, auf die Pflanzen einzuwirken, die Widerstandsfähigkeit von Pflanzen zu erhöhen oder die Aufbereitung organischer Stoffe zu beeinflussen.“

Die Einteilung in Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln erfolgt in Österreich ähnlich wie in Deutschland. Allerdings wird im Bundesgesetz für Bodenhilfsstoffe (ANONYM 1994) ein niedriger Gehalt an pflanzenaufnehmbaren Nährstoffen vorausgesetzt, während in Deutschland der Gesamtgehalt der einzelnen Nährstoffe zur Bemessung herangezogen wird.

Deutliche Unterschiede bestehen zwischen der deutschen und der österreichischen Düngemittelverordnung (DMVo) (ANONYM 2004). In Österreich werden keine Höchstgrenzen für die Nährstoffgehalte in Bodenhilfsstoffen und keine Höchstfrachten festgelegt. Andererseits liegen die Mindest-Nährstoffgehalte für organische und organisch-

mineralischen Düngemittel bei 1 % N, 1 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und 1 % K<sub>2</sub>O und somit deutlich höher als in Deutschland.

### **2.2.1.3 Schweiz**

Im Düngemittelrecht der Schweiz kommt der Begriff „Bodenhilfsstoff“ nicht vor.

In Artikel 5 der Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngern (Dünger-Verordnung, DÜV) (ANONYM 2001) werden aber Kompostierungsmittel, Bodenverbesserungsmittel, Kulturen von Mikroorganismen, sonstige Erzeugnisse, Mischungen und Mittel zur Beeinflussung biologischer Vorgänge im Boden definiert:

*„1 Dünger sind Stoffe, die der Pflanzenernährung dienen.*

*2 Als Dünger im Sinne dieser Verordnung gelten:*

- a. Hofdünger: Gülle, Mist, Mistwässer, Gülleseparierungsprodukte, Silosäfte und vergleichbare Abgänge aus der Tierhaltung oder dem Pflanzenbau des eigenen oder anderer Landwirtschaftsbetriebe sowie von maximal 20 Prozent Material nicht landwirtschaftlicher Herkunft, in aufbereiteter oder nicht aufbereiteter Form;*
- b. Recyclingdünger: Dünger pflanzlicher, tierischer, mikrobieller oder mineralischer Herkunft oder aus der Abwasserreinigung, wie:*
  - 1. Kompost: fachgerecht, unter Luftzutritt verrottetes pflanzliches, tierisches oder mikrobielles Material;*
  - 2. festes und flüssiges Gärgut: fachgerecht unter Luftabschluss vergärtes pflanzliches, tierisches oder mikrobielles Material; Gärgut ist flüssig, wenn der Gehalt an Trockensubstanz nicht mehr als 12 Prozent beträgt;*
  - 3. unverrottetes pflanzliches Material: wie Nebenprodukte aus Gemüserüstereien, Brennereien und Mostereien oder Extraktionsschrot, das in den Boden eingearbeitet wird;*
  - 4. Klärschlamm: Schlamm in aufbereiteter oder nicht aufbereiteter Form aus der kommunalen Abwasserreinigung;*
- c. Mineraldünger: Erzeugnisse deren Nährstoffe durch Extraktion oder durch industrielle, physikalische und/oder chemische Verfahren gewonnen wurden oder in Form von*

---

*Mineralien enthalten sind, sowie Kalkstickstoff, Cyanamid, Harnstoff und seine Kondensate und Anlagerungsverbindungen, wie:*

- 1. mineralische Einnährstoffdünger: Dünger, die nur einen Makronährstoff enthalten und davon mindestens 3 Prozent, oder nur einen Makronährstoff enthalten und davon mindestens 3 Prozent, wobei das Element in Verbindung mit Kalium, Magnesium oder Schwefel als Begleitung vorliegt,*
- 2. mineralische Mehrnährstoffdünger (NPK-, NP-, NK-, PK-Dünger): Dünger, die insgesamt mindestens 3 Prozent von zwei oder drei Primärnährstoffen enthalten, oder einen Primärnährstoff enthalten und Calcium, Magnesium, Schwefel oder Natrium nicht nur als Begleitung (insgesamt mindestens 3 Prozent dieser Elemente) vorliegt;*
- d. organische Dünger: Erzeugnisse, die hauptsächlich aus kohlenstoffhaltigem Material pflanzlichen, tierischen oder mikrobiellen Ursprungs bestehen, mindestens 10 Prozent organische Substanz sowie folgende Stoffe enthalten insgesamt mindestens 3 Prozent Makronährstoffe, oder insgesamt mindestens 0,005 Prozent von zwei oder mehreren Spurennährstoffen oder mindestens 0,01 Prozent von einem dieser Spurennährstoffe;*
- d<sup>bis</sup>. organisch-mineralische Dünger: Mischungen von organischen Düngern mit Mineraldünger und/oder mineralischen Bodenverbesserungsmitteln, die mindestens 10 Prozent organische Substanz sowie folgende Stoffe enthalten insgesamt mindestens 3 Prozent Makronährstoffe, oder insgesamt mindestens 0,005 Prozent von zwei oder mehreren Spurennährstoffen oder mindestens 0,01 Prozent von einem dieser Spurennährstoffe;*
- e. Dünger mit Spurennährstoffen: Dünger, die mindestens 0,01 Prozent von einem oder insgesamt mindestens 0,005 Prozent von mehreren Spurennährstoffen oder mindestens 3 Prozent eines nützlichen Nährstoffes (Natrium oder Silizium) enthalten;*
- f. Zusätze zu Düngern: Erzeugnisse, welche die Eigenschaften oder die Wirkung von Düngern verbessern oder ihre Anwendung erleichtern;*
- g. Kompostierungsmittel: Erzeugnisse, welche das Verrotten organischer Abfälle fördern;*
- h. Bodenverbesserungsmittel: Erzeugnisse, welche die Eigenschaften des Bodens verbessern;*
- i. Kulturen von Mikroorganismen zur Behandlung von Böden, Saatgut oder Pflanzen: Erzeugnisse, welche die Entwicklung landwirtschaftlicher Nutzpflanzen fördern, indem sie vermehrt Nährstoffe zur Verfügung stellen oder symbiotische Leistungen erbringen;*

- j. sonstige Erzeugnisse pflanzlichen, tierischen, mikrobiellen oder mineralischen Ursprungs, die der Pflanzenernährung dienen und nicht einer Definition dieser Verordnung entsprechen, wie Algenprodukte;*
- k. Mischungen der Erzeugnisse nach den Buchstaben a–j;*
- l. Mittel zur Beeinflussung biologischer Vorgänge im Boden: Erzeugnisse, welche die Umwandlungsvorgänge von Nährstoffen oder deren Freisetzung durch Bodenorganismen verändern.“*

Analog zur deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) regelt in der Schweiz die Verordnung des WBF (Department für Wirtschaft, Bildung und Forschung) über das Inverkehrbringen von Düngern (Düngerbuch-Verordnung DüBV) (ANONYM 2007a) die Zulassung von bestimmten Düngemitteltypen. Demnach gehören in der Schweiz Kalkdünger zu den mineralischen Bodenverbesserungsmittel. Ferner gehören hierzu Gesteinsmehle, Perlit, Vermiculit und Leca (Blähton).

Für organische und organisch-mineralische Bodenverbesserungsmittel gilt, dass der Höchstgehalt an Stickstoff, Phosphor, Kali und Schwefel auf jeweils 3% begrenzt ist. Diese Höchstgrenzen gelten für mineralische Bodenverbesserungsmittel nicht.

#### **2.2.1.4 England**

In England (sowie in Schottland, Wales, und Nordirland) werden Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate und Pflanzenhilfsmittel nicht im Düngemittelrecht reglementiert. „The Fertilisers Regulations 1990“ (ANONYM 1990) beziehen sich nur auf mineralische und organische Düngemittel sowie auf Kalke. „...materials used for improving soil structure or as growing media and which contain less than 1 % each of these nutrients“ (Gemeint sind hier die Nährstoffe N, P und K. Sie fallen nicht unter das englische Düngemittelrecht.)

#### **2.2.1.5 EU-Düngemittelrecht**

In der EU-Düngemittelverordnung werden Bodenhilfsstoffe (o.ä.) nicht aufgeführt (ANONYM 2003).

#### **2.2.2 Ähnliche Begriffe**

In Deutschland werden im Rahmen der Produktkennzeichnung häufig Begriffe wie „Bodenverbesserer“, „Bodenhilfsmittel“, „Bodenaktivator“ verwendet. Diese Bezeichnungen sind nicht konform mit dem Düngemittelrecht, werden aber zum Teil in

anderen Rechtsvorschriften verwendet. So zum Beispiel in den EU-Rechtsvorschriften für den ökologischen Landbau (ANONYM 2007b & 2008). Hier werden Stoffe aufgeführt, die im ökologischen Landbau eingesetzt werden dürfen. Dabei werden die Begriffe „Düngemittel“, „Bodenverbesserer“ und „Nährstoffe“ aber nicht im Einzelnen definiert und es erfolgt keine stoffliche Zuordnung zu diesen Begriffen.

Die Begriffe „Bodenverbesserer“, „Bodenhilfsmittel“, „Bodenaktivator“ werden in Deutschland oft für Produkte verwendet, die nach dem Düngemittelrecht als Düngemittel einzustufen sind, da es sich beispielsweise um Kalkdünger oder organisch-mineralische Düngemittel handelt. Zum Teil handelt es sich um Produkte bei denen Bodenhilfsstoffe mit Nährstoffen angereichert wurden. Oft werden diese Begriffe auch für Pflanzenhilfsmittel verwendet. Sogar Saatgutmischungen zur Gründung werden unter dem Begriff „Bodenverbesserer“ angeboten.

Den wenigsten Verbrauchern und Hobbygärtnern dürfte bewusst sein, dass allein der Begriff Bodenhilfsstoff dem Düngemittelrecht entspricht.

### ***2.2.3 Internationale Bezeichnungen***

Im englischen Sprachgebrauch gibt es keine eindeutige Übersetzung des Begriffs Bodenhilfsstoff (im Sinne des Düngemittelgesetzes). Die Begriffe „soil conditioner“, „soil amendment“ und „fertilizer“ werden von der Amerikanischen Gesellschaft für Bodenkunde (Soil Science Society of America, Inc., kurz SSSA) wie folgt definiert (SSSA 2013):

“**soil amendment:** Any material such as lime, gypsum, sawdust, compost, animal manures, crop residue or synthetic soil conditioners that is worked into the soil or applied on the surface to enhance plant growth. Amendments may contain important fertilizer elements but the term commonly refers to added materials other than those used primarily as fertilizers. See also soil conditioner.

**soil conditioner:** A material which measurably improves specific soil physical characteristics or physical processes for a given use or as a plant growth medium. Examples include sawdust, peat, compost, synthetic polymers, and various inert materials. See also soil amendment.

**Fertilizer:** Any organic or inorganic material of natural or synthetic origin (other than liming materials) that is added to a soil to supply one or more plant nutrients essential to the growth of plants.”

Demnach kommt der Begriff „soil conditioner“ dem deutschen „Bodenhilfsstoff“ sinngemäß am nächsten. Der Begriff „soil conditioner“ beinhaltet allerdings auch Kalk-Dünger und gibt keine Grenze für Nährstoffe (Gehalte, Frachten) vor.

Im englischen Sprachgebrauch finden sich aber auch Begriffe wie soil additive, soil amendment, soil auxiliary material, soil assisting substance, soil enhancer, soil improvement substance, ground excipient, die aber zum Teil auch sehr „unglückliche“ Übersetzungen darstellen.

#### **2.2.4 Physikalisch-chemische Eigenschaften**

Boden bietet den Pflanzen Raum zum Wurzeln und ermöglicht damit die notwendige Standfestigkeit. Er speichert und liefert Wasser und Nährstoffe, puffert schädliche Stoffe oder Einflüsse und ermöglicht den Gasaustausch mit der Atmosphäre. Ein guter Pflanzenstandort (Ackerboden) kombiniert diese Eigenschaften in idealer Weise. (BLUM 2012; STAHR ET AL. 2012)

Bei neugeschaffenem Boden, z.B. im Rahmen des Garten- und Landschaftsbaus oder bei Sportanlagen, bieten die verwendeten Substrate oft nicht diese idealen Voraussetzungen für das Pflanzenwachstum und müssen durch Zugabe von Bodenhilfsstoffen verbessert werden. Um diese Verbesserung zu unterscheiden, ist die Herstellung von Kultursubstraten wie z.B. Pflanzerden, die allein oder mit einem hohen Mischungsanteil in Beeten, Gewächshäusern, Töpfen oder sonstigen Pflanzgefäßen zum Einsatz kommen, notwendig.

Aufgrund der Körnung (Anteil an Sand, Schluff und Ton) hat jeder Boden im Zusammenspiel mit weiteren Faktoren (z.B. organische Substanz, pH-Wert, Kalk-, Salzgehalt) eine eigene Struktur und ein Gefüge (STAHR ET AL. 2012). Dieses beeinflusst wesentlich die Durchwurzelbarkeit und die Standfestigkeit der Pflanzen, die Nährstoffspeicherung (Kationenaustauschkapazität), die Wasserhaltekapazität und die Wasserleitfähigkeit sowie die Durchlüftung des Bodens (SCHEFFER ET AL. 2010).

Dabei haben leichte, sandige Böden das Problem, dass sie zwar eine gute Durchwurzelbarkeit, eine gute Durchlüftung und eine gute Wasserleitfähigkeit besitzen, aber nur wenig Wasser und Nährstoffe speichern können. Schwere, tonige Böden dagegen können viel Wasser und Nährstoffe speichern, sind aber in der Regel schlecht durchwurzelbar bei einem unzureichenden Gasaustausch und einer geringen Wasserleitfähigkeit (vgl. Abb. 4).

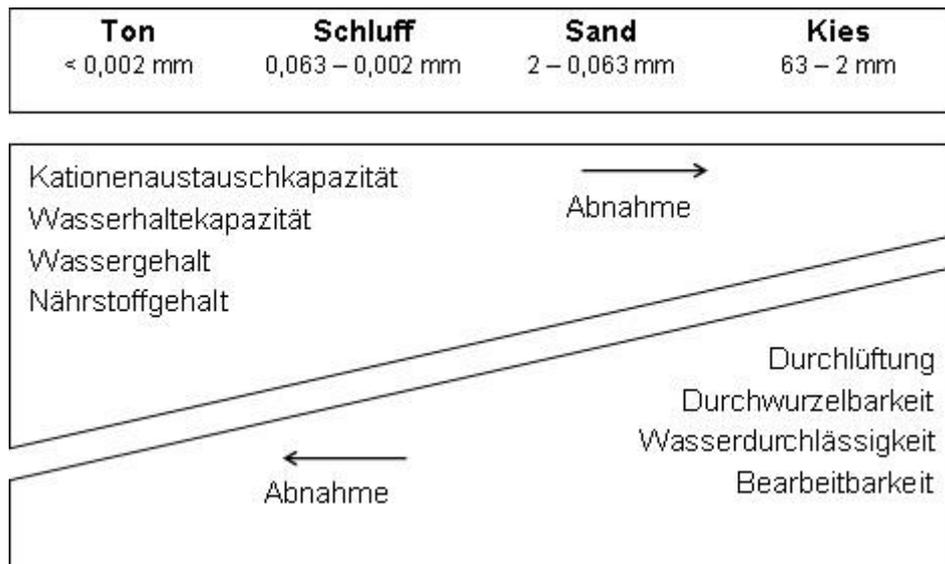


Abb. 4: Bodenarten und –eigenschaften (nach BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (STMUGV) 2006)

Um einzelne gezielte Bodeneigenschaften wie Struktur, Strukturstabilität, Durchlüftung, Anteil an organischer Substanz, Wasserhaltekapazität, Wasserleitfähigkeit, Kationenaustauschkapazität, Salzgehalt positiv zu beeinflussen, werden Bodenhilfsstoffe in der Landwirtschaft und anderen Bereichen eingesetzt. Eine Beeinflussung des pH-Wertes kann mit Hilfe der Bodenhilfsstoffe durchaus vorgenommen werden. Zum Beispiel durch den Einsatz von Torf kann eine Absenkung erzielt werden. Diese wird üblicherweise jedoch mit Hilfe von ackerbaulichen Maßnahmen über Kalkdüngung korrigiert (BRADY & WEIL 2008). Diese Kalkdünger fallen nach dem deutschen Düngemittelgesetz nicht unter die Bodenhilfsstoffe und dürfen somit auch nicht als solche gekennzeichnet werden (siehe Kap. 2.2.1.1).

Die flüssigen Hilfsstoffe stimulieren in erster Linie das Bodenleben und fördern somit die Humusbildung. Es handelt sich dabei um ökologisch unbedenkliche Suspensionen, die entweder direkt aus Natursubstanzen wie Algen oder aus in vitro vermehrte Bakterien, Huminsäuren oder Pilzen hergestellt werden. Sie eignen sich deshalb auch für den (Bio-) Ökolandbau.

#### **2.2.4.1 Bodenstruktur**

Die Strukturnachteile eines sandigen Bodens lassen sich verbessern, indem dem Boden feines Material (Schluff, Ton) beigemischt wird. Um ausreichende Effekte zu erzielen, sind

allerdings erhebliche Mengen (>10 %) beizumischen. Es ist aber auch möglich, die Gefügestabilität eines Sandbodens durch Verkittung, Verklebung oder Lebendverbauung der Sandpartikel zu verbessern. Hierzu kann organisches Material zugeführt werden, das einerseits selber günstige Struktureigenschaften aufweist, aber auch andererseits Substanzen enthält, die die Strukturstabilität direkt oder indirekt über eine gesteigerte mikrobielle Aktivität erhöhen. (GIS ET AL. 1997; HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997; SCHEFFER ET AL. 2010)

Schwere tonige Böden können durch die Zufuhr von sandigen Materialien aufgelockert werden. Auch hier gilt, dass erhebliche Mengen beizumischen sind. Ähnlich Effekte lassen sich mit porösen Materialien wie Blähton oder Perlite erzielen. In gewissem Umfang kann auch organische Substanz zu einer verbesserten Strukturstabilität und Auflockerung beitragen (KUNTZE ET AL. 1994). Das Aufkalken ist eine wichtige Maßnahme zur pH-Wert-Regulierung und zur Strukturverbesserung schwerer Böden (ADAMS 1984). Kalke gehören jedoch nicht zu den Bodenhilfsstoffen nach dem deutschen Düngemittelrecht.

#### **2.2.4.2 Organische Substanz**

Die organische Substanz übt einen wesentlichen Einfluss auf die Bodeneigenschaften aus und dient als Nährstoff- und Wasserspeicher im Boden. Die speichernde Funktion ist vor allem für tonarme, sandige Böden von Bedeutung. Organische Verbindungen im Boden können auch die Physiologie der Pflanzen beeinflussen. So können bestimmte Huminstoffe die Nährstoffaufnahme verbessern. Organische Substanzen fördern das Bodenleben und somit den raschen Umsatz von abgestorbenem Pflanzenmaterial, das zum antiphytopathogenen Potential eines Bodens beitragen kann (HEITEFUSS 2000). Die Strukturstabilität des Bodens wird durch organische Substanzen positiv beeinflusst. Dies kann zum einen durch die Struktur der organischen Partikel selbst erfolgen oder durch ein Verkitten von Bodenpartikel durch einen Huminstoffüberzug. Der Boden wird dadurch besser vor Erosion und Verschlammung geschützt, wird besser durchlüftet und erhält eine höhere Wasserhaltekapazität. (KUNTZE ET AL. 1994; SCHEFFER ET AL. 2010)

Die Zufuhr organischer Substanz zum Boden erfolgt in natürlichen Ökosystemen in der Hauptsache über abgestorbene Pflanzenreste (Laub, Wurzeln) oder Ausscheidungen von Tieren und Mikroorganismen, auf Ackerböden über Erntereste oder organische Düngung (FINCK 1992; HAIDER 1996; HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997). In der Regel sind

organische Materialien, die dem Boden von Außerhalb zugeführt werden, derart nährstoffreich bzw. führen aufgrund ihrer Aufwandmenge zu einer derartigen Nährstoffzufuhr zum Boden, dass sie als Dünger im Sinne der Düngemittelrechtes gelten.

Es gibt jedoch auch einige nährstoffarme, faserige Materialien, wie Zellulosefasern, Kokosfasern oder Torf, die in die Kategorie der Bodenhilfsstoffe fallen. Andere organische Bodenhilfsstoffe werden in sehr geringen Mengen (1-10 l/ha) dem Boden zugeführt. Hierzu zählen beispielsweise Huminstoff-Präparate, Algenextrakte oder Bakteriensuspensionen.

### **2.2.4.3 Bodenwasserhaushalt**

Der Wasserhaushalt des Bodens, also der Verlauf der Wassergehaltsänderungen, ist neben der Witterung und der Wasseraufnahme der Pflanzen von der Wasserspannung im Boden abhängig, also von der Kraft, mit der das Wasser im Boden gehalten wird und von der Wasserleitfähigkeit, also der Geschwindigkeit der Wasserbewegung im Boden, beeinflusst wird. Die Feldkapazität (FK) bzw. Wasserkapazität (WK) beschreibt „die Menge an Wasser, die ein Boden oder ein Substrat maximal gegen die Schwerkraft bzw. gegen das Versickern speichern kann“ (BLUM 2012 und KUNTZE ET AL. 1994). Zu unterscheiden sind die gesamte Wassermenge, die ein Boden speichern kann, und die Wassermenge, die ein Boden für die Pflanzen zur Verfügung stellen kann (nutzbare Feldkapazität, nFk). Dies ist abhängig von dem Anteil des Wassers in feinsten Poren des Bodens, in denen das Wasser aufgrund von Adhäsionskräften derart stark festgehalten, dass es den Pflanzen nicht mehr zur Verfügung steht (permanenter Welkepunkt, PWP). (ROWELL & BÖRSCH-SUPAN 1997; HULPKE & ADINOLFI 2000; STAHR ET AL. 2012)

Die nutzbare Feldkapazität ist besonders wichtig für das Pflanzenwachstum. Sie wird vor allem von der Bodenstruktur beeinflusst. Mit zunehmendem Tongehalt steigt die Menge an Wasser, die der Boden speichern kann, es sinkt jedoch die Wasserleitfähigkeit. Organische Substanz erhöht in der Regel die Wasserspeicherung und die Wasserleitfähigkeit. Ideale Böden besitzen einen mittleren Ton, Schluff und Sandgehalt (Lehmböden) mit einem ausreichenden Anteil an organischer Substanz, der eine hohe nutzbare Feldkapazität bei einer ausreichenden Wasserleitfähigkeit begünstigt.

Bodenhilfsstoffe mit strukturverändernden Eigenschaften üben somit direkten Einfluss auf den Wasserhaushalt aus. Es können aber auch Bodenhilfsstoffe eingesetzt werden, die selber wasserspeichernde Eigenschaften aufweisen. Es gibt eine Vielzahl mineralischer,

organischer und synthetischer Materialien, die mit diesen Eigenschaften als Bodenhilfsstoffe eingesetzt werden.

Dabei ist zwischen porösen Materialien (meist mineralisch) und quellenden Materialien (meist natürlich oder synthetisch organisch) zu unterscheiden. Während die mineralischen Bodenhilfsstoffe über einen langen Zeitraum im Boden verbleiben (eine gewisse Strukturstabilität vorausgesetzt), unterliegen organische Materialien dem mikrobiellen Abbau und verlieren ihre Eigenschaften mit der Zeit schneller.

#### **2.2.4.4 Kationenaustauschkapazität**

Im Boden werden wasserlösliche Nährstoffe an Ladungsstellen der Bodenpartikel, an Oxiden und Hydroxiden sowie an organischer Substanz sorbiert. Je größer dabei die Oberfläche von Bodenpartikel ist, desto mehr Ladungsstellen weisen diese auf, weshalb ein tonreicher Boden mehr Nährstoffe speichern kann als ein sandiger Boden. Die Kationenaustauschkapazität (KAK) beschreibt das Potential eines Bodens zur Speicherung von Nährstoffen. Eine hohe KAK bedeutet, dass Nährstoffe nach der Düngung gut im Boden gepuffert werden, die Konzentration der Nährstoffe in der Bodenlösung über einen längeren Zeitraum aufrecht erhalten bleibt und andererseits Nährstoffe vor dem Auswaschen geschützt sind. (HARTL 1992; SCHEFFER ET AL. 2010)

In der folgenden Tab. 2 ist eine Auflistung einiger anorganischer und organischer Kolloide und dessen durchschnittliche Kationenaustauschkapazität.

Tab. 2: Kationenaustauschkapazitäten in mval/g Boden (DUNGER ET AL. 1997)

Bodenkolloide	mval/g Boden	Bodenkolloide	mval/g Boden
Quarz, Feldspäte	0,01 - 0,03	humoser sandiger Lehm	0,15 - 0,20
Hydroxide von Al und Fe	0,04	humuser Lehm	0,20 - 0,25
Kaolinite, Halloysite	0,03 - 0,15	Ton	0,25 - 0,80
Illite, Chlorite, Allophane	0,10 - 0,50	Rohumus	> 1
Smectite	0,70 - 1,30	Torf	> 1,2
organische Substanz	1,50 - 3,00		
humusarmer Sand	0,02 - 0,05		
stark humoser Sand	0,05 - 0,10		
humoser lehmiger Sand	0,10 - 0,15		

Böden mit einer geringen KAK, wie Sandböden, können durch Zufuhr von Materialien mit einer hohen KAK eine Verbesserung der Nährstoffspeicherung erfahren. Dies kann über organische Materialien, über mineralische Materialien, wie Ton, Gesteinsmehl oder Zeolith oder über synthetische Materialien, wie z.B. Polyacrylate, erfolgen. Bodenhilfsstoffe erhöhen also nicht den Nährstoffgehalt des Bodens, sondern sie tragen dazu bei, dass der Boden neben Wasser auch mehr Nährstoffe speichern kann. Am Beispiel eines Tonminerals, in diesem Fall ein Montmorillonit, wird dieser Speichereffekt von Kationen und Wassermolekülen sehr gut sichtbar (siehe Abb. 5):

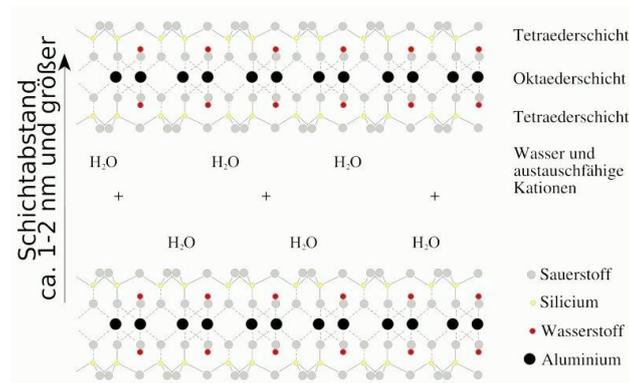


Abb. 5: Die molekulare Struktur eines Montmorillonit Minerals. (nach TREPTE 2006)

#### 2.2.4.5 Bodenacidität

Die Bodenacidität beeinflusst verschiedene physikalische, chemische und biologische Vorgänge im Boden. Der pH-Wert des Bodens beeinflusst beispielsweise das Bodengefüge und somit das Wasser und den Lufthaushalt. Er hat direkten Einfluss auf Oxid- und Hydroxidgruppen und damit auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen aber auch auf die Mobilität von Schadstoffen wie Aluminium und Schwermetallen. Außerdem beeinflusst er die Lebensbedingungen der Bodenorganismen und grundlegend diverse Stoffwechselforgänge im Boden. (KAPPEN 1929; BREITENBACH 2007)

Diverse Prozesse führen unter humiden Bedingungen zur Bodenversauerung. Hierzu zählen die Bildung von Kohlensäure beim Abbau organischer Substanz und bei der Wurzelatmung, die Abgabe von Wasserstoff-Ionen bei der Nährstoffaufnahme der Wurzeln, der Oxidation von Fe<sup>2+</sup>- und Mn<sup>2+</sup>-Ionen und Fe-Sulfiden, der Auswaschung basisch wirkender Substanzen, der Oxidation von Ammoniumverbindungen und schließlich des sauren Regens. In ariden Gebieten kann es dagegen wegen fehlender Niederschläge zu einer Anreicherung

von basisch wirkenden Substanzen und somit zu einer Alkalisierung des Bodens kommen. (WEIS 1975; GRYSCHKO & HORLACHER 1996)

Der Bodenversauerung wird begegnet mit Kalk-Düngung. Aber auch verschiedene Bodenhilfsstoffe beeinflussen in gewissem Maß die pH-Wert. Organisches Material wie Torf wird verwendet, wenn der pH-Werte gezielt abgesenkt werden soll (Azaleen-/Rhododendren-Erde).

## **2.2.5 Bodenhilfsstoffe auf dem Markt**

### **2.2.5.1 Klassifizierung der Bodenhilfsstoffe**

Bodenhilfsstoffe lassen sich zum einen nach ihrer Beschaffenheit (Konsistenz), fest oder flüssig, einteilen. Zum anderen können sie nach ihren Hauptbestandteilen (mineralisch und/oder organisch) zusammengefasst werden. Letztere Einteilung erlaubt weitere Untergliederungen. So lassen sich die organischen Produkte in solche gliedern, die überwiegend aus Mikroorganismen gewonnen werden (Bakterien, Pilze, Algen, Enzyme) oder die aus frischem, verrottetem oder sogar fossilem Pflanzenmaterial gewonnen werden (z.B. Kokosfaser, Torf und Xylite und Huminsäure aus Braunkohle). Ferner müssen verschiedene synthetische Materialien zu den organischen Produkten gezählt werden (z.B. Polyacrylate). Darüber hinaus gibt es Bodenhilfsstoffe, die aus Mischungen verschiedener Stoffgruppen bestehen, um deren Eigenschaften zu kombinieren. Einige auf dem Markt angebotene Bodenhilfsstoffe entziehen sich aber einer stofflichen Klassifizierung, da sie beispielsweise als homöopathische Produkte im Wesentlichen aus Wasser bestehen (z.B. Greengold, Fa. MikroVeda GmbH). Ihre Wirkung beruht auf ihrer „Energetischen Information“ (Plocher-Produkte) ([www.plocher.de](http://www.plocher.de), Stand Juni 2014) oder besteht nach Herstellerangaben sogar aus chemischen Elementen (z.B. Ormus), die in dieser Form bisher noch nicht wissenschaftlich beschrieben sind und somit eher im Bereich der Esoterik oder des Sciencefiction angesiedelt werden müssen ([www.nexus-magazin.de](http://www.nexus-magazin.de), Stand Juni 2014).

Zusammenfassend müssen die festen und flüssigen Bodenhilfsstoffe in Bezug auf ihre Anwendungsbereiche und ihrer Applikationstechnik separat voneinander betrachtet werden. Jedoch können beide Stoffarten mineralischer, organischer oder mineralisch-organischer Herkunft seien.

### **2.2.5.2 Hersteller von Bodenhilfsstoffen**

Viele Bodenhilfsstoffe werden von verschiedenen Herstellern produziert und vertrieben (z.B. Gesteinsmehle, Bentonite). Manche Hersteller haben sich aber auch auf die Produktion bestimmter Bodenhilfsstoffe, meist in besonderen Mischungen oder für besondere Anwendungen, spezialisiert (z.B. Geohumus GmbH, Axis, Alginit). Dabei wird oft nicht ersichtlich, aus welchen Bestandteilen und in welchen Mischungsverhältnissen diese Produkte zusammengesetzt werden.

Die sehr große Anzahl an Herstellern von festen und flüssigen Bodenhilfsstoffen und die daraus resultierende große Auswahl an Produkten gleicht einem „Dschungel“, indem die Wahl eines wirksamen Substrates erheblich erschwert wird. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit versucht, einen Einblick über das momentane Marktangebot zu geben (siehe Tabelle im Anhang). Viele Hersteller machen zudem keine bzw. kaum Angaben, weder auf der Verpackung noch in der Produktbeschreibung, über die genaue stoffliche Zusammensetzung ihrer angebotenen Produkte. Die Preise und Applikationsempfehlungen hingegen sind frei verfügbar.

### **2.2.5.3 Kuriositäten auf dem Markt**

Laut DÜMV (2012) dürfen Bodenhilfsstoffe nur angeboten werden, wenn sie bei der Anwendung nicht schädlich sind (siehe Kap. 2.2.1.1). Es wird aber kein Nachweis der Wirksamkeit gefordert. Dies führt dazu, dass zahlreiche Produkte auf dem Markt sind, die zum Teil mit extremen Versprechen den Verbraucher über die Wirksamkeit täuschen. Dies sollen beispielsweise folgende Produkte zeigen:

„Canna AkTRIVator“ (CANNA INTERNATIONAL BV, Oosterhout NB, Niederlande)

Es handelt sich hierbei um ein Produkt aus Lehmpulver, das in die Erde eingearbeitet werden soll und dort vor allem einen positiven Einfluss auf das Wurzelsystem/wachstum der Pflanzen erzeugen soll. Laut Hersteller ist in diesem Pulver ein Schimmelpilz enthalten, der sich nach der Ausbringung an und um die Wurzeln ansiedelt und andere Pilze unterdrückt (www.canna.at/aktrivator; Stand: Juni 2014). Die genaue Zusammensetzung dieses festen Bodenhilfsstoffe wird nicht erläutert. In Einheiten von 10 g für 12,95 € wird das Produkt angeboten. Überspitzt formuliert, bedeutet dies, dass eine große Menge, z.B. eine Schubkarre gefüllt mit Canna AkTRIVator, schnell den Wert eines kleinen Eigentumshauses annehmen kann.

„Fish-Mix“ (BioBizz Worldwide BV, Groningen, The Netherlands)

Dieses Präparat besteht zum größten Teil aus einer „Infusion eines organischen Fischgemisches aus der Nordsee, das mit niederländischen Zuckerrüben-Extrakten vermenget ist“ (www.biobizz.com; Stand: Juni 2014). Laut Hersteller führt die Einbringung des flüssigen Bodenhilfsstoffes zu einer gesteigerten Aktivität der Bodenflora. Angepriesen wird das Produkt mit „spektakulären Effekten“ und die Wirkungen sind nicht zu unterschätzen. Der durchschnittliche Preis liegt bei 10 € pro Liter. Die Auskünfte über die genaue Zusammensetzung, den Anwendungsbereich und der Aufwandmenge gehen nicht eindeutig aus den Produktinformationen des Herstellers hervor. Ein interessanter und durchaus wichtiger Hinweis eines Internethändlers (www.growland.net, Stand Juni 2014) lautet wie folgt: „Bitte beachten sie, dass der Fish-Mix nicht in geschlossenen Räumen verwendet wird, da dieser einen sehr starken Geruch hat.“

„EM-Keramikpulver“ (MULTIKRAFT PRODUKTIONS- UND HANDELS GmbH)

Dieser feste Bodenhilfsstoff wird aus Ton hergestellt, der zunächst mit Effektiven Mikroorganismen (kurz EM) infiziert wird und anschließend bei über 1000 °C gebrannt wird. Das so entstandene Keramikpulver soll als „Fermentationshilfe“ im Boden dienen (www.multikraft.com; Stand Juni 2014), das eventuell in Form von einer Steigerung der Verrottungsrate erfolgt. In welcher Art und Weise diese Hilfe jedoch stattfinden soll, wird demnach nicht klar. Auch die Beimischung von den EM ist nicht ganz eindeutig. Laut Hersteller bestehen diese flüssigen Präparate vor allem aus Milchsäurebakterien, Hefen und Photosynthesbakterien, die eigentlich einen schnellen Verrottungsprozess hemmen sollen. Sie werden beim EM-Keramikpulver jedoch bereits durch den Brennvorgang getötet. Es ist nicht erklärlich, dass bei einer Veraschung bei über 1000 °C irgendeine Wirkung von den abgetöteten Organismen ausgeht. Mit einem Preis von 28,50 € pro Kilogramm und der wenigen Informationen lässt dieses Produkt beim Verbraucher somit viele Fragen offen.

„MYKONOR BIO-NPK Pulver“ (Mykonor Unternehmergeellschaft)

Ein weiteres Beispiel für eine interessante Kuriosität dieser Liste ist das MYKONOR BIO-NPK Pulver, das jedoch auch in flüssiger Form erhältlich ist. Anders als die anderen aufgeführten Bodenhilfsstoffe, soll dieses pulvrige Präparat den Pflanzen die wichtigen

Nährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium mit Hilfe von unterschiedlichen Bakterien liefern. Die Hersteller werben mit „MYKONOR BIO-NPK wirkt im Boden als permanenter Lieferant von Stickstoff, Phosphor und Kalium. Der Entzug des Stickstoffs direkt aus der Luft und die Abgabe an die Pflanze ermöglicht eine Reduzierung der Stickstoffdüngung“ oder „Die Anwendung von MYKONOR BIO-NPK ermöglicht eine Reduzierung der Aufwandmengen für anorganischen Dünger. Durch die bessere und konstantere Versorgung der Pflanzen mit NPK kommt es zu einem verbesserten Pflanzenwachstum und Mehrertrag“ (www.mykonor.de; Stand Juni 2014). In diesem Zusammenhang würde man als Verbraucher eher von einem Düngemittel ausgehen, jedoch wurde das Produkt laut Anbieter als „Bodenimpfungsmittel“ durch die Düngemittelverordnung zugelassen. Bei empfohlenen Aufwandmengen von 0,5 l pro Hektar ist die Wirkung schwer nachzuvollziehen, da auch in diesem Fall keinerlei Referenzprojekte zur Verfügung stehen. Auch der hohe Preis von 165 € pro Kilogramm ist nicht zu vernachlässigen.

Natürlich lassen sich auf dem Markt noch weitere zahlreiche kuriose Bodenhilfsstoffe finden, die diese Liste erweitern könnten. Die aufgeführten Produkte zeigen jedoch sehr deutlich, wie viel Aufklärung und Kontrolle in diesem unübersichtlichen Markt noch fehlt. Im Vordergrund einiger Anbieter steht oft nicht das Wohl der Pflanzen bzw. die Verbesserung des Bodens.

## ***2.2.6 Auswahl der untersuchten Bodenhilfsstoffe***

### ***2.2.6.1 Feste Bodenhilfsstoffe***

Die folgende Tab. 3 enthält die Liste der untersuchten festen Bodenhilfsstoffe samt der Informationen über Anbieter, Körnung, empfohlene Aufwandmenge und (Durchschnitts-) Preis. Die Aufwandmenge wurde in Gewichtsprozent (Gew.-%) angegeben, die aus der Angabe kg pro m<sup>2</sup> der Hersteller ermittelt wurde. Da die Hersteller bei den meisten Produkten nur Applikationsbereiche (von...bis... kg/m<sup>2</sup>) angeben, wurde in dieser Arbeit aus den gegebenen Angaben eine entsprechende Aufwandmenge definiert.

Tab. 3: Übersicht der verwendeten festen Bodenhilfsstoffe mit Aufwandmenge nach Herstellerangabe und dem aktuellen Preis (Feb. 2013)

Produkt	Hersteller	Körnung [mm]	Aufwandmenge <sup>1</sup> [Vol.-%]	Preis [€/kg]
Perligran®	Knauf Perlite	2-6	25	0,05
Alginit™	TNR	0-3	15	0,08
Axis™ Regular	Consagro	0-5	10	0,63
Betasoil™	Tech consult limited	0,2-5	5	2,00
Naturzeolith	Zeolithwelt GmbH	3-5	5	0,14
Bentonit Sandbodenverbesserer	Neudorff	1-2,5	2	0,92
Urgesteinsmehl	Neudorff	0-0,063	2	0,38
GEOHUMUS™	Geohumus GmbH	0-5	1	9,95
Humusziegel (Kokosfaser)	Canna	Faser	25	1,87
Floratorf	Floragard	Faser	25	0,22

<sup>1</sup>nach Herstellerangabe

Bei den folgenden Produktangaben handelt es sich ausschließlich um die Angaben der Hersteller. Die Inhalte unterliegen keiner wissenschaftlichen Ausarbeitung im Rahmen dieser Arbeit.

#### *Perligran (Perlite)*

„Perlite im Gartenbau hat einen Namen: PERLIGRAN®. Hergestellt aus dem Vulkangestein Perlit sorgt PERLIGRAN® für eine hervorragende Mineralisierung von Erde. Substrate werden durch die Beimischung von PERLIGRAN® optimal belüftet, sind besser wiederbenetzbar, haben ein höheres Wasserspeichervolumen und sind strukturstabiler. Mit PERLIGRAN® veredelte Pflanzenerde ist ein idealer Nährboden, mit dem Wurzeln buchstäblich aufblühen. (www.knauf-aquapane.de; Stand Juni 2014)

#### *Alginit*

„Alginit ist ein weltweit einzigartiges natürliches Mineral mit hervorragenden Eigenschaften zur Bodenverbesserung. Alginit bietet eine beachtliche Wasserhaltekapazität und eine hohe Langzeitspeicherfähigkeit für essentielle Pflanzennährstoffe.“ (www.alginit.com; Stand Juni 2014)

#### *Axis™ Regular*

„Axis besteht aus den Kapseln (Diatomeen) der Kieselalgen. Die Rohform wird im Tagebau abgebaut und durch thermische und mechanische Bearbeitung in die vorliegende Form gebracht. Chemisch besteht das Produkt aus fast reinem SiO<sub>2</sub>. Axis ist pH neutral, stabil und dauerhaft wirksam. Seine physikalischen Eigenschaften erklären sich durch den hohen Anteil an Mittelporen (rund 90 %).“ (www.consagros.de; Stand Juni 2013)

#### *Betasoil™*

Betasoil™ ist ein Wirkstoff zur Verbesserung der WHK des Bodens. Wenn es in den Boden appliziert wurde, reduziert es den Wasserbedarf der Bewässerung um mindestens 50% und verbessert die Nährstoffspeicherkapazität des Bodens. Es ist ein rein natürliches und umweltfreundliches Produkt. Es besteht aus natürlichen Mineralen (größtenteils Silikaten) und speziellen Zusätzen.“ (Broschüre von tech consult limited; Stand Juni 2014)

#### *Zeolith*

„Unser Zeolith ist ein natürliches Mineral von hoher Reinheit. Es besteht zu mindestens 90 % aus Klinoptilolith, einem Aluminosilikat mit Kristallstruktur und zu rund 10 % aus Montmorillonit, einem wertvollen Tonmineral, der auch unter dem Namen Natriumbentonit bekannt ist. Zeolith ist sehr porös und speichert bei Regen oder Bewässerung das Wasser, welches dann Pflanzen in niederschlagsfreier Zeit zur Verfügung steht. Die Bodenstrukturverbesserung durch den Zeolitheinsatz führt zudem dazu, dass sich das Wasser bei Regen in der Wurzelzone gleichmäßig verteilen kann (Speicherfunktion von natürlichem Zeolith).“ (www.zeolithwelt.de; Stand Juni 2014)

#### *Bentonit SandbodenVerbesserer*

„Bentonit SandbodenVerbesserer ist ein gekörntes, natürliches Tonmineral-Mehl zur nachhaltigen Verbesserung der Struktur leichter und sandiger Böden. Es erhöht die Speicherfähigkeit von Wasser und lebensnotwendigen Nährstoffen im Boden ermöglicht eine bessere Wirkung von Düngemitteln. Es bindet während der Kompostierung Feuchtigkeit und verhindert so lästige Geruchsbildung und Fäulnis.“ (www.neudorff.de; Stand Juni 2014)

#### *Neudorffs UrgesteinsMehl*

„Neudorffs UrgesteinsMehl dient der Wiederanreicherung des Bodens mit wertvollen Mineralsubstanzen und Spurenelementen, die durch Auswaschung und Ernten laufend entzogen werden. Es trägt auch zur physikalischen Verbesserung des Bodens bei und ist optimal geeignet zur Eisen- und Magnesiumversorgung von Rasenflächen. Das

Urgesteinsmehl reagiert leicht basisch und wirkt so der Bodenübersäuerung entgegen und ist zudem auch für die Kompostverbesserung hervorragend geeignet.“ (www.neudorff.de; Stand Juni 2014)

#### *Geohumus<sup>TM</sup>*

„Geohumus – der Langzeit Dünger- und Wasserspeicher verhindert, dass ein Großteil des Gießwassers versickert oder verdunstet, ohne dass es von den Pflanzenwurzeln aufgenommen werden kann. Geohumus ist in der Lage, bis zum 40-Fachen seines Eigengewichtes an Wasser aufzunehmen. Das Wasser und die darin gelösten Nährstoffe werden in Wurzelnähe gespeichert und bei Bedarf an die Pflanzen abgegeben. Dieser Prozess ist beliebig oft wiederholbar. Der Mineralien-Mix aus echtem Vulkangestein und die Nährstoffe erleichtern den Pflanzen die Anwuchsphase und führen zu noch schöneren Blüten.“ (www.geohumus.com; Stand Juni 2014)

#### *Humusziegel (Kokosfasern)*

„Gepresster und 100 % organischer Humus aus der Faser der Kokosnuss. Hervorragender Wasserspeicher. Als Blumenerde unterstützt die Wurzelung durch lockeren Boden. Es hat einen sehr langsamen Verrottungsprozess und dient als gleichmäßig abgebender Nährstoff- und Mineralstoffspeicher...“ (www.humusziegel.de; Stand Juni 2014)

#### *Floratorf*

„Floragard Floratorf ist der klassische naturreine Qualitätstorf ohne Zusätze. Das Naturprodukt Floratorf lockert den Boden und sorgt für eine gute Luftzirkulation. Es speichert Wasser, Nährstoffe und Bodenwärme. Außerdem schützt es den Boden vor Verkrustung, Verschlammung und Austrocknung. Floratorf fördert die biologische Aktivität des Bodens und regt die Humusbildung an.“ (www.floragard.de; Stand Juni 2014)

Neben den oben aufgelisteten „Produktversprechen“ machen die Hersteller auch Angaben über die Zusammensetzung ihrer Produkte. Diese werden jedoch nicht gleich stark detailliert angeben. Aus diesen Informationen (siehe Tab. 4) können bereits Rückschlüsse auf die Wasserhaltekapazität der einzelnen Substrate gezogen werden. Bei mineralischen Stoffen beeinflusst vor allem die Menge an Ton, aber auch dessen Aufbau der Tonminerale (z.B. Smectit, Illit, Vermiculit oder Klinoptilolithe) die WHK (BLUM 2012; STAHR ET AL. 2012). Aber auch andere Inhaltsstoffe nehmen Einfluss, wie zum Beispiel die org. Polymere im Geohumus oder das Silikagel in Betasoil, auf die WHK. Polymere, auch Superabsorber

genannt, werden synthetisch aus Acrylsäure und Natriumacrylat hergestellt. Dieser Stoff kann aufgrund seines Aufbaus ein Vielfaches seines Eigengewichtes an Wasser aufnehmen. (BUCHHOLZ/GRAHAM 1998; ZEUGE 2005) Ein ähnliches Funktionsprinzip weist das Silikagel auf. Dieses Produkt wird insbesondere in Kugelform als Trocknungsmittel (z.B. bei Lederwaren oder Elektrogeräten) verwendet und hat aufgrund seiner großen inneren Oberfläche ein hohes Wasserspeichervermögen (ILER 1979). Hergestellt wird es aus Wasserglas, das mit einer Säure aufgeschlossen wird. Des Weiteren wurden Stoffe aus der Gruppe der natürlichen Silikate wie Naturperlite (erhitzt und aufgebläht), Axis (gebrannte Kieselalgen), Zeolith (Alumosilikat mit Kristallstruktur), Bentonit (Schichtsilikat) und Urgesteinsmehl (Silizium und Tonerde) analysiert. Ausgenommen vom Gesteinsmehl besitzen alle Stoffe Partikel mit einer sehr großen inneren Oberfläche.

Organische Stoffe, wie Kokosfaser und Torf, können ebenfalls ein Vielfaches ihres Eigengewichtes an Wasser speichern. Kokosfasern bestehen hauptsächlich aus Lignin und Zellulose. Es handelt sich dabei Biopolymere, die aufgrund ihrer vernetzten Molekülstruktur, ähnlich wie die Superabsorber, sehr viele Wasser-Moleküle binden können. (GEHRKE ET AL. 2003; MOHANTY ET AL. 2005; LEWIN 2007)

Torf entsteht hauptsächlich aus der unvollständigen Verrottung von Pflanzenresten und enthält deshalb sehr viel Zellulose, Hemizellulose und Lignin. Durch Humifizierung von vor allem Lignin entstehen Huminstoffe, die stark an der „Wasserbindung beteiligt“ (BLUM 2012) sind. (KUNTZE ET AL 1994; STAHR ET AL 2012)

Tab. 4: Zusammensetzung der verwendeten festen Bodenhilfsstoffe nach Herstellerangaben

Substrat	Bestandteile [%]		Zusammensetzung
	min.	org.	
Perlite	100	-	Kristalle von Quarz (SiO <sub>2</sub> ), Cristobalit, Feldspat
Alginit	81	19	T (54 %): 50 % Smectit, 40 % Illit, 10 % Vermiculit, U (40 %), S (6 %)
Axis	100	-	SiO <sub>2</sub> (90 %), Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (6,5 %), Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (32,3 %)
Betasoil	100	-	Silikagel, Tuff, Ca Bentonit, Perlite
Zeolith	100	-	Klinoptilolithe (90 %), Montmorillonit (Na-Bentonit) (10 %)
Bentonit	100	-	Montmorillonit (mehr als 50 %)
Gesteinsmehl	100	-	SiO <sub>2</sub> (46 %)
Geohumus	75	25	Gesteinsmehle (75 %), org. Polymere (25 %)
Kokosfaser	-	100	aus den Fasern der Kokosnuss
Torf	-	100	naturreiner Torf

### 2.2.6.2 Flüssige Bodenhilfsstoffe

Die Auswahlkriterien für die untersuchten flüssigen Bodenhilfsstoffe waren in erster Linie die Wirkungsmechanismen der Aktivierung des Bodenlebens und der Förderung des Wurzelwachstums. Die Tab. 5 zeigt die Auswahl der verwendeten Bodenhilfsstoffe. Neben Hersteller und Zusammensetzung der Produkte wurden auch die empfohlene Aufwandmenge und der durchschnittliche Preis abgebildet.

Tab. 5: Übersicht der verwendeten flüssigen Bodenhilfsstoffe (Produkt, Hersteller und Zusammensetzung) mit Aufwandmenge nach Herstellerangabe und dem aktuellen Preis (Stand Feb. 2013)

Produkt	Hersteller	Zusammensetzung	Aufwandmenge [l/ha]	Preis [€/l]
BlackJak SC	Lances Link SA	sauerer Suspensionskonzentrat mit Humin- Fulvo- und Ulminsäure	1,0	14,37
Nitrovin	Project Acon	<i>Azospirillum brasilense</i> , Enzyme/Vitamine, Auxin/Cytokinin, Stabilisator/Lösungsmittel	1,0	39,00
Biomagic	Project Acon	<i>Bacillus Megaterium</i> , Enzyme/Vitamine, Auxin/Cytokinin, Stabilisator/Lösungsmittel	1,0	39,00
Biorend	Bioagro/e-nema	Chitosan	5,0-12,0	26,90
Sojall-Vitana A	Sojall Pro Natura	Dynamisiertes Wasser, Wasserstoffperoxid, Natriumbenzoat, Sorbinsäure, Silizium	1,5-2,5	10,76
Sojall-Vitana B	Sojall Pro Natura		1,5-2,5	10,76
Sojall-Vitalan A	Sojall Pro Natura		1,5	11,96
Sojall-Vitalan B	Sojall Pro Natura	Dynamisiertes Wasser, Milchsäure/-bakterien, Zuckermelasse, Silizium	1,5	11,96
Humibak	Humital	Heterotrophe Bakterien. Hefe-/Milchsäurebakterienstämme und Pilze (Hauptbestandteile)	1,0	2,50
Azotovit/Phosphatovit	Project Acon	<i>Azotobacter chroococcum</i> / <i>Bacillus mucilaginosus</i>	je 0,5	39,00

Wie bei den Produktbeschreibungen bei den festen Bodenhilfsstoffen, sind im Folgenden ausschließlich die Angaben der Hersteller aufgelistet.

*BlackJak®SC*

„BlackJak®SC liefert den Bodenorganismen die lebensnotwendigen Bausteine, die für ihren Bestand und ihre Aktivität nötig sind. Das Bodenleben wird dadurch angeregt und die Bodengesundheit, Gare und der Gasaustausch verbessert. Außerdem regt BlackJak®SC das Wachstum der Pflanze an. In Folge dessen wird die Kulturpflanze ganzheitlich gegen negative äußere Einflüsse gestärkt.“ (www.intrachem-bio.de; Stand Juni 2014)

*Nitrovin*

„Nitrovin ist ein flüssiges Biodüngemittel. Es fixiert alle Stickstoffverbindungen und hilft so zwischen 15 und 20 kg N pro Hektar und Jahr zu fixieren. 20 – 30 % der Stickstoffdünger können so reduziert werden. Es erzeugt signifikante Mengen an Wachstumshormonen wie Gibberellinen, Cytokinine, IAA etc.“ (übersetzte Produktbeschreibung der Firma The Gene Tech; Stand Juni 2014)

*Biomagic*

„Biomagic ist ein flüssiges Biodüngemittel. Es schließt alle Phosphorverbindungen auf und liefert Pflanzenwachstumsanreger und Aminosäuren für die Pflanzen während der gesamten Entwicklung. Es verbessert Glanz und Prallheitsgrad aller Pflanzenerzeugnisse. Biomagic erweitert das Wurzelwachstum und fördert die Aufnahme von Nährstoffen.“ (übersetzte Produktbeschreibung der Firma The Gene Tech; Stand Juni 2014)

*Biorend*

“Der Wirkstoff ist ein biologisch abbaubares, ungiftiges, umweltschonendes aus Chitin gewonnenes Polymer. Pflanzen absorbieren Biorend systematisch über Samen oder Wurzel. Dadurch steigt der Chitosangehalt in den Pflanzen, was in ihr eine Abwehrreaktion gegen Pilzbefall auslöst. Es kommt einer Vielzahl biochemischer, cyto-genetischer und struktureller Veränderungen, die eine signifikante Zunahme von Biomasse und Ertrag bewirken. Biorend stellt sozusagen eine Versicherung gegen Pilzbefall dar.“ (Informationsblatt von e-nema; Stand Juni 2012)

*Sojall-Vitana A und B*

„Sojall-Vitalan kann zur Lösung der gegenwärtigen Probleme bezüglich Bodensanierung und Humusbildung, Beseitigung von Agrar-Chemikalien, Schwermetallen, Nitratbelastung sowie Verbesserung des Pflanzenschutzes, -wachstums, von Qualität und Quantität sowie zur Entlastung der Umwelt einen wesentlichen Beitrag leisten. Sojall-Vitalan ist die Kraft,

die im Boden unerwünschte Energie abbauende Elemente unterdrückt und dadurch ertragreicher macht.“ (www.sojall-naturen.at; Stand Juli 2012)

#### *Sojall-Vitalan A und B*

Sojall-Vitalan stimuliert und erhöht die Bildung der Antioxidation an der Wurzel der Pflanze, wodurch die Wurzeln selbst widerstandsfähiger werden. Mit stärkeren Wurzeln können die Pflanzen im Boden „vorhandene“ Nährstoffe wesentlich wirkungsvoller aufnehmen, was wiederum dazu führt, dass auf den gesunden Pflanzen die Schädlinge verhungern. Sojall-Vitalan unterstützt auch den Photosynthese-Prozess der Pflanzen, bei dem eine Menge an Energie verbraucht wird...“ (www.sojall-naturen.at; Stand Juli 2012)

#### *Humibak*

„Das natürliche Mikrobenpräparat HUMIBAK ist eine konzentrierte Mikrobenmischung welche Regenerationsprozesse in den verschiedensten Bereichen unterstützt, beschleunigt und nachhaltig stabilisiert. HUMIBAK enthält wichtige Substanzen wie Vitamine, organische Säuren, Enzyme und Antioxidantien und ist auch in der Lage diese zu produzieren. Dadurch verändert sich die Mikroflora des Bodens positiv. Das Verhältnis von C:N, wird verbessert, organisches Material umgesetzt, Humus aufgebaut und Nährstoffe werden mobilisiert. All dies zusammen gewährleistet eine nachhaltige, hohe Qualität von Böden und den darauf angebauten Pflanzen. (www.humital.de; Stand Juni 2014)

#### *Azotovit*

„Azotovit ist ein mikrobieller Bodenhilfsstoff, bestehend aus hochwirksamen stickstoffbindenden Bakterien. Die in Azotovit enthaltenen Mikroorganismen bewegen sich aktiv zur Wurzel und machen ihn der Pflanze zugänglich. Die Mikroorganismen in Azotovit synthetisieren aktiv biologische Stoffe, die eine phytosanitäre Wirkung haben. Ertrag und Qualität werden positiv beeinflusst.“ (Auszug; www.project-acon.de, Stand Juli 2012)

#### *Phosphatovit*

„Phosphatovit ist ein mikrobieller Bodenhilfsstoff, bestehend aus hochwirksamen Silikat-Bakterien. Die in Phosphatovit enthaltenen Mikroorganismen bewegen sich aktiv zur Wurzel und besiedeln diese. Phosphatovit mobilisiert durch biologische Prozesse, festgelegten Phosphor und Kalium und macht sie der Pflanze zugänglich. Ertrag und Qualität werden positiv beeinflusst.“ (Auszug; www.project-acon.de; Stand Juli 2012)

Ob und inwieweit die Produktbeschreibungen realistisch bzw. zutreffend sind, kann unter der Berücksichtigung der Angaben der Inhaltsstoffe (vgl. Tab. 5) leider nicht eindeutig

geklärt werden. Auch die angegebenen Aufwandmengen pro Liter, die relativ gering sind, stellen die Wirksamkeit der Mittel in Frage. Es besteht jedoch kein Zweifel, dass Inhaltsstoffe wie Säuren, Bakterien und/oder Pilze positive Wirkungen auf das Bodenleben und Wurzel-/Pflanzenwachstum haben können.

Humin- und Fulvosäuren stellen die alkalilöslichen Fragmente des Humus und können aus den Huminstoffen extrahiert werden. Aufgrund ihrer molekularen Struktur bieten sie zahlreiche Vorteile für die Pflanzenproduktion. Sie helfen Ton zu brechen, können die Übertragung von Mikronährstoffen aus dem Boden in die Pflanze unterstützen, erhöhen Wassereinlagerungen, erhöhen die Keimungsrate von Samen und ihr Durchdringen und fördern die Entwicklung der Mikroflorapopulationen in Böden (SENESI ET AL. 1991). (PENA-MÉNDEZ ET AL. 2004)

Neben Säuren vertreiben die meisten Hersteller Suspensionen mit einer Bakteriengattung. Einige, wie zum Beispiel das Humibak, beinhalten auch unterschiedliche Bakterienstämme. Bevorzugt werden Milchsäurebakterien oder N-fixierende Bakterien von den Herstellern angeboten. Aber auch Produkte mit anderen Bakterienstämmen wie zum Beispiel phosphat-lösende Bakterien werden als Bodenverbesserer angeboten.

Milchsäurebakterien können im Boden den Abbau/Zersetzung von organischem Material (Humus) fördern. Zusammen mit Hefepilze/-bakterien können organische Substanzen im Boden fermentiert werden. Sie erzeugen daraus organische Verbindungen wie Zucker, Alkohol, Aminosäuren, Milchsäure und andere, die von den Pflanzenwurzeln direkt aufgenommen werden können. Laut HIGA & KINJO (1991) können diese fermentierten Stoffe den Humusgehalt des Bodens und auch das Pflanzenwachstum erhöhen. (HIGA & WIDIDANA 1991)

In dieser Arbeit wurden zwei Produkte mit unterschiedlichen stickstofffixierenden Bakterienstämmen untersucht: *Azospirillum brasilense* und *Azotobacter chroocum*.

Alle Bakterien der Gattung *Azospirillum* sind dafür bekannt, das Pflanzenwachstum (TROCH & VANDERLEYDEN 1996) zu fördern. Sie können der Pflanze die Stickstoffaufnahme erleichtern. Andere Effekte sind die Herstellung von wachstumsfördernden Substanzen (z.B. Auxin-wirksame oder Gibberellin-ähnliche (SCHINNER & SONNENLEITNER 2012)), die zu einer morphologischen und physiologischen Veränderung der inokulierten Pflanzenwurzeln, einschließlich einer erhöhten Anzahl von Seitenwurzeln und Wurzelhaaren führen. (UMALI-GARCIA ET AL. 1980; OKON & LABANDERA-GONZALES 1994; FLORES und HADELER 2010)

N<sub>2</sub>-Fixierung von frei lebenden Mikroorganismen mit Pflanzen ist bereits seit vielen Jahren im Interesse der Wissenschaft (BASAN 1986; LINDBERG & GRANHALL 1984). Die Verwendung von *Azotobacter* Inokulation als Bakteriendünger wurde bereits ausführlich untersucht (MESHRAM & SHENDE 1982). Dabei wurde zudem beobachtet, dass *Azotobacter chroocuum* Gibberellinsäure, Indol-3-Essigsäure und Cytokinin produzieren (GONZALEZ-LOPEZ ET AL. 1986), die wiederum die Keimlingsentwicklung und das Pflanzenwachstum (BAREA & BROWN 1974; BROWN 1982) fördern.

Untersucht wurden ebenfalls zwei Produkte mit unterschiedlichen Phosphat freisetzenden Bakterien der Gattung *Bacillus*: *Bacillus megaterium* und *Bacillus mucilaginosus*.

Eine größere Anzahl von Studien hat Mikroorganismen zu diesem Thema untersucht und vielversprechende Ergebnisse aus Biodünger-Untersuchungen erhalten (CAKMAKCI ET AL. 2006; ELKOCA 2008). Bakterien wie *Bacillus megaterium* können zur Erhöhung der Verfügbarkeit von im Boden festgelegten Phosphaten beitragen und das Pflanzenwachstum durch die Erhöhung der Effizienz von anderen Nährstoffen verbessern. In Kombination mit N-fixierenden Bakterien konnten Ertragssteigerungen z.B. bei Zuckerrüben (CAKMAKCI ET AL. 1999) und Klee, Weizengras, Deutsches Weidelgras (HOLL ET AL. 1998) nachgewiesen werden. *Bacillus megaterium* (var. *phosphaticum*) kann außerdem das Pflanzenwachstum durch Anreicherung der Rhizosphäre mit einer Vielzahl von wachstumsfördernden Substanzen wie Spurenelemente, Vitamine, Enzyme, Hormone usw. stimulieren (QIN ET AL. 2010).

Silikat Bakterium oder *Bacillus mucilaginosus* ist eine besondere *Bacillus*-Art, die eine Vielzahl von Exopolysaccharide produziert. Es wird in der Landwirtschaft weitgehend als multifunktionaler mikrobieller Dünger genutzt, der K, P und andere nützliche Elemente durch Auflösen von Bodenmineralien zur Verfügung stellt. (LI ET AL. 2007)

Ebenfalls wurde ein Produkt (Biorend) mit dem Hauptbestandteil Chitsoan verwendet, das aus der Schale von Krustentieren (z.B. Krebstiere) gewonnen wird. Beim Einsatz von Chitosan als Bodenverbesserer wurde gezeigt, dass *Fusarium*-Welke bei vielen Pflanzenarten bekämpft werden konnte (RABEA ET AL. 2003). In einer optimalen Konzentration ist dieses Biomaterial in der Lage, eine Verzögerung in der Krankheitsentwicklung hervorzurufen, das wiederum zu einer reduzierten Pflanzenwelke führt (BENHAMOU ET AL. 1994).

Neben den Hauptbestandteilen werden den Produkten noch unterschiedliche Zusatzstoffe wie Stabilisatoren, Lösungsmittel, (dynamisiertes) Wasser, Enzyme, Vitamine, Pflanzenhormone (Auxin, Cytokinin) etc. beigefügt.

### 3 MATERIAL UND METHODEN

#### 3.1 Bodenhilfsstoffe und Bodensubstrate

Wie bereits in Kap. 2.2.5.2 beschrieben, gibt es eine große Anzahl an Bodenhilfsstoffen, sowohl in fester als auch in flüssiger Form, auf dem Markt. In den folgenden Analysen und Versuchen wurde deshalb eine repräsentative Auswahl (siehe Kap. 2.2.6) an geeigneten Stoffen getroffen. Im Vordergrund dieser Arbeit standen dabei natürliche und synthetische Feststoffe (siehe Tab. 3), die zudem zu unterschiedlichen Stoffgruppen (mineralisch und organisch) zählten. Bei der Auswahl der flüssigen Bodenhilfsstoffe (siehe Tab. 5) wurden vor allem Präparate mit unterschiedlichen Inhaltsstoffen berücksichtigt.

In den Versuchen zur Bestimmung der Wasserhaltekapazität und den Gefäßversuchen mit Weidelgras im Gewächshaus wurde stets dasselbe sandige Bodengemisch, das aus  $\frac{2}{3}$  „Uedorfer Krume“ und  $\frac{1}{3}$  Quarzsandanteilen (0,2-0,63 mm, feuergebrannt) bestand, verwendet. Der Boden kommt von der ehemaligen Versuchsstation des agrikulturchemischen Instituts der Universität Bonn, die sich in Uedorf bei Bornheim befand. Die Zusammensetzung des Bodens ist der Tab. 6 zu entnehmen.

Tab. 6: Bodeneigenschaften der „Uedorfer Krume“ und „Meckenheimer Krume“  
(BODENKUNDEINSTITUT DER UNIVERSITÄT BONN)

	Uedorfer Gemisch	Meckenheimer Krume
Bodenart	Sl 2	Ut 3
Grobsand (%)	3,1	1,3
Mittelsand (%)	55,4	2,5
Feinsand (%)	17,8	3,1
Grobschluff (%)	8,2	50,3
Mittelschluff (%)	5,5	20,9
Feinschluff (%)	4,4	6
Ton (%)	5,7	16
Corg (%)	0,923	1,015
CaCO <sub>3</sub>	< 0,2	< 0,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	52,1	8,05
K <sub>2</sub> O	22	6,5
Mg	4,32	6,28
pH	6,2	5,5

Im Versuch zur Wasserhaltekapazität (siehe Kap.3.1.1) wurde zudem ein Lössboden („Meckenheimer Krume“) benutzt, dessen Lagerstätte auf der ehemaligen Versuchsstation des agrilkulturchemischen Instituts der Universität Bonn in Meckenheim bei Bonn befindet.

### ***3.1.1 Methode zur Bestimmung der Wasserhaltekapazität [WHK] von festen Bodenhilfsstoffen und Bodensubstraten***

Bei allen Analysen zur Wasserhaltekapazität wurde eine Doppelbestimmung durchgeführt. Vorversuche hatten gezeigt, dass die Methoden ausreichend genau sind (sehr geringe Standardabweichungen).

#### ***3.1.1.1 Schüttdichte [RD<sub>FS</sub>]***

Mit Hilfe eines 1000ml-Messzylinders (Ø 60 mm) wurde die Schüttdichte gravimetrisch bestimmt. Die Durchführung erfolgte nach der Methode aus der Vorschrift „Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate“ (2006).

#### ***3.1.1.2 Wassergehalt [WG]***

Für die Ermittlung des Wassergehaltes [%] wurden jeweils 100 g frisches Bodenmaterial für ca. 24 Std. bei 105 °C in einem Umlufttrockenschrank getrocknet. Die Bestimmung wurde ebenfalls nach der Methode aus der Vorschrift „Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate“ (2006) durchgeführt.

#### ***3.1.1.3 Volumenzunahme nach Wassersättigung [V<sub>z</sub>]***

Der Einfluss des Quellungsverhaltens war ein wichtiger Faktor bei der Berechnung der Aufwandmenge im anschließenden Versuch zur Wasserhaltekapazität (siehe Kap. 3.1.1). Viele Bodenhilfsstoffe vergrößern ihr Volumen nach der Aufnahme von Wasser, einige sogar um ein Vielfaches. Für die Bestimmung wurde frisches Material verwendet. Durch die vorherige Trocknung würden einige Stoffe wie z.B. Geohumus oder Torf noch weiter schrumpfen.

Die Volumenzunahme wurde mit Hilfe von 100 ml-Plastikstandzylindern (Ø 27 mm) bestimmt, die im Boden mit Löchern versehen waren. Diese wurden vor dem Befüllen mit einem feuchten Papierfließ abgedeckt, damit die Substrate nicht herausrieselten. Die eingefüllte Menge an Substrat betrug 10 ml. Anhand der vorher ermittelten Schüttdichte konnte so die exakte Menge an Substrate in mg errechnet und eingefüllt werden. Anschließend kamen die Proben für 4 Std. in ein Wasserbad (gefüllt mit Leitungswasser).

Um den Wasserstand oberhalb des quellenden Substrats zu halten, musste mehrfach Wasser nachgefüllt werden. Da einige Produkte stärker quollen als andere, wurden mehrere Wasserbäder angesetzt. Dies war aufgrund der unterschiedlich hohen Schüttdichten der Produkte notwendig, da Plastikstandzylinder mit sehr leichten Stoffen, wie zum Beispiel Perlite oder Kokosfaser, bei zu hohem Wasserstand sehr leicht umkippten. Nach kurzem Abtropfen (ca. 15 Sek.) des Überschusswassers konnte die Höhe ( $h_{\text{feu}}$ ) des feuchten Substrates bestimmt werden. Um eine ebene Oberfläche zu erhalten, wurden die Proben mit einer Styroporscheibe mit einem Gewichtstück (eine 2-Euro-Münze) bedeckt. Mit folgender Formel wurde die maximale Volumenzunahme [%] berechnet:

$$V_z = [(V_{\text{feu}} - V_{\text{tro}}) / V_{\text{tro}}] \times 100$$

$V_z$  : maximale Volumenzunahme nach Wassersättigung [%]

$V_{\text{feu}}$ : Volumen nach Wasseraufnahme ( $\pi \times r^2 \times h_{\text{feu}}$ ) [ml]

$V_{\text{tro}}$ : Volumen frisches Substrat (Einwaage) [ml]

Mit Hilfe der oben beschriebenen Versuchsdurchführung wurden auch unterschiedliche Beladungslösungen getestet. Untersucht wurde dabei die Wirkung von Leitungswasser, destilliertem Wasser und einer 0,5 M CaCl-Lösung auf die Volumenzunahme am Beispiel des Geohumus.

#### **3.1.1.4 Wasserhaltekapazität [WHK]**

Zur Bestimmung der max. Wasserhaltekapazität [%] der Bodenhilfsstoffe wurde die Methode nach der Vorschrift der Bundegütegemeinschaft Kompost e.V. (2006) modifiziert, um das stark unterschiedliche Quellungsverhalten der untersuchten Stoffe zu berücksichtigen. Unter diesem Aspekt wurde die ermittelte Volumenzunahme der Substrate bei der Einwaage ( $m_{\text{netto}}$ ) berücksichtigt, so dass bei maximaler Wassersättigung ein Endvolumen von 1000 ml ( $\pm 100$  ml) bei allen Varianten erreicht wurde. So sollte beim Abtropfvorgang ein gleicher Druck der Wassersäule auf die unterschiedlichen Substrate gewährleistet werden.

Die Wahl der Versuchsgefäße, 1,2-Liter-Gefrierdosen (10 x 10 x 12 cm), war ebenfalls eine Abweichung zur Vorschrift der Bundegütegemeinschaft Kompost e.V. (2006). In ihrer Methodenvorschrift werden sogenannte „Mitscherlich-Zylinder“ (aus Zink:  $h = 160$  mm;  $\emptyset = 40$  mm) verwendet, die einen feinmaschigen Siebboden besitzen. Diese Gefäße brachten mehrere Nachteile mit sich. Der größte Nachteil war der sehr kleine Durchmesser, der das Befüllen aber auch die Säuberung nach der Durchführung erheblich erschwerte und damit sehr zeitaufwendig machte. Zudem klebten vor allem stark tonhaltige Probenrückstände sehr

stark an den metallischen Zylinderinnenseiten fest. Um ein gleichmäßiges Abtropfen aller Gefrierdosen zu gewährleisten, wurden pro Dosenboden jeweils 20 Löcher ( $\varnothing = 8$  mm) im gleichen Abstand gebohrt. Wie bereits aus dem Versuch der Volumenzunahme bekannt, wurden die Löcher vor dem Befüllen mit einem feuchten Papierfließ abgedeckt. Anschließend wurden die Töpfe samt Fließ gewogen ( $m_{\text{tara}}$ ). Im nächsten Schritt wurden die mit Hilfe der Schüttdichte und Volumenzunahme ermittelten Mengen des jeweiligen Substrates (naturfeucht) in die Gefrierdosen eingefüllt, leicht eingerüttelt und in ein Wasserbecken mit Leitungswasser gestellt. Um ein Aufschwemmen der Proben zu vermeiden, wurden die Gefäße zunächst vorsichtig von oben mit Leitungswasser befeuchtet. Damit der permanente Wasserstand von ca. 1 cm oberhalb der Substratoberflächen hielt, wurde je nach Bedarf Wasser nachgefüllt. Nach Vorschrift der BGK sollten die Proben nach 4 Std. zum Abtropfen auf ein Bett mit Quarzsand gestellt werden. Um die Durchschlagkraft an Proben zu erhöhen, wurden die Gefrierdosen auf ein Abtropfsieb gestellt, das vorher mit mehreren Schichten aus feuchtem Papierfließ abgedeckt wurde. Dieses Fließ hatte dieselbe Funktion wie der Quarzsand. Nach 2 Std. wurden die Gefäße gewogen ( $m_{\text{brutto}}$ ) und anschließend die max. Wasserhaltekapazität in Vol-% und Gew-% ermittelt. Folgende Formeln wurden zur Berechnung (siehe Methodenbuch der BGK) angewendet:

$$WHK_{\text{max}} = (W_m / P_V) \times 100 [\text{Vol.-%}]$$

$W_m$ : Wassermenge [ml]

$P_V$ : Substratvolumen frisch [ml]

$$WHK_{\text{max}} = (m_W / m_{\text{netto}}) \times 100 [\text{Gew.-%}]$$

$m_W$ : Wassermasse [g H<sub>2</sub>O]

$m_{\text{netto}}$ : Substratmasse trocken [g]

### 3.1.2 Bestimmung der Kationenaustauschkapazität (KAK)

Wie bereits in Kap. 2.2.4.4 beschrieben, kann durch den Einsatz von Bodenhilfsstoffen die Kationenaustauschkapazität (KAK) von Böden erhöht werden. Aufgrund unterschiedlicher Zusammensetzungen kann sie von Stoff zu Stoff sehr variieren. Die Hersteller der untersuchten Hilfsstoffe geben oftmals in ihren Produktbeschreibungen nur den Hinweis, dass ihr Produkt die Nährstoffspeicherung und -verfügbarkeit positiv beeinflussen. Die exakte Höhe der KAK des reinen Produktes geben nur wenige an.

Aus diesem Grund wurde mit Hilfe der Bariumaustauschmethode in Anlehnung an MEHLICH (1952) die Gesamtaustauschfähigkeit ( $KAK_{pot}$ ) bestimmt. Für die Durchführung dieser Standardmethode wurde von jedem Hilfsstoff/Boden jeweils 5 g benötigt. Es erfolgte eine Doppelbestimmung. (BLUME ET AL. 1984; SCHLICHTING ET AL. 1995)

### 3.2 Gefäßversuch: Kombination aus Unterflurbewässerung und Bodenhilfsstoff

#### 3.2.1 Versuchssubstrat und -pflanzen

Für die Pflanzenversuche in Bonn wurde ausschließlich *Lolium multiflorum* (Welsches Weidelgras) verwendet. Vor allem der schnelle Wuchs und die schnelle Ausbildung eines starken Wurzelsystems, aber auch die allgemein höhere Trockenstresstoleranz von Gräsern gegenüber anderen Pflanzenarten war ausschlaggebend für die Auswahl dieser Kulturpflanze.

Als Versuchssubstrat wurde das in Kap. 3.1 beschriebene Uedorfer Gemisch benutzt.

#### 3.2.2 Nährstoffgehalte im Bodengemisch

Um den Pflanzen eine ausreichende Versorgung an Nährstoffen zu gewährleisten, wurde das Bodensubstrat mit Hilfe von drei Düngerlösungen (**1. Lsg:**  $KNO_3$  und  $MgSO_4 \times 7 H_2O$ ; **2. Lsg:**  $Ca(NO_3)_2 \times 4 H_2O$ ,  $Mg(NO_3)_2 \times 6 H_2O$  und  $NaCl$ ; **3. Lsg:**  $KH_2PO_4$  und  $K_2HPO_4$ ) aufgedüngt (siehe Tab. 7). Die Versorgung mit Mikronährstoffen erfolgte mit 1 g Ferty10-Dünger pro Topf. Diese Fertigdünger Mischung enthält Bor, Kupfer, Eisen, Mangan, Molybdän und Zink.

Tab. 7: Makronährstoffe

Nährelement	[g/kg Boden]
N	1,00
P	0,47
K	0,95
Ca	0,88
Mg	0,47
S	0,24
Na	0,24
Cl	0,37

Die Tab. 8 zeigt zum einen die analysierten Nährstoffgehalte (Druckaufschluss) der Elemente Kalium, Phosphor, Magnesium und Natrium des verwendeten Bodengemisches (Uedorfer Gemisch), die bereits ohne Düngung im Substrat vorhanden waren. Zum anderen

erfolgte eine Nährstoffzufuhr anhand der oben genannten Grunddüngung vor der Aussaat und einer Nachdüngung nach jeder Ernte, um den Nährstoffentzug durch das Erntegut auszugleichen.

Tab. 8: Nährstoffgehalt und –zufuhr [g/Topf] der Mikronährstoffe Kalium, Phosphor, Magnesium und Natrium des Uedorfer Gemisches; Ein Topf enthielt 9,5 kg Bodensubstrat.

	Grundgehalt <sup>1</sup> [g/Topf]	Grunddüngung [g/Topf]	Ferty3 <sup>2</sup> [g/Topf]	Gesamt [g/Topf]
Kalium	1,67	0,95	0,75	<b>3,37</b>
Phosphor	1,34	0,47	0,26	<b>2,07</b>
Magnesium	0,19	0,47	0,06	<b>0,72</b>
Natrium	1,37	0,24	-	<b>1,61</b>

<sup>1</sup> Gesamtgehalte

<sup>2</sup> 5 Teilgaben

### 3.2.3 Aufwandmenge der Bodenhilfsstoffe

Die Auswahl der festen Bodenhilfsstoffe wurde in diesem Versuch untersucht. Aufgrund des Versuchsaufbaus (festes Topfvolumen) wurden die Substrate nach Herstellerempfehlung wie folgt appliziert (siehe Tab. 9):

Tab. 9: Aufwandmenge [Vol.-% und g/Depot] nach Herstellerempfehlung der verwendeten Bodenhilfsstoffe

Hilfsstoffe	Aufwandmenge	
	[Vol.-%]	[g/Depot <sup>1</sup> ]
Perlite	25	9,00
Alginit®	15	66,00
Axis®	10	16,00
Betasoil®	5	14,40
Zeolith	5	19,28
Bentonit	2	9,20
Gesteinsmehl	2	13,44
Geohumus®	1	1,84
Kokosfaser	25	11,00
Torf	25	50,00

<sup>1</sup> entsprach 400 ml

### 3.2.4 Versuchsdesign/-durchführung

Um die Kombination von Unterflurbewässerung und Bodenhilfsstoffe praxisnah zu testen, wurde ein Container-Versuch mit Kick-Brauckmann-Gefäßen (STOMA GmbH, Siegburg) im Gewächshaus angelegt. Pro Versuchstopf mit einem Nennvolumen von ca. 7 l wurden jeweils ein Tropfer und ein Hilfsstoffdepot von 400 ml installiert (siehe Abb. 6). Die dabei verwendeten Produkte sind der Tab. 3 zu entnehmen. Die Applikationsrate entsprach den Empfehlungen der Hersteller. Die Menge an Versuchssubstrat (Uedorfer Gemisch) samt Depot entsprach 9,5 kg. Welsches Weidelgras (Saatstärke 1 g pro Topf) wurde in dem Gemisch, das vorher mit den Makroelementen (vgl. Tab. 7) gedüngt wurde, angezogen. Die Saatstärke betrug 2 g pro Topf.

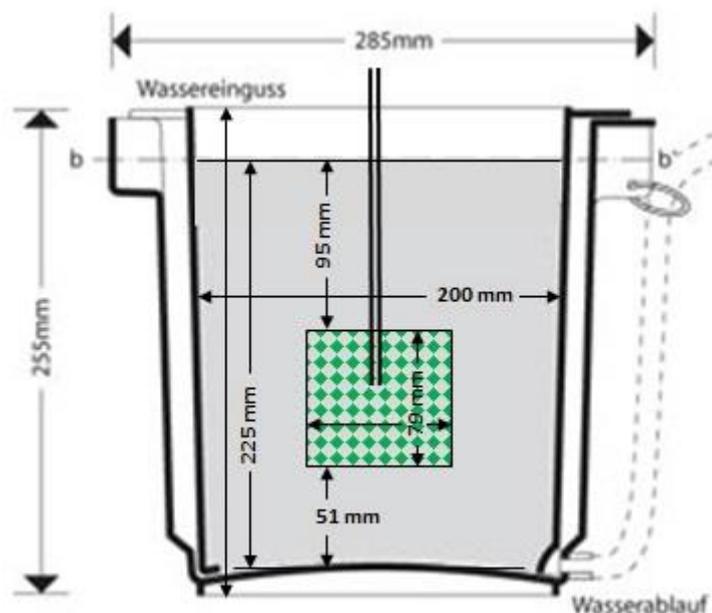


Abb. 6: schematischer Aufbau eines Kick-Brauckmann-Gefäßes (nach STOMA GmbH verändert)

Um auch Langzeiteffekte zu ermitteln, wurde der Versuch über zwei Vegetationsperioden geführt. Nach der Aussaat und während des anschließenden Auflaufens der Samen wurde nur mit Hilfe einer Sprühflasche die obere Bodenschicht feucht gehalten. Anschließend wurden die Töpfe über Kopf gegossen, bis sich ein etabliertes Wurzelsystem der Pflanzen entwickelt hat. Danach wurde auf das vorher installierte Bewässerungssystem umgestellt.

Der simulierte Tropfer bestand aus einem 20 cm langen Plastikröhrchen ( $\varnothing$  10 mm), in dem ein Tropfschlauch des automatischen Bewässerungssystems steckte. Mit Hilfe eines vorgeschalteten Dosatrons und einer Zeitschaltuhr (Firma Netafim<sup>TM</sup>, Typ AquaPro) konnte die Wassermenge den durch Temperaturschwankungen im Gewächshaus bedingten

veränderlichen Bedürfnissen angepasst werden, in dem die Bewässerungsdauer manuell eingestellt wurde.

Im ersten Versuchsjahr wurde die Bewässerung so gesteuert, dass es bei einem Wasserüberschuss bei den meisten Gefäßen zu einer Sickerwasserbildung kam. Das überschüssige Wasser wurde dabei in einem Auffangbehälter gesammelt (siehe Abb. 7). Im darauffolgendem Jahr wurde der Versuch weitergeführt, jedoch die Bewässerungsmenge soweit reduziert, dass kein Sickerwasser mehr anfiel und die Pflanzen zumindest temporär wiederholt einem Trockenstress unterlagen.

Der Versuch wurde mit zehn verschiedenen Bodenhilfsstoffen (Kap. 2.2.6.1) und zwei Kontrollvarianten durchgeführt. Durch die zwei Kontrollen wurden zum einen eine Überkopfbewässerung und zum anderen eine Unterflurbewässerung ohne Zusatzstoff simuliert. Von allen zwölf Varianten wurden jeweils fünf Wiederholungen angelegt. Um Standorteinflüsse wie Randgefäße oder Einfallwinkel der Sonnenstrahlen zu kompensieren, wurden die 60 Versuchstöpfe gezielt auf einem dafür geeigneten Gleis im Gewächshaus randomisiert verteilt (siehe Abb. 7).



Abb. 7: Versuchsaufbau im Gewächshaus

Auf der Abb. 7 sind außerdem noch das Bewässerungssystem mit der Hauptleitung und den einzelnen Tropfschläuchen zu sehen. Des Weiteren sind die schwarzen Auffangbehälter für das überschüssige Wasser zu erkennen. Das komplette Gleis kann bei zu hohen Temperaturen im Gewächshaus ins Freiland geschoben werden.

Die Ernte erfolgte ausschließlich vor dem Ährenschieben des Weidelgrases, das in Abhängigkeit der Wetterlage alle vier bis sechs Wochen eintrat. Zur Ertragsbestimmung wurde das Gras mit Hilfe einer Schere ca. 5 cm oberhalb der Bodenoberfläche abgeschnitten und das Erntegut direkt auf Frischmasse gravimetrisch bestimmt.

### **3.2.5 Analyse der Pflanzenproben**

Die Proben wurden für mindestens 48 Stunden bei 60 °C getrocknet. Nach dem Trocknungsvorgang wurden sie erneut gewogen, um die Trockenmasse zu bestimmen. Für die weiteren Analysen auf Inhaltsstoffe wie Natrium, Kalium etc. wurde das getrocknete Pflanzenmaterial mit Hilfe einer Scheibenschwingmühle (Firma Sieb-Technik, Typ TS 250) fein gemahlen.

Anschließend wurden jeweils 0,5 g gemahlene Pflanzenmaterial unter HNO<sub>3</sub>-Zugabe mittels Druckaufschluss aufgeschlossen (HEINRICHS ET AL. 1986). Die erhaltenen Lösungen wurden mittels Trichter in 25ml-Messkolben überführt und mit dest. Wasser bis zur Eichmarke aufgefüllt. Nach Abfiltration konnten die Probenlösungen mit folgenden Messgeräten analysiert werden:

#### *Kalium und Natrium*

Die Gehalte an Kalium und Natrium wurden am Flammenphotometer (Eppendorf ELEX 6361) ermittelt.

#### *Phosphor*

Die Analyse der Phosphorgehalte erfolgte mit Hilfe der Molybdänblau-Färbemethode nach MURPHY & RILEY (1962) an einem Durchflussphotometer der Firma Eppendorf (Typ ECOM 6122).

#### *Magnesium*

Am Atomabsorptionsspektrometer (PERKIN ELMER 1100B) wurde der Gehalt an Magnesium bestimmt.

### **3.3 Gefäßversuch: Wirkung der flüssigen Bodenhilfsstoffe**

In diesem Versuch wurde die Wirkung der flüssigen Bodenhilfsstoffe auf das Pflanzenwachstum untersucht. Aufgrund der relativ geringen empfohlenen Aufwandmenge der Hersteller (siehe Tab. 10) wurde die Wirkung der Präparate zusätzlich mit der 100-fach erhöhten Menge in diesem Versuch untersucht. Hiermit sollte ein klar sichtbarer Effekt auf das Pflanzenwachstum durch den Einsatz solcher Produkte gewährleistet werden. Die Aufwandmengen sind der Tab. 10 zu entnehmen:

Tab. 10: Aufwandmenge der untersuchten Präparate pro Topf für die Varianten „nach Herstellerangabe“ und „100-fach höhere Dosierung“; Verdünnung = Verhältnis Präparat : Wasser

Produkt	Aufwandmenge		Verdünnung BHS : Wasser
	[ml/Topf] <sup>1</sup>	[ml/Topf] <sup>2</sup>	
Nitrovin	0,001	0,1	1:100
Biomagic	0,001	0,1	1:100
Biorend	0,012	1,2	1:100
Sojall-Vitana A	0,002	0,2	1:200
Sojall-Vitana B	0,002	0,2	1:200
Sojall-Vitalan A	0,0015	0,15	1:300
Sojall-Vitalan B	0,0015	0,15	1:300
Humibak	0,001	0,1	1:50
Azotovit/Phosphatovit	0,0005 <sup>3</sup>	0,05 <sup>3</sup>	1:200

<sup>1</sup> nach Herst.  
<sup>2</sup> 100-fach höher  
<sup>3</sup> jeweils

Die Durchführung des Versuchs erfolgte in 1,2 l Gefrierdosen (10x 10 x 12 cm), die mit 1,35 kg (= 1 l) Uedorfer Bodengemisch (vgl. Kap. 3.2.1) gefüllt waren. Bei jeder Variante mit jeweils vier Wiederholungen, ausgenommen die Kontrollvariante ohne Behandlung, wurden die entsprechenden Aufwandmengen vor der Aussaat in den Boden eingebracht. Die jeweiligen Mengen sind der Tab. 10 zu entnehmen. Dabei wurden die Präparate im vorgegebenen Verhältnis mit Wasser verdünnt und eingearbeitet. Pro Topf wurde 1 g Grassamen (Welsches Weidelgras) ausgesät. Vorher wurde das Gemisch mit derselben Menge an Makronährelementen (vgl. Tab. 7), wie bereits aus dem Kick-Brauckmann-Gefäßversuch bekannt, gedüngt. Auf die Zufuhr von Mikronährstoffen wurde verzichtet, da das Uedorfer Gemisch gut versorgt ist.

Bis zur vollständigen Keimung wurde der Oberboden mit den Saatkörnern mit einer Sprühflasche feucht gehalten. Anschließend wurde eine konstante Bodenfeuchte von 70 - 80 % der max. Wasserhaltekapazität mittels täglicher Wiegung der Töpfe eingestellt. Die Ermittlung der WHK erfolgte mit der Methode zur Bestimmung der Wasserhaltekapazität (vgl. Kap. 3.1.1). Um kontrollierte Keim- und Wachstumsbedingungen zu garantieren, wurde der Versuch auf einem Bewässerungstisch in einem temperierten Gewächshaus angelegt. Aufgrund der optimalen Temperatur und Luftfeuchtigkeit konnte das Gras im 3 Wochen - Rhythmus geerntet werden. Die Analyse des geernteten Pflanzenmaterials verlief wie im Gefäßversuch in Kap. 3.2.5 beschrieben.

### 3.4 Versuch mit Rhizoboxen

In diesem Versuch wurde der Einfluss der Bewässerungsart auf das Wachstumsverhalten von Pflanzenwurzeln untersucht. Getestet wurde zum einen die Unterflur-Tropfbewässerung mit BHS-Depot („Hydrip“-Variante), zum anderen eine konventionelle oberirdische Flächenbewässerung. Durch den speziellen Aufbau der verwendeten „Rhizoboxen“ war eine visuelle Darstellung des Wurzelapparates im Boden möglich, in der das Wachstumsverhalten von Haupt- und Feinwurzeln evident wurde. Bereits ein Referenzversuch ([www.hydrop.at](http://www.hydrop.at), Stand Oktober 2014) mit einem ähnlichen Versuchsaufbau wurde von der Firma Hydrip® in Zusammenarbeit mit der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt. Jedoch wurde dort nur die Wasserverteilung und -versickerung untersucht und visuell dargestellt. Die Auswirkungen von Pflanzen und vor allem deren Wurzelsystem wurde dabei vernachlässigt ([www.hydrop.at](http://www.hydrop.at), Stand September.2013).

#### 3.4.1 Aufbau der Versuchsgefäße

Rhizoboxen bestehen aus einem schmalen, rechteckigen Korpus, der an der einen Seite mit einer abnehmbaren Plexiglasscheibe verschlossen ist. Der Boden dieses Gefäßes ist mit zahlreichen Löchern versehen, damit das Abtropfen des überschüssigen Bewässerungswassers gewährleistet wird und keine Staunässe entstehen kann. Die Abb. 8 zeigt den schematischen Aufbau einer Rhizobox und seine Maße (25 x 50 x 5 cm).

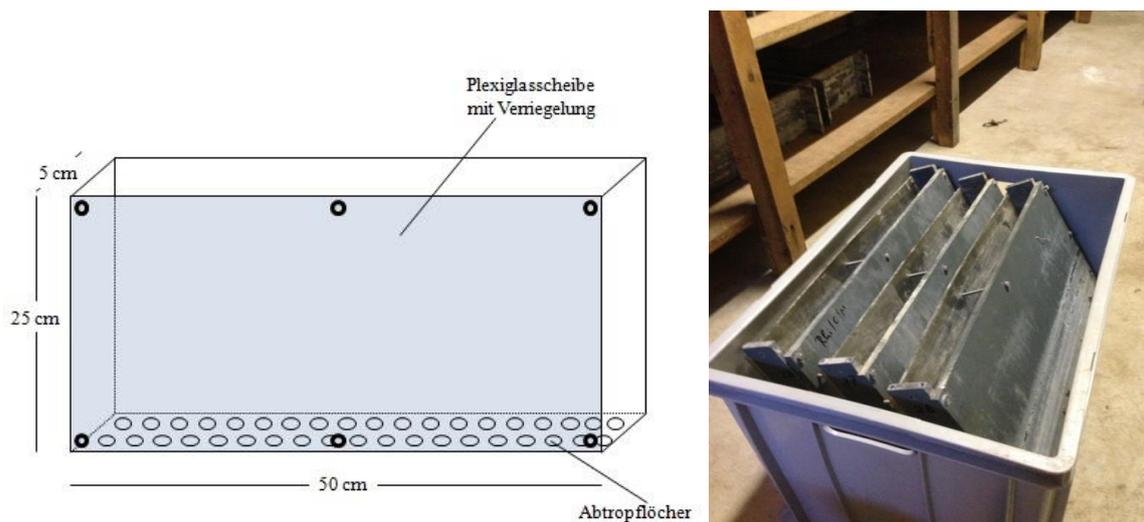


Abb. 8: Aufbau einer Rhizobox; links: schematische Darstellung einer Box; rechts: Position der Rhizoboxen im Versuch

Um ein optimales Wachstum der Wurzel entlang der Scheibe zu gewährleisten, mussten die Boxen während des gesamten Versuchs in schräg liegender Position auf dem Schauglas verweilen (siehe Abb. 8).

### **3.4.2 Versuchsdurchführung**

Die Versuchsgefäße wurden mit 675 g Substrat (Uedorfer Gemisch) gefüllt und anschließend wurden jeweils zwei Maiskörner (*Zea mays*) pro Box gepflanzt. Angelegt wurden zum einen eine Variante mit einem simulierten Tropfer und einem Hilfsstoffdepot aus einem Alginit-Sandgemisch, zum anderen eine Kontrolle mit Überkopfbewässerung. Von jeder Variante wurden jeweils zwei Rhizoboxen befüllt und bepflanzt. Um das unterschiedliche Wurzelverhalten besser deutlich zu machen, wurden die Maiskörner an den beiden Rändern der Boxen abgelegt, die Tropfeinheit jedoch mittig. Die Bewässerung erfolgte separat dosiert mit einer Schlauchpumpe (ISMATEC<sup>®</sup>, Typ Ecoline VC-MS/CA 8-6). Die Plexiglasscheibe wurde während des gesamten Versuchs mit einer lichtundurchlässigen Moosgummiplatte abgedeckt, damit ein Algenwachstum verhindert werden konnte.

## **3.5 Wurzeleinwuchstest**

### **3.5.1 Versuchsdesign/-durchführung**

In diesem Versuch wurde ausschließlich das Wuchsverhalten von Pflanzenwurzeln auf unterirdisch verlegte Tropfschläuche untersucht. Das Eindringen der Wurzeln in die Austrittslöcher der Tropfer lag im Fokus dieser Untersuchung. Es wurden zwei verschiedene Tropferfabrikate (Eurodrip<sup>®</sup> und Netafim<sup>®</sup>, siehe Kap. 3.5.2) mit und ohne Bodenhilfsstoffdepot (Alginit) getestet, die außerdem über zwei unterschiedlich lange Zeiträume im Boden verweilten (12 und 20 Wochen). Es wurden von allen Varianten jeweils acht Wiederholungen (= 32 Töpfe) angelegt.

Wie der in Kap. 3.2.4 beschriebene Versuch wurde der Einwuchstest ebenfalls in Kick-Brauckmann-Gefäßen (STOMA GmbH, Siegburg) durchgeführt (Abb. 9). Als Versuchssubstrat wurde wiederum das Uedorfer Gemisch verwendet. Dieses wurde vor dem Befüllen der Töpfe mit den Grundnährstoffen (vgl. Kap. 3.2.1) versorgt.

Pro Versuchstopf wurde zuerst eine 5 cm dünne Schicht des Bodensubstrates eingefüllt, auf der ein Tropfer samt Verbindungseinheit zur oberirdischen Hauptleitung installiert wurde. Je nach Variante wurde zusätzlich das Bodenhilfsstoffdepot um die Tropfeinheit gelegt.

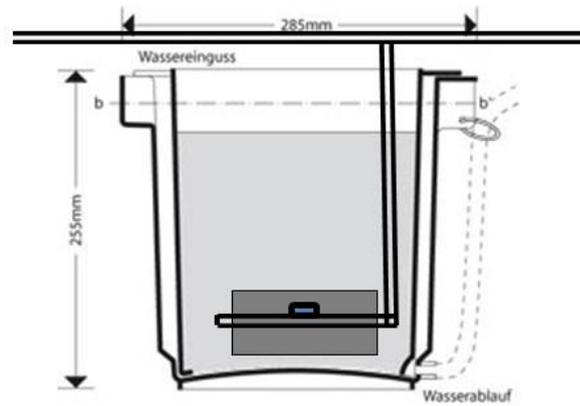


Abb. 9: Schematische Darstellung eines Kick-Brauckmann-Gefäßes; Positionierung des Tropfers mit Bodenhilfsstoffdepot

Anschließend wurde jeder Topf bis ca. 3 cm unterhalb der Gefäßoberkante mit Bodengemisch befüllt. Darauffolgend wurde in alle Gefäße *Lolium multiflorum* (Welsches Weidelgras) gesät. In Form von Stoßbewässerung wurden gezielt Trocken-Impulse erzeugt, um den Wuchs der Wurzeln zur Wasserquelle zu beschleunigen. Bei dieser Art der Wasserversorgung wurden die Versuchstöpfe zuerst übersättigt mit Wasser gegossen und anschließend bis zur sichtbaren Welke der Pflanzen nicht mehr versorgt.

Aufgrund der unterschiedlichen Durchflussmengen (Eurodrip GR: 2 l/h und Netafim UniRam AS: 1,6 l/h) der zwei Tropfertypen mussten zwei separate Zuleitungen samt eigener Zeitschaltuhr (Netafim AuqaPro) installiert werden. Eine identische Bewässerung beider Systeme konnte so gewährleistet werden. Die Bewässerungsdauer/-menge musste den klimatischen Bedingungen im Gewächshaus ständig angepasst werden. In der Etablierungsphase der Pflanzen und deren Wurzeln wurde ausschließlich oberirdisch gegossen, um ein optimales Auslaufen und Wachstum zu garantieren. Um das Einwachsen der Wurzeln zu begünstigen, wurde nach einiger Zeit die Bewässerung auf Stoßbewässerung umgestellt. Dies bedeutete, dass die Töpfe auf 80 % ihrer WHK eingestellt wurden. Erst bei 30 % ihrer WHK wurde wieder auf 80 % bewässert. Die Menge an Wasser ließ sich mittels Waage errechnen.

Das Augenmerk dieses Versuchs war auf das vermutete Einwachsen der Pflanzenwurzeln in die Tropfer gerichtet. Auf eine Bestimmung der oberirdisch produzierten Pflanzenmasse wurde verzichtet, da sie sich augenscheinlich nicht unterschieden. Ein Pflegeschnitt alle 4-6 Wochen wurde durchgeführt. Anschließend wurde mit 1 g Ferty3 pro Topf nachgedüngt, um die Nährstoffabfuhr zu kompensieren.

Wie bereits oben beschrieben, wurde die erste Versuchsreihe bereits nach 12 Wochen, die anderen nach ungefähr 20 Wochen aus den Töpfen entfernt. Zur Bonitur des Wurzeleinwuchsverhaltens wurden die Tropfereinheiten anschließend vorsichtig gesäubert und mit einem Skalpell geöffnet.

### 3.5.2 Aufbau der verwendeten Tropfschläuche

In diesem Versuch wurden handelsübliche Tropfschläuche der Firma Eurodrip® (Abb. 10) und Netafim® getestet. Die beiden Fabrikate unterscheiden sich dabei im Aufbau der in den Schlauch integrierten Tropfereinheit, die bei beiden einen Abstand von 20 cm besaßen. Der wesentliche Unterschied war der Schutz vor Wurzeleinwuchs, der nur im Netafim-Tropfer vorhanden war.



Abb. 10: Aufbau eines Tropfers der Firma Eurodrip® (Typ GR); Innenliegendes Druckkompensationslabyrinth für die gleichmäßige Wasserausbringung

Wie die Abb. 10 zeigt, besteht die Tropfereinheit beim Eurodrip GR aus einem Röhrchen, das durch ein integriertes Labyrinth dieselbe Durchflussmenge aller Tropfer garantiert. Es gibt keine Wurzelbarriere wie bei Netafim (siehe Abb. 11).

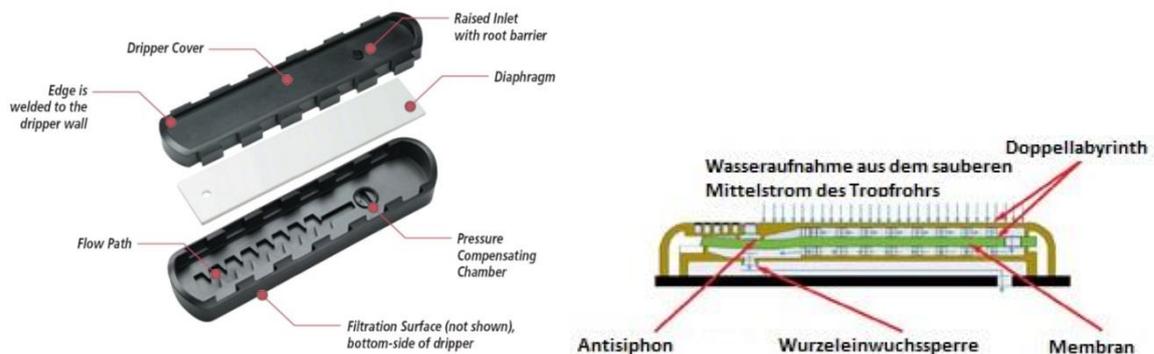


Abb. 11: Aufbau eines Tropfers der Firma Netafim® (Typ UniRam AS); links: Bauteile des Tropfers; rechts: schematischer Längsschnitt durch einen Tropfer mit Fließrichtung des Wassers

In der schematischen Zeichnung (Abb. 11) wird das Funktionsprinzip des Tropfers deutlich. Wie zu erkennen, ist ein einzelne Tropfereinheit ein komplexes System. Die Wasseraufnahme erfolgt zunächst aus dem Mittelstrom des Tropfrohrs. Das

Doppellabyrinth steuert die Fließgeschwindigkeit (Durchflussrate) und die Membran soll durch Schwingungen für Verwirbelungen im Tropfer sorgen, damit Fremdstoffe (z.B. Sankörner, Wurzelspitzen etc.) herausgespült werden. In der Vorkammer befindet sich eine Wurzeleinwuchssperre. Laut Hersteller dürfen Wurzeln dort hineinwachsen, werden dann aber durch Plastiklippen an das Weiterwachsen in die Kammer mit dem Doppellabyrinth gehindert.

### 3.5.3 Auswertung

Die Tropfer wurden je nach Bauart und Beschaffenheit mit einem Längs- und/oder Querschnitt vorsichtig geöffnet. Mit Hilfe eines digitalen Kameramikroskops (Firma dnt<sup>®</sup>, Typ DigiMicro Profi) wurden die aufgeschnittenen Tropfer vergrößert digital erfasst und ausgewertet.

Um den Grad des Wurzeleinwuchses zu quantifizieren, wurde ein eigenes Bewertungsschema ausgearbeitet. Dieses wurde anhand der visuellen Bonitur durchgeführt und mit Hilfe der Bewertungsskala der Tab. 11 durchgeführt.

Tab. 11: Bewertungsskala und –kriterien für die Beurteilung der Wurzeleinwuchsstärke

---

#### **Skala Bewertungskriterium**

---

- |   |   |
|---|---|
| 0 | kein Einwuchs                               |
| 1 | Wurzeleintritt in das Tropfloch             |
| 2 | vereinzelte Wurzeln im Tropfer (Haarwurzel) |
| 3 | Hauptwurzel mit Verzweigungen               |
| 4 | dichtes Wurzelwerk im Tropfer               |
| 5 | Wurzelwachstum bis in den Tropfschlauch     |
- 

Nach den in Tab. 11 aufgelisteten Kriterien wurde die Stärke des Wurzeleinwuchses bewertet. Hierzu wurden alle verlegten Tropfereinheiten vorsichtig aufgetrennt.

Nach dem Herauslösen der Bodenkerne der Versuchsgefäße konnte ein sichtbarer Unterschied in der Durchfeuchtung festgestellt werden, obwohl alle Töpfe zuvor dieselbe Menge an Gießwasser erhalten haben. Um die Funktionalität der Tropfer unter den gegebenen Umständen, d.h. ohne einen analytischen Materialtest durchzuführen, zu untersuchen, wurden die Gefäße und dessen Bewässerungseinheiten auf zwei verschiedenen Wegen analysiert. Die Funktionalität wurde zum einen mit Hilfe einer übersättigten Bewässerung, d.h., dass bei allen Töpfen eine Überschusswassermenge ablief, überprüft.

Dabei war zwar eine unterschiedliche Geschwindigkeit des Wasseraustrittes zu verzeichnen, jedoch mindestens eine eingeschränkte Funktionalität der Tropfer gewährleistet. Zum anderen wurden die Töpfe einige Tage vor dem Herauslösen der Bodenkerne sowie Tropfereinheiten mit gleicher Bewässerungsmenge gegossen.

### 3.6 Gewächshausversuch in Herongen: Spargel

In diesem Versuch wurde das „Hydrip“-System (Kombination aus unterirdischer Tropfbewässerung und Bodenhilfsstoff) mit einer konventionellen oberirdischen Tropfbewässerung (ohne Bodenhilfsstoff) verglichen. Dabei wurden jeweils zwei Bewässerungsmengen (100 % und 50 % der betriebsüblichen Menge) eingestellt, wodurch sich vier Bewässerungsvarianten ergaben. Die zwei unterschiedlichen Bewässerungsmengen sollten den Effekt des Alginitz auf Versickerung und Wasserhaltevermögen verstärkt zeigen. Untersucht wurden jeweils vier Wiederholungen a zehn Pflanzen pro Variante (siehe Abb. 12). Insgesamt wurden vier Reihen pro Variante angelegt. Um Randbedingungen zu minimieren, wurden nur die mittleren Spargelreihen beprobt.

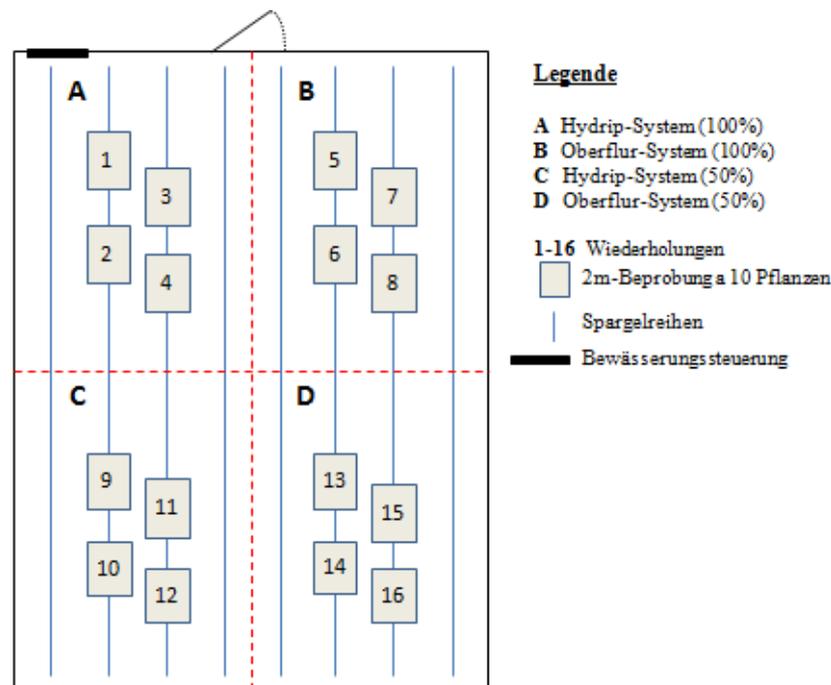


Abb. 12: Versuchsplan des Gewächshauses

#### 3.6.1 Anlegen der Versuchspartzellen

Der Spargel ist eine mehrjährige Kulturpflanze, die erst ab dem dritten Anbaujahr geerntet werden kann. Der Anbau findet in einem Damm statt, jedoch die Auspflanzung kann

entweder in Form von Jungpflanzen oder Rhizomen in einem Pflanzgraben erfolgen. Da es sich um einen Nachbau von Spargel in diesem Treibhaus, in dem vorher bereits Spargel in 4 Hochbeeten kultiviert wurde, handelte, wurde eine Pflanzung von Jungpflanzen bevorzugt. Der Grund dafür war ein erhöhtes Befallsrisiko von *Fusarium*, das aus dem Anbau Spargel nach Spargel resultiert (ALDENHOFF 2004; BRÜCKNER ET AL. 2008). Durch die befallenen Wurzelreste der Vorfrucht wären Rhizome anfälliger als Jungpflanzen, da sie zum Beispiel durch das mechanische Verlegen Verletzungen bekommen und so die Anfälligkeit von Pilzbefall erhöhen könnten.

Um den Boden für die Pflanzung der Spargelpflanzen vorzubereiten, mussten für die beiden unterschiedlichen Varianten (unter- und oberirdisches Bewässerungssystem) zwei unterschiedliche Maschinen verwendet werden. Bei der „Hydrip“-Variante wurde mit Hilfe einer modifizierten Rillenfräse (Abb. 14, Firma Dröppelmann Agrartechnik GmbH, Geldern) ein ca. 40 cm tiefer Graben gezogen, in dem vor der Pflanzung der Tropfschlauch samt 2 kg Bodenhilfsstoff, in diesem Versuch ausschließlich Alginit, pro laufendem Meter ausgebracht wurde. Der Schlauch wurde dabei von dem Hilfsstoff idealerweise ummantelt (siehe Abb. 13). Der Tropfschlauch wurde auf ca. 30 cm Tiefe verlegt. Oberhalb der Schicht aus Boden und Alginit wurden die Jungpflanzen eingepflanzt. Eine Einebnung und Dammbildung erfolgte in den folgenden Anbaujahren.

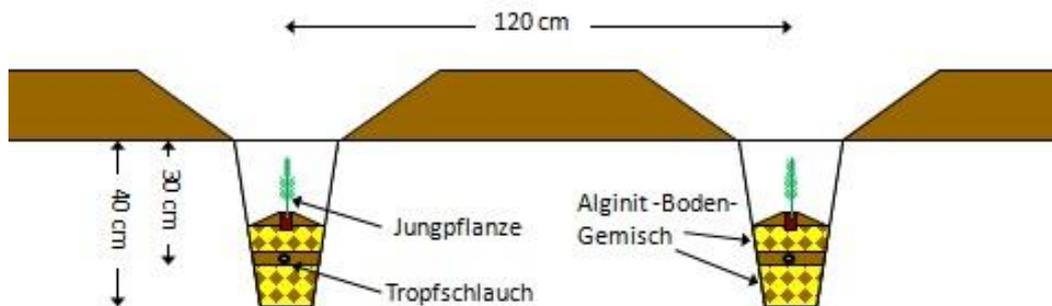


Abb. 13: Schematischer Querschnitt der Pflanzreihen der „Hydrip“-Variante

Anders verlief die Pflanzung des Spargels in der konventionell oberirdisch bewässerten Variante. Hier wurde mit Hilfe eines Pfluges ca. 20 cm tiefe und 50 cm breite Furchen in den Boden gezogen (siehe Abb. 14, rechts), in die anschließend die Spargelpflanzen gesetzt und die Tropfschläuche verlegt wurden.



Abb. 14: Vergleich der beiden Verlegetechniken; links oben: Rotorfräse bei der „Hydrip“-Variante; rechts oben: Pflug bei der oberirdisch-bewässerten Variante

Für die passenden Pflanzlöcher der Jungpflanzen wurde ein Pflanzlochstecher verwendet. Bei allen Varianten betrug der Pflanzenabstand in der Reihe 20 cm, der zugleich dem Tropflochabstand der verwendeten Schläuche entsprach.

Im ersten Anbaujahr wiesen einige Pflanzen der „Hydrip“-Variante einen „Sonnenbrand“ auf (siehe Abb. 15). Betroffen war ausschließlich die äußere Reihe, die zur Sonnenseite ausgerichtet war. Aufgrund der Seitenfenster wurde die Lichteinstrahlung verstärkt und verursachte so leichte Verbrennungen. Mit Hilfe einer Kalksuspension wurde die komplette Gewächshausseite gleichmäßig benetzt (siehe Abb. 15), um die intensivere Lichteinstrahlung zu brechen. Im darauffolgenden Jahr konnten derartige Verletzungen an den Pflanzen nicht mehr festgestellt werden. Inwieweit diese Schädigungen Auswirkungen auf den Ertrag im dritten Jahr (Stangenspargelernte) hatten, wurde in diesem Versuch nicht weiter untersucht.



Abb. 15: Sonnenbrand an Spargelpflanzen und Gegenmaßnahme; links: betroffene Spargelreihe im Gewächshaus; rechts: mit Kalk behandelte Fensterseite des Gewächshauses (Südseite)

### **3.6.2 Steuerung der Bewässerung**

Die Bewässerung erfolgte mit einer semi-automatischen Steuerung, d.h. das Bewässerungsintervall und der Bewässerungszeitpunkt pro Variante musste den gegebenen Bedingungen im Gewächshaus (Temperaturunterschiede im Gewächshaus) per Hand angepasst werden. Alle vier Varianten konnten mit dem Bewässerungscomputer separat angesteuert werden. Dies musste aus zwei verschiedenen Gründen geschehen. Einerseits hatten die unter- und oberirdischen Tropfschläuche unterschiedliche Durchflussraten bei demselben Wasserdruck. Die Tropfschläuche der Firma Netafim® (Typ UniRam AS) hatten einen Wasserdurchfluss von 8 mm/h, die der Firma Eurodrip® (Typ T-Tape) von 12 mm/h pro Tropfloch. Andererseits sollten in diesem Versuch jeweils zwei unterschiedliche Bewässerungsmengen (100 % und 50 % der betriebsüblichen Menge) miteinander verglichen werden. Die „betriebsübliche Menge“ entsprach der Bewässerungsmenge, die der Spargelanbauer zum Bewässerungszeitraum für notwendig hielt. Im Bewässerungscomputer musste aus diesem Grund immer wieder das Zeitintervall der Bewässerung angepasst werden. Zur Kontrolle der tatsächlichen Bewässerungsmenge aller vier Varianten wurde jeweils ein separater Wasserzähler verbaut.

Als Gießwasser wurde Grundwasser verwendet, das mit Hilfe einer Elektropumpe aus einem vorhandenen Brunnen in das Gewächshaus befördert wurde. Die Pumpe besaß eine separate Steuereinheit und musste deswegen vor jedem Bewässerungsdurchgang per Hand eingeschaltet werden. Dies führte dazu, dass das Bewässerungsprogramm nicht wie ursprünglich geplant über eine Zeitschaltung, sondern von Hand angeschaltet werden musste.

Zusätzlich zu der installierten Bewässerungstechnik wurde die vorhandene Sprinklerberegnung im Treibhaus weiterhin im betriebsfähigen Zustand aufrechterhalten. Sie war vor allem im Etablierungszeitraum der Pflanzen, in dem sie ihr Wurzelsystem aufbauen, zur Wasserversorgung notwendig. Aber auch zur Düngereinbringung kam sie zwischenzeitlich immer wieder zum Einsatz, um ein optimales Auflösen und Einwaschen des Düngers zu gewährleisten. Um auch diesen Wassereinsatz zu kontrollieren, wurde an der Hauptzulaufleitung vor dem Gewächshaus eine zusätzliche Wasseruhr angebracht.

### **3.6.3 Überwachung der Bodenfeuchte**

Zur Kontrolle der Bodenfeuchte wurden unterschiedliche Messverfahren angewendet, um optimale Bewässerungszeitpunkte festzulegen. Hierzu mussten auch die tieferen Bodenschichten auf Feuchtigkeit untersucht werden.

### 3.6.3.1 Tensiometer

Im ersten Anbaujahr wurde mit Hilfe von fest installierten Tensiometern der Wassergehalt des Bodens kontrolliert (Abb. 16). Ein sogenanntes Tensiometer misst die Wasserspannung des Bodens, d. h., die Kraft des Bodens Wasser zu halten, und wird in hPa angegeben. Der optimale Bereich liegt dabei zwischen -40 und -300 hPa. Da es sich dabei um einen Unterdruck handelt, sinkt der Wert mit Abtrocknen des Bodens. Ein Tensiometer wird vor dem Einbau mit Wasser gefüllt. Es verfügt am Ende über eine wasserdurchlässige Keramikspitze (Tonzelle), die samt Rohr in den Boden eingebracht wird. Beim Abtrocknen des Bodens wird dem Tensiometer Wasser entzogen, was einen Unterdruck erzeugt, der mit einem Manometer gemessen wird. Beim Bewässern verläuft der Prozess entgegengesetzt. Das Wasser wird durch die Tonzelle wieder in das Tensiometer gedrückt, der Zeiger des Manometers bewegt sich in Richtung 0 hPa. Mit den verwendeten Tensiometern können Saugspannungen bis -600 mbar gemessen werden (Abb. 16).

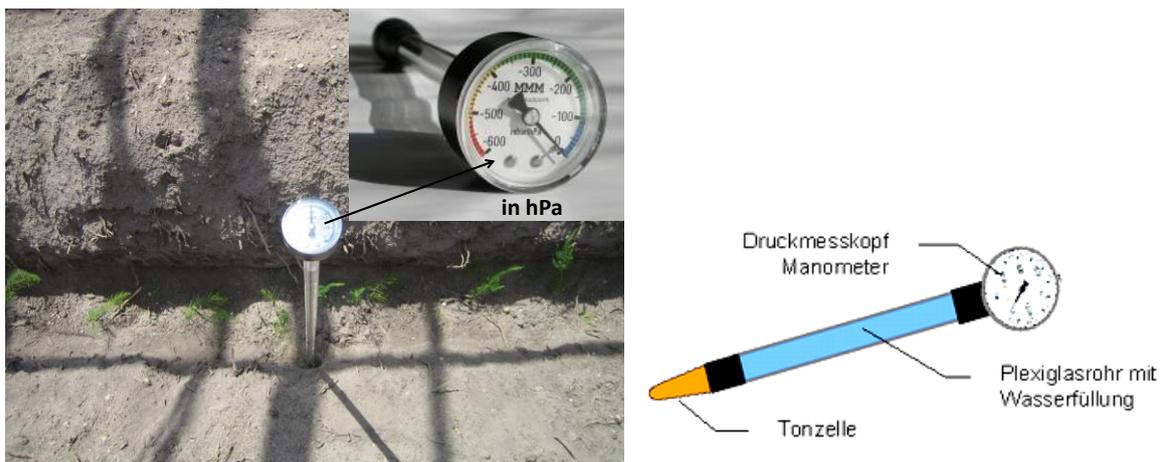


Abb. 16: Aufbau und Funktion eines Tensiometers; links: eingebautes Tensiometer mit mechanischem Manometer; rechts: schematischer Aufbau eines Tensiometers

Bei der Installation eines Tensiometers ist darauf zu achten, dass ein optimaler Verbund zwischen Boden und Tonzelle/Glasrohr gewährleistet ist. Dies wird erzielt, indem das Messgerät eingeschlämmt wird und anschließend nicht mehr versetzt wird. Mit Hilfe eines entsprechenden Bohrstocks wird vorher ein passendes Loch ausgehoben und anschließend mit „Bodenschlämme“ gefüllt. Die Messeinheit sollte möglichst direkt danach langsam in das Bohrloch eingeführt werden. Die einzelnen Schritte der Installation sind der Abb. 17 zu entnehmen.

Die Position sollte möglichst nah an den Pflanzen und der Bewässerungseinheit erfolgen.



Abb. 17: Installation eines Tensiometers; links: Installationsloch mit Bohrstock ausstechen; mitte: Einfüllen von Bodenschlämme; rechts: langsames Einführen des Tensiometers

### 3.6.3.2 TDR-Messgerät

Im zweiten Anbaujahr wurde eine mobile TDR-Sonde („Time Domain Reflectometry“) zur Bestimmung des Wassergehaltes unterschiedlicher Bodenschichten verwendet. Das Gerät verfügt über sechs Messsensoren, die in den Tiefen 10, 20, 30, 40, 60 und 100 cm die Bodenfeuchte messen. Um die Messsonde in den Boden einführen zu können, mussten entsprechende Glasfaserrohre in den Boden eingelassen werden.

Ziel dieser Messung war die Ermittlung der Wasserverteilung der unterschiedlichen Bodenschichten darzustellen. Für die Ermittlung des Bodenwasserprofils aus den gewonnenen Daten wurden pro Variante jeweils zwei Wiederholungen a drei Messpunkte (Glasfaserrohre) angelegt. In der Abb. 18 wird die Positionierung der drei Rohre grafisch dargestellt. Das erste Glasfaserrohr (a) wurde direkt an der Pflanzreihe und dem Tropfschlauch gelegt. Von dem Ausgangspunkt wurden das zweite in 20 cm (b) und das dritte in 40 cm (c) Abstand gesetzt. Mit dieser Messmethode konnte ein flächiges Wasserprofil, also die Verteilung in vertikaler und horizontaler Richtung, bestimmt werden.

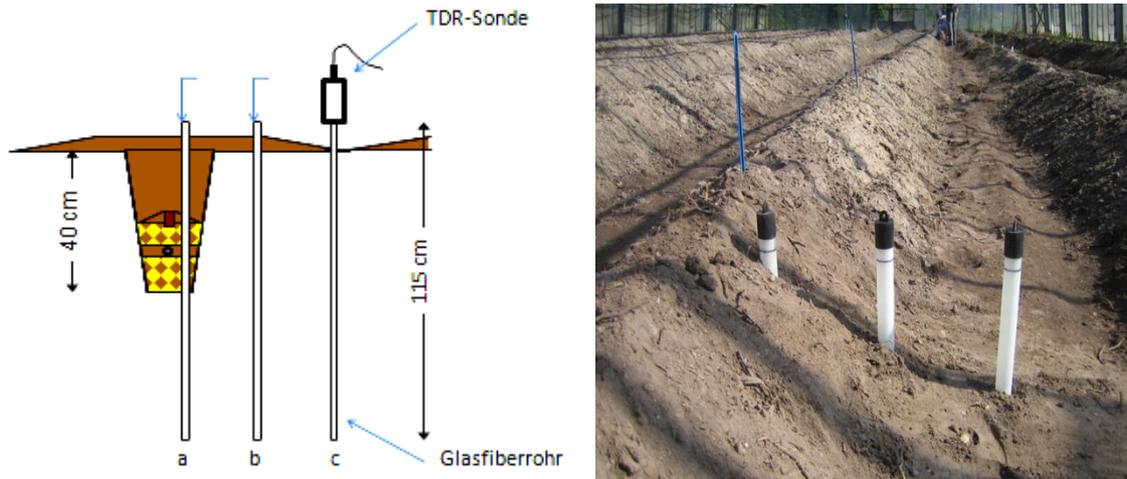


Abb. 18: Positionierung der Glasfaserrohre pro Variante und Wiederholung; links: schematische Darstellung; rechts: eingebaute Glasfaserrohre; Abstand zwischen den Rohren betrug 20 cm

### 3.6.4 Pflanzenbonitur und Ertragshebung

Mit Hilfe einer Bonitur wurden die vier Varianten miteinander verglichen. Hierzu wurden, wie in Abb. 12 sichtbar, jeweils vier Wiederholungen pro Variante mit jeweils zehn Pflanzen festgelegt, in der jede zweite Pflanze beprobt wurde. Zusammengefasst wurden jeweils fünf Pflanzen pro Wiederholung untersucht. Verglichen wurden dabei zum einen die Zahl der Triebe pro Pflanze und zum anderen die Länge des höchsten Triebes.

Zudem wurde ganzflächig der Krankheitsdruck der Pflanzen optisch begutachtet.

Im dritten Anbaujahr und somit dem ersten Jahr der Spargelernte wurde der Ertrag in kg an weißem Stangenspargel der beiden Varianten ermittelt. Es wurde nur der Ertrag zwischen den beiden Bewässerungsarten erhoben und keine Differenzierung zwischen der Bewässerungsmenge gemacht. Eine Beurteilung der Qualität des Stangenspargels wurde ebenfalls nicht durchgeführt.

### 3.7 Freilandversuch im Weinbau: Almeirim, Portugal

In einem bereits bestehenden Weinbau-Versuch des portugiesischen Beratungsinstitutes APAS (Associação dos Produtores Agrícolas da Sobrena) wurde eine zusätzliche Versuchsvariante mit einer Kombination aus unterirdischer Tropfbewässerung und Bodenhilfsstoffen integriert. Der Versuch befand sich auf einer 15 Jahre alten Weinanbaufläche, die mit der Sorte Alicante Bouschet (rote Traube) bepflanzt war, in Almeirim im Westen Portugals. Ursprünglich wurde die Fläche ausschließlich mit oberirdischen Tropfschläuchen bewässert. In diesem Versuch wurde unter den hier pflanzenbaulich schweren Verhältnissen (sehr sandiger Boden und sehr heißes Klima mit wenig Niederschlag) das „Hydrip“-System auf seinen Einfluss auf die Biomasse-Produktion, den Ertrag und den wassereinsparenden Effekt über eine Dauer von 3 Vegetationsperioden untersucht.



Abb. 19: Versuchsanlage in Almeirim, Portugal; links: Versuchsdesign mit den einzelnen Parzellen; rechts: Versuchsfeld mit Weinreben

Der Versuchsplans (siehe Abb. 19) zeigt die Aufteilung der verschiedenen Versuchsvarianten. Für jede Variante wurden drei Parzellen a drei Rebenreihen angelegt. Im Verlaufe des Versuchs wurden ausschließlich die mittleren Reihen der jeweiligen Parzellen untersucht, um Randeffekte möglichst zu minimieren bzw. ganz zu vermeiden.

In der Tab. 12 sind die unterschiedlichen Versuchsvarianten mit ihren jeweiligen Behandlungen und ihrer Bewässerungsart, d. h., ob ober- oder unterirdisch bewässert wurde, aufgelistet wurde. Ergänzend werden noch die unterschiedlich verwendeten Bodenhilfsstoffe mit der dazugehörigen Aufwandmenge angegeben. Die Bewässerungsmengen der unterschiedlichen Varianten richteten sich nach der Kontrollvariante. Die Angabe in Prozent gibt die prozentuale Menge an Bewässerungswasser zur Kontrolle an.

Tab. 12: Auflistung der Versuchsvarianten mit zugehöriger Behandlung, Bewässerungsart und Aufwandmengen

Variante	Behandlungen	Tropfschläuche:	Bewässerungsart	BHS <sup>a</sup>	MSA <sup>b</sup>
1	30 % <sup>c</sup> + BHS			Betasoil <sup>1</sup>	-
2	40 % + BHS		unterirdisch	Betasoil <sup>1</sup>	-
3	50 % + BHS	UNIRAM 16mm AS; 2,3 l/h		Betasoil <sup>1</sup>	-
4	30 %	2 Schläuche/Reihe	unterirdisch	-	-
5	30 % + BHS + MSA		unterirdisch	Alginit <sup>2</sup>	Blakjak <sup>3</sup>
Kontrolle	Anbauer Wissen	16mm 3,5 l/h 1 Schlauch/Reihe	oberirdisch	-	-

<sup>a</sup> Bodenhilfsstoff fest           <sup>1</sup> 150 g/m  
<sup>b</sup> Bodenhilfsstoff flüssig       <sup>2</sup> 1000 g/m  
<sup>c</sup> der Kontrollvariante           <sup>3</sup> 0,5 ml/m

Die Varianten 1-4 und die Kontrolle wurden bereits im 1. Versuchsjahr angelegt, die Variante 5 mit einer Kombination aus einem festen und einem flüssigen Bodenhilfsstoff wurde nachträglich etabliert. Dabei handelte es sich um Alginit<sup>®</sup> mit einer Aufwandmenge von 1 kg pro laufenden Meter und Blakjak<sup>®</sup> SC mit einer Menge von 0,5 ml pro laufenden Meter. Vor dem Verlegen der Tropfschläuche in 30 cm Tiefe und 50 cm Abstand zur Reihe wurde ein entsprechender Graben mit Hilfe eines Minibaggers freigelegt (siehe Abb. 20). Auf dem ausgelegten Bewässerungsschlauch wurde dann zuerst das Alginit<sup>®</sup> ausgebracht und mit dem Boden vermischt. Anschließend erfolgte die Applikation des flüssigen Bodenhilfsstoffes mit einer Gießkanne. Nach dem Antrocknen der Suspension wurde das Alginit<sup>®</sup>-Bodengemisch samt Blakjak<sup>®</sup> SC vermischt und der Graben per Hand geschlossen.

Die Enden der Tropfschläuche konnten nun mit der Bewässerungssteuerung gekoppelt werden.



Abb. 20: Installation der letzten Versuchsvariante; links: Öffnen der Gräben für die Tropfschlauchbewässerung und des Glasfibrerrohrs; rechts: Installation der Tropfschläuche, Ausbringen und Mischen der festen und flüssigen Bodenhilfsstoffe

In dieser Arbeit wurden ausschließlich die Varianten „30 % mit Alginit (+ Blakjak)“ und „30 % ohne Alginit“ mit der Kontrollvariante verglichen.

### 3.7.1 Überwachung der Bodenfeuchte: TDR-Messgerät

Zusammen mit dem Beratungsinstitut wurde ähnlich wie im Spargelversuch (vgl. Kap. 3.6.3) auch in diesem Freilandversuch die Bodenfeuchte mit Hilfe eines mobilen TDR-Messgerätes (Firma Sentek™ technologies, Typ Diviner 2000) überwacht. Anders als bei dem Gerät im Spargelversuch musste hier die Messsonde in einem Zug in das Rohr eingeführt bzw. wieder heraus gezogen werden. Bei diesem Vorgang misst die Sonde und das Gerät speichert die tiefenabhängigen Feuchtwerte (im 10 cm Abstand). Zur Verwendung des mobilen Messgerätes wurden ebenfalls entsprechende Rohre (siehe Abb. 20, roter Pfeil) in den Boden eingebracht. Die Messtiefe der Sonde betrug bis 100 cm.

Aufgrund der unterschiedlichen Bewässerungsarten wurden bei der Kontrollvariante (oberirdisch) die Glasfibrerrohre senkrecht und möglichst nah an die Rebenreihe installiert, wie die Abb. 21 sehr deutlich zeigt. Anders war es bei den anderen Versuchsvarianten mit unterirdischer Bewässerung. Da die Tropfschläuche in 30 cm Tiefe und in einem 50 cm weiten Abstand zur Reihe eingebaut wurden, wurden die Messrohre diagonal in den Boden eingebracht. Dies ist in der grafischen Darstellung (siehe Abb. 21) sehr gut zu erkennen.

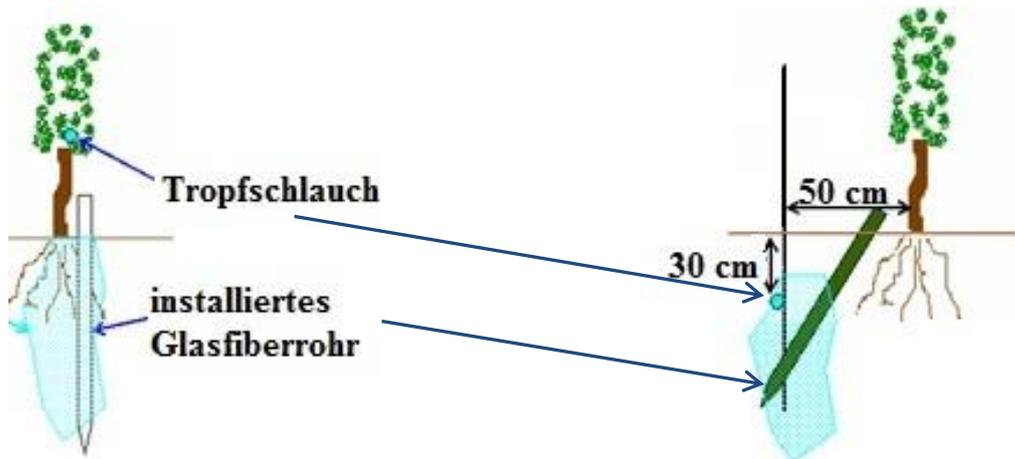


Abb. 21: Installation der Glasfaserrohre zur TDR-Messung; links: installiertes Rohr (weiß) in einer Kontrollvariante; rechts: diagonale Platzierung der Rohre (grün) in einer Versuchsvariante (unterirdisch bewässert)

### 3.7.2 Ermittlung der Qualität und Quantität der Weintrauben/-beeren

Die Ertrags- und Qualitätsanalyse wurde vom portugiesischen Projektpartner, dem APAS Institut (Associação dos Produtores Agrícolas da Sobrena, Portugal), durchgeführt. Hierzu wurden pro Wiederholung einer Variante von zwei Trauben jeweils vier Beeren gesammelt. Das ergab für drei Wiederholungen 96 Beeren, die für die einzelnen Untersuchungen ausgewählt wurden. Folgende Parameter wurden anschließend analysiert: voraussichtlicher Alkoholgehalt (Refraktometer), pH-Wert (Potentiometer), Säuregehalt (Titration) und Ertrag (Waage).

## 4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Mit Hilfe der Analysen im Labor und den unterschiedlichen Pflanzenversuchen sollten in erster Linie die wasserspeichernden Eigenschaften von festen Bodenhilfsstoffen untersucht werden. Laut den Herstellern (vgl. Kap. 2.2.6.1) besitzen alle Produkte diese Funktion bereits mit der von Ihnen empfohlenen Aufwandmenge. Die Eignung der untersuchten Stoffe für das „Hydrip“-Bewässerungssystem wurde ausschließlich mit Hilfe der Versuche mit Pflanzen durchgeführt.

### 4.1 Modifizierte Methode zur Bestimmung der Wasserhaltekapazität

Um die Behauptung, feste Bodenhilfsstoffe steigern die WHK von unterschiedlichen Böden und Bodengemischen, zu prüfen, wurden die ausgewählten Substrate aus der Tab. 3 mit Hilfe einer modifizierten Methode zuerst einmal auf diese Eigenschaft untersucht.

Die in dieser Arbeit verwendete Methode zur Bestimmung der Wasserhaltekapazität orientierte sich an der Vorschrift des „Methodenbuchs zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate“ der Bundegütegemeinschaft Kompost e.V. (2006). Wie bereits in Kap. 3.1.1 erwähnt, wurde die vorgeschriebene Methode in den folgenden Punkten verändert:

#### *1. Versuchsgefäße*

Anstelle von Metallstandzylindern ( $V = 200$  ml oder  $250$  ml) mit einem feinmaschigen Siebboden, sogenannten „Mitscherlichzylindern“, wurde die WHK-Analyse in Gefrierdosen ( $V = 1200$  ml) durchgeführt, die im Dosenboden mit jeweils derselben Anzahl an Löchern ( $\varnothing = 8$  mm) versehen waren. In einem Vorversuch hatte die Verwendung von Metallzylindern gezeigt, dass bereits das Bedecken des Siebbodens mit einem Papierfließ sich als eine schwierige und zeitaufwendige Aufgabe herausstellte. Der Grund dafür war der sehr kleine Durchmesser von  $40$  mm und die Höhe von  $160$  mm des Zylinders. Auch ein Großteil der ausgewählten festen Bodenhilfsstoffe (siehe Tab. 3) war nicht für diese Gefäße geeignet. Die Substrate mit sehr geringer Dichte wie Perlite oder Kokosfaser schwammen oftmals stark auf. Andere Stoffe wie Geohumus oder das Alginit quollen so stark, dass sie über den Rand der Gefäße hinaustraten. Des Weiteren sorgten insbesondere die mineralischen Bodenhilfsstoffe für Probleme beim Reinigen der Mitscherlichzylinder nach der Versuchsdurchführung. Angetrocknete Substratrückstände klebten an Siebboden und Zylinderinnenwand und konnten nur mühevoll entfernt werden. Einziger Nachteil der Gefrierdosen war die 5-fache Menge an Versuchssubstrat gegenüber den Zylindern.

## *2. Probenmenge*

Bei der Betrachtung der ursprünglichen Methode wurde weder ein Substratvolumen noch eine Probenmenge angegeben. Die tatsächlich eingewogene Menge wird später in die Berechnung der Wasserhaltekapazität einbezogen. Aufgrund der Auswahl an sehr unterschiedlichen Bodenhilfsstoffen wurde in der verwendeten modifizierten Methode eine definierte Einwaage verwendet. Diese wurde so gewählt, dass die Substrate nach der Wassersättigung ein Volumen von ca. 1000 ml erreichten. Somit war der Druck, der beim Abtropfvorgang auf das Substrat wirkt bei allen BHS gleich, was besonders bei stark quellenden Substraten von Bedeutung ist. Die Volumenzunahme nach dem Quellen war deshalb ein entscheidender Faktor in dieser Berechnung. Sie wurde mit Hilfe eines Vorversuchs ermittelt. Zusammen mit der ermittelten Schüttdichte konnte so die genaue Einwaage der einzelnen Stoffe in Gramm pro Gefäß errechnet werden. In der Methodenvorschrift nach ÖHLINGER (1993) oder DUNGER & FIEDLER (1997) wird zur Gefäßgröße auch die exakte Probenmenge von 50,0 g angegeben. Bei stark quellenden Stoffen wie zum Beispiel Geohumus würde das eingefüllte Substrat aus den Gefäßen hinaustreten. Diese extreme Volumenzunahme wird in beiden Methoden nicht berücksichtigt.

## *3. Abtropfeinheit*

Laut Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (2006) werden die Proben nach 4 Std. Überstauung aus dem Wasserbad genommen und dann für 2 Std. auf ein wassergesättigtes Kiesbett (2 mm) gestellt. Ob der Abtropfvorgang beendet ist, wird anschließend durch vorsichtiges Abstellen auf ein getrocknetes Papierfließ getestet. Es werden keine genaueren Angaben zur Durchführung gemacht. Etwas genauer ist die Versuchsvorschrift in diesem Punkt bei ÖHLINGER (1993) und DUNGER & FIEDLER (1997). Beide Methoden schreiben eine Schütthöhe von 10 cm des Kiesbettes vor. Zudem soll die Abtropfwanne mit einem Abtropfhahn ausgerüstet sein, damit überschüssiges Wasser abgelassen werden kann. Unterschied zu der vorherigen Methode: Die Abtropfzeit soll mindestens 3 Std. betragen.

Aufgrund von Vorversuchen mit der Methode der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (2006) und Erfahrungen von anderen Versuchen am Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz wurde auf die Verwendung eines feuchten Sandbettes (0,2 bis 0,63 mm) verzichtet. Aus diesem Grund wurden die gesättigten Proben lediglich für 2 Std. auf ein Abtropfsieb, das vorher mit mehreren Schichten feuchtem Papierfließ abgedeckt wurde, gestellt.

#### 4.1.1 Methodenvergleich am Beispiel der Bodensubstrate Uedorfer Gemisch, Meckenheimer Krume und Quarzsand und der Substrate Geohumus und Torf

Mit Hilfe der Daten aus Tab. 13 (siehe Kap. 4.2.1) wurde zu Vergleichszwecken die Wasserhaltekapazität der Bodensubstrate Uedorfer Gemisch, Meckenheimer Krume und Quarzsand sowie der beiden stark quellenden Stoffe Geohumus und Torf anhand beider Methoden bestimmt.

Die Bestimmung der Wasserhaltekapazität der drei Bodensubstrate erzielte keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Methoden (siehe Abb. 22). Beide Methoden eignen sich somit für Substrate mit keiner bis geringer Quellfähigkeit.

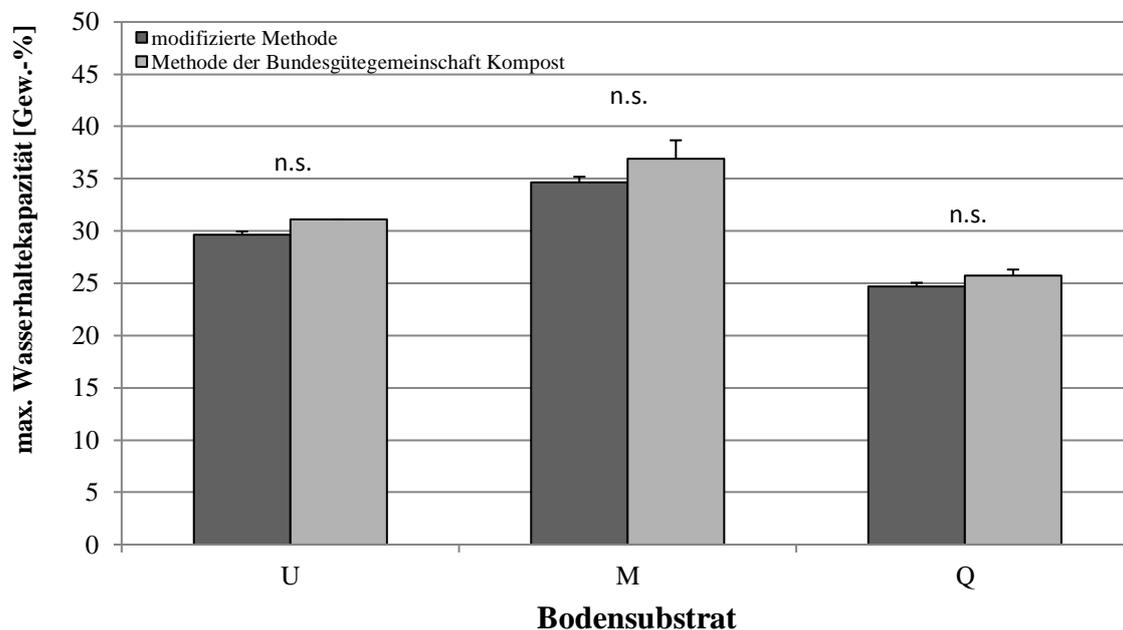


Abb. 22: Methodenvergleich zur Max. Wasserhaltekapazität [Gew.-%] der drei Versuchssubstrate; U = Uedorfer Gemisch; M = Meckenheimer Krume; Q = Quarzsand; n = 2; Fehlerbalken: Standardabweichung; n.s. = nicht signifikant

Bei den beiden stark quellenden Substraten Geohumus und Torf wurden höchst signifikante Unterschiede zwischen den beiden Methoden festgestellt (siehe Abb. 23). Die gemessene Wasserhaltekapazität beider Stoffe nach der modifizierten Methode lag ca. 30 % höher als nach der Methode der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.. Hervorgerufen wurde dieser Unterschied vermutlich durch die unterschiedlichen Versuchsgefäße. Die stark quellenden Substrate konnten sich in den wesentlich kleineren Mitscherlich Gefäßen horizontal nur sehr gering ausdehnen. Die Kraft zur vollständigen Wasseraufnahme in der vertikalen

Ausdehnung in den Röhrcchen reichte nicht aus. Die Form der Gefäße (quadratisch) in der modifizierten Methode begünstigtsten eine vertikale Ausdehnung.

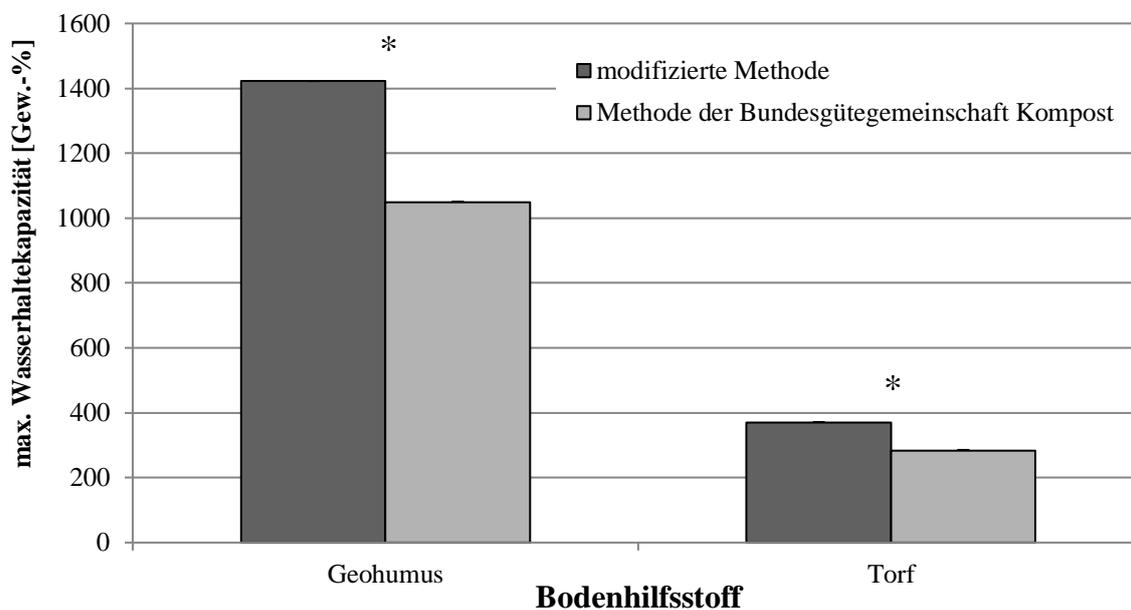


Abb. 23: Vergleich der Methode der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. und der modifizierten Methode; n = 2; Fehlerbalken: Standardabweichung; \* = signifikant

#### 4.1.2 Maßeinheit der WHK: Volumenprozent vs. Gewichtsprozent

Die Wasserhaltekapazität, die in der Literatur oftmals nur als „Wasserkapazität“ (DUNGER & FIEDLER 1997) bezeichnet wird, kann entweder in Volumen- oder Gewichtsprozent angegeben werden. In der Literatur findet man darüber sehr unterschiedliche Aussagen. In älterer Literatur wird die WHK oft in Gew.-% (g H<sub>2</sub>O/100 g Boden) angeführt (ÖHLINGER 1993, DUNGER & FIEDLER 1997). Laut der Methode nach BLUM ET AL. (2010) und nach BLUM (2012) wird die max. Haftwassermenge in ml H<sub>2</sub>O pro 100 ml Boden, also in Vol.-%, dargestellt. Keine der aufgezählten Methoden definiert dabei die Substratart. Grundsätzlich wäre für organische Topfsubstrate (z.B. Torf oder Kokosfaser) die Angabe Vol.-%, für mineralische Stoffe und Böden (z.B. Bentonit oder Alginit) Gew.-% sinnvoll. Mit Hilfe der Rohdichtewerte können die beiden Größen jedoch ineinander umgerechnet werden (GISI ET AL. 1996). In der Methodenvorschrift der Bundesgütegemeinschaft Kompost (2006) werden für die beiden Einheiten jeweils die notwendige Formel angegeben (siehe Kap. 3.1.1).

Aufgrund der unterschiedlichen Dichten der untersuchten Bodenhilfsstoffe ist ein Vergleich der WHK nur in Volumenprozent sinnvoll (RAMSER 2014). Weil die Stoffe jedoch in sehr vielen unterschiedlichen Anwendungsgebieten eingesetzt werden, sollte eine Angabe beider

Einheiten erfolgen. Ein Gartenbauer zum Beispiel arbeitet fast ausschließlich mit Substraten und Böden, die entweder in den Verpackungs- oder Pflanzeinheiten (Töpfe, etc.) in Volumen abgegeben sind. Anders ist es bei einem Landwirt, der solche Bodenhilfsstoffe großflächig auf seinen Äckern ausbringt. Daher wäre für ihn eine WHK-Angabe in Gew.-% sinnvoller.

## 4.2 Ergebnisse der WHK-Analyse

### 4.2.1 Schüttdichte, Wassergehalt und Volumenzunahme

Wie bereits in Kap. 4.1 beschrieben, wurden für die Berechnung der Einwaage zur WHK-Bestimmung die Werte der Schüttdichte und der Volumenzunahme benötigt. Der Wassergehalt der Frischsubstanz wurde für die spätere Berechnung der Wasserhaltekapazität benötigt.

Die Tab. 13 zeigt die Schüttdichten, Wassergehalte und Volumenzunahmen der drei Bodensubstrate und der festen Bodenhilfsstoffe. Beim Wassergehalt handelt es sich um Gew.-%, also die gespeicherte Wassermenge in g pro 100 g Substrat.

Tab. 13: Durchschnittswerte der Schüttdichte [ $RD_{FS}$ ], des Wassergehaltes [ $WG_{FS}$ ] und der maximalen Volumenzunahme [ $V_z$ ] der untersuchten Substrate;  $n = 2$

Substrate	$RD_{FS}$ [g/l]	$WG_{FS}$ [%]	$V_z$ [%]
Uedorfer Gemisch	1370	1,1	12,5
Meckenheimer Krume	1270	2,3	17,5
Quarzsand	1500	>0,1	>0,1
Perlite	90	>0,1	>0,1
Alginit <sup>®</sup>	1011	7,3	42,5
Axis <sup>®</sup>	395	2,9	5,0
Betasoil <sup>®</sup>	719	8,4	45,0
Zeolith	964	6,3	0
Bentonit	1153	16,3	10,0
Urgesteinsmehl	1675	6,9	>0,1
Geohumus <sup>®</sup>	463	12,5	1300,0
Kokosfaser	113	>0,1	80,0
Torf	500	54,1	60,0

Die Volumenzunahme, auch „Quellfähigkeit“ oder „Quellbarkeit“ genannt (HEIM 1990; KATZ 1917), ist von der Zusammensetzung (siehe Tab. 4) der Bodenhilfsstoffe abhängig.

Bei den Stoffen Perlite, Axis, Zeolith und Urgesteinsmehl konnte kaum bis gar keine Quellung festgestellt werden, da sie alle zur Mineralgruppe der Gerüstsilikate (LIEBAU 1985; OKRUSCH & MATTHES 2009) gehören. Dazu zählen Quarze, Feldspäte und Klinoptilolithe, die aus einem Kristallgitter bestehen. Aufgrund ihres Aufbaus (große Hohlräume) können große Kationen und vor allem Wasser gespeichert werden, jedoch behalten sie durch ihre hohe Stabilität ihre Strukturform bei (LIEBAU 1983; ANTHONY ET AL. 2001).

Beim Alginat ist der quellende Faktor das Smektit (über 50 % des Tongehaltes). Die größte Gruppe der Smektite bildet das Montmorillonit, das zu den Dreischicht-Tonmineralen gehört. In den sogenannten Zwischenschichten speichert dieses Schichtsilikat große Mengen an Wasser (siehe Abb. 5), das so ein Aufquellen bewirkt. Die Volumenzunahme nach Wassersättigung betrug 42,5 % (siehe Tab. 13). (JASMUND & LAGALY 1993; GRIM 1968)

Bentonit besteht ebenfalls zum Großteil aus Montmorillonit und müsste eine ähnliche Volumenzunahme wie das Alginat aufweisen. Jedoch zeigten die Messungen (vgl. Tab. 13) bei Bentonit nur eine Zunahme von 10 %. Somit hängt das Quellungsverhalten vermutlich nicht ausschließlich von der Art und Menge der Tonminerale ab.

Betasoil ist ein aus Naturstoffen zusammen gestelltes Produkt, das aus den Komponenten Silikagel, Bentonit, Tuff und Perlite besteht. Das Silikagel und das Bentonit, dessen Eigenschaft bereits erläutert wurde, sind für den quellenden Faktor verantwortlich. Das Silikagel (Kieselgel) ist ein wasserdurchlässiger Stoff, der aufgrund seiner vernetzten Struktur stark hydratisiert und deshalb quillt. Er wird sehr häufig in der Industrie als ein Trocknungsmittel eingesetzt.

Für die sehr starke Volumenzunahme beim Geohumus (ca. 1300 %) sind die organischen Polymere (viskoelastische Polyacrylsäuremoleküle), die aus langkettigen Kohlenwasserstoffketten mit Carboxylgruppen bestehen, verantwortlich (ENDERBY 1954; FERRY 1970). Zum einen wirkt durch den Aufbau der Moleküle ein kapillarer Effekt auf die Wasser-Moleküle, zum anderen diffundiert durch gelöste Na-Ionen, die vorher an den Carboxylgruppen gebunden waren, immer mehr Wasser ins Innere, ähnlich wie bei der Osmose von Zellen (BUCHHOLZ & GRAHAM 1998). Dieser osmotische Effekt sorgt für eine stark erhöhte Aufnahme von Wassermolekülen im Inneren dieses elastischen Netzwerkes der Polymere (HERMANS 1949; REHAGE 1964; MARK 2004).

*Exkurs: „Osmotischer Effekt“*

Mit Hilfe der Methode zur Bestimmung der Volumenzunahme nach Wassersättigung (vgl. Kap. 3.1.1.3) mit drei unterschiedlichen Beladungslösungen konnte ein osmotischer Effekt

nachgewiesen werden. Die Volumenzunahme des Geohumus wurde mit Leitungswasser, destilliertem Wasser und drei unterschiedlichen  $\text{CaCl}_2$ -Lösungen getestet. Die Ergebnisse in der Abb. 24 zeigen, dass Geohumus wesentlich mehr dest. Wasser als normales Leitungswasser aufnehmen konnte. Der Grund sind die geringen Mengen an gelösten Salzen und anderen Ionen im Leitungswasser. Die Anziehungskräfte der inneren und der in dem Leitungswasser enthaltenen Ionen in Bezug auf die Wassermoleküle konkurrieren miteinander. Weniger Wasser wird in die Hohlräume der Polymere aufgenommen, der Quelleffekt ist niedriger.

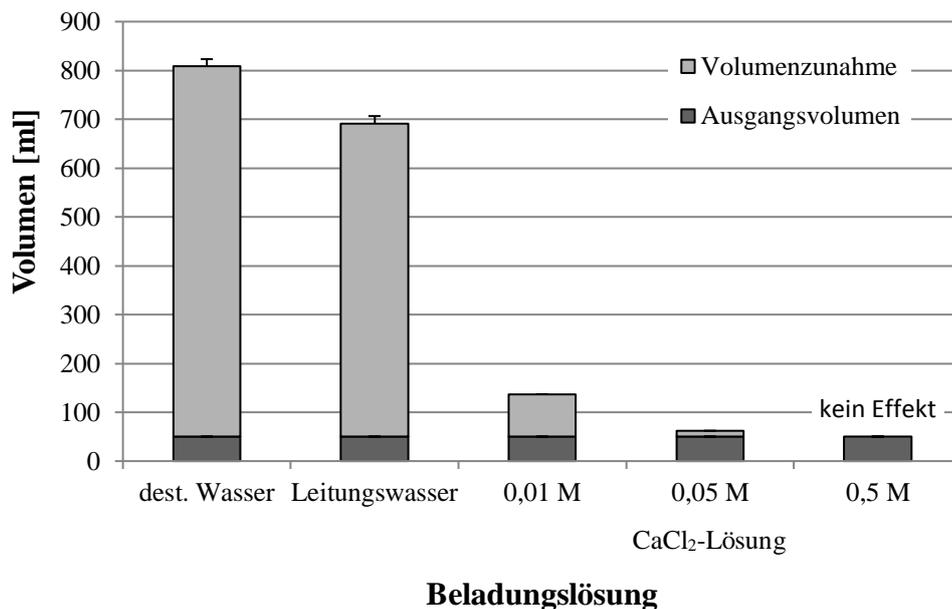


Abb. 24: Volumenzunahme [ml] des Geohumus in Abhängigkeit von drei unterschiedlichen Flüssigkeiten (Leitungswasser, dest. Wasser und 0,01 M, 0,05 M und 0,5 M  $\text{CaCl}_2$ -Lösung)

In einer geringen  $\text{CaCl}_2$ -Lösung (0,01 M) war der Quellungseffekt von Geohumus gegenüber den Beladungslösungen des dest. Wassers und des Leitungswassers extrem eingeschränkt. Mit steigender  $\text{CaCl}_2$ -Konzentration verminderte sich die Quellfähigkeit stetig und in der 0,5 M  $\text{CaCl}_2$ -Lösung zeigte das Geohumus bereits keinen Quellungseffekt mehr. (siehe Abb. 24). Der Grund sind die Ca-Ionen, die einen Kationenaustausch mit den Na-Ionen durchführen. Aufgrund der Zweiwertigkeit eines Ca-Ions werden jeweils zwei Na-Ionen gelöst. Es entsteht zwischen zwei Carboxalgruppen eine Ca-Brücke, die zur starken Vernetzung der Polymere führt (MORTIMER & MÜLLER 2007). Folge sind eine sehr hohe Festigkeit und Stabilität, die eine Quellung verhindern.

Das quellende Medium bei den organischen Stoffen bildet die Zellulose. Wie bereits in Kap. 2.2.6.1 beschrieben, besteht dieses ebenfalls aus vernetzten Polymeren (hier: lange Ketten aus Glucosebausteinen), die ein Vielfaches ihres Eigengewichtes an Wasser binden können. Die dipolaren Wassermoleküle lagern sich an die freien polaren OH-Gruppen an. Aufgrund ihrer Struktur und Masse können sie wesentlich weniger Wasser aufnehmen als die Superabsorber. (HERMANS ET AL. 1944)

#### **4.2.2 WHK-Vergleich der reinen Substrate in Volumen- und Gewichtsprozent**

Die Bestimmung der max. Wasserhaltekapazität der reinen Substrate sollte einen ersten Überblick über deren wasserspeichernde Eigenschaft geben. Vor allem die Produktbeschreibungen bzw. –versprechen der Hersteller sollten mit dieser Analyse überprüft werden. Einige Hersteller geben in der Hinsicht sogar konkrete Werte zur WHK an, andere hingegen formulieren es eher unpräzise oder gar nicht. Für die Bodenhilfsstoffe Alginit (mind. 63 Gew.-%), Axis (mind. 150 Gew.-%) und Geohumus (4000 Gew.-%) wird eine genaue Angabe gemacht. Die Messung bei Alginit mit ca. 77 Gew.-% und Axis mit ca. 196 Gew.-% hatten den angegebenen Wert sogar übertroffen. Geohumus erreichte nur knapp die Hälfte der versprochen Haltekapazität. Jedoch gemessen an den anderen Stoffen erzielte es in Bezug auf Gewichtsprozent den höchsten Wert (siehe Abb. 25). Ebenfalls eine hohe Wasserhaltekapazität in Gewichtsprozent wurde bei den Stoffen Perlite (258 Gew.-%), Axis (150 Gew.-%), Kokosfaser (862 Gew.-%) und Torf (368 Gew.-%) gemessen. Die anderen Stoffe wie Alginit, Betasoil, Zeolith und Bentonit verfügten über eine Wasserkapazität zwischen 60 Gew.-% und 105 Gew.-%. Das Gesteinsmehl erzielte mit 32 Gew.-% den niedrigsten Wert der festen Bodenhilfsstoffe. Um einen Vergleich zu erhalten, wie die ermittelten WHK-Werte der festen Bodenhilfsstoffen einzuordnen sind, wurden die max. Wasserkapazitäten der drei verwendeten Versuchssubstrate Uedorfer Gemisch, Meckenheimer Krume und Quarzsand ebenfalls bestimmt. Sie ergaben folgende Werte: Uedorfer Gemisch = 30 Gew.-%, Meckenheimer Krume = 35 Gew.-% und Quarzsand = 25 Gew.-%. Die Höhe der Wasserhaltekapazität wird durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst. Laut BLUM (2012) sind die „Werte der WK sehr variabel je nach Ton- und Schluff-Gehalt, Gefüge, Gehalt an org. Substanz, Humus-Form und Zersetzungsgrad, Ionen-Belag der Bodenkolloide. In der Regel: Sande < Lehme < Schluffe < Tone < Torfe“. In Bezug auf die drei Versuchssubstrate trifft diese „Regel“ auf jeden Fall zu. Die Meckenheimer Krume ist ein lehmiger Schluff, das Uedorfer Gemisch ein schwach lehmiger Sand und der Quarzsand ein Reinsand. Bei den mineralischen Stoffen hat natürlich der

Tonanteil einen entscheidenden Einfluss auf die WHK. Entscheidend ist besonders die Zusammensetzung des Tons, d.h. aus welchen Tonmineralgruppen besteht er zum größten Teil. Die wasserspeichernden Funktionen und die Zusammensetzungen der einzelnen Bodenhilfsstoffe und BHS-Gruppen wurden bereits in Kap. 2.2.6.1 und Kap. 4.2.1 näher erläutert.

In der Abb. 25 ist die Wasserhaltekapazität aller untersuchten Substrate und Stoffe sowohl in Volumen- als auch in Gewichtsprozent dargestellt. Wie bereits aus Kap. 4.1.2 bekannt, besteht ein Zusammenhang zwischen Rohdichte und Volumen- und Gewichtsprozent. Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich diesen Zusammenhang. Bei Stoffen mit einer Dichte kleiner als 1 kg pro l, wie zum Beispiel Perlite, Axis, Geohumus, Kokosfaser oder Torf, war die max. WHK in Bezug auf ihr Gewicht bezogen wesentlich größer als auf ihr Volumen. Bei den drei Versuchssubstraten Uedorfer Gemisch, Meckenheimer Krume und Quarzsand war genau das Gegenteil der Fall. Sie erzielten bezogen auf ihr Volumen eine höhere WHK. Ihre Schüttdichten liegen alle bei über 1,2 kg pro l. Bei den drei Bodenhilfsstoffen Alginit (1,1 kg/l), Bentonit (1,15 kg/l) und Zeolith (0,96 kg/l) ergaben die WHK-Messungen in Volumen- und Gewichtsprozent relativ identische Ergebnisse. Hieraus lässt sich demnach ableiten: Wenn  $RD_{FS} > 1 \text{ kg/l}$ , dann ist  $Vol.\% > Gew.\%$  und umgekehrt. Für Stoffe und Substrate mit  $RD_{FS} = 1 \text{ kg/l}$  entspricht  $Vol.\% = Gew.\%$ .

Auch für das Substrat Perlit traf diese Regel zu. Es besitzt bei einer  $RD_{FS}$  von 90 g/l eine WHK von ca. 258 Gew.-%. Bezogen auf das Volumen liegt die WHK von Perlit bei 23 Vol.-% und ist der niedrigste gemessene Wert aller untersuchten Substrate, sogar unterhalb von reinem Quarzsand. Das Einsatzgebiet von Perlit befindet sich im Gartenbau, in dem ausschließlich in Volumen gerechnet wird. Die gemessene Senkung der WHK auf 23 Vol.-% bekräftigt die Eigenschaft der Durchlüftung von Böden, die beim Einsatz von Perlit im Gartenbau oftmals im Vordergrund steht.

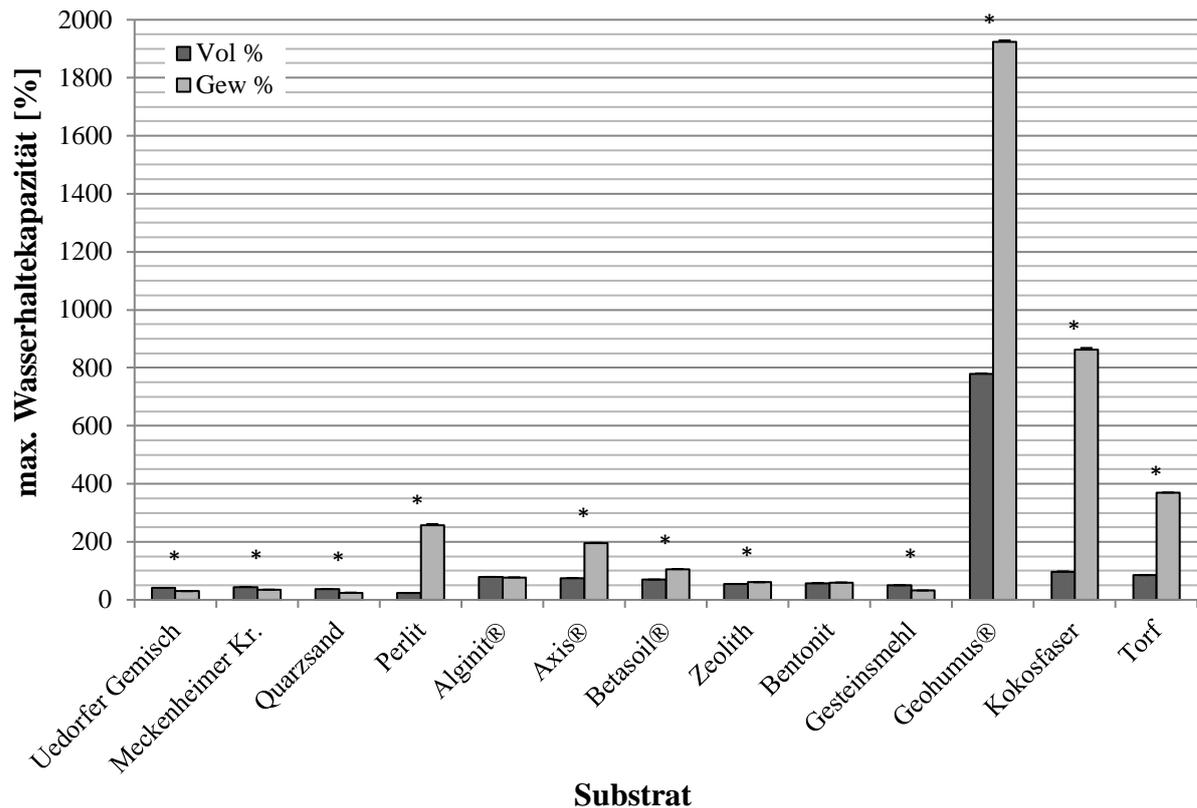


Abb. 25: Vergleich der durchschnittlichen max. Wasserhaltekapazitäten in [Vol-%] und [Gew-%] der drei Versuchssubstrate und der festen Bodenhilfsstoffe in reiner Form; n = 2; Fehlerbalken: Standardabweichung, \* = Signifikanz zwischen Volumen- und Gewichtsprozent (T-Test zweiseitig)

#### 4.2.3 Einfluss der Aufwandmenge auf die max. WHK

Alle Hersteller der untersuchten Produkte geben auf ihren Internetseiten, Broschüren und/oder Verpackungen Informationen über Aufwandmenge und –gebiet an. Die Angaben über die Aufwandmenge der Hersteller sind ausschließlich Empfehlungen für den Anwender. Über die Ermittlung der empfohlenen Dosiermengen geben die Hersteller kaum bis gar keine Informationen preis. Aufgrund dieser mangelnden Transparenz gegenüber dem Endverbraucher wurden in diesem Versuchsteil drei unterschiedliche Aufwandmengen untersucht. Dabei wurden bewusst die drei Dosiermengen 30, 10 und 3 Gew.-% ausgewählt, da dieser Bereich die unterschiedlich empfohlenen Angaben der Hersteller, ausgenommen Geohumus (1 Gew.-%), abgedeckt werden konnten. Ob, wie bereits in Kap. 4.2.5 erwähnt, die Aufwandmenge der Bodenhilfsstoffe auch von der Bodenart abhängt, wurde ebenfalls in diesem Versuch untersucht. Die Versuchsdurchführung erfolgte hierzu für die drei Versuchssubstrate Uedorfer Gemisch, Meckenheimer Krume und Quarzsand.

Als repräsentatives Beispiel für die unterschiedlichen Effekte der Bodenhilfsstoffe und den verschiedenen Aufwandmengen auf die max. WHK werden die Ergebnisse des Uedorfer Gemisches angeführt.

Hinsichtlich der unterschiedlichen Einsatzgebiete (siehe Kap. 4.2.2) der Bodenhilfsstoffe wurden die Ergebnisse der Wasserhaltekapazitäten in Gewichts- und Volumenprozent angegeben. Um einen Effekt der unterschiedlichen Varianten und Bodenhilfsstoffe zu beurteilen, wurde die max. WHK des reinen Uedorfer Gemisches als Referenzwert ebenfalls dargestellt (siehe Abb. 26).

Bezüglich der ermittelten Werte konnten die untersuchten Stoffe in vier Gruppen zusammengefasst werden. Zu der ersten Gruppe gehören Geohumus und Kokosfaser, die bereits mit geringen Aufwandmengen (kleiner als 3 Gew.-%) die max. WHK des Uedorfer Gemisches um mindestens 20 Gew.-% steigern konnten. Zudem erzielten beide Stoffe mit zunehmender Aufwandmenge eine immer höhere max. WHK des Substratgemisches. 30 % Geohumus im Uedorfer Gemisch steigert die WHK von ca. 29 Gew.-% auf über 430 Gew.-%. Wie sich die Quellfähigkeit beider Stoffe unter Freilandbedingungen, d.h., wie sich zum Beispiel die Bodendichte auf einer Ackerfläche auf diese Eigenschaft auswirkt, konnte mit diesem Versuch nicht überprüft werden. Eine Verdichtung eines Bodens hängt von unterschiedlichen Faktoren wie zum Beispiel Belastungen durch Traktoren oder Wassersättigung ab (GISI ET AL. 1997).

Eine weitere Gruppe bilden die Stoffe Perlite, Axis und Torf, die die max. WHK des Uedorfer Gemisches ab einer Aufwandmenge von 10 Gew.-% um 15 bis 30 Gew.-% steigerten, wie die Abb. 26 zeigt. Auch diese Bodenhilfsstoffe-Substratgemische erzielten den höchsten Effekt in der 30 % - Variante.

In der dritten Gruppe sind die getesteten Stoffe Alginit, Betasoil, Zeolith und Bentonit zusammengefasst, die die WHK unter 30 %iger Beimischung bis zu 15 Gew.-% gegenüber dem reinen Bodensubstrat erhöhten.

Der Einsatz von Gesteinsmehl zeigte keinen positiven Effekt auf die Erhöhung der WHK von der Uedorfer Krume. Mit steigender Aufwandmenge wurde die Wasserspeicherfähigkeit des BHS-Bodengemisches sogar weiter verringern.

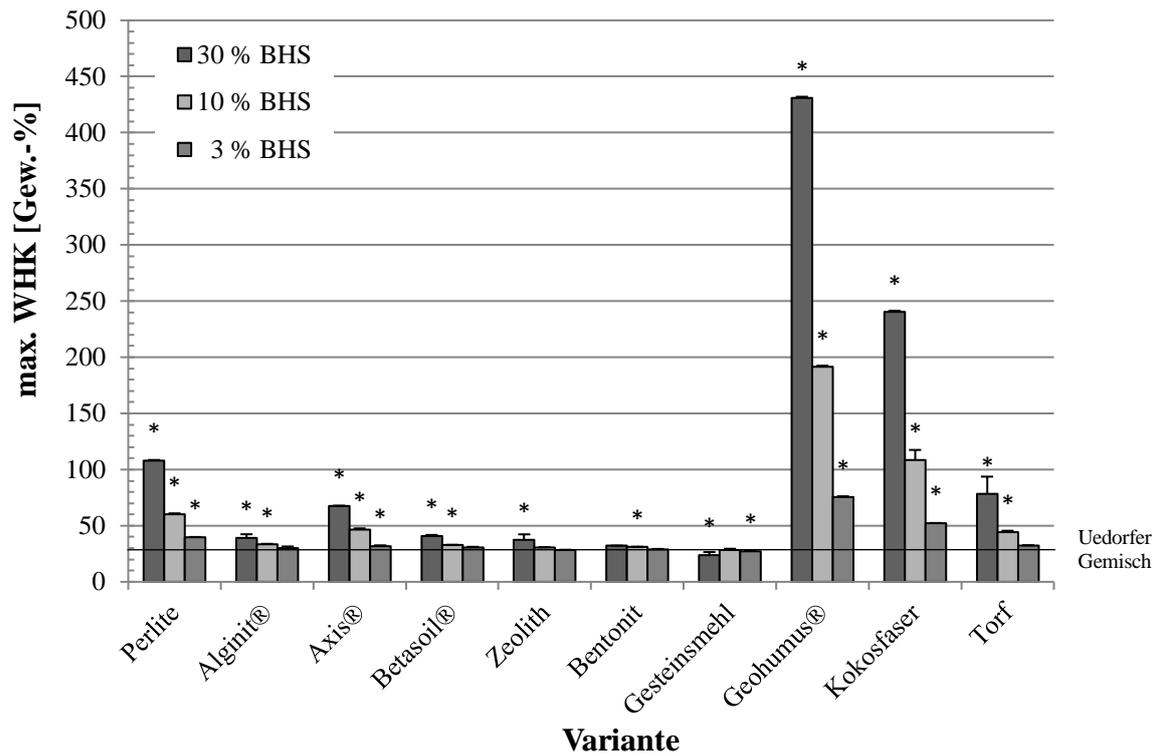


Abb. 26: Vergleich der durchschnittlichen Wasserhaltekapazität in [Gew-%] des Uedorfer Gemisches mit den drei unterschiedlichen Aufwandmengen (30, 10 und 3 %) der verschiedenen Bodenhilfsstoffe; n = 2; Fehlerbalken : Standardabweichung; \* = Signifikanz BHS-Substratgemisch zum reinen Uedorfer Gemisch

Die max. Wasserhaltekapazitäten der Bodenhilfsstoff-Substratgemische (Uedorfer Gemisch) zeigten in Bezug auf das Volumen und der bereits erwähnten unterschiedlichen Aufwandmengen ein anderes Ergebnis. Auch hier können die Stoffe wieder in vier Gruppen eingeteilt werden. Die erste Gruppe besteht jedoch nur aus Geohumus. Die WHK des Bodensubstrates wurde bei der geringen Aufwandmenge von 3 Vol.-% bereits um mehr als 50 Vol.-% erhöht (vgl. Abb. 27).

Die zweite Gruppe wird von der Kokosfaser gebildet, da es bei einer Beimischung von 10 % die WHK um ca. 30 Vol.-% steigerte. Die erhöhte Aufwandmenge in Vol.-% gegenüber Gew.-% ist auf die relativ geringe Rohdichte zurückzuführen. Um denselben Effekt zu erzielen, muss dementsprechend auf das Volumen bezogen mehr beigemischt werden. Ebenfalls in diese Gruppe muss das Axis eingestuft werden.

Die Stoffe mit einer Steigerung von bis zu ca. 20 Vol.-% in der höheren Aufwandmenge von 30 % werden in der dritten Gruppe zusammengefasst. Hierzu gehören Alginit, Betasoil, Zeolith und Torf, wobei Alginit und Torf Steigerungen von 12 Vol.-% und 18 Vol.-%

erzielten. Die anderen beiden Stoffe konnten in der 30 % Variante nur einen sehr geringen Steigerungseffekt (2 – 4 Vol.-%) aufweisen.

Die letzte Gruppe enthält die Stoffe, die entweder gar keinen (Bentonit) oder einen negativen Effekt (Perlit und Gesteinsmehl) in Bezug auf die max. WHK bewirken. Bei den Bodenhilfsstoff-Substratgemischen mit Perlit und Gesteinsmehl wurde mit zunehmender Aufwandmenge sogar eine zunehmende Reduzierung der WHK des Gemisches beobachtet (siehe Abb. 27).

Aufgrund der hohen Rohdichte von ca. 1700 g/l nimmt der gewichtsmäßige Anteil von Gesteinsmehl mit steigender Aufwandmenge stark zu (Bsp.: 30 Vol.-% entsprechen mehr als 50 Gew.-%). Laut SNOEK & WÜLFRATH (1995) „sind Gesteinsmehle meist größer als der sogenannte Tonschluff, besitzen eine mehr körperliche, kristalline Struktur und nicht den Plättchencharakter der Tone. Die Quellfähigkeit und damit die Wasserbindefähigkeit ist wesentlich geringer, bei größeren Korngrößen gar nicht mehr vorhanden“. D.h., dass der Tonanteil des BHS-Bodengemisches (Das Uedorfer Gemisch enthält im reinen Zustand ca. 6 % Ton.) mit steigendem Anteil an Gesteinsmehl abnimmt und somit die Wasserspeicherfähigkeit herabsenkt.

Auch beim Einsatz von Perlit spielt die Rohdichte eine entscheidende Rolle. Mit ca. 90 g/l handelt es sich um ein sehr leichtes Substrat. Wie bereits in Abb. 25 sichtbar, konnte das reine Perlit im Gegensatz zum Uedorfer Gemisch (ca. 40 Vol.-%) nur ca. 23 Vol.-% an Wasser halten. Durch das Beimischen von Perlit wurde wie beim Gesteinsmehl der stark wasserspeichernde Tonanteil mit steigender Aufwandmenge reduziert.

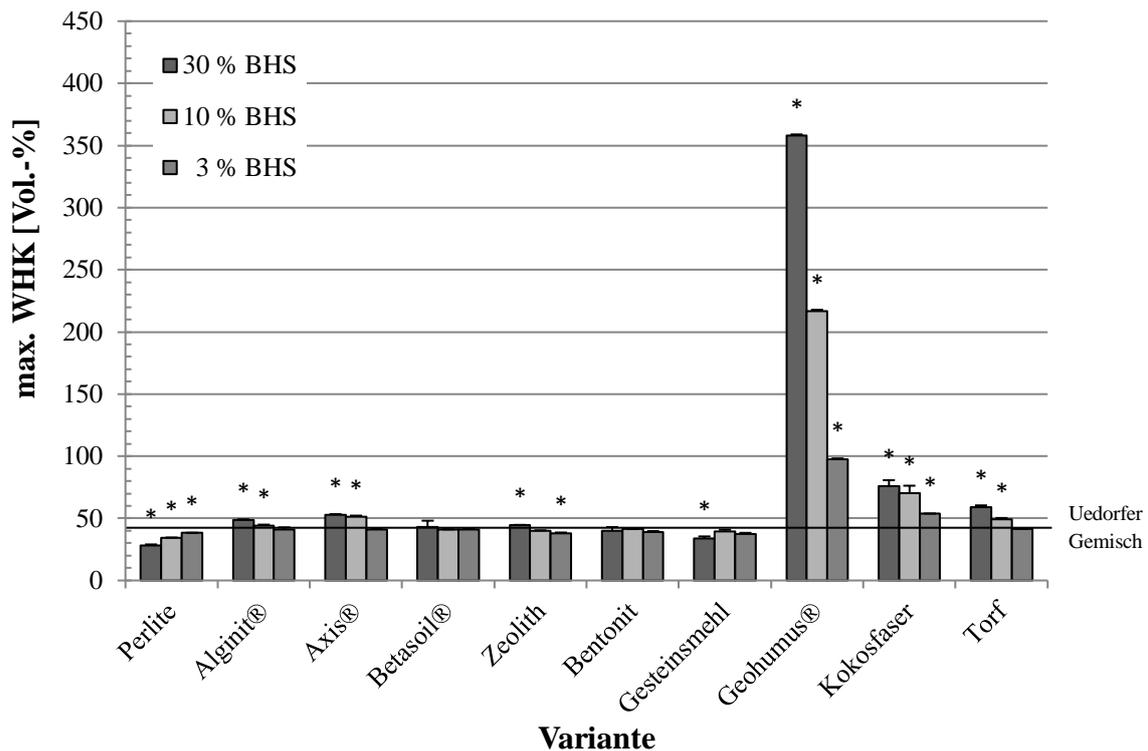


Abb. 27: Vergleich der durchschnittlichen Wasserhaltekapazität in [Vol.-%] des Uedorfer Gemisches mit den drei unterschiedlichen Aufwandmengen (30, 10 und 3 %) der verschiedenen Bodenhilfsstoffe; n = 2; Fehlerbalken : Standardabweichung; \* = Signifikanz BHS-Substratgemisch zum reinen Uedorfer Gemisch

#### 4.2.4 Einfluss der Bodenart auf die Aufwandmenge der BHS

Neben den klimatischen Bedingungen und der verwendeten Pflanzenart beeinflusst laut einiger Hersteller (alginit.com; Stand Juli 2014) vor allem die Bodenart, auch Bodentextur (LESER 1997) genannt, zusammen mit der Aufwandmenge der Bodenhilfsstoffe die Höhe der Wasserhaltekapazität. Ob und inwiefern eine Abhängigkeit zwischen Aufwandmenge und Bodenart besteht, wurde anhand zweier Beispiele, Alginit und Kokosfaser, näher untersucht. Berechnet und dargestellt wurde die tatsächliche WHK-Steigerung in Gew.-%, das bedeutet, wie viel g Wasser konnte pro g BHS-Bodengemisch gegenüber dem reinen Bodengemisch mehr gehalten werden.

Beim Einsatz von Alginit, ein mineralischer Bodenhilfsstoff mit über 50 % Tonanteil, konnte eine Abhängigkeit zwischen Aufwandmenge und Bodenart festgestellt werden (siehe Abb. 28). In der Meckenheimer Krume (Ut, T > 16 %) erzielte die geringe Menge von 3 Gew.-% Alginit dieselbe WHK-Steigerung wie in dem Uedorfer Gemisch (Sl, T < 6 %) und dem Quarzsand mit 10 Gew.-% Anteil. Um einen vergleichbaren Steigerungseffekt wie Alginit mit 10 Gew.-% Beimischung in der Meckenheimer Krume zu erhalten, musste die dreifache

Menge an Alginit dem Uedorfer Gemisch zugeführt werden. In allen drei Aufwandmengen wurde in dem Uedorfer Gemisch der niedrigste Effekt gegenüber den beiden anderen Bodenarten verzeichnet. Anders als in den beiden niedrigeren Aufwandmengen wurde die höchste Steigerung bei 30 Gew.-% Alginit im Quarzsand gemessen. Aus diesen Ergebnissen konnte einerseits abgeleitet werden, dass bei einem tonreichen Boden bereits geringe Aufwandmengen von Alginit zu stärkeren WHK-Steigerungen führen. Andererseits können vor allem bei tonarmen bis -freien Böden hohe Aufwandmengen von Alginit die WHK erheblich steigern. Angesichts dieses Ergebnisses war ab einer bestimmten Höhe der Aufwandmenge der Gesamttonanteil des BHS-Bodengemisches nicht der beeinflussende Steigerungsfaktor. Laut Hersteller (alginit.com; Stand Juni 2015) enthält das Alginit neben 54 % Ton auch ca. 22 % fein verteiltes Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), das im Boden leicht löslich ist und somit schnell verfügbar ist. Durch das Aufkalken wurden vermutlich unterschiedliche Struktureffekte in den Böden ausgelöst. Die Bindung von  $\text{Ca}^{2+}$  kann zur Vernetzung an Ton- und Schluffteilchen führen (OKRUSCH & MATTHES 2009). Eine Wasseraufnahme kann dadurch eingeschränkt werden. Ob dieser Prozess die Wasserspeicherung in den beiden tonhaltigen Böden (U und M) wirklich beeinflusste, wurde in diesem Versuch nicht untersucht. Daher konnte der sehr starke Effekt von Alginit (30 Gew.-%) im Quarzsand nicht geklärt werden.

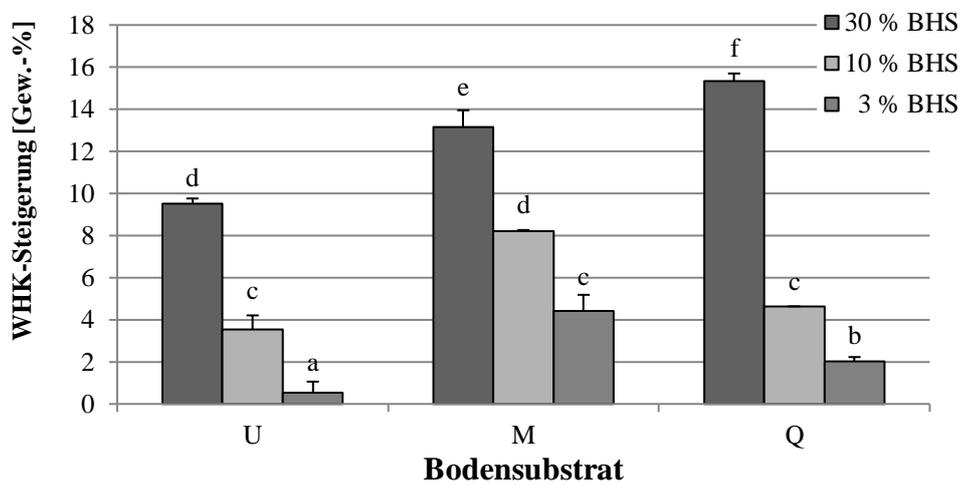


Abb. 28: Abhängigkeit der Bodenart und der Aufwandmenge von **Alginit** auf die WHK von Bodensubstraten; U = Uedorfer Gemisch, M = Meckenheimer Krume, Q = Quarzsand; n = 2; Fehlerbalken : Standardabweichung; Buchstaben = Signifikanz (Duncan-Test)

Das Applizieren von 3 Gew.-% und 10 Gew.-% Kokosfaser zeigte in allen drei Bodenarten keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die WHK-Steigerung (siehe Abb. 29). Sie lag bei der 3 %igen Variante bei ca. 35 Gew.-% und bei der 10 %igen bei ca. 70 Gew.-%. Mit 30 Gew.-% Kokosfaser wurden WHK-Steigerungen von über ca. 250 Gew.-% gemessen. Die WHK der Meckenheimer Krume war gegenüber den beiden anderen Böden signifikant höher, wie in Abb. 29 sichtbar. Die Höhe des Tons, der bei den drei Bodensubstraten unterschiedlich ist, beeinflusste die WHK-Steigerung beim Einsatz von Kokosfaser nicht. Ob sich auf Dauer vermehrt Ton-Humuskomplexe bilden, konnte mit diesem Versuch nicht untersucht werden.

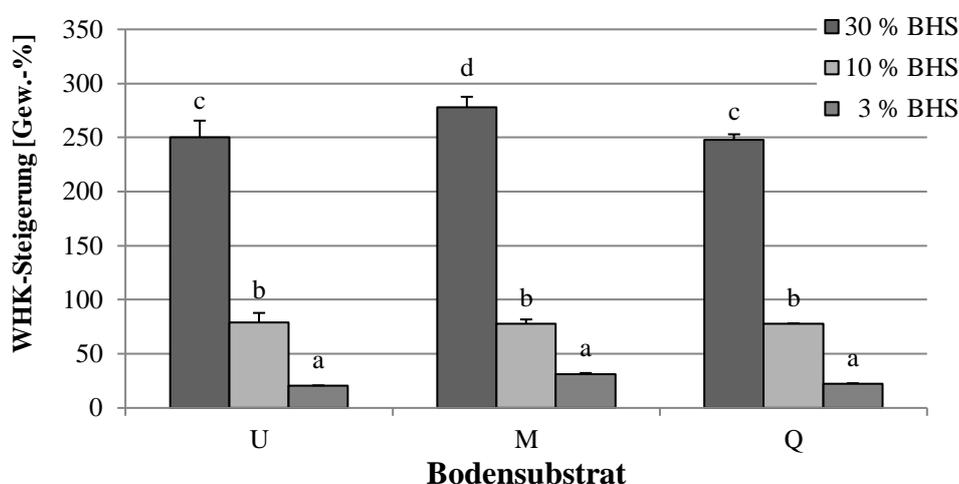


Abb. 29: Abhängigkeit der Bodenart und der Aufwandmenge von **Kokosfaser** auf die WHK von Bodensubstraten; U = Uedorfer Gemisch, M = Meckenheimer Krume, Q = Quarzsand; n = 2; Fehlerbalken : Standardabweichung; Buchstaben = Signifikanz (Duncan-Test)

#### 4.2.5 Max. WHK: Aufwandmenge der Bodenhilfsstoffe nach Herstellerangabe

Die Mehrzahl der Hersteller von festen Bodenhilfsstoffen geben für ihre Produkte genaue Informationen über die Aufwandmenge entweder in Vol.- oder Gew.-% an. Einige wenige machen keine bzw. nur Angaben „von...bis...“ Vol./Gew.-%. Mit Hilfe der Ergebnisse aus den WHK-Bestimmungen der Bodenhilfsstoffen und Bodengemischen wurde anhand des Perlits diese Angabe mittels Regressionsanalyse näher untersucht. In der Abb. 30 wurde die analytisch ermittelte WHK in Gew.-% für die Aufwandmengen 0, 3, 10, 30 und 100 Gew.-% Perlit im Uedorfer Gemisch dargestellt. Die Umrechnung der empfohlenen Aufwandmenge von 25 Vol.-% (siehe Tab. 3) konnte mit Hilfe der Rohdichte erfolgen und entsprach demnach 2,25 Gew.-%. In Bezug auf die WHK in Gew.-% wird in der Grafik sehr gut deutlich, dass jede Beimischung von Perlit eine Steigerung erzielte. Der gewonnene

Effekt durch den Einsatz von 25 Vol.-% Perlit würde ca. 8 Gew.-% gegenüber dem reinen Uedorfer Gemisches (ca. 30 Gew.-%) betragen.

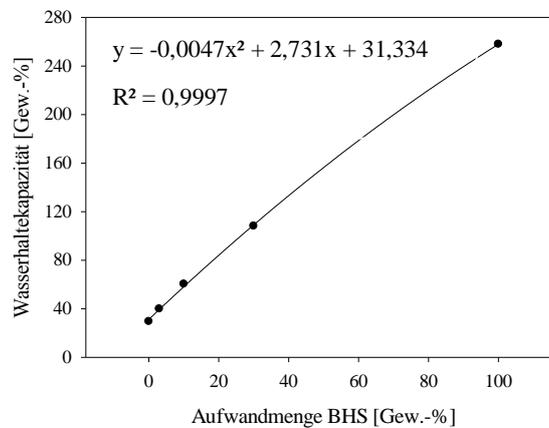


Abb. 30: Wasserhaltekapazität [Gew.-%] in Abhängigkeit unterschiedlicher Aufwandmengen von Perlit (0, 3, 10, 30 und 100 Gew.-%) im Uedorfer Gemisch;  $n = 2$

Wie bereits aus Kap. 4.2.3 bekannt, wurde durch den Einsatz von Perlit in Bezug auf das Volumen die WHK sichtbar verringert. Dieser negative Effekt wird in der Abb. 31 sehr deutlich. Die WHK sank mit zunehmender Aufwandmenge exponentiell. Durch seine geringe Dichte und sein Einsatz im Gartenbau zur Durchlüftung, ist der Einsatz von Perlit als Wasserspeicher nicht zu empfehlen. Bei 25 Vol.-% Perlit sank die WHK des BHS-Uedorfer Gemisches um ca. 2 Vol.-% ab.

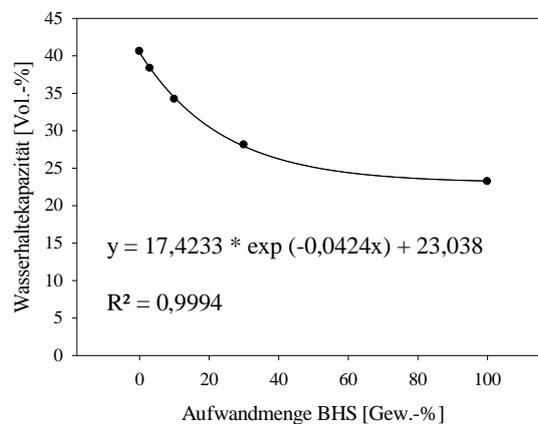


Abb. 31: Wasserhaltekapazität [Vol.-%] in Abhängigkeit unterschiedlicher Aufwandmengen von Perlit (0, 3, 10, 30 und 100 Gew.-%) im Uedorfer Gemisch;  $n = 2$

Neben dem Perlite wurde eine Regressionsanalyse auch für die weiteren Bodenhilfsstoffe durchgeführt. Der mögliche Effekt, sowohl positiv als auch negativ, kann durch den Einsatz der empfohlenen Menge des jeweiligen Substrates auf die WHK des BHS/Bodengemisches der Tab. 14 entnommen werden. Eine theoretische Steigerung der WHK könnte laut Berechnung nur für die Stoffe Alginit, Axis, Geohumus, Kokosfaser und Torf erwartet werden. Die höchsten Effekte sowohl auf das Gewicht als auch auf das Volumen bezogen würde Geohumus bereits mit einer Aufwandmenge von nur einem Vol.-% erzielen. Hohe Effekte könnten ebenfalls durch den Einsatz von Kokosfaser und Torf erlangt werden. Sie werden jedoch auch mit einer hohen Aufwandmenge von 25 Vol.-% empfohlen. Mit 15 Vol.-% Alginit oder 10 Vol.-% Axis könnte die WHK des Uedorfer Gemisches ebenfalls sichtbar gesteigert werden (siehe Tab. 14). Bei den Stoffen Betasoil, Zeolith und Bentonit würde die empfohlene Ausbringungsmenge nur einen schwachen bis gar keinen Effekt zeigen. Die applizierten Mengen sind in Bezug auf den eingesetzten Boden zu gering angegeben. Wie bereits aus dem Kap. 4.2.3 bekannt, ist vom Einsatz sowohl von Perlite als auch vom Gesteinsmehl zur WHK-Steigerung abzuraten.

Tab. 14: Theoretisch ermittelter Effekt auf die Wasserhaltekapazitäten [Gew.- und Vol.-%] des Uedorfer Gemisches durch den Einsatz der festen Bodenhilfsstoffe und der empfohlenen Aufwandmengen der Hersteller in Gew.- und Vol.-%.

	empfohlene Aufwandmenge		theor. Effekt[%] auf die	
	[Vol.-%]	[Gew.-%]	WHK [Gew.-%]	WHK [Vol.-%]
Perlite	25	2,25	26,4	- 4,2
Alginit®	15	16,50	16,6	10,8
Axis®	10	3,95	18,4	7,1
Betasoil®	5	3,60	4,0	0,6
Zeolith	5	4,82	0,3	- 2,0
Bentonit	2	2,31	0,1	- 0,7
Gesteinsmehl	2	3,35	- 4,0	- 3,6
Geohumus®	1	0,46	68,6	70,1
Kokosfaser	25	2,83	76,1	26,1
Torf	25	12,50	53,2	21,1

#### **4.2.6 Kationenaustauschkapazität**

Neben den guten wasserspeichernden Eigenschaften können einige getestete Stoffe die Nährstoffverfügbarkeit und –mobilisierung der Böden erheblich verbessern (vgl. Kap. 2.2.4.4). Dieser Nebeneffekt könnte bei einer Fertigation von Nährstoffen über das Tropfbewässerungssystem zu einer Reduzierung und damit zu einer Einsparung von Düngermitteln führen. Laut DUNGER ET AL (1997) wird „das Puffer-, Speicher- und Austauschvermögen des Bodens für Stoffe von seiner Sorptionskapazität bestimmt, die an anorganische und organische Kolloide (hauptsächlich Tonminerale und Humus) gebunden ist“. In Bezug auf die Bodenhilfsstoffe beeinflusst demzufolge die chemische Zusammensetzung die Höhe der KAK.

Laut SCHEFFER ET AL. (2010) wird die potentielle KAK von Bodensubstraten und somit auch von Bodenhilfsstoffen bei einem pH von 7-7,5 gemessen. Die Beziehung zwischen KAK und Tonanteil sowie der Höhe des organischen Materials (JASMUND & LAGALY 1993; ROWELL & BÖRSCH-SUPAN 1997) konnte mit diesem Versuch dargestellt werden. Deutlich wurde diese Abhängigkeit bereits bei den drei Bodensubstraten Quarzsand (kein Ton), Uedorfer Gemisch (5,7 % T) und Meckenheimer Krume (16 % T). Mit steigendem Tonanteil stieg auch die Kationenaustauschfähigkeit an (siehe Tab. 15).

Die mineralischen Bodenhilfsstoffe mit hohem Tonanteil wie Alginat und Bentonit, aber auch das Betasoil erzielten im reinen Zustand eine  $KAK_{pot}$  um ca. 25  $cmol_c/kg$ . Doppelt so hohe Bindekapazitäten wiesen die rein organischen Stoffe Kokosfaser und Torf auf. Sie lagen bei durchschnittlich 51  $cmol_c/kg$  und 52  $cmol_c/kg$ . Die höchste potentielle KAK von ca. 76  $cmol_c/kg$  wurde beim Geohumus gemessen. Der Grund dafür waren die organischen Polymere, die eine große Menge an leicht austauschbarem  $Na^+$  enthalten. Die restlichen Bodenhilfsstoffe, die hier analysiert wurden, besaßen nur eine geringe KAK zwischen 1  $cmol_c/kg$  und 8  $cmol_c/kg$ .

Tab. 15: Potentielle Kationenaustauschkapazität (KAK)

<b>Substrat</b>	<b>KAK<sub>pot</sub></b> [cmol <sub>c</sub> /kg]
Uedorfer Gemisch	4
Meckenheimer Kr.	9
Quarzsand	2
Perlite	1
Alginit <sup>®</sup>	27
Axis <sup>®</sup>	8
Betasoil <sup>®</sup>	23
Zeolithe	4
Bentonit	25
Gesteinsmehl	2
Geohumus <sup>®</sup>	76
Kokosfaser	52
Torf	51

#### 4.2.7 *Der ökonomische Aspekt: Kostenkalkulation*

Für jeden Anwender aus dem Gartenbau und Landwirtschaft spielen neben des gewünschten (hier wasserspeichernder) Effektes der eingesetzten Produkte vor allem die Kosten eine entscheidende Rolle. Diese Kosten, erstmals unabhängig von den Investitionskosten von irgendwelcher Bewässerungstechnik betrachtet, hängen von unterschiedlichen Faktoren wie aktueller Preis pro Menge, Aufwandmenge, Abnahmemenge (Fläche x Aufwandmenge) und Transportentfernung ab.

Mit Hilfe des aktuellen Preises und der verwendeten Aufwandmenge können die Kosten pro Fläche (Hektar) ermittelt werden. Am Beispiel der Aufwandmenge nach Herstellerempfehlung wurde diese Berechnung für die untersuchten festen Bodenhilfsstoffe durchgeführt. Je nach Aufwandmenge und Gesamtfläche kann die benötigte Abnahmemenge kalkuliert werden. Die Preise hängen jedoch auch von der Gebindegröße ab. Die meisten Händler bieten ihre Produkte in 5 kg Säcken (Bsp. Gartencenter), BigPacks (ca. 1000 l) oder lose (ab LKW-Ladung) an. Mit steigender Abnahmemenge nimmt der Preis pro Kilogramm im Regelfall deutlich ab.

Einige mineralische Stoffe wie Alginit, Perlit oder Bentonit können in unterschiedlichen Korngrößen geordnet werden. Diese unterschiedlichen Körnungseinheiten der einzelnen

Bodenhilfsstoffe können zu Preisunterschieden führen, die durch zusätzliche Verarbeitungsschritte in der Produktion bzw. nach dem Abbau entstehen.

Tab. 16: Kosten (€/ha) ausgewählter fester Substrate in Abhängigkeit der aktuellen Preise (Stand: Feb. 2013) und den Aufwandmengen (kg/m<sup>2</sup>)

Produkt	Hersteller	Preis <sup>1</sup> [€/kg]	Aufwandmenge <sup>2</sup> [kg/m <sup>2</sup> ]	Kosten [€/ha]
Alginit®	TNR	0,08	2,0	1600
Bentonit	Neudorff	0,92	0,5	4600
Betasoil®	Betasoil™	2,00	1,5	30000
Axis®	Consagro	0,63	1,9	9450
Urgesteinsmehl	Dia-Bas	0,38	0,5	1900
Geohumus®	GEOHUMUS™	9,95	0,2	20000
Perlite	Knauf Perlite	0,05	1,8	9000
Kokosfaser	Canna	1,87	2,8	52360
Weißtorf	Floratorf	0,22	12,5	27500
Zeolith	ZEOCEM	0,14	1,0	1400

<sup>1</sup> Richtpreise

<sup>2</sup> flächig ausgebracht

Die Tab. 16 stellt ausschließlich die Produktkosten pro Hektar (ha) in Abhängigkeit der aktuellen Preise und Aufwandmengen nach Herstellerangabe dar, wobei jeweils eine großflächige Anwendung/Ausbringung zu Grunde gelegt wurde. Für die Berechnung zum Beispiel beim „Hydrip“-System muss die reihenabhängige Ausbringung einberechnet werden. Hierzu wird jedoch zum einen der Abstand der einzelnen Bewässerungsschläuche und zum anderen die Kulturart/-sorte benötigt. In den Kosten sind zudem keinerlei Transportkosten enthalten. Sie können das ein oder andere Produkt stark belasten. Am Beispiel Naturzeolith aus der Slowakei wird das sehr stark deutlich:

Zeolith ohne Transportkosten = 140€/t

Zeolith mit Transportkosten = 200€/t

Bezogen auf einen Hektar entstehen so bereits 2000 Euro Frachtkosten, die sich ausschließlich auf das Verschiffen nach Hamburg, Deutschland beziehen. (zeocem.com; Stand Februar 2013)

Die Preise sind nur eine Momentaufnahme und können sich jeder Zeit verändern. Zudem ist in der Kostenkalkulation aus der Tab. 16 die Abnahmemenge nicht mit einbezogen, es

handelt sich lediglich um Richtpreise. Aktuelle Preise erhält man direkt bei den Herstellern und Lieferanten, die zusätzlich die Abnahmegröße und Transportkosten einberechnen. Des Weiteren müssen zur Berechnung der Kosten noch der Maschineneinsatz und die Arbeitskraft berücksichtigt werden.

### **4.3 Kick-Brauckmann-Gefäßversuch**

Unter praxisähnlichen Bedingungen sollten in diesem Versuch die ausgewählten festen Bodenhilfsstoffe (siehe Tab. 3) auf ihren wasserspeichernden Effekt getestet werden. Wie bereits in Kap. 3.2 detailliert erläutert, wurden die Stoffe mit der empfohlenen Aufwandmenge nach Herstellerangabe mit dem Uedorfer Gemisch vermischt und in dem Topf als ein 400 ml Depot um einen simulierten Tropfer (hier Röhrchen) positioniert. Neben der Wasserspeicherfähigkeit konnte hier auch der Effekt auf eine eventuell verbesserte Nährstoffverfügbarkeit, die zahlreiche Hersteller in ihren Produktbezeichnungen versprechen, getestet werden. Allgemein wird in diesem Zusammenhang auch oftmals von verbessertem Pflanzen- und Wurzelwachstum gesprochen.

#### **4.3.1 Untersuchung des überschüssigen Gießwassers**

Die Messung der Sickerwassermenge wurde im ersten Versuchsjahr an zwei und im zweiten Versuchsjahr an vier Terminen durchgeführt.

Die Messung der Sickerwassermengen sollte Rückschlüsse auf die Wasserbindekraft der Bodenhilfsstoffe geben. Diese Bindekraft setzt sich aus Adhäsions- (Adsorptionswasser) und Kohäsionskräften (Kapillarwasser) zusammen.

Die Messung des überschüssigen Wassers zeigte im ersten Versuchsjahr keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten. Die verhältnismäßig höhere Wassermenge der Kontrollvariante mit oberflächlicher Bewässerung wurde durch einen defekten Tropfer einer einzelnen Wiederholung ausgelöst. Dieser wurde noch vor der zweiten Ernte ausgetauscht. Bei allen anderen Varianten wurde eine Sickerwassermenge zwischen 1000 und 1500 ml pro Topf gemessen.

Die relativ hohe Sickerwassermenge aller Varianten wurde voraussichtlich durch zeitweise kältere Bedingungen im Gewächshaus hervorgerufen, da die Pflanzen zu dem Zeitpunkt weniger Wasser verbrauchten. Es wurde daher mit mehr Wasser bewässert als benötigt. Die

Ursache hierfür war die Bewässerungssteuerung, dessen Bewässerungsintervall nur manuell eingestellt und somit nicht bei jeder Temperaturschwankung durchgeführt werden konnte.

Im darauffolgenden Versuchsjahr wurden ebenfalls keine signifikanten Unterschiede der Sickerwassermengen zwischen den Varianten gemessen (siehe Abb. 32). Die höchsten Abtropfmengen, die bei ca. 1500 ml Wasser lagen, wurden in den Varianten Kontrolle „unterirdisch bewässert“, Axis, Gesteinsmehl und Geohumus festgestellt. Bei den Varianten mit Alginit, Betasoil, Zeolith, Bentonit, Kokosfaser und Torf tropften über das Jahr gesehen um die 900 ml Wasser ( $\pm 100$  ml) ab. Nur in den beiden Varianten Kontrolle „oberirdisch bewässert“ und mit dem Perlite wurde unter 450 ml überschüssiges Wasser erfasst.

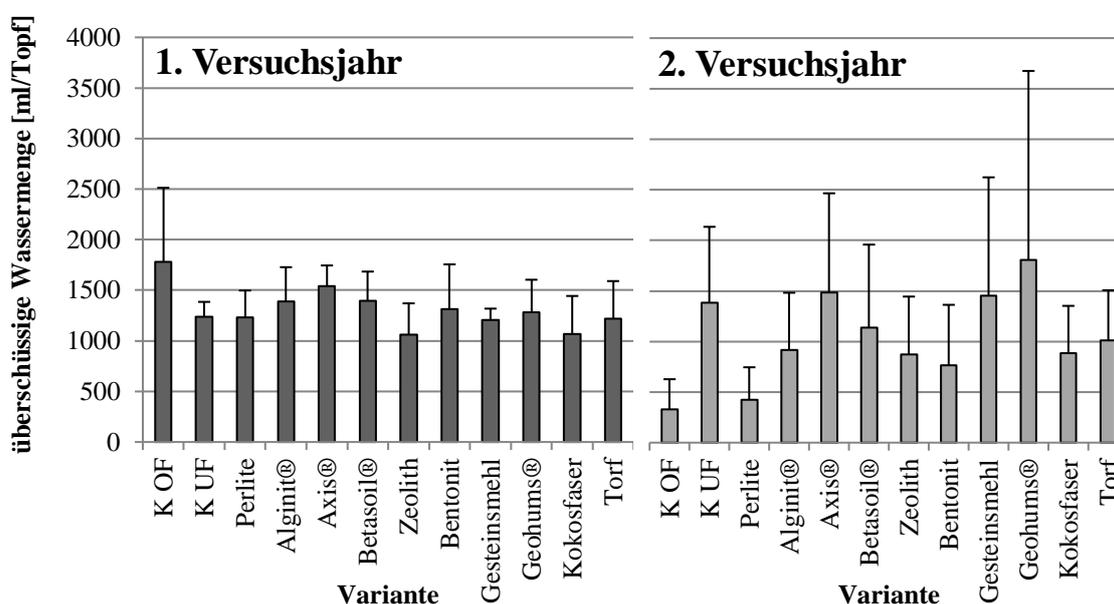


Abb. 32: Vergleich der durchschnittlichen Sickerwassermenge der einzelnen Versuchsvarianten des 1. und 2. Versuchsjahres; K OF = Kontrolle oberirdisch bewässert; K UF = Kontrolle unterirdisch bewässert; n = 5; Fehlerbalken: Standardabweichung

Eine Erfassung der gesamten Bewässerungsmenge erfolgte nur für das erste Versuchsjahr (September bis Dezember). Sie betrug ca. 8,5 Liter pro Topf. Im zweiten Versuchsjahr wurde über einen deutlich längeren Zeitraum (April bis Dezember) bewässert und doppelt so häufig geerntet. Hinzu kam die vollständige Sommerperiode mit sehr hohen Temperaturen im Gewächshaus. Somit kann durchaus angenommen werden, dass im zweiten Jahr mit mindestens dreimal so viel Wasser bewässert wurde. Würden die Sickerwassermengen beider Jahre mit einander korrelieren, würde die überschüssige Menge an Wasser im zweiten Versuchsjahr auch mindestens dreimal so hoch sein. Die niedrigen Sickerwassermengen

zahlreicher Varianten im zweiten Versuchsjahr wurden vermutlich durch eine wesentlich höhere Transpiration der Pflanzen hervorgerufen. Vor allem bei sehr hohen Temperaturen hatten die Pflanzen mehr Wasser verbraucht. Durch das erhöhte Austrocknen des Bodensubstrates wurde pro Bewässerungsintervall mehr Wasser in die oberen Schichten transportiert, die Sickerwasserbildung dadurch reduziert. Ein Effekt der Bodenhilfsstoffe auf eine verbesserte Wasserspeicherung konnte mit dieser Messung nicht bestätigt werden.

Die allgemeine Sickerwasserbildung in beiden Versuchsjahren wurde durch den Versuchsaufbau induziert. Um den Boden und somit die Pflanzen mit ausreichend Wasser zu versorgen, d.h. 70 - 80 % FK, wurden die BHS-Bodendepots überschüssig mit Wasser bewässert, um auch die umliegenden Bodenschichten zu durchfeuchten. Da sich die Depots im unteren Drittel des Topfes befanden, war eine Sickerwasserbildung unvermeidlich. Die Schwerkraft war stärker als die Kapillarkräfte (SCHEFFER ET AL. 2010). Um dem entgegenzuwirken, hätte die Bewässerungsintensität auf ein Minimum heruntergefahren und die Bewässerungsintervalle stark erhöht werden müssen.

#### **4.3.2 *Frischmasse-Ertrag des Pflanzenmaterials***

„Die Zunahme der Frischmasse (FM), der Trockenmasse (TM; organische Substanz) und des Wassergehaltes (WG) können als Maß für das Wachstum einer Pflanze oder eines Pflanzenorgans dienen. Bei der Bestimmung der Frischmasse ist zu beachten, dass diese Größe natürlich nur dann etwas über Wachstum aussagen kann, wenn das Pflanzenmaterial vor der Messung optimal mit Wasser versorgt war (volle Turgeszenz des Gewebes).“ (SCHOPFER 1989).

Die Frischmasse setzt sich aus der organischen Substanz und dem darin enthaltenen Wassergehalt zusammen. Die optimale Versorgung der Pflanzen war im Fokus des Versuchs und somit war der Vergleich der Frischmasse ein idealer Beurteilungsfaktor. Laut KALTSCHMITT ET AL. (2009) hat Weidelgras einen sehr hohen Bedarf an Wasser (Transpirationskoeffizient ca. 700 mm H<sub>2</sub>O/kg TM), der kontinuierlich und gleichbleibend gedeckt werden muss. Die Ernte des oberirdischen Pflanzenmaterials erfolgte an zwei Terminen im ersten Versuchsjahr und an vier Terminen im zweiten Jahr.

Die Frischmasse-Erträge aller Varianten zeigten keine signifikanten Unterschiede auf. Folglich unterschieden sich die Gesamterträge aller Ernten (Schnitte) ebenfalls nicht signifikant. Einen auffällig hohen Ertrag (ca. 150 g/Topf) erzielten alle Varianten in der ersten Ernte, der in der Abb. 33 gut sichtbar ist. Er war im Verhältnis mindestens dreimal so

hoch wie in den restlichen Ernten. Dieser allgemein hohe Frischmasseertrag aller Varianten in der 1. Ernte resultierte aus einer konstanten Wasserversorgung über Kopf (80 % FK) und einer sehr guten Nährstoffversorgung durch die Grunddüngung des Bodensubstrates. Anschließend wurden alle Varianten ausschließlich mit 1 g Ferty3 pro Topf nachgedüngt, um eventuelle Effekte der Bodenhilfsstoffe auf die Nährstoffverfügbarkeit zu untersuchen. Die installierte unterirdische Bewässerung wurde erst nach dem 1. Erntetermin in Gebrauch genommen, damit ein gleichmäßiges Aufwachsen und Etablieren der Pflanzen gewährleistet werden konnte.

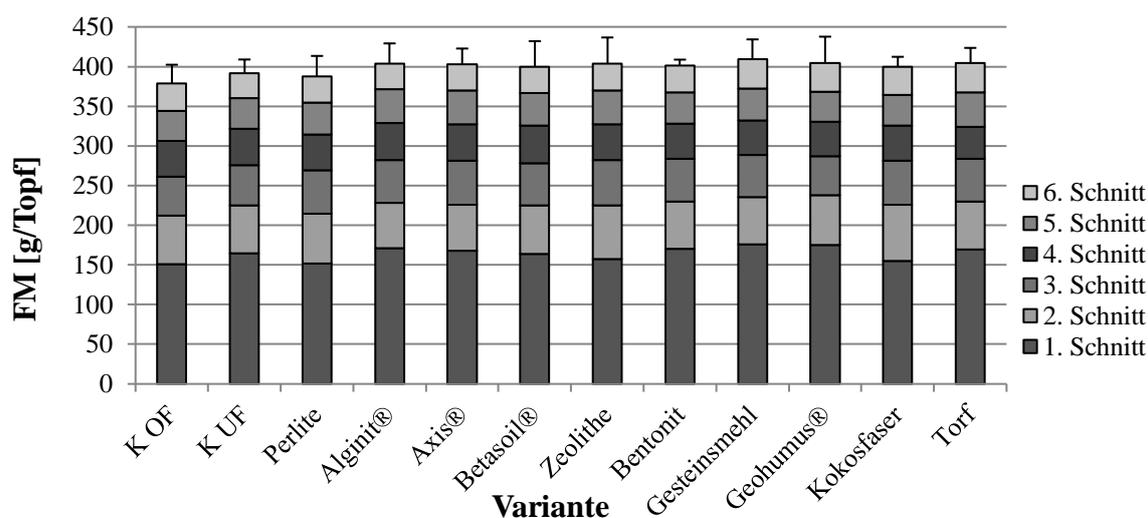


Abb. 33: Vergleich des gesamten Frischmasse-Ertrages [g FM/Topf] der unterschiedlichen Varianten; Ertragsermittlungen aus 6 Ernteschnitten; K OF = Kontrolle oberirdisch bewässert; K UF = unterirdisch bewässert; n = 5; Fehlerbalken: Standardabweichung

Mit der Bestimmung der Frischmasse der Varianten konnte somit nicht geklärt werden, ob und inwiefern die wasserspeichernde Eigenschaft der Bodenhilfsstoffe eine Rolle gespielt hat. Die Unterschiede zwischen den Varianten waren zu keiner Ernte signifikant unterschiedlich.

#### 4.3.3 Trockenmasse-Ertrag des Pflanzenmaterials

Die organische Substanz (Trockenmasse) setzt sich ca. aus 90 Gew.-% aus den Elementen Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und 6 % Wasserstoff (H) zusammen. Die Pflanze nimmt sie in Form von CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O auf. (MENGEL 1991)

Die Aufnahme hängt von verschiedenen äußeren Einflussfaktoren wie Klima, Boden oder pflanzenbaulichen Maßnahmen ab (GISI ET AL. 1997). Die Trockenmassebildung ist von

einer optimalen Wasserversorgung der Pflanzen (Weidelgras) abhängig. Aufgrund unterschiedlicher Entwicklungsphasen der Pflanzen muss das Verhältnis Frischmasse zu Trockenmasse nicht zwangsläufig identisch verlaufen.

Die ermittelten Trockenmasse-Erträge der Varianten unterschieden sich genau wie bei der Frischmasse-Analyse in den einzelnen Ernten nicht signifikant voneinander. Ebenfalls wurde die höchste Trockenmassebildung in der ersten Ernte (ca. 20 g/Topf) gemessen (siehe Abb. 34). In den Ernten vom zweiten bis zum fünften Schnitt ging der Ertrag um ca. 50 % zurück, in der letzten sogar um ca. 70 %. Auch hier waren vermutlich die sehr gute Grundversorgung an Nährstoffen und die optimale Wasserversorgung ausschlaggebend.

Der Vergleich der Gesamterträge zeigte desgleichen keine signifikanten Unterschiede.

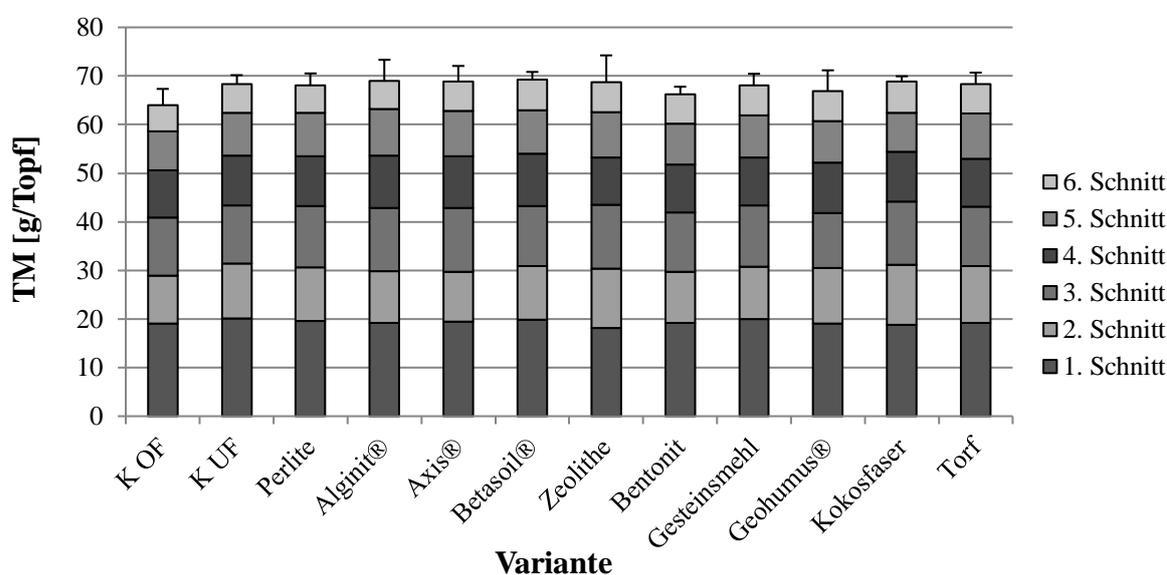


Abb. 34: Vergleich des gesamten Trockenmasse-Ertrages [g TM/Topf] der unterschiedlichen Varianten; Ertragsermittlungen aus 6 Ernteschnitten; K OF = Kontrolle oberirdisch bewässert; K UF = unterirdisch bewässert; n = 5; Fehlerbalken: Standardabweichung

Aufgrund der Streuung innerhalb der einzelnen Varianten lassen sich die Ergebnisse nicht statistisch absichern. Eine Steigerung des TM-Ertrages durch den Einsatz von Bodenhilfsstoffen konnte mit diesem Versuch also nicht bestätigt werden, da die Kontrollvariante mit unterirdischer Bewässerung im Verhältnis zu den Varianten mit BHS ähnliche Steigerungen aufwies. Die ausgebliebenen (nicht signifikant) höheren Erträge durch den Einsatz einiger BHS lassen sich vermutlich auf die applizierte Menge

zurückführen. Die WHK-Analysen (siehe Kap. 4.2.3) bestätigen die Ergebnisse dieses Gefäßversuchs. Die Aufwandmengen der Hersteller sind bei vielen BHS viel zu niedrig angesetzt (siehe Tab. 3). Einige Stoffe wie zum Beispiel Bentonit, Zeolith oder Betasoil erhöhten die WHK des Uedorfer Gemisches erst bei Aufwandmengen um die 30 Gew.-% (siehe Abb. 26). Die empfohlene und in diesem Versuch verwendete Menge lag für die genannten Stoffe nur zwischen 2 und 5 Gew.-%.

Um das Verhältnis zwischen FM und TM genauer zu untersuchen, wurde zusätzlich der relative Wassergehalt der Pflanzen berechnet. Dieser kann mögliche Unterschiede der Wasserversorgung zwischen den Ernteterminen zeigen, die durch die Ertragsmessungen nicht sichtbar wurden (siehe Kap. 4.3.4).

#### **4.3.4 Relativer Wassergehalt der Pflanzen**

Neben der Frischmasse kann auch der relative Wassergehalt der Pflanzen Rückschlüsse auf die Wasserverfügbarkeit und -aufnahme geben. Der relative Wassergehalt wurde aus der FM und TM wie folgt errechnet:

$$\mathbf{WG}_{rel} = \left( \frac{FM - TM}{FM} \right) \times 100 \quad [\%]$$

Die Wassergehalte des oberirdischen Pflanzenmaterials unterschieden sich zwischen allen Varianten innerhalb der einzelnen Ernten nicht signifikant. Auffällig hoch waren die hohen Gehalte in der ersten Ernte, wie in Abb. 35 sehr gut sichtbar ist. Die Pflanzen enthielten zwischen 87 und 89 % Wasser. Im 2. und 6. Schnitt lag der Wassergehalt in den Pflanzen bei ca. 82 % Wasser ( $\pm 1-2$  %). In den restlichen Ernten konnten lediglich Wassergehalte zwischen 75 und 79 % festgestellt werden.

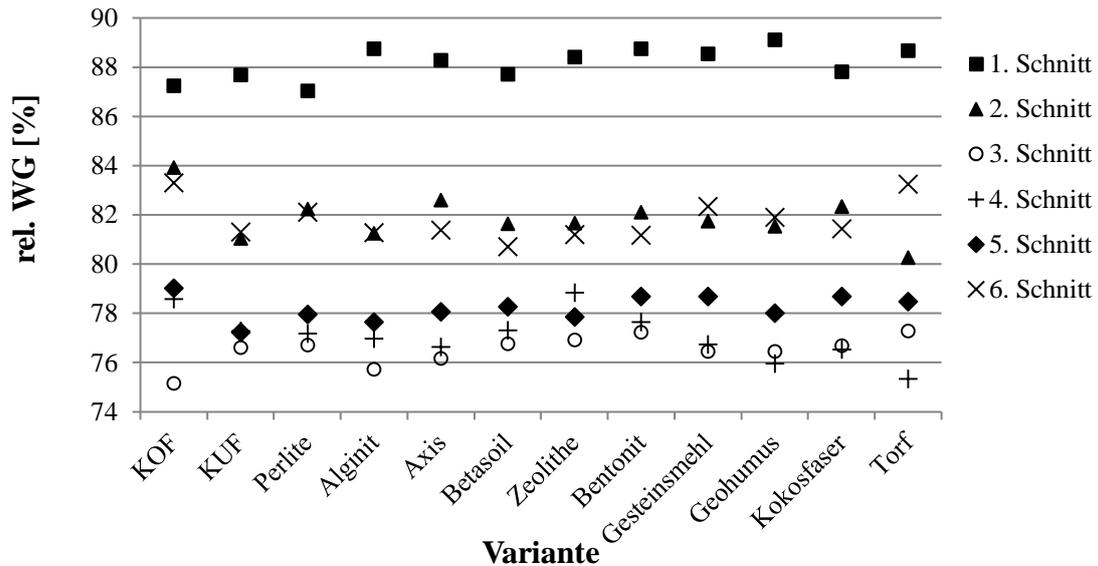


Abb. 35: Vergleich der relativen Wassergehalte [%] der Varianten der einzelnen Schnitte; n = 5

Die Unterschiede der Wasserkonzentrationen von Schnitt zu Schnitt wurden durch unterschiedliche Wachstumsfaktoren (physikalische, chemische oder biotische) hervorgerufen. So genannte variable Faktoren werden dabei in Klima- und Bodenfaktoren gegliedert. Die Klimabedingungen müssen dabei noch in energetische (Licht, Temperatur und Länge der Photoperiode) und stoffliche Faktoren unterteilt werden. Die Bodenfaktoren beziehen sich dagegen auf den Gehalt von Wasser, Mineralstoffen und organischen Stoffen, die den Pflanzen zur Verfügung stehen. (FINCK 2007)

Der Gehalt an Wasser in den Pflanzen hängt auch stark vom Erntezeitpunkt statt. Mit zunehmendem Entwicklungsstadium sinkt die Wasserkonzentration in den Pflanzen, vor allem nach dem Umstellen in die generative Wachstumsphase (am Beispiel von Senfpflanzen analysiert; JUNGK 1969). Der erheblich höhere Wassergehalt in den Pflanzen nach der ersten Ernte resultierte zum einen aus dem hohen Frischmasseertrag, der durch das Nicht-Schossen von Welschem Weidelgras nach Herbstsaat im Anbaujahr hervorgerufen wurde (HANUS ET AL. 2008). Zum anderen wurden alle Varianten konstant auf 80 % FK oberirdisch bewässert. Alle Varianten wurden so optimal mit Wasser versorgt. Zudem war die Nährstoffversorgung ebenfalls durch die vorher ausgebrachte Grunddüngung des Bodens gesichert.

Laut SCHOPFER (1989) dient der Wassergehalt sowie die Frisch- und Trockenmasse lediglich als Maß für einen Wachstumsvergleich von Pflanzen. Die Ergebnisse des gesamten

Versuchs zeigten, dass die Bodenhilfsstoffe unter den hier gewählten Versuchsbedingungen keinen Einfluss auf die Wasserspeicherung im Boden und dem Pflanzenwachstum hatten.

#### ***4.3.5 Nährstoffentzug der Pflanzen***

Der Nährstoffentzug der Pflanzen konnte mit Hilfe der Ergebnisse der Trockenmassebestimmung [g TM/Topf] und der ermittelten Nährstoffkonzentrationen [g/g TM] berechnet werden. Die Nährstoffentzüge wurden nur für die vier Varianten K UF, Alginit, Betasoil und Kokosfaser analysiert und berechnet. In diesem Versuchsteil sollte ein Vergleich der unterirdischen Bewässerung mit und ohne Bodenhilfsstoffzusatz untersucht werden. Hierzu wurde das Alginit und Betasoil ausgewählt, da beide Stoffe bereits in anderen Praxisversuchen der Firma Hydrip eingesetzt wurden. Zudem wurde Alginit ebenfalls in dem Spargelversuch in Herongen (vgl. Kap. 3.6) und im Weinbauversuch in Portugal (vgl. Kap. 3.7) verwendet. Um neben der mineralischen Stoffgruppe der BHS auch die organische abzudecken, wurde zusätzlich die Variante mit dem Kokosfaser ausgewählt.

Die Nährstoffentzüge an Kalium, Phosphor, Magnesium und Natrium der Kontrolle und die drei untersuchten Varianten zeigten keine Unterschiede (siehe Abb. 36). Eine vermutete erhöhte Nährstoffverfügbarkeit oder –mobilisierung durch die eingesetzten Stoffe konnte hier nicht festgestellt werden. Die relativ hohen Entzüge aller Elemente in der ersten Ernte gegenüber den fünf anderen lässt sich aus dem hohen Pflanzenertrag (siehe Abb. 33 und Abb. 34) ableiten. Je höher die Pflanzenmasse ist, desto höher ist auch der Nährstoffentzug.

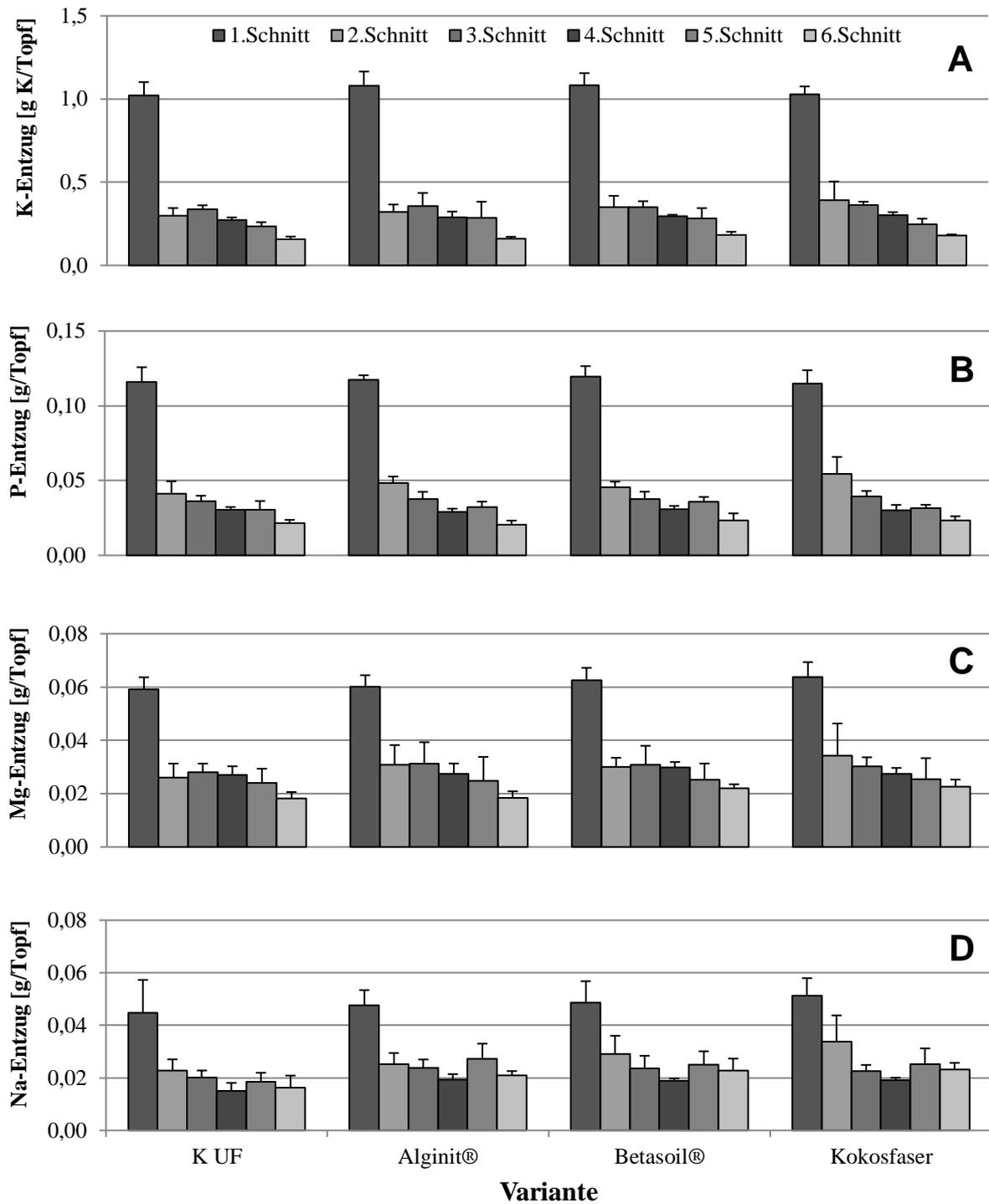


Abb. 36: Vergleich der durchschnittlichen Nährstoffentzüge [g/Topf] der ausgewählten Versuchsvarianten in Abhängigkeit von 6 Ernteterminen; A = Kalium; B = Phosphor; C = Magnesium; D = Natrium; n = 5; Fehlerbalken: Standardabweichung

#### 4.4 Effekt von flüssigen Bodenhilfsstoffen auf den Pflanzenertrag und der Nährstoffverfügbarkeit

In diesem Versuch wurden, wie in Kap. 3.3 ausführlich beschrieben, unterschiedliche flüssige Bodenhilfsstoffe mit zwei unterschiedlichen Aufwandmengen (vgl. Tab. 5) auf ihre Wirkung in Bezug auf das Pflanzenwachstum untersucht. Dies erfolgte mit Hilfe der Ermittlung des Trockenmasse-Ertrages und des Wassergehaltes des Welschen Weidelgrases in diesem Topfversuch, der unter kontrollierten Temperatur- und Lichtbedingungen durchgeführt wurde. Außerdem wurden alle Varianten konstant auf 80 Gew.-% FK oberirdisch bewässert.

Neben dem TM-Ertrag und dem Wassergehalt wurde in diesem Versuch der Nährstoffentzug der Elemente Kalium, Phosphor und Magnesium durch die Pflanzen ermittelt. Zusätzlich wurde noch die Natriumentzug der Pflanzen untersucht. Diese Messung sollte mögliche Rückschlüsse auf eine Verbesserung der Nährstoffverfügbarkeit durch den Einsatz von flüssigen BHS geben.

##### 4.4.1 Trockenmasse-Ertrag und Wassergehalt des Pflanzenmaterials

In den drei Schnitten ergaben sich Trockenmasse-Erträge zwischen 1,3 und 1,9 g TM/Topf im ersten, 2,2 und 2,8 g TM/Topf im zweiten und 1,6 und 2,4 g TM/Topf im dritten Schnitt, sodass sich insgesamt Erträge von 5,8 bis 6,6 g TM/Topf bildeten (siehe Abb. 37).

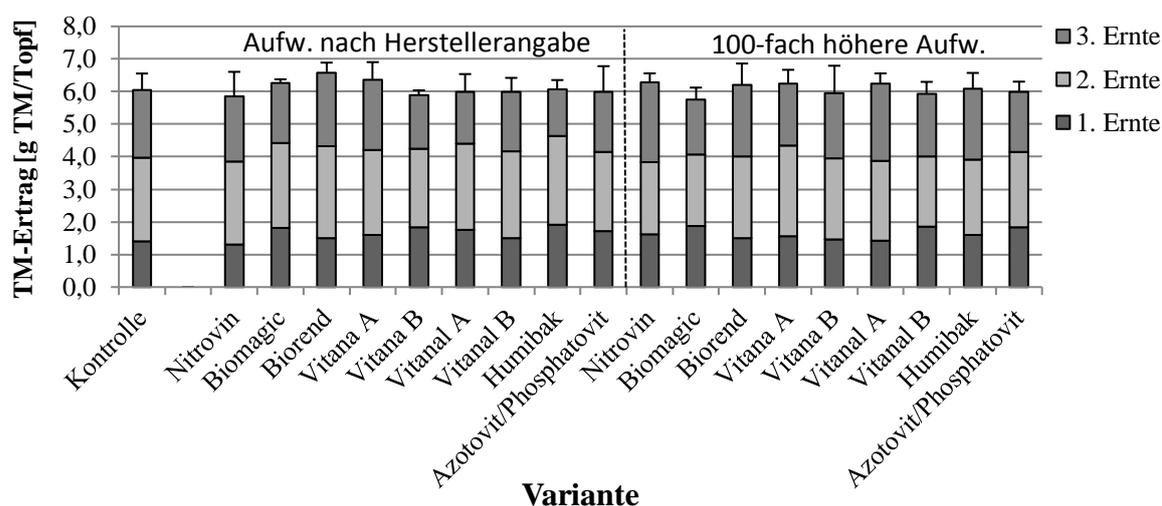


Abb. 37: Durchschnittlicher Gesamttrockenmasse-Ertrag der Varianten mit den flüssigen Bodenhilfsstoffen (zwei unterschiedliche Aufwandmengen) und einer Kontrollvariante, 3 Ernten; n = 4; Fehlerbalken: Standardabweichung

Einige Varianten, wie zum Beispiel die mit Biorend oder Vitana A mit der Aufwandmenge nach Herstellerangabe, übertrafen zwar in jedem Schnitt und somit im Gesamtertrag die Kontrolle, jedoch ließen sich diese Unterschiede nicht statistisch signifikant absichern. Eine Vielzahl der untersuchten Präparate zeigte keinen oder sogar einen geringfügigen negativen Effekt, zum Beispiel Nitrovin, Vitana B und Biomagic, auf das Pflanzenwachstum. Aber auch diese geringeren Erträge gegenüber der Kontrolle konnten nicht statistisch signifikant abgesichert werden. Selbst die Ausbringung der 100-fach erhöhten Aufwandmenge gegenüber der Herstellerempfehlung erbrachte keine Ertragssteigerung.

Einfluss auf die Wirkung der Präparate könnte durch den Aufbau und der Durchführung des Versuchs hervorgerufen worden sein. Laut den Herstellern besitzen alle hier getesteten Mittel ähnliche Eigenschaften (vgl. Kap. 2.2.6.2). Sie sollen in erster Linie das Bodenleben verbessern, indem sie die Humusbildung und/oder das Wurzelwachstum mit Hilfe ihrer Inhaltsstoffe fördern. Dieser positive Einfluss auf den Boden soll eine verbesserte Nährstoffmobilisierung bewirken, die sich auf die Quantität und Qualität der Pflanzen auswirkt. Vor allem die Auswahl der Versuchsgefäße könnte ein entscheidender Störfaktor gewesen sein. Die Größe der Töpfe war somit ein beschränkender Faktor auf die Ausbildung eines vergrößerten Wurzelsystems bei den behandelten Varianten. Unterschiede in der Durchwurzelung gegenüber der Kontrollvariante konnten nach optischer Begutachtung nicht festgestellt werden.

Ein möglicher weiterer Einflussfaktor könnte die Wahl des Versuchssubstrates gewesen sein. Es handelte sich um einen sandigen Lehm (siehe Kap. 3.2.1), der vor dem Versuch optimal mit Nährstoffen angereichert wurde. Hieraus ließe sich auf jeden Fall der relativ gute Ertrag der Kontrollvariante ableiten. Aber inwiefern die Produkte wirklich Einfluss auf die Nährstoffversorgung hatten, wurde anhand der Nährstoffanalyse der Elemente K, P, Mg und Na untersucht.

Eine Ertragssteigerung durch die eingesetzten flüssigen Bodenhilfsstoffen konnte mit diesem Versuch nicht belegt werden.

Neben der Ertragsmessung wurde auch der relative Wassergehalt im Pflanzenmaterial bestimmt. Im ersten und zweiten Schnitt lag er zwischen ca. 89 und 91 %, im dritten Schnitt zwischen ca. 86 und 88 % (vgl. Abb. 38).

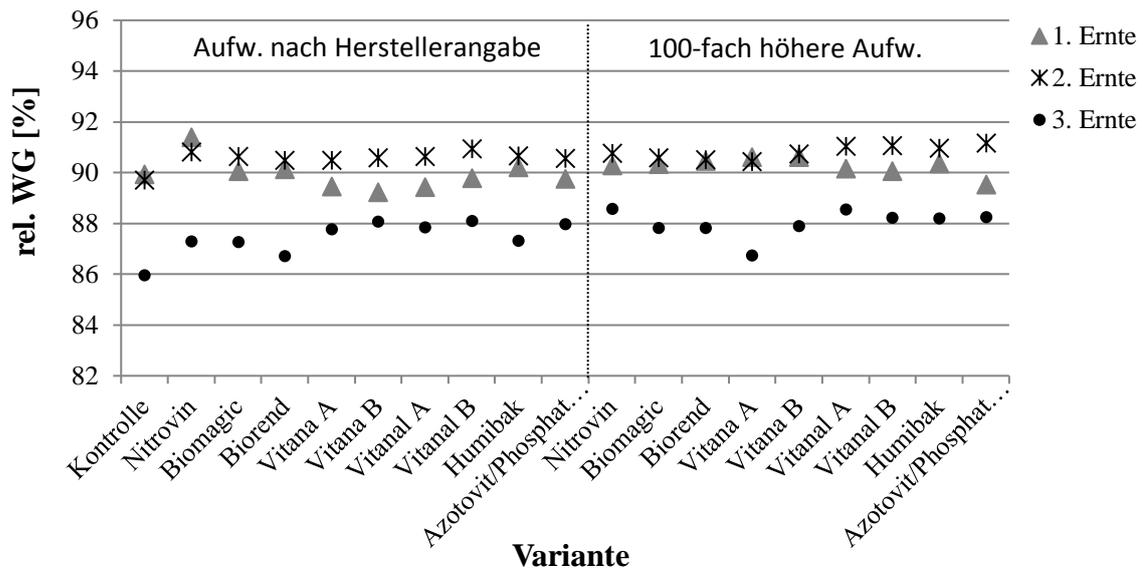


Abb. 38: Durchschnittlicher relativer Wassergehalt der geernteten Pflanzen der Varianten mit den flüssigen Bodenhilfsstoffen (zwei unterschiedliche Aufwandmengen) und einer Kontrollvariante, 3 Ernten; n = 4

Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten, unabhängig von der Aufwandmenge, konnten innerhalb eines einzelnen Schnittes nicht festgestellt werden.

#### 4.4.2 Gehalt an ausgewählten Makroelementen

Die Ausbringung von den Präparaten, unabhängig von der Aufwandmenge, erzielte keine (signifikanten) Unterschiede zur Kontrollvariante (siehe Tab. 17) in den jeweiligen Schnitten. Aus diesem Grund wurde auf die Analyse der Nährstoffentzüge des dritten Schnittes verzichtet. Eine verbesserte Nährstoffverfügbarkeit bzw. -mobilisierung konnte durch den Einsatz der jeweiligen Mittel nicht festgestellt werden.

Die höheren Entzüge der Pflanzen im zweiten Schnitt gegenüber dem ersten waren durch den höheren Ertrag im zweiten Schnitt, siehe Abb. 37, begründet. Die Pflanzen hatten vermutlich zu diesem Zeitpunkt ein wesentlich größeres Wurzelsystem ausgebildet und konnten so mehr Nährstoffe aufnehmen. Die Ausbildung der oberirdischen Pflanzenmasse wurde so gesteigert.

Die gewonnenen Ergebnisse konnten die Versprechen der Hersteller nicht belegen. Ein Einsatz solcher Produkte zur Ertragssteigerung kann deshalb nicht empfohlen werden.

Tab. 17: Durchschnittliche Entzüge [mg/Topf] der Elemente Kalium, Phosphor, Magnesium und Natrium an zwei Ernteterminen

Variante	Behandlung	Kalium		Phosphor		Magnesium		Natrium	
		Schnitt 1	Schnitt 2						
Kontrolle		86	158	11,6	16,0	5,9	11,5	2,3	9,7
Nitrovi	a	84	156	10,7	15,9	5,5	11,9	2,0	9,4
	b	111	139	13,3	15,0	5,3	10,9	2,1	8,5
Biomagic	a	116	155	15,8	17,2	6,9	11,9	2,5	9,4
	b	124	137	15,9	14,3	6,6	10,1	2,5	7,9
Biorend	a	96	170	12,5	17,5	5,8	13,0	2,3	10,7
	b	100	153	12,7	16,7	5,6	12,2	2,2	9,6
Sojall-Vitana A	a	94	161	13,8	17,7	5,8	12,7	2,3	10,5
	b	105	161	13,1	18,7	5,5	13,7	2,0	11,0
Sojall-Vitana B	a	121	146	15,8	15,2	5,7	11,6	2,1	8,2
	b	96	157	12,5	16,8	5,4	11,9	2,1	9,4
Sojall-Vitalan A	a	113	154	14,8	17,3	5,9	12,2	2,1	9,0
	b	87	157	11,6	16,5	5,1	11,8	2,0	9,4
Sojall-Vitalan B	a	93	169	12,8	18,2	5,2	12,6	1,8	9,3
	b	121	133	15,4	15,4	6,6	10,5	2,4	8,5
Humibak	a	125	159	15,7	18,3	7,0	13,1	2,8	10,2
	b	105	144	13,2	15,7	5,8	11,2	2,3	8,8
Azotovit/ Phosphatovit	a	102	159	14,3	16,4	6,1	11,5	2,3	9,6
	b	125	141	14,9	16,1	7,1	10,6	2,7	9,1

a = Aufwandmenge nach Herstellerangabe

b = 100-fach höhere Aufwandmenge

#### 4.5 Rhizoboxen: Vergleich von Wurzelsystemen unter dem Einfluss von unterschiedlicher Bewässerungsart

In der Abb. 39 werden Wurzelsysteme von Mais, gewachsen in Rhizoboxen mit unterschiedlichen Bewässerungssystemen, dargestellt. Untersucht wurde mit diesem Versuch das Wurzelwachstum von Maispflanzen in Abhängigkeit einer Unterflurbewässerung mit einem Bodenhilfsstoffdepot („Hydrip“-System) und einer ganzflächigen Oberflurbewässerung. In der „Hydrip“-Variante war sehr deutlich zu erkennen, dass dicke Nebenwurzeln verstärkt aktiv zur Wasserquelle und somit zum Depot gewachsen waren (vgl. Abb. 39, linkes Bild). Ferner bauten die Pflanzen in diesem Bereich des Bodens ein dichtes Netz an Feinwurzeln auf. Dies konnte verstärkt in dem Bereich mit dem BHS-Bodengemisch beobachtet werden. Bei der anderen Variante bildeten die

Maispflanzen ein stark sichtbares glockenförmiges Hauptwurzelsystem (siehe Abb. 39, rechtes Bild) aus. Im Zwischenraum hatten die Maispflanzen ein sehr dünnes Feinwurzelswerk aufgebaut.



Abb. 39: Vergleich des Wurzelsystems von Maispflanzen (*Zea mays*) bei unterschiedlicher Bewässerungsart; links: unterirdischer Tropfer mit Bodenhilfsstoffdepot (Alginit) zwischen den beiden Pflanzen; rechts: ganzflächige oberirdische Bewässerung

Dieser Versuch zeigte sehr deutlich, dass Pflanzenwurzeln einem Feuchtegradienten (STÜTZEL ET AL. 2004) entlang wachsen. Dieses Phänomen ist die Grundvoraussetzung für den Einsatz eines unterirdischen Bewässerungssystems, da in einigen Kulturen wie zum Beispiel beim Wein der unterirdische Tropfschlauch mindestens 30 cm entfernt von der Rebe verlegt wird (siehe Abb. 20). Eine Förderung des (Fein-)Wurzelwachstums um den Tropfer könnte durchaus aus den besonderen Eigenschaften des Alginits hervorgerufen worden sein. Mit der Eigenschaft der Verbesserung der WHK wurde vermutlich dem Versickern des Gießwassers entgegengewirkt und so wurde die umliegende Bodenschicht um den Tropfer permanent feucht gehalten. Ein Hineinwachsen der Wurzeln in die Tropfrohre konnte in diesem Versuch nicht beobachtet werden.

#### 4.6 Wurzeleinwachstest

Wie bereits im vorherigen Kapitel erläutert, wachsen die Pflanzenwurzeln aktiv zur Wasserquelle und demnach zu den Tropflöchern des unterirdisch verlegten Bewässerungssystems. Die Idee der Firma Hydrip war es, dass durch den Einsatz von wasserspeichernden Bodenhilfsstoffen die Zone um diese Löcher mit möglichst wenig Wassereinsatz lange feucht gehalten werde. Dieser Effekt sollte die Tropfschläuche

zusätzlich gegen das Einwachsen schützen, indem eine Art „Wasserblase“ um den Schlauch produziert werde. Dies kann jedoch nur mit konstanter optimaler Bewässerungsmenge erzielt werden. Bereits aus dem Kanal- und Abwasserbau ist bekannt, dass Wurzeln (hier vor allem von Bäumen) den Weg in die entsprechenden Rohre finden. Laut STÜTZEL ET AL. (2003 und 2004) sind sowohl defekte als auch intakte Abwasserrohre vom Wurzeleinwuchs betroffen. Im Rahmen seines Forschungsprojektes wurde am IKT (Institut für unterirdische Infrastruktur Gelsenkirchen) eine Messtechnik zur Untersuchung von mechanischen Wurzelkräften, die unterschiedliche Pflanzen auf Oberflächen etc. auswirken können, entwickelt. Zum Beispiel wurden Maximaldrücke bei der Garten-Erbse (*Pisum sativum*) von bis zu 5,9 bar und bei der Stieleiche (*Quercus robur*) von bis zu 11,9 bar festgestellt. Zum Vergleich hat ein Autoreifen einen Druck von ca. 2,5 bar. In diesem Zusammenhang kann auch die Anhebung von befestigten Wegen wie Gehwegen und Asphaltstraßen angeführt werden, die ebenfalls durch die großen Kräfte von Wurzeln hervorgerufen werden (REICHWEIN 2002). Dabei werden die Gehwegplatten und/oder Asphaltdecken regelrecht aufgebrochen und hoch gedrückt.

Diesen sogenannten Wurzelkräften von Pflanzen sind natürlich auch unterirdisch verlegte Tropfschläuche ausgesetzt. Hierbei sind insbesondere die Tropfeinheiten vom Einwachsen der Wurzeln gefährdet. Beim Eindringen können diese relativ kleinen Austrittslöcher, die für eine gleichmäßige Wasserversorgung im Boden sorgen, verstopft werden. Die Folge wäre eine Einschränkung bis hin zum vollständigen Verlust ihrer Funktionalität. Einige Hersteller von Tropfschläuchen versuchen technisch das Problem des Hinwachsens zu lösen. Die Firma Netafim bietet bereits Tropfer mit einer „Einwuchssperre“ (siehe Abb. 11) an. Inwieweit diese Sperre Schutz gegen Einwuchs bietet, sollte ebenfalls in diesem Versuch untersucht werden.

Aufgrund von unterschiedlichen Faktoren wachsen die Wurzeln bei unterirdischer Bewässerung ebenfalls in Richtung der wassergebenden Quelle (hier Tropfloch) wie bereits in Kap. 4.5 erwähnt. In diesem Versuch wurden die unterirdisch verlegten Tropfschläuche ebenfalls den Wurzeln und ihren Kräften ausgesetzt, indem zwei unterschiedliche Tropfschläuche in diesem Topfversuch unterirdisch verlegt wurden. (vgl. Kap. 3.5). Zum einen wurde der Tropfschlauch der Firma EURODRIP ohne Wurzelbarriere im Tropfer und zum anderen einer der Firma Netafim mit einer Tropfeinheit mit einer Einwuchssperre verlegt.

#### 4.6.1 Visuelle Auswertung

Nach dem Auftrennen der Tropfereinheiten wurde mit Hilfe des digitalen Kameramikroskops das Innenleben der im Versuch verbauten Tropfer analysiert, um den Weg der eingewachsenen Wurzeln zu untersuchen. In beiden Fabrikaten konnten Wurzeln nachgewiesen werden, wie die Abb. 40 und Abb. 41 sehr gut zeigen. Bei einigen Tropfern ohne Wurzelbarriere (EURODRIP GR) wurde zu den eingewachsenen Wurzeln noch der Eintrag von Sandkörnern festgestellt (siehe Abb. 40). Diese Beobachtungen konnten beim UniRam AS nicht gemacht werden. Laut Hersteller besitzen diese Tropfeinheiten einen „Vakuumschutzmechanismus (AS), der das Einsaugen von Schmutzpartikeln in den Tropfschlauch verhindert“ (netafim.de; Stand Juli 2014). Ein Einwachsen von Wurzeln konnte dieser Schutz nicht verhindern, wie die Bilder in Abb. 41 zeigen.

Die visuelle Analyse hatte ebenfalls ergeben, dass die Wurzeln unabhängig von der Variante stark eingewachsen waren.

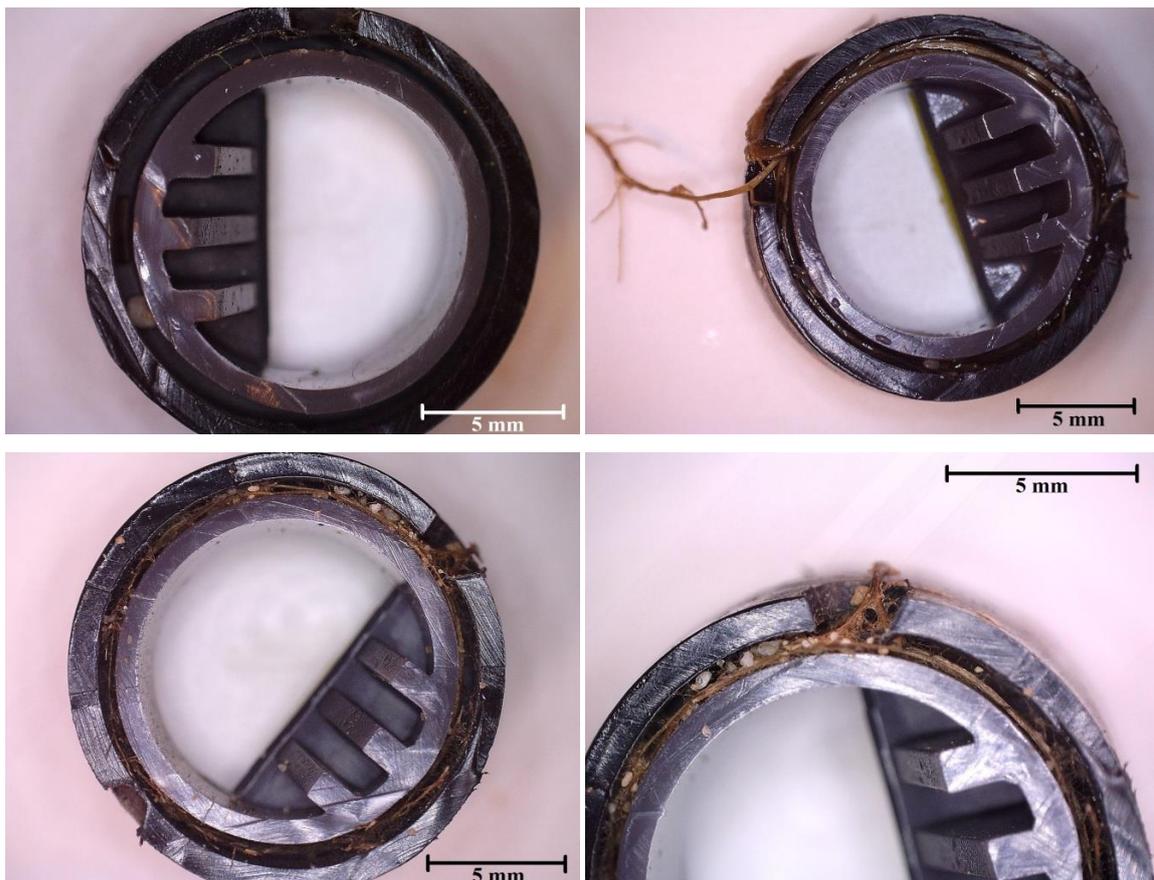


Abb. 40: Querschnittsbilder vom Tropfer ohne Wurzelbarriere, ohne Alginit und 12-wöchiger Wachstumsphase (Eurodrip GR); oben links: Tropfer mit defekter Zuleitung

Wie in Abb. 41 sehr gut zu erkennen, war das Hineinwachsen von Wurzeln in den Tropfern der Firma Netafim ebenfalls sehr stark. Jedoch konnten Wurzeln nur ausschließlich in der Vorkammer der komplexen Tropfereinheit (vgl. Abb. 11) festgestellt werden. Laut Hersteller schränkt der Einwuchs in diese Vorkammer die Funktionalität in keiner Weise ein (netafim.de; Stand Juli 2014). Die eingebaute Wurzelbarriere befindet sich bei diesem Typ erst am Verbindungsloch zur nächsten Kammer. Ein totaler Verlust der Funktionalität der Tropfer konnte in diesem Versuch nicht festgestellt werden. Vermutlich war der Kontakt von den Tropfern und den Pflanzenwurzeln mit 20 Wochen zu gering, um die Funktionalität der Einwuchssperre dieses Fabrikates zu testen. Jedoch wurden diese Tropfschläuche auch im Weinbauversuch (siehe Kap. 3.7) eingesetzt und wurden somit einen wesentlich längeren Zeitraum (mehr als 1 Jahr) im Boden verbaut.

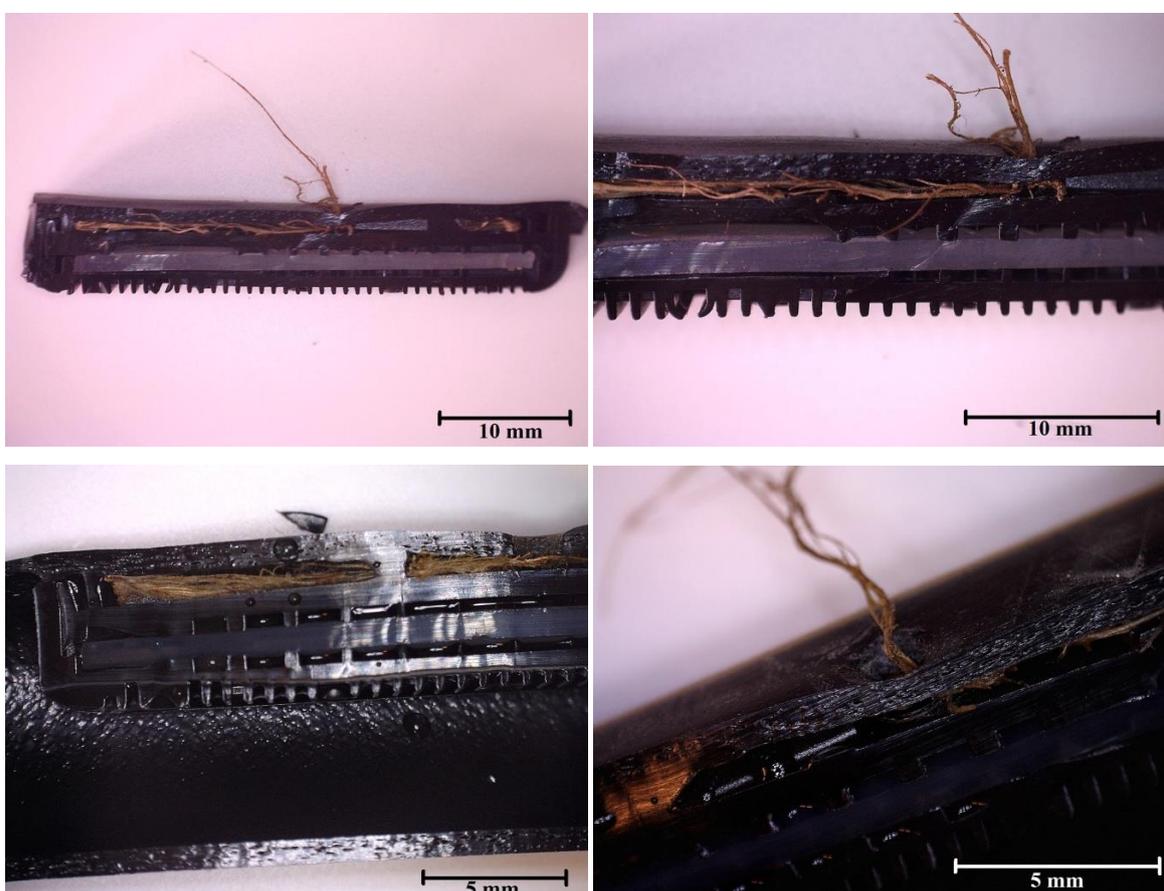


Abb. 41: Längsschnitt vom Tropfer mit Wurzelbarriere, ohne Alginat und 20-wöchiger Wachstumsphase (Netafim UniRam AS)

Auch einige Tropfereinheiten des Netafim-Schlauches wurden mit Hilfe eines Skalpell vorsichtig aufgetrennt und einer visuellen Begutachtung unterzogen. In Abb. 42 ist sehr gut sichtbar, dass das Einwachsen der Weinreben deutlich stärker als im oben beschriebenen

Versuch mit *Welschem Weidelgras* war. Neben dem Einwachsen von Hauptwurzeln in der Vorkammer konnte das Eindringen von zahlreichen Feinwurzeln bis in den Wasserstromkanal beobachtet werden. Der Funktionsverlust des betroffenen Tropfer kann einerseits durch das Verstopfen durch die Feinwurzeln und andererseits durch das sekundäre Dickenwachstum (STRASBURGER 2008) der Wurzeln in der Vorkammer hervorgerufen werden.



Abb. 42: Quer- und Längsschnitt vom Tropfer mit Wurzelbarriere im Weinbauversuch, Portugal (Netafim UniRam AS); links oben: Eintritt der Wein-Wurzel in das Tropfloch; oben rechts: Längsschnitt des Tropfers; Mitte unten: Vorkammer mit Einwuchssperre (Quelle: João Azevedo, 2013)

#### 4.6.2 Bewertung der Tropfer

In der Abb. 43 wird der Unterschied der Durchfeuchtungszonen eines intakten und eingeschränkt funktionierenden Tropfer nach dem Abtrocknungszeitraum (ca. 2 Tage) sichtbar. Obwohl beide Varianten aus einem unterschiedlichen Blickwinkel abgebildet wurden, erkennt man beim Topf mit dem funktionierenden Tropfer ein erheblich größeres durchfeuchtetes Bodenvolumen (siehe Abb. 43, rechtes Bild).



Abb. 43: Vergleich zweier Bodenkerne aus der Variante mit dem Tropfer der Firma Eurodrip® ohne Alginit

Die Tab. 18 und Tab. 19 zeigen die Ergebnisse der Bewertung der Einwachsstärke, die nach den ausgearbeiteten Bewertungskriterien (Tab. 11) ermittelt wurden. Bei einigen Varianten hatte sich während der Versuchsdurchführung das L-Verbindungsstück zur Tropfereinheit gelöst. Dort konnte nicht mehr über den Tropfer bewässert werden. Demzufolge wurden diese Wiederholungen aus der Bewertung herausgenommen. Sie wurden in der Bewertung mit einem „x“ gekennzeichnet. In dieser Bewertung wurde ausschließlich das Eindringen der Wurzeln und die vorhandene Wurzelmasse im Tropfer beurteilt. Die Wurzelbarriere im Fabrikat von Netafim wurde somit nicht berücksichtigt, da in einigen Wiederholungen dieser Variante eine relativ starkes Einwachsen beobachtet wurde, auch wenn es sich dabei nur um die Vorkammer handelte. Untersucht wurden Tropfeinheiten aller vier Varianten (siehe Tab. 18 und Tab. 19), die 12 und 20 Wochen in den Gefäßen eingebaut waren. Diese um acht Wochen verlängerte Wachstumsphase verursachte einen durchschnittlich um 33 % höheren Score bei der Bewertung des Wurzeleinwuchses. Diese Wurzelmasse ist durchaus kritisch zu beurteilen, weil die meisten Bewässerungsschläuche für einen Gebrauchszeitraum von 8

bis 10 Jahren ausgelegt sind. Darüber hinaus geben die Hersteller für ihre Produkte nicht nur ihre Garantie, sondern empfehlen die Tropfschläuche auch für sämtliche Kulturpflanzen.

Den größten Schutz vor dem Einwachsen der Wurzeln zeigte nach beiden Wachstumsphasen die Kombination aus Tropfschlauch mit Wurzelbarriere und Alginit. In dieser Variante konnten nur vereinzelte Wurzeln in der Vorkammer beobachtet werden. Der Effekt von Alginit in diesem Zusammenhang war jedoch schwierig zu beurteilen, da dieser in Kombination mit dem anderen Tropfschlauch keinen Unterschied zwischen der Variante ohne BHS aufwies. Ein Einsatz von Alginit zum Schutz von Wurzeleinwuchs konnte mit diesem Versuch nicht nachgewiesen werden.

Tab. 18: Bewertung der Einwuchsstärke (12 Wochen Wachstumsphase)

Variante	Wiederholung				Ø
	1	2	3	4	
Standard	x	2	3	1	2,0
Standard + Alginit	3	1	2	2	2,0
Netafim	3	2	0	2	2,0
Netafim + Alginit	2	1	2	1	1,5
				Gesamt Ø	1,88

x = defekte Zuleitung

Tab. 19: Bewertung der Einwuchsstärke (20 Wochen Wachstumsphase)

Variante	Wiederholung				Ø
	1	2	3	4	
Standard	3	x	3	3	3,0
Standard + Alginit	x	3	2	3	2,7
Netafim	2	3	2	2	2,3
Netafim + Alginit	2	2	2	2	2,0
				Gesamt Ø	2,5

x = defekte Zuleitung

## 4.7 Ober- und unterirdische Bewässerung im Spargel

### 4.7.1 Klimatische Bedingungen im Gewächshaus

Neben dem Einflussfaktor Boden spielt das Klima eine entscheidende Rolle für das Ertragspotential eines Standortes. Zu den wichtigsten Klimaparametern für die Landwirtschaft zählen Temperatur, Niederschlag, Strahlung und CO<sub>2</sub>-Konzentration. (ANTER ET AL. 2009; DIEPENBROCK ET AL. 2005; CHMIELEWSKI 2007)

Aufgrund der Durchführung des Versuchs in einem Gewächshaus herrschten für die Pflanzen beider Varianten dieselben Temperaturen und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (wurde in diesem Versuch nicht überprüft). Neben der kontinuierlichen Messung der Temperatur wurde zudem die Luftfeuchtigkeit aufgezeichnet, die zusammen mögliche Informationen über die Evapotranspiration (Evaporation und Transpiration) liefern könnten. Die exakte Berechnung der Evapotranspiration hängt jedoch noch von weiteren Faktoren ab. So wird die Evaporation (Wasserverdunstung über unbewachsene Bodenoberflächen) durch Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Bedeckung des Bodens, Sonneneinstrahlung (Exposition) und Pflanzenbestand (Dichte, Kulturart, Masse) beeinflusst. Ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Evaporation nehmen die Bodenart und dessen Wassergehalt. Die Transpiration (Verdunstung von Wasser über Spaltöffnungen) ist die tatsächlich verbrauchte Wassermenge der Pflanze. Laut AMBERGER (1996) müssen „zur Erzeugung von 1 kg Pflanzentrockensubstanz 300 bis 800 kg Wasser durch die Pflanze geschleust und wieder verdampft werden“.

Die Spargelpflanze ist eine wärmeliebende Pflanze, die zur eigenen Entwicklung bestimmte Temperaturen bzw. Temperaturreize benötigt. Der Temperaturverlauf des Jahres 2012 aus der Abb. 44 zeigt sehr deutlich, dass bereits ab März Tagestemperaturspitzen von durchschnittlich 20 °C erreicht werden konnten, die eine Eignung von Spargelanbau im Treibhaus durchaus unterstreichen. Diese Maxima führten vermutlich schon frühzeitig zu einer erhöhten Erwärmung der oberen Bodenschichten, die ein Triebwachstum an den Kronen auslösten.

Im Verlaufe des Jahres (April bis September) wurde eine Durchschnittstemperatur zwischen 18 und 25 °C gemessen. Laut SWADA ET AL. (1962) findet in diesem Temperaturbereich eine optimale CO<sub>2</sub>-Fixierung der Pflanzen statt. Mit den optimalen Wachstumsbedingungen des Spargels in Bezug auf Temperatur und CO<sub>2</sub>-Aufnahme war eine optimale Wasserversorgung notwendig. Besonders in den Sommermonaten, in denen tagsüber Temperaturen um die 40 °C gemessen wurden, musste verstärkt bewässert werden.

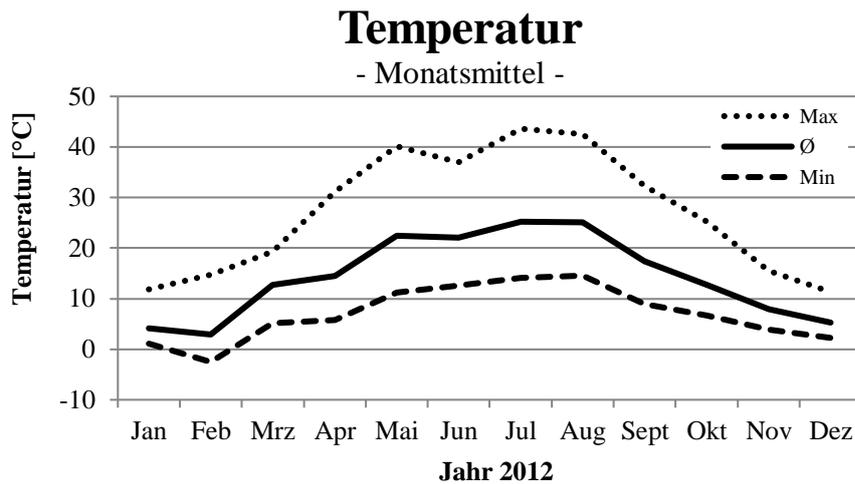


Abb. 44: Temperaturverlauf für das Jahr 2012, Gewächshaus Herongen

Neben der Temperatur hängt die Transpiration der Pflanzen auch von der relativen Luftfeuchtigkeit ab. Die Messungen der rel. Luftfeuchtigkeit hatten über das Jahr Durchschnittswerte zwischen 60 und 85 % ergeben. Die gemessenen max. Werte wurden ausschließlich in der Nacht festgestellt. Die durchschnittliche rel. Luftfeuchtigkeit in den Monaten Mai bis August zeigte diesen Effekt ebenfalls (siehe Verlauf in Abb. 45). Aus sehr hohen Temperaturen resultierte eine verhältnismäßig geringere Luftfeuchtigkeit tagsüber. Für die Pflanzen bedeutete eine Zunahme der Luftfeuchtigkeit zugleich eine Abnahme der Transpiration. (WEILER ET AL. 2008, BURGSTEIN 2013)

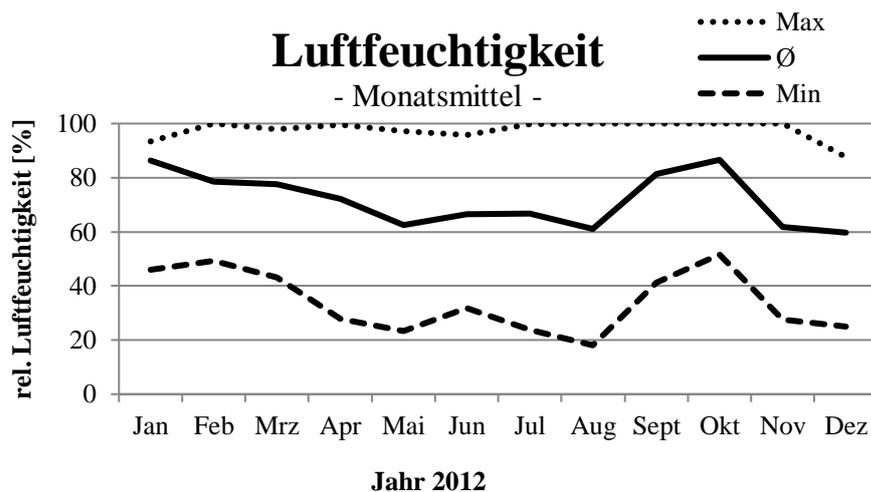


Abb. 45: Luftfeuchtigkeit im Jahr 2012, Gewächshaus Herongen

#### **4.7.2 Bewässerungsmenge und –intervalle im Spargelanbau**

In diesem Versuch wurde das Bewässerungssystem der Firma Hydrip, bestehend aus einem unterirdischen verlegten Tropfschlauch (Netafim UniRam AS) und einem Zusatz eines Bodenhilfsstoffes (2 kg Alginit pro laufenden Meter), mit einem oberirdisch verlegten Tropfschlauch (Eurodrip GS) im Spargelanbau verglichen werden. Beide Systeme sollten des Weiteren mit zwei unterschiedlichen Bewässerungsmengen (100 % und 50 %) getestet werden (siehe Kap. 3.6). Im Verlaufe des Versuchs wurde anhand der verbrauchten Wassermengen (Zählerstände der installierten Wasseruhren) der Varianten (siehe Tab. 20) festgestellt, dass die zwei Messparameter Durchflussrate der Schläuche und die Bewässerungsintervalle (Dauer) bei der Bewässerungssteuerung nicht beachtet wurden. Zum einen hatten beide Varianten pro Bewässerungssystem jeweils ungefähr dieselbe Wassermenge bekommen, zum anderen hatten die Systeme jedoch ab Mitte des zweiten Anbaujahres unterschiedlich hohe Wassergaben erhalten. Dabei stand den Spargelpflanzen der Variante mit dem „Hydrip“-System bis zur ersten Ernte (im dritten Anbaujahr) ca. 30 % weniger Wasser gegenüber der oberirdischen Variante zur Verfügung. Hervorgerufen wurden diese Abweichungen des ursprünglich geplanten Versuchsablaufes durch technische und organisatorische Gründe. Die Menge und der Zeitpunkt der Bewässerung erfolgten nach Empfehlung des Projektpartners (Spargelbauer) und wurden von ihm selbst durchgeführt. Der richtige Zeitpunkt spielt dabei eine entscheidende Rolle für die optimale Entwicklung des Spargels. Wie der Tab. 20 zu entnehmen ist, musste zwischendurch immer wieder mit Hilfe einer vorhandenen Sprinkler-Anlage beregnet werden. Laut BRÜCKNER ET AL. (2008) ist vor allem eine „Über-Kopf-Beregung“ nach der Pflanzung sinnvoll, um ein optimales Anwachsen der Pflanzen zu gewährleisten. Ebenfalls wurde mit Hilfe dieser Bewässerungsart der ausgebrachte Nährstoffdünger über den gesamten Anbauverlauf zunächst gelöst und anschließend in den Boden gleichmäßig eingebracht.

Der Unterschied der Bewässerungsmenge von 30 % lässt sich auf die Bewässerungsintervalle zurückführen. Vermutlich wurden die vier Steuerungsventile der eigentlichen Varianten für dieselbe Zeit geöffnet. Die Differenz ergab sich aus den unterschiedlichen Durchflussraten der beiden Tropfschläuche (vgl. Kap. 3.6.2). Eine Differenzierung zwischen der 100 %-Variante und 50 %-Variante konnte aufgrund dieses Bewässerungsfehlers nicht durchgeführt. Bei allen weiteren Messungen in diesem Versuch wurden ausschließlich die beiden Systeme „Hydrip“ und „Oberflur“ miteinander verglichen.

Tab. 20: Übersicht über Wasserverbrauch der beiden Varianten, der Sprinkleranlage und des gesamten Gewächshauses (in m<sup>3</sup>)

Variante	Nach der Pflanzung	Sep. '11 - Juni '12	Juli '12 - Aug. '12	Nov. '12 - Mai '13	Gesamt
<b>Hydrip-System</b> (100 %)	2,1	11,0	8,7	4,2	25,9
<b>Hydrip-System</b> (50 %)	2,1	10,2	8,8	4,2	25,2
<b>Oberflur-System</b> (100 %)	2,5	14,3	13,2	6,0	36,0
<b>Oberflur-System</b> (50 %)	2,5	13,8	13,6	5,7	35,7
<b>Sprinkleranlage</b>	12,1	31,2	32,9	44,3	120,5
<b>Gesamtwasser</b>	<b>21,3</b>	<b>80,5</b>	<b>77,1</b>	<b>64,4</b>	<b>243,3</b>

Fast 50 % der Gesamtwassergabe erfolgte mit Hilfe der Sprinkleranlage (siehe Tab. 20). Diese Maßnahme diente, primär nach der Pflanzung, hauptsächlich zum optimalen Anwachsen der Spargelpflanzen und zur Förderung eines Wurzelsystems. Hinsichtlich ihrer besonderen Überwinterungsstrategie benötigen sie ein möglichst ausgeprägtes Wurzelsystem, das außerhalb der Vegetationszeit als wichtiges Speicherorgan fungiert. (BRÜCKNER ET AL. 2008)

#### 4.7.3 Kontrolle der Bodenfeuchtigkeit mit Tensiometer

Mit Hilfe der verbauten Tensiometer sollte die Bodenfeuchte kontrolliert werden, um mögliche Informationen über Bewässerungszeitpunkt und –menge zu erhalten. Im Verlaufe des ersten Anbaujahres zeigten die erhaltenen Ergebnisse sehr deutlich, dass diese Methode sich als nicht ausreichend bewährte.

Die Tab. 21 zeigt die Werte der einzelnen Varianten aus dem besagten Jahr. Starke Schwankungen waren nicht nur unter den vier verschiedenen Varianten zu erkennen, sondern auch in den einzelnen über den abgebildeten Zeitraum. Die starken Ausreißer der Oberflur-Variante 100 % mit -45 hPa am 22.06.2011 oder der Oberflur-Variante 50 % mit -90 und -70 hPa der beiden anderen Messterminen resultierten aus Leckagen im Gewächshausdach.

Die leichten Schwankungen innerhalb eines Messtermins zwischen den Varianten könnten durch die Messposition der einzelnen Tensiometer gelegen haben. Speziell die Entfernung zwischen Tensiometer, Tropfschlauch und –loch spielte dabei eine entscheidende Rolle. Infolge dieser ungenügenden Ergebnisse wurde im zweiten Anbaujahr die Bodenfeuchtheitsmessung mit Hilfe eines mobilen TDR-Messgerätes durchgeführt.

Tab. 21: Messwerte der Tensiometer der unterschiedlichen Varianten an unterschiedlichen Terminen (in hPa)

<b>Variante</b>	<b>22.06.11</b>	<b>29.07.11</b>	<b>02.09.11</b>
<b>Hydrip-System (100 %)</b>	-210	-330	-200
<b>Hydrip-System (50 %)</b>	-130	-350	-250
<b>Oberflur-System (100 %)</b>	-45	-360	-270
<b>Oberflur-System (50 %)</b>	-280	-90	-70

#### **4.7.4 Wasserverteilung im Boden: mobile TDR-Messsonde**

Neben der in Kap. 4.7.3 erwähnten Überwachung der Bodenfeuchte konnte mit Hilfe der TDR-Sonde (vgl. Kap. 3.6.3) die Wasserverteilung bis in eine Bodentiefe von 100 cm ermittelt werden. Für die Analyse der horizontalen Wasserverteilung wurden drei nebeneinander liegende Messpunkte angelegt (siehe Abb. 18). Die Abb. 46 zeigt die Wasserverteilung der beiden Systeme für die Monate April, Juni und November des zweiten

Anbaujahres. Hier konnten keine signifikanten Unterschiede der Wassergehalte der einzelnen Messtiefen zwischen den beiden Varianten festgestellt werden.

Die Auswahl dieser drei Messtermine zeigte zum einen den Verlauf der Wasserverteilung (vgl. Abb. 46) über eine komplette Vegetationsperiode (zweites Anbaujahr), zum anderen die Auswirkungen der unterschiedlichen Wassergaben der beiden Systeme über das Jahr. Wie bereits aus der Tab. 20 bekannt, erhielt die „Hydrip“-Variante gegenüber der Oberflur-Variante bis zum November ca. 30 % weniger Wasser. Zum Start der Messungen hatten beide Variante noch dieselbe Menge an Wasser erhalten. In diesem Monat (April) wurden tendenziell höhere Wassergehalte (3-10 Vol.-%) in allen fast allen Bodentiefen in der „Hydrip“-Variante gemessen. Die höchsten Gehalte wurden in dieser Variante in 40 cm Tiefe festgestellt, in der sich der Tropfschlauch und der Bodenhilfsstoff befanden. Beim Bewässern mit dem oberirdischen Tropfschlauch wurden die max. Wassergehalte eher in tieferen Schichten (40-60 cm) festgestellt. Bei beiden Varianten war eine gute horizontale Wasserverteilung (bis 40 cm Pflanzenabstand) zu verzeichnen.

Aufgrund von steigenden Temperaturen (vgl. Abb. 44) und vermehrtem Pflanzenwachstum wurde zwischen April und Mai stark bewässert. Hervorgerufen durch die bereits erwähnten steuerungstechnischen und organisatorischen Gründe erhielt die Oberflur-Variante zu diesem Zeitpunkt ca. 22 % mehr Bewässerungswasser. Die bereits im März beobachteten max. Wassergehalte der Oberflur-Variante wurden ausschließlich in 60 cm Tiefe ermittelt. Hingegen wurden die höchsten Gehalte in der „Hydrip“-Variante weiterhin in 40 cm Tiefe gemessen.

Im Zeitraum bis November wurden die beiden Varianten ebenfalls ausreichend bewässert. Da auch hier die unterschiedliche Durchflussmenge nicht weiter beachtet wurde, hatten sich die Unterschiede der Bewässerungsmenge bereits auf über 30 % gesteigert. Ähnlich wie bei den beiden anderen Messzeitpunkten, wurden die höchsten Wassergehalte bei der „Hydrip“-Variante in 40 cm und bei der Oberflur-Variante in 60 cm Tiefe gemessen.

Trotz 30 % weniger Bewässerungswasser waren in der „Hydrip“-Variante höhere Maximalgehalte in der 40 cm Bodenschicht im Verlauf der gesamten Vegetationsperiode zu registrieren. Obwohl die Oberflur-Variante mit wesentlich mehr Wasser bewässert wurde, sammelte sich dieses eher in den unteren Bodenschichten von 60 cm an. Diese Ergebnisse zeigten einen Effekt auf die Wasserspeicherung von Alginit.

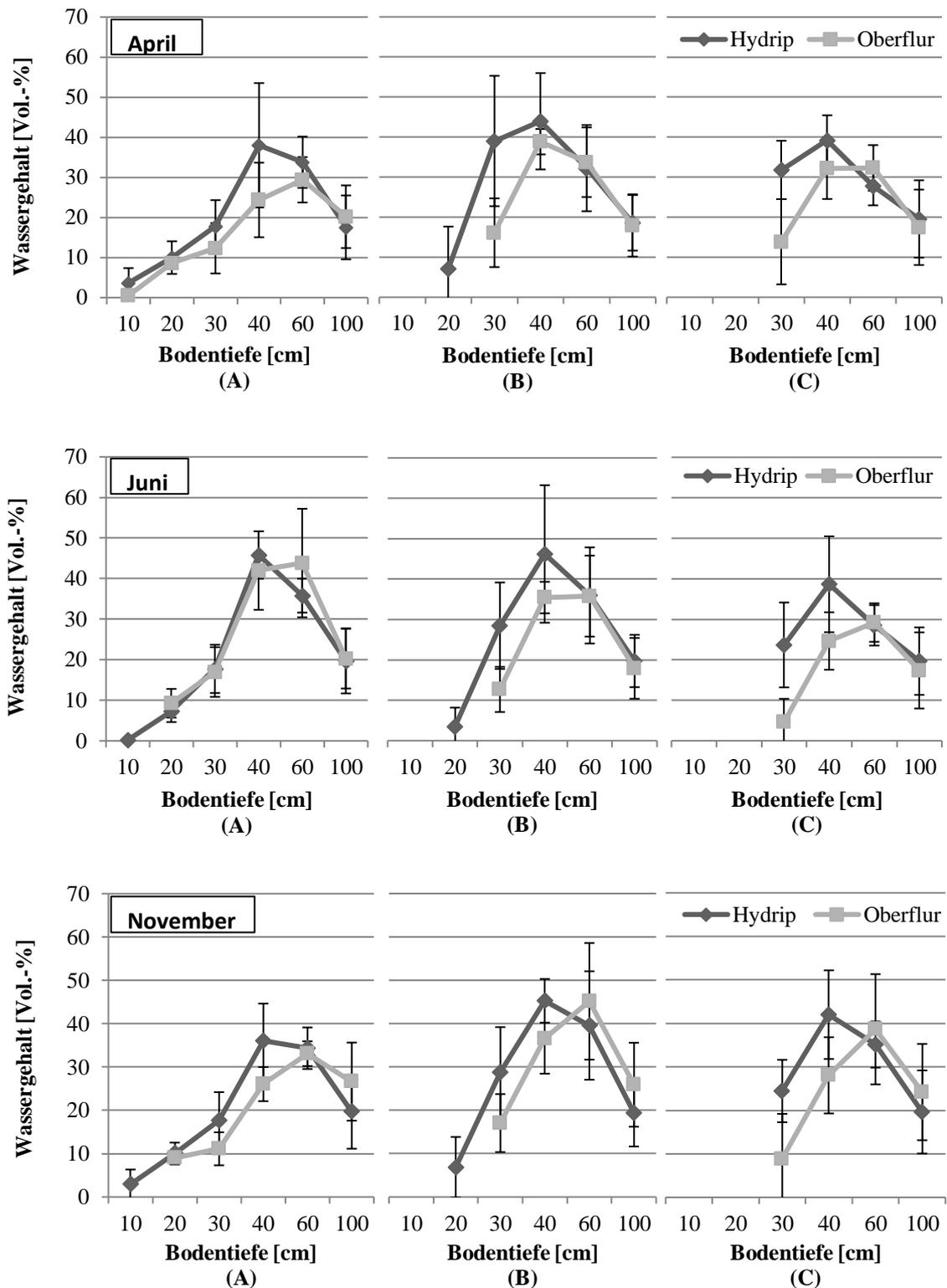


Abb. 46: Vergleich der vertikalen (bis 100 cm Tiefe) und horizontalen (bis 40 cm Reihenabstand) Wasserverteilung der Varianten Hydrip und Oberflur im 2. Anbaujahr (2012); A = Pflanzreihe; B = 20 cm Abstand zu A; C = 40 cm Abstand zu A; n = 4; Fehlerbalken: Standardabweichungen

#### 4.7.5 *Pflanzenaufwuchs*

Die Beprobung des oberirdischen Pflanzenmaterials wurde im ersten und zweiten Anbaujahr (2011 und 2012) durchgeführt. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Varianten konnten nicht festgestellt werden. Im Pflanzungsjahr 2011 entwickelten die Spargelbestände beider Bewässerungsvarianten durchschnittlich acht Triebe pro Pflanze (siehe Abb. 47). Im darauffolgenden Jahr konnten im August zunächst um die vier Triebe pro Pflanze, im September sechs Triebe gezählt werden. Der Rückgang der durchschnittlichen Triebzahl auf fünf im November war die Folge der Abreife und des Absterbens des oberirdischen Pflanzenmaterials (DROST 1997), die auch im Freiland zwischen Mitte November und Anfang Dezember einsetzt (BRÜCKNER ET AL. 2008). Die abgestorbenen Triebe wurde in der Bonitur nicht mehr mitgezählt. Der Unterschied zwischen den Triebzahlen im September 2011 und 2012 betrug ca. 25 %.

Neben der Triebzahl wurde zusätzlich noch der längste Trieb pro Pflanze ermittelt (siehe Abb. 48). Auch hier konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Varianten festgestellt werden. Im zweiten Anbaujahr waren die durchschnittlich höchsten Pflanzen beider Varianten um ca. 40 % höher als im ersten. Im Zusammenhang mit den Triebzahlen bedeutet das, dass mit zunehmender Triebzahl die Pflanzenmasse pro Trieb und Jahr abgenommen hatte und umgekehrt.

Der Grund für die verminderte Triebzahl im zweiten Jahr war nicht die Folge eines Wassermangels, sondern hatte einen anbautechnischen Hintergrund (Neuanlage mit Jungpflanzen). Die beiden Varianten wurden mit vorher aufgezogen Jungpflanzen bepflanzt, die im Anpflanzungsjahr bereits eine Vielzahl an kleinen dünnen Trieben aufwiesen. Die Spargelpflänzchen mussten zudem noch ihr Wurzelsystem ausbilden und wuchsen in einem Pflanzgraben auf. Neben den bereits vor der Pflanzung vorhanden oberirdischen Trieben entwickelten sie noch weitere dünne Triebe. Nach der Abreife im Herbst wurde das oberirdische Material dann zerkleinert und die Furchen eingeebnet (siehe Kap. 3.6.1). Im darauffolgenden Jahr mussten die Pflanzen mit Hilfe ihrer eingespeicherten Reservestoffe in den Wurzeln ihre Triebe wieder austreiben. Da auch im zweiten Jahr keine Ernte der Spargelstangen stattfand, entwickelten sich vermutlich weniger Triebe, die jedoch bereits einen dickeren Stangen-/Triebdurchmesser aufwiesen. Diese kräftigeren Triebe erzielten damit auch ein höheres Pflanzenwachstum. Bis zur Etablierung einer Neuanlage werden in den ersten zwei Jahren keine Ernten von Spargelstangen durchgeführt. (BRÜCKNER ET AL. 2008).

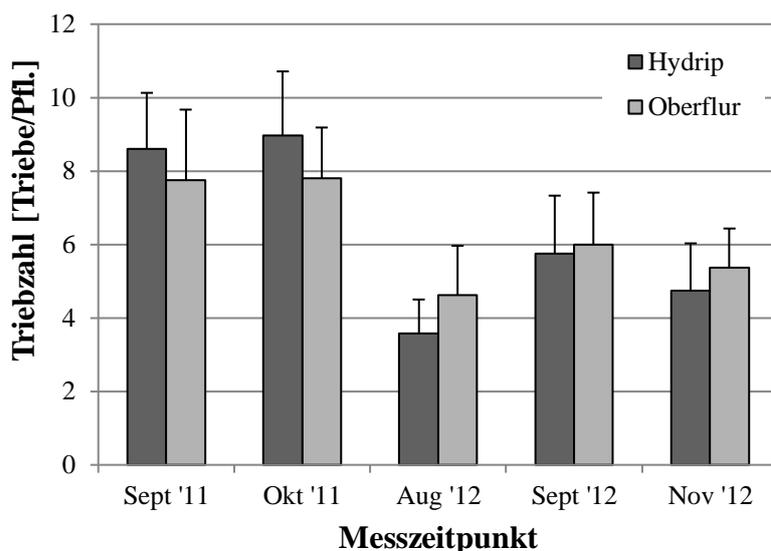


Abb. 47: Vergleich der durchschnittlichen Triebzahl [Triebe/Pflanze] unterschiedlicher Messzeitpunkte (im 1. und 2. Anbaujahr) in Abhängigkeit der beiden Bewässerungsvarianten; n = 20; Fehlerbalken = Standardabweichungen

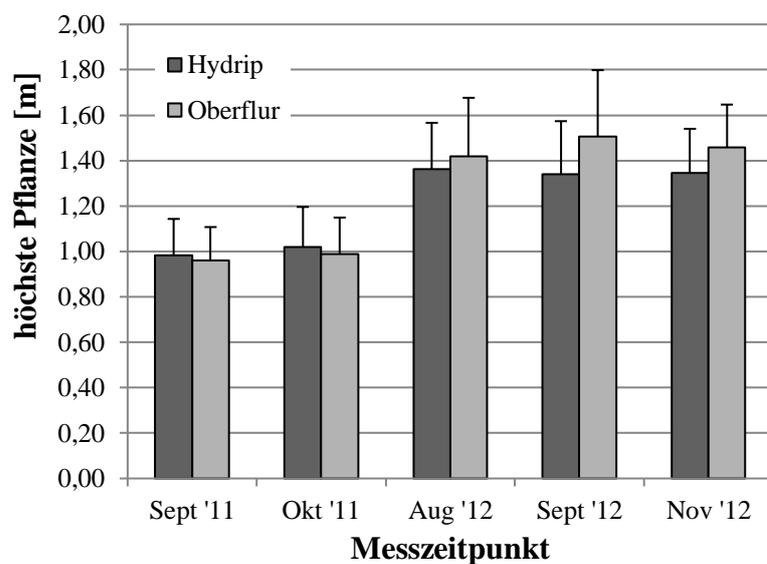


Abb. 48: Vergleich des durchschnittlich höchsten Triebes [Triebe/Pflanze] unterschiedlicher Messzeitpunkte (im 1. und 2. Anbaujahr) in Abhängigkeit der verschiedenen Bewässerungssysteme und -varianten; 5 Pflanzen pro Wiederholung; 4 Wiederholungen pro Variante; Fehlerbalken = Standardabweichungen

#### 4.7.6 Krankheitsbefall

Ein Krankheitsbefall konnte im zweiten Jahr (2012) festgestellt werden. Dieser wurde durch die Fruchtfolge begünstigt, da bereits vor der Versuchsdurchführung Spargel in Form von fünf Hochbeeten in dem verwendeten Treibhaus kultiviert wurde. Vor dem Anlegen der acht Spargelreihen, wurden diese Beete auch eingeebnet. Laut BRÜCKNER ET AL. (2008) nimmt bei Spargel nach Spargel das Befallsrisiko vorzugsweise mit Fusariumarten (Pilze) stark zu. Neben verwelkenden und einschrumpfenden Trieben oder Stängelfäule, die bis zur Krone reicht, kann ebenfalls ein reduziertes Triebwachstum eintreten. Die Auswirkungen nehmen oftmals von Jahr zu Jahr zu und wirken sich deshalb auf Qualität und Quantität des Stangenspargels aus. Der in Deutschland und vielen anderen Ländern am häufigsten auftretende Erreger ist in diesem Fall *Fusarium oxysporum* f. sp. *Asparagi*, der Wurzeln und Kronen infiziert (STAHL 1970 und WOLTERSTORFF 1990). In dem durchgeführten Versuch wurden die unterirdischen Pflanzenorgane jedoch nicht auf Krankheiten analysiert. Lediglich an vereinzelt oberirdischen Trieben konnte in beiden Varianten im zweiten Jahr Stängelfäule (durch *Fusarium culmorum*) diagnostiziert werden. Der Krankheitsdruck wurde nicht bonitiert. Wie er sich auf den Ertrag ausgewirkt hat, ist unklar. Nach optischer Beurteilung hatten sich die oberirdischen Triebe dennoch gut entwickelt. Laut BRÜCKNER ET AL. (2008) „übersteht ein Nachbau selten mehr als vier bis fünf ökonomisch vertretbare Stechjahre“. Eine Neuanlage hingegen kann mindestens vier bis acht Jahre aufweisen.

Ebenfalls konnte im Versuch ein Insektenbefall beobachtet werden. Vereinzelt Spargelhähnchen (*Crioceris asparagi*) traten ab April im Gewächshaus auf und waren bei beiden Varianten gleich stark zu finden. Es wurden keine Insektizide eingesetzt.

Auch ein vermehrtes Auftreten von Unkräutern konnte beobachtet werden. Es handelte sich dabei fast ausschließlich um Franzosenkraut (*Galinsoga parviflora*). Hervorgerufen wurde der hohe Befallsdruck durch die bereits erwähnte ungünstige Fruchtfolge. Die Unkrautsamen wurden durch das Einebnen der Hochbeete gleichmäßig in den oberen Bodenschichten eingearbeitet. Mithilfe der Sprinklerberegnung, die immer wieder verwendet wurde, wurden die oberen Bodenschichten regelmäßig feucht gehalten. Die Folge war der permanente Unkrautdruck. Da beide Variante gleich stark betroffen waren, wurde auf eine Bonitur verzichtet. Es erfolgte in regelmäßigen Abständen eine mechanische Bekämpfung.

#### 4.7.7 Spargelertrag

Im dritten Anbaujahr (2013) wurde die Spargelanlage nur zwei Wochen beerntet. Hinsichtlich der Neuanpflanzung wurde im ersten Erntejahr nur wenig geerntet, um die Pflanzen nicht zu sehr zu erschöpfen (BRÜCKNER ET AL. 2008). Untersucht wurden alle vier Spargelreihen der jeweiligen Variante ohne Unterscheidung zwischen den Wiederholungen und der Bewässerungsvariante. Aus diesem Grund handelt es sich bei den Ergebnissen um absolute Werte, die statistisch nicht analysiert werden konnten. Wie in der Abb. 49 deutlich zu erkennen, lagen die Erntemengen in der ersten Erntewoche bei der Oberflur-Variante (zwischen 4,8 kg und 5,5 kg) durchgängig um ca. 1 kg höher als bei der „Hydrip“-Variante (zwischen 3,9 kg und 4,5 kg). Das war ein durchschnittlicher Mehrertrag von ca. 20 % pro Erntetag bei der oberirdisch bewässerten Variante in der ersten Erntewoche.

In der zweiten und zugleich letzten Erntewoche (25.4 - 29.4) wurde bei der Oberflur-Variante zu Beginn ca. 14-15 % mehr als in der „Hydrip“-Variante, wie in der Abb. 50 ersichtlich, geerntet. Am 27.4 stieg dieser Unterschied auf 44 % an. Zum Ende der Ernte erzielte die „Hydrip“-Variante einen messbaren Mehrertrag von ca. 19 %.

Der Gesamtertrag aller Erntetage lag bei der „Hydrip“-Variante bei ca. 40,2 kg und bei der Oberflur-Variante bei ca. 50,2 kg Bleichstangenspargel. Daraus ergibt sich ein prozentualer Mehrertrag bei der oberirdisch bewässerten Variante von ca. 20 %. Eine Erklärung für diesen Unterschied liegt in der Morphologie der Spargelpflanze. Der Spargel gehört zu den Staudengewächsen mit unterirdischen Speicherorganen (STRASBURGER ET AL. 2008). Diese Pflanzen werden auch als „Wurzelsukkulente“ (WALTER 1979) bezeichnet. Aus diesem Grund muss das Speicherwurzelsystem solcher Pflanzen besonders gut ausgebildet sein, um genügend Speicherplatz vor allem für Reservekohlenhydrate, aber auch für Wasser und Nährstoffe aus der Bodenmatrix zu schaffen. Der ermittelte Minderertrag der „Hydrip“-Variante lässt auf ein vermindert ausgeprägtes Wurzelsystem gegenüber den Pflanzen in der Oberflur-Variante schließen. Wie bereits in Kapitel 4.7.4 ausführlich beschrieben, wurden die höchsten Wassergehalte der „Hydrip“-Variante in der 40 cm Bodenschicht gemessen. Oberhalb dieser Schicht befanden sich die Rhizome der Pflanzen und somit der Wurzelhauptapparat. Die Pflanzenwurzeln hatten sich aus diesem Grund nicht so stark ausgebreitet, da die Hauptwasserquelle in unmittelbarer Nähe lag.

Dass eine Bewässerung im Spargel einen Einfluss auf den Ertrag und das Wurzelwachstum ausübt, ist in der Literatur und in der Praxis bereits bekannt. Der gezielte Einsatz von Bewässerung (z.B. in Hitzeperioden) zeigte sich zum Beispiel durch allgemeine Mehrerträge

(HARTMANN 1981; PETERSON 2005; PASCHOLD ET AL. 2007) oder der Einfluss auf die Speicherwurzelzahl unter Freilandbedingungen (DROST 1999). Lediglich PETERSON (2005) konnte den Einfluss von Tropfbewässerung auf die erhöhte Durchwurzelung in tiefere Bodenschichten gegenüber einer Kreisberegnung feststellen.

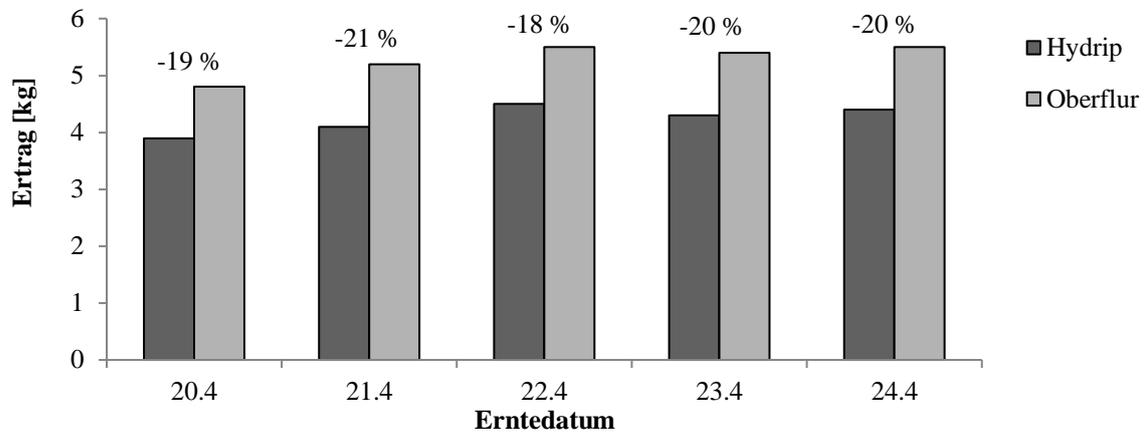


Abb. 49: Vergleich des Spargelertrages der Varianten Hydrip und Oberflur in der 1. Erntewoche. Zahlen oberhalb der Balken geben den Ertragsunterschied zwischen den beiden Varianten wieder.

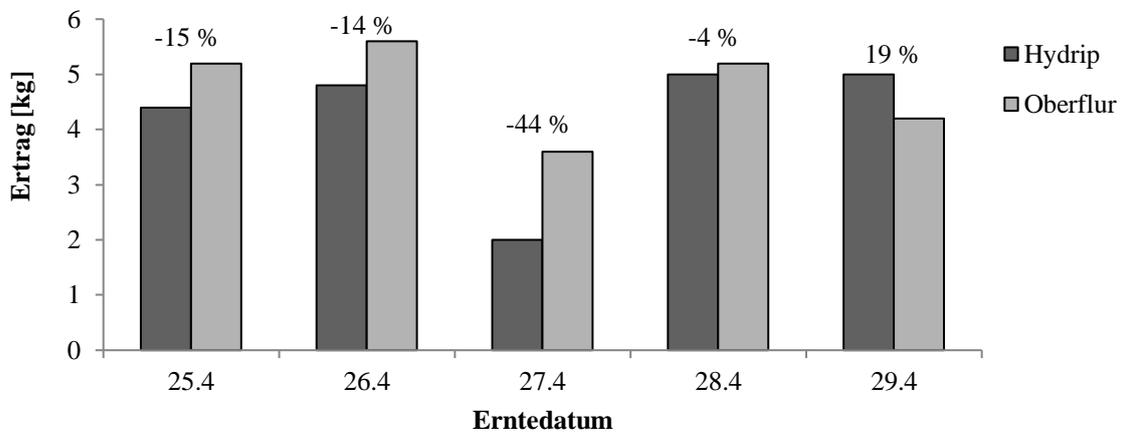


Abb. 50: Vergleich des Spargelertrages der Varianten Hydrip und Oberflur in der 2. Erntewoche. Zahlen oberhalb der Balken geben den Ertragsunterschied zwischen den beiden Varianten wieder.

## 4.8 Weinbauversuch in Portugal

### 4.8.1 Wassergehalte und –verteilungen im Boden

Die Ermittlung der Wassergehalte in den verschiedenen Bodenschichten (bis 100 cm) erfolgte für das Jahr 2012. Um weitere Informationen über den Effekt von Bodenhilfsstoffen zu erhalten, wurden in dieser Arbeit nur die Kontrollvariante und die Varianten „30 % Bewässerungswasser + Alginit + BlakJak“ und „30 % Bewässerungswasser ohne Bodenhilfsstoff“ ausgewertet.

Die Messungen den gesamten Zeitraum zeigten deutliche Unterschiede der Wasserverteilungen zwischen den drei Varianten (siehe Abb. 51). Die gemessenen maximalen Wassergehalte bei der Kontrollvariante und der Variante mit Alginit lagen dabei durchschnittlich bei ca. 12 Vol.-%, bei der Variante ohne Alginit bei maximal ca. 8 Vol.-%. Die höchsten Wassergehalte wurden bei der Kontrollvariante (oberirdische Tropfbewässerung) in den Tiefen 0 bis 60 cm gemessen. In den tieferen Bodenschichten nahm der maximale Gehalt geringfügig ab. In der Variante mit Alginit und unterirdischem Tropfschlauch waren über das Jahr die höchsten Wassergehalte laut Abb. 51 B in den Bodenschichten 40 cm bis 60 cm. Anders als in der Kontrollvariante wurden die TDR-Messrohre der beiden anderen Varianten diagonal (siehe Abb. 21) in den Boden eingebaut. Aus diesem Grund handelte es sich dabei um die Bodenschichten 20 cm bis 40 cm im Feld. In dieser Schicht, also in 30 cm, waren die Tropfschläuche samt Alginit verlegt. Im Vergleich zu den Wassergehalten der Variante ohne Alginit (siehe Abb. 51 C) der unterschiedlichen Bodenschichten konnten durchaus Rückschlüsse auf den wasserspeichernden Effekt des Alginits gezogen werden. In den umliegenden Bodenschichten des Tropfschlauches wurden nur ca. halb so hohe Wassergehalte gemessen wie in der Variante mit Alginit. Die höchsten Wassergehalte in der Variante ohne Alginit wurden ausschließlich in tieferen Schichten festgestellt. Eine verstärkte Versickerung fand statt. Der hier beobachtete Effekt des Alginits konnte bereits im Spargelversuch (siehe Kap. 4.7.4) beobachtet werden. Auch dort wurden erhöhte Wassergehalte in der Alginitschicht gemessen.

Die am 4. Mai 2012 in allen drei Varianten auftretenden hohen Wassergehalte waren die Folge eines Starkregenereignisses am Tag zuvor.

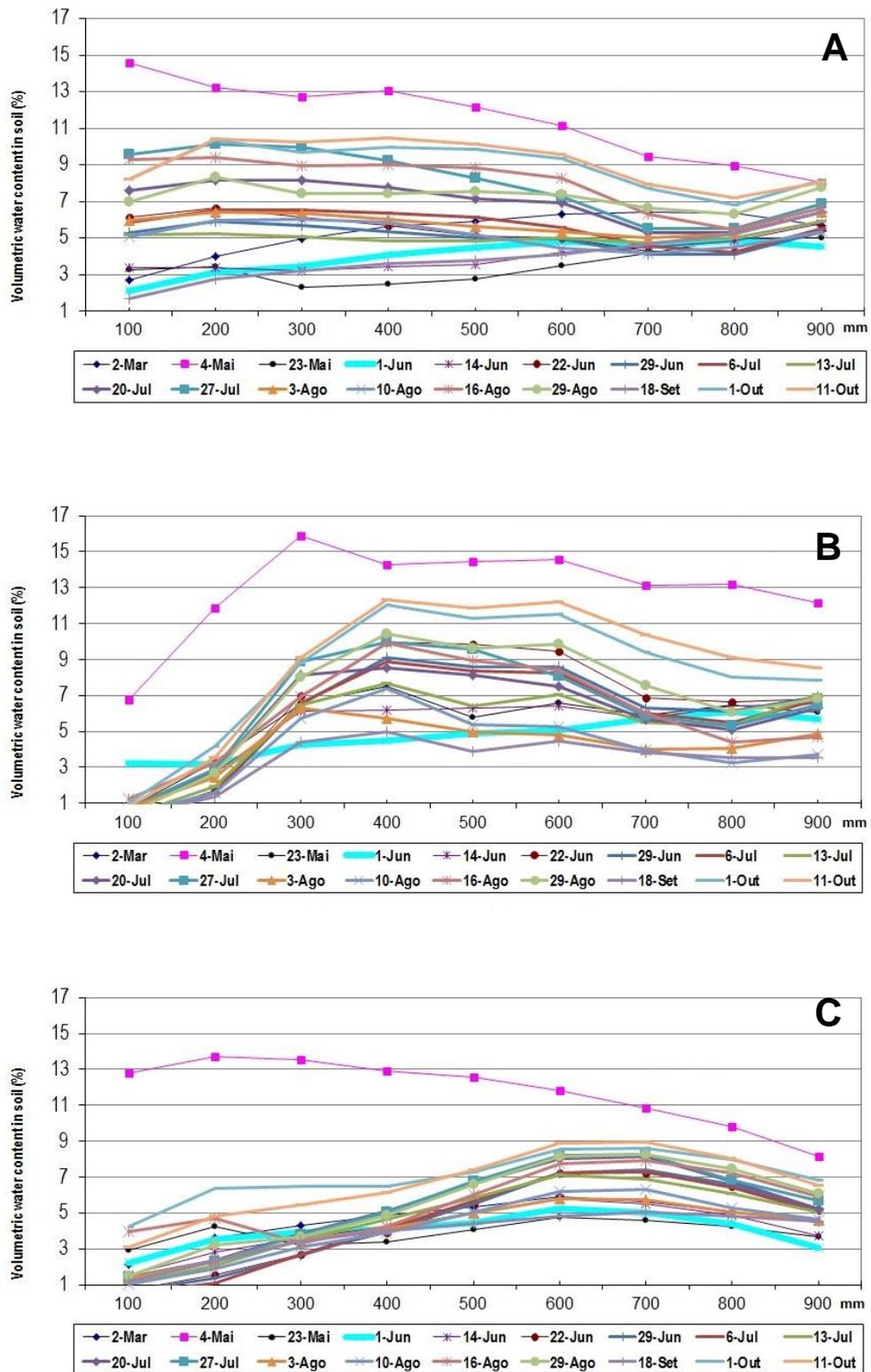


Abb. 51: Vertikale Wasserverteilung bis 900 mm Bodentiefe an unterschiedlichen Messzeitpunkten. A = Kontrollvariante; B = Variante „30 % + Alginit + BlakJak“ und C = 30 % ohne Bodenhilfsstoff. (Quelle: João Azevedo, 2013)

#### ***4.8.2 Qualität und Quantität der Weintrauben***

Im Weinbau kommt es, ähnlich wie beim Spargel, nicht nur auf den Ertrag an, sondern vielmehr auf die richtige Qualität der Beeren. Zudem gibt es, anders als in anderen landwirtschaftlichen Kulturen, in jedem Land eine festgeschriebene Höchstertragsmenge pro Hektar (TISCHELMAYER 2001). Diese ist im nationalen und/oder europäischen Weinrecht festgelegt.

In diesem Zusammenhang mit Qualität und Quantität wird oftmals auch das empirische „Menge-Güte-Gesetz“ (VOGT & SCHRUF 2000) angeführt, das vereinfacht aussagt: Ertragsreduktion führt zu Qualitätssteigerung. Dies gilt jedoch nur für Weinreben, die am selben Standort unter gleichen Bedingungen (Rebsorte, Klima, Boden, Alter und Pflegezustand) kultiviert werden. Laut VOGT & SCHRUF 2000 ist die Beziehung zwischen Traubenqualität und Blattfläche der entscheidende Faktor.

Aufgrund des ausgewählten Standortes (trockenes Klima und sandiger Boden) konnte in diesem Versuch auch die Auswirkung auf Ertrag und Qualität durch unterschiedliche Bewässerungsarten, ober- und unterirdische Tropfschläuche, analysiert werden. Neben der unterschiedlichen Bewässerungstechnik wurde zudem der Effekt von unterschiedlich hoher zusätzlicher Bewässerungsmenge untersucht. Wie bereits aus Kapitel 4.8.1 bekannt, erhielten die beiden Varianten mit unterirdischer Bewässerung ca. 70 % weniger Wasser als die Kontrollvariante (wurde nach Anbauer Wissen gegossen). Die Analyse der Beerenqualität wies keine Unterschiede zwischen den drei Varianten auf (siehe Tab. 22). Weder in Bezug auf das Beerengewicht noch auf den Traubenertrag ergab sich ein statistisch absicherbarer Unterschied zwischen den drei Varianten. Jedoch lag der durchschnittliche Ertrag der Variante mit Alginit ca. 10 % niedriger als die Variante ohne Alginit und ca. 2 % als die Kontrollvariante, wie der Tab. 22 zu entnehmen ist. Jedoch waren diese Ertragsunterschiede statistisch nicht abgesichert.

Der Versuch hatte eindeutig gezeigt, dass ein Einsatz von unterirdischen Tropfschläuchen im Weinbau sinnvoll ist. Die eingesparte Menge an Wasser hatte keine Auswirkungen auf die Qualität und Quantität des Weins. Der Einsatz von Alginit ist fraglich, da das Weglassen von Alginit keinen Nachteil brachte, obwohl die Wassergehalte mit Alginit im Boden höher waren.

Tab. 22: Qualitätsparameter, Beerengewicht und Traubenertrag der unterschiedlichen Varianten (verändert nach JOÃO AZEVEDO, 2013)

---

Variante	voraussichtlicher Alkoholgehalt [Vol.-%]	pH	Säuregehalt [g]	Beerengewicht [g]	Traubenertrag [kg/ha]
Kontrolle	12,1 <b>a</b>	3,31 <b>a</b>	6,50 <b>a</b>	1,76 <b>a</b>	8211 <b>a</b>
30 % mit Alginit	12,2 <b>a</b>	3,25 <b>a</b>	6,12 <b>a</b>	1,73 <b>a</b>	8071 <b>a</b>
30 % ohne Alginit	12,0 <b>a</b>	3,26 <b>a</b>	6,37 <b>a</b>	1,89 <b>a</b>	8818 <b>a</b>

---

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Das Ziel der vorliegenden Dissertation war es, einen Bodenhilfsstoff zu finden, der die Wasserhaltekapazität eines Bodens bei SDI erhöht und somit eine weitere Wassereinsparung bei SDI ermöglicht („Hydrip“-System). Anhand einer Auswahl von organischen und mineralischen Stoffen (Perlit, Alginit, Axis, Betasoil, Zeolith, Bentonit, Gesteinsmehl, Geohumus, Kokosfaser und Torf) sollte diese Eigenschaft näher untersucht werden. Ebenfalls sollte eine Auswahl von flüssigen Bodenhilfsstoffen untersucht werden, die mit Hilfe der SDI direkt in den Bodenschichten um den Schlauch appliziert werden könnten. Sie sollen das Wurzelwachstum und damit eine bessere Wasser- und Nährstoffaufnahme begünstigen.

Im Rahmen eines europäischen Gemeinschaftsprojektes „NILE – New Irrigations systems for Low and Efficient water use in agriculture“ wurden hierzu unterschiedliche Labor-, Gewächshaus- und Freilandversuche durchgeführt. Die Eignung von festen Bodenhilfsstoffen in einem Unterflur-Tropfbewässerungssystem der Firma Hydrip lag im Fokus dieses Projektes.

Zur Charakterisierung der festen Bodenhilfsstoffe wurde neben der Bestimmung der Schüttdichte, dem Wassergehalt und der Volumenzunahme (nach Wassersättigung) mit Hilfe einer modifizierten Methode nach Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (2006), die Wasserhaltekapazität im reinen Stoffzustand ermittelt. Zudem wurden die Wasserhaltekapazitäten für unterschiedliche Aufwandmengen (nach Herstellerangabe, 3 %, 10 % und 30 %) und drei unterschiedliche Bodenarten (Sand, lehmiger Sand und toniger Schluff) bestimmt. Aufgrund von verschiedenen Anwendungsgebieten (Landwirtschaft, Gartenbau, Filtertechnik, etc.) der Produkte wurde die WHK in Vol.- und Gew.- % berechnet.

Die Messung der WHK mit der Aufwandmenge nach Herstellerangabe zeigte, dass eine Vielzahl der Stoffe keinen bis nur geringen steigernden Effekt erzielte. Inwiefern dies von der empfohlenen Aufwandmenge abhing, konnte erst in den Untersuchungen mit den unterschiedlichen Aufwandmengen beantwortet werden. Sie wiesen eindeutig auf, dass die mineralischen Stoffe wie zum Beispiel Alginit oder Betasoil gegenüber den organischen nur in höheren Mengen eine deutliche Steigerung hervorrufen. Bei den organischen Stoffen wie Kokosfaser oder Torf, aber vor allem Geohumus (Superabsorber) konnten bereits relativ geringe Aufwandmengen die WHK des Bodens steigern. Die mineralischen Stoffe mit geringer Dichte (Bsp. Axis, Perlit) konnten auf ihr Gewicht bezogen relativ viel Wasser

binden. Die Folge waren wesentlich geringere Effekte auf die WHK bei denselben Aufwandmengen in Vol.-%.

Einen nicht zu erwartenden Effekt auf die WHK der Bodengemische wurde beim Einsatz von Perlit (RD = 90 g/l) beobachtet. Es handelt sich dabei um ein im Gartenbau weitverbreitetes Produkt, das ausschließlich in volumenbezogener Menge verarbeitet wird. Die WHK-Messung in Bezug auf das Volumen zeigte, dass ein Einsatz von Perlit mit steigendem Gewichtsanteil (3 bis 30 Gew.-%) in einem Substrat sogar zu einer verstärkten Herabsetzung der Gesamt-WHK (Vol.-%) des BHS-Bodengemisches führte. Das reine Uedorfer Gemisch erzielte eine WHK von ca. 40 Vol.-%. Beim Einmischen von 3 Gew.-% Perlite wurde eine WHK von 38,3 Vol.-% und bei 30 Gew.-% Perlite eine WHK von nur noch 28,1 Vol.-% gemessen. Eine Anwendung von Perlit zur WHK-Steigerung, obwohl der Hersteller dies verspricht, kann deshalb nicht empfohlen werden.

Neben der WHK der Bodenhilfsstoffe wurde auch die Kationenaustauschkapazität analysiert, um möglicherweise Rückschlüsse auf die Nährstoffspeicherung und -verfügbarkeit durch den Einsatz solcher Stoffe zu erhalten. Zahlreiche Hersteller werben mit einer sehr guten KAK ihrer Produkte, mit der der Anwender Nährstoffdünger einsparen kann. Die höchsten KAK-Werte wurden bei Alginit, Betasoil, Bentonit, Geohumus, Kokosfaser und Torf ermittelt.

Inwiefern der Einsatz der ausgewählten Hilfsstoffe Auswirkungen auf die Wasserversorgung und Nährstoffverfügbarkeit hat, wurde in einem Kick-Brauckmann-Gefäßversuch im Gewächshaus getestet. Hierzu wurde um die Tropfereinheit ein vorher definiertes Bodenvolumen von 400 ml mit der entsprechenden Menge an Bodenhilfsstoff (Aufwandmenge nach Herstellerangabe) in den Töpfen installiert und anschließend mit Welschem Weidelgras bepflanzt. Anhand mehrerer Ernten (über zwei Vegetationsperioden) wurde das Pflanzenmaterial jeweils auf Ertrag und Nährstoffentzug untersucht. Es konnten mit diesem Versuch keine Effekte durch Bodenhilfsstoffe auf das Pflanzenwachstum nachgewiesen werden.

In zwei weiteren Pflanzenversuchen wurde die Kombination aus einem unterirdisch verlegten Tropfschlauch und einem Bodenhilfsstoff in der Praxis getestet. Es handelte sich zum einen um Spargelanbau (Weißstangenspargel) im Gewächshaus (Deutschland) und zum anderen um Weinbau im Freiland (Portugal). Es erfolgte bei beiden Versuchen ein Vergleich zwischen konventioneller oberirdischer Tropfbewässerung und dem „Hydrip“-System anhand der Parameter Bewässerungswassermenge, Wasserverteilung im Boden und

Quantität/Qualität des Ernteguts. In beiden Versuchsanlagen wurde Alginit als Bodenhilfsstoff im unterirdischen Tropfsystem eingesetzt.

Sowohl im Spargel- als auch im Weinbauversuch wurde in der Variante mit dem „Hydrip“-Bewässerungssystem deutlich weniger Bewässerungswasser gegenüber der konventionellen Variante eingesetzt. Im Spargel betrug die Bewässerungswassermenge 30 % weniger und im Weinbau 70 % weniger als die oberirdisch bewässerte Variante. Trotz dieser reduzierten Wassermenge wurden in den umliegenden Bodenschichten (mit Alginit versetzt) erhöhte Wassergehalte gemessen. Demnach konnte eindeutig eine Verringerung der Sickerwasserbildung nachgewiesen werden. Beim Spargel wirkte sich das auf den Ertrag negativ aus. Er wurden ca. 20 % weniger Stangenspargel geerntet. Die Positionierung der Tropfschläuche samt BHS-Depot hatte vermutlich ein eingeschränktes Wurzelwachstum hervorgerufen. Das reservespeichernde Wurzelsystem ist beim Spargel ein entscheidender Faktor der Ertragsbildung. Beim Wein hingegen konnten weder in Bezug auf den Ertrag noch auf die Qualität Einbußen verzeichnet werden.

Neben den pflanzenbaulichen Aspekten zum Einsatz des „Hydrip“-System wurden außerdem die technischen Auswirkungen auf die Tropfschläuche durch den Kontakt mit Pflanzenwurzeln untersucht. Mit einem Rhizoboxen-Versuch konnte zunächst das aktive Wurzelwachstum, besonders das Feinwurzelwerk, in Richtung einer unterirdischen Tropfstelle nachgewiesen werden. Inwiefern die Wurzeln aktiv in die Tropfeinheiten der Schläuche eindringen, wurde in einem weiteren Versuch untersucht. Dieser zeigte eindeutig ein Hinwachsen der Wurzeln. Jedoch konnte eine totale Funktionseinschränkung der Tropfer durch die Wurzeln des Weidelgrases nicht beobachtet werden. Jedoch zeigten die Tropfschläuche aus dem Weinbauversuch, dass eine spätere Funktionseinschränkung zu erwarten ist. Die eingetretenen Rebenwurzeln wuchsen teilweise durch den Tropfer bis zum Hauptkanal des Schlauches. Aufgrund ihres sekundären Dickenwachstums kann es durchaus zu einem totalen Verstopfen der Vorkammer bzw. zum vollständigen Funktionsverlust der Tropfereinheit kommen.

Des Weiteren wurden neben den festen noch flüssige Bodenhilfsstoffe in einem separat durchgeführten Versuch mit Welschem Weidelgras untersucht. Die ausgewählten Präparate (Nitrovin, Biomagic, Biorend, Vitana, Vitanal, Humibak und Azotovit/Phosphatovit) sollen laut den Herstellern das Wurzelwachstum fördern. Die verstärkte Wurzelbildung ermöglicht den Pflanzen eine erhöhte Wasser- und Nährstoffaufnahme, die sich in gesteigerten Erträgen der behandelten Varianten widerspiegeln sollte. Jedoch zeigte keines der eingesetzten

Präparate in dem Versuch signifikante Unterschiede auf den Ertrag und der Nährstoffverfügbarkeit gegenüber einer unbehandelten Variante auf. Aufgrund dieser Versuchsergebnisse kann der Einsatz solcher Bodenhilfsstoffe zur Ertragssteigerung nicht nachgewiesen werden. Hieraus ergab sich die Frage, ob der Versuchsansatz überhaupt geeignet war, um diesen Effekt darzustellen. Die sehr klein gewählten Bodenvolumina (1,2-Liter-Gefrierdose) waren nicht optimal gewählt.

Zusammengefasst kann durchaus behauptet werden, dass Bodenhilfsstoffe die Wasserhaltekapazität von Böden erhöhen können. Wie stark dieser Effekt ist, hängt von der Aufwandmenge des ausgewählten Stoffes und der Bodenart ab. Der Einsatz von festen Bodenhilfsstoffen in Kombination mit einem unterirdisch verlegten Tropfschlauch hatte trotz 30 %iger Wassereinsparung eindeutig einen erhöhten Wassergehalt in den entscheidenden Bodenschichten gegenüber oberirdischer Tropfbewässerung gezeigt. Eine effektivere Wasserausnutzung gegenüber konventionellen Tropfbewässerungssystemen konnte somit nachgewiesen werden, da zum Beispiel beim Wein weder Qualität noch Quantität eingeschränkt wurden.

Um dem Anwender/Anbauer genauere Empfehlungen über die Wahl des richtigen Bodenhilfsstoffes mit der passenden Aufwandmenge für unterschiedliche Standorte zu geben, müssen noch weitere Versuche angesetzt werden. Ebenfalls wäre ein erneuter Versuch, jedoch im Freiland, im Spargel denkbar. Eine Verlegung des unterirdischen Tropfschlauches zwischen den Spargelreihen und somit die Veränderung der Position könnte im Fokus stehen. Der Einsatz von unterschiedlichen Bodenhilfsstoffen, die in der Analyse eine starke Wasserhaltekapazität aufwiesen, könnte ebenfalls in diesen Versuchen getestet werden. Ferner besteht noch Forschungspotential in Bezug auf die Eignung des „Hydrip“-Systems für andere Kulturarten. Aufgrund der aufwendigen Installation dieses Bewässerungssystem eignen sich vermutlich Dauerkulturen besonders gut. Der Einsatz des „Hydrip“-System könnte im mehrjährigen Kulturhopfen (*Humulus lupulus*) unter Freilandbedingungen untersucht werden. Bereits mehr als 20 % der deutschen Hopfenanbauflächen (DBU-Projekt der LfL, Stand Juli 2015) sind dauerhaft mit Bewässerungstechnik ausgestattet. Die Verwendung von oberirdisch verlegten Tropfschläuchen wird hierbei bevorzugt.

Der Einsatz von festen Bodenhilfsstoffen bei einem unterirdisch verlegten Tropfschlauch kann den Wassergehalt im Boden positiv beeinflussen. Die Versickerungsmenge gegenüber oberirdischer und unterirdischer Tropfbewässerungssysteme ohne Bodenhilfsstoff konnte

messbar gesenkt werden. Dieses Resultat wurde mit Hilfe von Alginit im Spargel und Weinbau erzielt. Anhand der WHK-Bestimmungen wurde das Steigerungspotential von weiteren festen Hilfsstoffen festgestellt. Besonders starke wasserspeichernde Eigenschaften wurden beim Axis, Geohumus, Kokosfaser und Torf gemessen. Inwieweit dieser Effekt auch unter Freilandbedingungen eintritt, müssen weitere Versuche zeigen.

Die Verwendung des modifizierten Tropfbewässerungssystems, bestehend aus unterirdischem Tropfschlauch und einem geeigneten Bodenhilfsstoff, kann den nachhaltigen Umgang mit Wasser weiter fördern. Ein schonender Einsatz von Bewässerungswasser wird in der Zeit der steigenden Extremwettersituationen, der wachsenden Weltbevölkerung und der stetig verringernden landwirtschaftlich genutzten Flächen die Bewässerungslandwirtschaft immer mehr an Bedeutung gewinnen. Nur so kann ein gleichbleibendes Ertragsniveau bzw. eine benötigte Ertragssteigerung gewährleistet werden. Veraltete und ineffektive Systeme müssen in ausgewählten Kulturen ersetzt werden. Daher müssen Wissenschaft und auch Wirtschaft stetig an innovativer Technik forschen, um unser kostbares Gut Wasser möglichst schonend einsetzen zu können.

---

**LITERATURVERZEICHNIS**

- Adams, F.** (1984): Soil Acidity and Liming. 2nd ed. Madison, Wis., USA: American Society of Agronomy.
- Aldenhoff, L.** (2004): Einfluss der Jungpflanzenqualität auf die Etablierung von Spargelanlagen. Dissertation Humboldt-Universität zu Berlin.
- Allan, J.A.** (1998): Watersheds and problemsheds: Explaining the absence of Armed Conflict over water in the Middle East. Middle East Review of International Affairs, 2 (1)
- Amberger, A.** (1996): Pflanzenernährung. Ökologische und physiologische Grundlagen ; Dynamik und Stoffwechsel der Nährelemente ; 90 Tabellen. 4. Aufl. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (UTB für Wissenschaft, 846).
- Anonym** (1977): Düngemittelgesetz (DüMG) vom 15. November 1977. In: Bundesgesetzblatt. Jg. 1977, Teil I, S. 2134, zuletzt geändert durch Artikel 6 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2819; 2007, 195).
- Anonym** (1990): The Fertilisers Regulation. (No. 887) Online verfügbar: [www.legislation.gov.uk](http://www.legislation.gov.uk) (Stand Feb. 2013)
- Anonym** (1994): Österreichisches Düngemittelgesetz (DMG) vom 12. Juli 1994. In: Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich. Jg. 1994 (Nr. 513/1994)
- Anonym** (2001): Schweizerische Dünger-Verordnung (DüV) (Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngern) vom 10. Januar 2001. Der Schweizerische Bundesrat, Artikel 5. (Stand 1. Januar 2014)
- Anonym** (2003): EU-Düngemittelverordnung (Verordnung (EG) Nr.2003/2003 des europäischen Parlaments und des Rates über Düngemittel) vom 13. Oktober 2003. In: ABl. L 304 vom 21.11.2003, S.1
- Anonym** (2004): Düngemittelverordnung (DüMV) vom 1. Februar 2004. In: Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich. Jg. 2004, Teil II (Nr. 100/2004)
- Anonym** (2006): Düngeverordnung (DüV) (Verordnung über die Grundsätze der guten fachlichen Praxis beim Düngen) vom 10. Januar 2006. In: Bundesgesetzblatt. Jg. 2006, Teil I, S. 33 (Nr. 2)
- Anonym** (2007a): Düngerbuch-Verordnung WBF (DüVB) (Verordnung der WBF über Inverkehrbringen von Düngern) vom 16. November 2007. In: DüV. Jg 2001, Artikel 4, 7, 14, 19, 21a, 23 und 32. (Stand 1. Januar 2015)
- Anonym** (2007b): EG-Öko-Basisverordnung Nr. 834/2007 (Verordnung (EG) des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 2092/91c) vom 28. Juni 2007. In: ABl. Nr. L 189 vom 20.07.2007, S. 1

- Anonym** (2008): EG Durchführungsverordnung Nr.889/2008 der KOMMISSION(mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/ biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle) vom 5. September 2008. In: ABl. Nr. L 250 vom 18.09.2008, S. 1
- Anonym** (2012): Düngemittelverordnung (DüMV) (Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln) vom 05. Dezember 2012. In: Bundesgesetzblatt. Jg. 2012, Teil I, S. 2482 (Nr. 58)
- Anter, J.; Görmann, Dr. H.; Kreins, P.; Richmann, A** (2009): Einfluss sich wandelnder ökonomischer Rahmenbedingungen auf die Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen in Deutschland. In: Dirksmeyer, Walter; Sourell; Heinz (2009): Wasser im Gartenbau. Tagungsband zum Statusseminar am 9. und 10. Februar 2009 im Forum des vTI in Braunschweig. Braunschweig: vTI (Landbauforschung Sonderheft, 328).
- Banik, G. & Brückle, I.** (2010): Principles of Water Absorption and Desorption in Cellulosic Materials. In: *Restaurator* 31 (3-4).
- Barea, J.M. & Brown, M.E.** (1974): Effect on plant growth produced by *Azotobacter paspali* related to synthesis of plant growth regulating substance. *J. Appl. Bacteriol.*, 37: 583-593
- Bashan, Y.** (1986): Enhancement of wheat root colonization and plant development by *Azospirillum brasilense* Cd. following temporary depression of rhizosphere microflora. *Appl Environ Microbiol* 51:1067-1071
- Bastian, J.; Gunkel, A.; Leister, H.; Menniken, T.; Rhodius, R.** (2008): Wasser – Konfliktstoff des 21. Jahrhunderts. Heidelberg: Universitätsverlag Winter.
- Benhamou, N.; Lafontaine, P.J.; Nicole, M.** (1994): Induction of systemic resistance to *Fusarium crown and root rot* in tomato plants by seed treatment with chitosan. *Phytopathology*, 84, 1432–1444.
- Bennetzen, J. L.** (2009): Handbook of maize. New York, NY: Springer.
- Blume, H.-P.; Brümmer, B.; Kalk, E.; Lamp, J.; Lichtfuß, R.; Schimming, C.-G.; Zing, M.** (1984): Bodenkundliches laborpraktikum. Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel., 35 S.
- Blume, H.-P.; Stahr, K.; Leinweber, P.** (2011): Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag (SpringerLink : Bücher).
- Board, J. (Hg.)** (2013): A Comprehensive Survey of International Soybean Research - Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships: InTech.
- Borchard, W.** (1972): Über die thermodynamische Stabilität von hochmolekularen Stoffen im flüssigen Zustand. In: *Kolloid-Z.u.Z.Polymere* 250 (11-12), S. 1182–1186.
- Borchard, W.; Cölfen, H.; Kisters, D.; Straatmann, A.** (2002): Evidence for phase transitions of aqueous gelatin gels in a centrifugal field. In: W. Borchard und A.

- Straatmann (Hg.): Analytical Ultracentrifugation VI, Bd. 119. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Progress in Colloid and Polymer Science), S. 101–112.
- Borchard, W. & Straatmann, A.** (Hg.) (2002): Analytical Ultracentrifugation VI. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Progress in Colloid and Polymer Science).
- Brady, N. C. & Weil, R. R.** (2008): The nature and properties of soils. 14. Aufl. Upper Saddle River, N.J: Pearson Prentice Hall.
- Breitenbach, B.** (2010): PH-Wert im Boden und Bodenacidität. München: GRIN Verlag GmbH.
- Bresinsky, A. & Strasburger, E.** (2008): Lehrbuch der Botanik. 36. Aufl. Heidelberg: Spektrum.
- Brown, M.E.** (1976): Role of Azotobacter in association with Paspalum notatum. J Appl Bacteriol 40:341-348
- Bruisma, J.** (2009): The Resource k to 2050: By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? In: FAO (2009): On How to Feed the World in 2050. Expert Meeting, Rome June.
- Buchholz, F. L. & Graham, A. T.** (1998): Modern superabsorbent polymer technology. New York: Wiley-VCH.
- Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.** (2006): Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate. 5. Aufl. Köln: Bundesgütegemeinschaft Kompost.
- Burgerstein, A.** (2013): Die transpiration der pflanzen. [S.l.]: Dogma.
- Cakmakci, R.; Kantar, F.; Algur, O.F.** (1999): Sugar beet barley yields in relation to Bacillus polymyxa and Bacillus megaterium var. phosphaticum inoculation. J. Plant Nutrition Soil Science, 162: 437-442.
- Cakmakci, R.; Donmez, F.; Aydin, A.; Sahin, F.** (2006): Growth promotion of plants by growth-promoting rhizobacteria under greenhouse and two different field soil conditions. Soil Biology and Biochemistry, 38: 1482-1487.
- Cantow, H.-J.; Dall'Asta, G.; Ferry, J. D.; Fujita, H.; Gordon, M.; Kern, W. et al.** (1974): Thermal Analysis of Polymers. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Advances in Polymer Science, 13).
- Chapagain, A.K. & Hoekstra, A.Y.** (2004): Water footprints of nations. Volume 1: Main Report. Value of Water Research Report Serie No. 16, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands
- Chmielewski, F.** (2011): Wasserbedarf in der Landwirtschaft Beitrag aus: José L. Lozán, J.L.; Graßl, H.; Karbe, L.; Hupfer, P.; Schönwiese, C.-D. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?, Neuauflage 2011
- Corrocher, R.; Tedesco, F.; Rabusin, P.; Sandre, G. de** (1975): Effect of human erythrocyte stromata on complement activation. In: *Br. J. Haematol.* 29 (2), S. 235–241.

- 
- Dirksmeyer, W.** (2009): Wasser im Gartenbau. Tagungsband zum Statusseminar am 9. und 10. Februar 2009 im Forum des vTI in Braunschweig. Braunschweig: vTI (Landbauforschung Sonderheft, 328).
- Drost, D.T.** (1999): Irrigation Effects on Asparagus Root Distribution. *Acta Horticulturae*. 479, S. 283-288.
- Drost, U. & Ell, M.** (2013): Das neue Wasserrecht - Ein Lehrbuch für Ausbildung und Praxis, 1. Auflage, Stuttgart, Richard Boorberg Verlag
- Dunger, W.** (Hg.) (1997): Methoden der Bodenbiologie. Mit 56 Tabellen. 2. Aufl. Jena [u.a.]: Fischer.
- Elkoca, E.; Kantar, F.; Şahin, F.** (2008): Influence of nitrogen and phosphorus solubilizing bacteria on the nodulation, plant growth and yield of chickpea. *Journal of Plant Nutrition*, 31: 157-171.
- FAO** (= Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2007): AQUASTAT database. Online verfügbar: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm> (Stand 5.10.2007)
- FAO** (2010): AQUASTAT database.  
Online verfügbar: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>
- FAO** (2011a): The State of the World's Land and Water Resources: Managing Systems at Risk. London, Earthscan. In UN (2012): World Water Development Report. Online verfügbar: <http://www.unwater.org/publications/publications-detail/en/c/202715/>
- Finck, A.** (1992): Dünger und Düngung. Grundlagen und Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen. 2., neubearb. Aufl. Weinheim [etc.]: VCH-Verl.-Ges.
- Finck, A.** (2007): Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten. 6. Aufl. Berlin, Stuttgart: Borntraeger (Hirts Stichwortbücher).
- Flores, K. & Hadel, K. P.** (2010): The random walk of *Azospirillum brasilense*. In: *Journal of Biological Dynamics* 4 (1), S. 71–85.
- Gehrke, K.; Heering, R.; Lechner, M. D.; Nordmeier, E. H.** (2003): Makromolekulare Chemie. Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker. 3. Aufl. Basel [u.a.]: Birkhäuser.
- Gisi, U.** (1997): Bodenökologie. [mit] 56 Tabellen. 2. Aufl. Stuttgart [u.a.]: Thieme (Flexibles Taschenbuch).
- Grim, R. E.** (1968): Clay mineralogy. 2. Aufl. New York: McGraw-Hill (McGraw-Hill international series in the earth and planetary sciences).
- Grudzinski, A.** (2003): Bewässerungslandwirtschaft heute – Möglichkeiten und Grenzen. Seminar Wasserwirtschaft, Universität Kiel, Deutschland. Online verfügbar: <http://www.koordinierungsstelle-bewaesserung.de/bund.html>

- Gryschko, R. & Horlacher, D.** (1996): Bodenversauerung - Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen - Literaturstudie -. LfU, Texte und Berichte zum Bodenschutz Bd 3b/96. Karlsruhe.
- Haider, K.** (1996): Biochemie des Bodens. Stuttgart: F. Enke.
- Hanke, B.** (1986): Wasser in der Pflanzenproduktion. 2. Aufl. Berlin: Dt. Landwirtschaftsverl. (Taschenbuch der Bewässerung).
- Hanus, H.** (Hg.) (2008): Getreide und Futtergräser. Mit 252 Tabellen. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (Handbuch des Pflanzenbaues, 2).
- Hartl, K.** (1992): Struktur und Chemie der Bodenminerale. In: Naturwissenschaften im Unterricht – Physik / Chemie, 8, 33, S. 267 – 276.
- Hartmann, H. D.** (1981): Die Bewässerung bei Spargel und ihre Auswirkung auf die Pflanze. Archiv Gartenbau, 29, 4, S. 167-175.
- Hatfield, J. L.; Sauer, T.J.; Prueger, J. H.** (2001): Managing Soils to Achieve Greater Water Use Efficiency: A Review. Agronomy Journal, Vol. 93, March-April 2001
- Haynes, R. J.** (1987): Accumulation of dry matter and changes in storage carbohydrate and amino acid content in the first two years of asparagus growth. Sci. Hort., 32, S. 17-23.
- Heim, D.** (1990): Tone und Tonminerale. Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie. Stuttgart: F. Enke.
- Heinrichs, H.; Brumsack, H.-J; Loftfield, N.; König, N.** (1986): Verbessertes Druckaufschlußsystem für biologische und anorganische Materialien. In: *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* 149 (3), S. 350–353.
- Heitefuss, R.** (2000): Pflanzenschutz. Grundlagen der praktischen Phytomedizin ; 22 Tabellen. 3., neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart [u.a.]: Thieme
- Hermans, P. H.; Vermaas, D.; Hermans, J. J.** (1944): über die Raumverhältnisse im System Cellulose-Wasser und über die Packungsdichte der Cellulosefasern. In: *J. Prakt. Chem.* 1 (10-12), S. 247–290.
- Hermans, P.H.** (1949): In colloid Science Vol. II edited by Kruyt, H.R., Elsevier Publ Co Inc, Amsterdam
- Higa, T. & Kinjo, S.** (1991): Effect of lactic acid fermentation bacteria on plant growth and soilhumus formation. In: J.F. Parr, S.B. Hornick and C.E. Whitman (ed.) Proc. 1st. Intl. Conf. onKysuei Nature Fanning. Oct. 17-21, 1989, Khan Kaen, Thailand. pp. 140-147.
- Higa, T. & Wididana, G.N.** (1991): The role of effective microorganisms (EM4) in improving soil fertility and production dalam Bulletin Kyusei Nature Farming, Vol.03/IKNFS/Th. II, Maret 1994. Jakarta, 82-94
- Hintermaier-Erhard, G. & Zech, W.** (1997): Wörterbuch der Bodenkunde. Systematik, Genese, Eigenschaften, Ökologie und Verbreitung von Böden. Stuttgart: F. Enke.

- Hochholdinger**, F.; Zimmermann, R. (2008): Conserved and diverse mechanisms in root development. In: *Curr. Opin. Plant Biol.* 11 (1), S. 70–74.
- Hoekstra**, A. Y. (2003): *Virtual water trade*: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Delft, The Netherlands, 12–13 December 2002. Value of Water Research Report Series No. 12, UNESCO-IHE. Delft, The Netherlands. (Editor)
- Hoekstra**, A.Y. & **Hung**, P.Q. (2003): *Globalisation of water resources*: international virtual water flows in relation to crop trade. UNESCO-IHE Institute for Water Education, P.O. Box 3015. Delft, The Netherlands.
- Hoekstra**, A.Y.; Chapagain, A.K.; Aldaya, M.M.; Mekonnen, M.M. (2009): *Water Footprint Manual. State of the Art 2009*. Water Footprint Network. Enschede, the Netherlands.
- Hoekstra**, A.Y.; Chapagain, A.K.; Aldaya, M.M.; Mekonnen, M.M. (2011): *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan, London.
- Hoffmann**, J. (1998): *Biologische Bodenreinigung. Ein Leitfaden für die Praxis*. Berlin: Springer.
- Holl**, F.B.; Chanway, C.P.; Turkington, R.; Radley, R.A. (1988): Response of crested wheatgrass (*Agropyron cristatum* L.), perennial ryegrass (*Lolium perenne*L.) and white clover (*Trifolium repens*L.) to inoculation with *Bacillus polymyxa*. *Soil Biol. Biochem.*, 20: 19-24.
- Hsieh**, T.-H.; Chen, J.-J. J.; Chen, L.-H.; Chiang, P.-T.; Lee, H.-Y. (2011): Time-course gait analysis of hemiparkinsonian rats following 6-hydroxydopamine lesion. In: *Behavioural Brain Research* 222 (1), S. 1–9.
- Hulpke**, H. & **Adinolfi**, M. (2000): *Römpp-Lexikon Umwelt*. 2. völlig überarb. Aufl. Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Iler**, R. K. (1979): *The chemistry of silica. Solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry*. New York: Wiley (A Wiley-Interscience publication).
- Jasmund**, K. & **Lagaly**, G. (1993): *Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendungen, und Einsatz in Industrie und Umwelt*. Darmstadt: Steinkopff.
- Kaltschmitt**, M. (2009): *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. In: *Energie aus Biomasse*.
- Kappen**, H. (1929): *Die Bodenazidität. Nach Agrikulturchemischen Gesichtspunkten Dargestellt*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-91785-1>.
- Katz**, J. R. (1917): Die Gesetze der Quellung. In: *Kolloidchem Beih* 9 (1-6), S. 1–182.
- Knopp**, G. M. (2010): *Das neue Wasserhaushaltsrecht. Rechtsstand: voraussichtlich 1. November 2009*. 1. Aufl. München: Beck, C H.
- Kuntze**, H.; Roeschmann, G.; Schwerdtfeger, G. (1994): *Bodenkunde*. 188 Tabellen. 5. Aufl. Stuttgart: Ulmer (UTB, 8076).

- Kunzelmann, G.** (1999): Möglichkeiten zur effizienten Bewässerung und Bewässerungssteuerung bei ausgewählten Freilandgemüsearten sowie bei Zuckerrüben und Mais. Geisenheim: Gesellschaft zur Förderung der Forschungsanstalt (Geisenheimer Berichte, 38).
- Leser, H.** (1997): Diercke-Wörterbuch allgemeine Geographie. Vollkommen überarbeitete Neuausg. Braunschweig, München: Westermann; Deutscher Taschenbuch Verlag (DTV (Series)).
- Lewin, M.** (2007): Handbook of fiber chemistry. 3. Aufl. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis (International fiber science and technology series, 16).
- Li, X.; Wu, Z.; Li, W.; Yan, R.; Li, L.; Li, J. et al.** (2007): Growth promoting effect of a transgenic *Bacillus mucilaginosus* on tobacco planting. In: *Appl Microbiol Biotechnol* 74 (5), S. 1120–1125.
- Liebau, F.** (1982): Classification of Silicates in: Reviews in Mineralogy Volume 5: Orthosilicates; Mineralogical Society of America
- Liebau, F.** (1985): Structural chemistry of silicates, structure, bonding and classification. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 347 Pages
- Lindberg, T. & Granhall, U.** (1984): Isolation and characterization of dinitrogen-fixing bacteria from the rhizosphere of temperate cereals and forage grasses. *Appl. Environ Microbiol* 48:683-689
- Maresch, W.; Medenbach, O.; Steinbach, G.; Medenbach, K.** (1996): Gesteine. Neue, bearb. Sonderausg. München: Mosaik-Verl. (Steinbachs Naturführer).
- Mark, J.E.** (2004): Physical properties of polymers. 3rd ed. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Mekonnen, M.M. & Hoekstra, A.Y.** (2011): The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrol Earth Syst Sci* 15:1577-1600.
- Mengel, K.** (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Mit 109 Tabellen. 7., überarb. Aufl. Jena: Fischer.
- Meshram, S.U. & Shende, S.T.** (1982) Response of maize to *Azotobacter chroococcum*. *Plant Soil* 69:265-273
- Mohanty, A.K.; Misra, M.; Drzal, L. T.** (2005): Natural fibers, biopolymers, and their biocomposites. Boca Raton, Fla, London: CRC.
- Mortimer, C. E.; Müller, U.** (2007): Chemie. Das Basiswissen der Chemie. In: *Chemie*.
- Mosler, T.** (1998): Bewässerungstechnik Spezial – Tropfbewässerungsanlagen. Monatszeitschrift 01/1998 – 05/1998
- Murphy, J. & Riley, J.P.** (1962): A modified single-solution method for the determination of phosphorus in natural water: *Analytica Chimica Acta*, v. 27, p. 31-36.

- 
- Nentwig, W.** (2005): Humanökologie. Fakten - Argumente - Ausblicke. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Nkongolo, K. K.; Spiers, G.; Beckett, P.; Narendrula, R.; Theriault, G.; Tran, A.; Kalubi, K. N.** (2013): Long-Term Effects of Liming on Soil Chemistry in Stable and Eroded Upland Areas in a Mining Region. In: *Water Air Soil Pollut* 224 (7).
- OECD** (2009): Environment Outlook to 2030. In: UNESCO: Water in a Changing World: The United Nations World Water Development Report 3.
- Ohyama, T.; Minagawa, R.; Ishikawa, S.; Yamamoto, M.; van Phi Hung, N.; Ohtake, N. et al.** (2013): Soybean Seed Production and Nitrogen Nutrition. In: James Board (Hg.): A Comprehensive Survey of International Soybean Research - Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships: InTech.
- Oki, T.; Sato, M., Kawamura, A.; Miyake, M.; Kanae, S.; Musiake, K.** (2003): *Virtual water trade to Japan and in the world*. Proceedings of the expert meeting held 12 - 13 December 2002, Delft, The Netherlands. Editor Arjen Hoekstra, UNESCO-IHE
- Okrusch, M. & Matthes, S.** (2009): Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Okon, Y. & Labandera-Gonzalez, C.A.** (1994): Agronomic applications of Azospirillum. An evaluation of 20 years worldwide field inoculation, *Soil Biol. Biochem.* 26, pp. 1591–1601.
- Passioura, J.** (2006): Increasing crop productivity when water is scarce—from breeding to field management. *Agricultural Water Management* 80, S. 176–196
- Paschold, P.-J. & Eimert, K.** (2007): Spargel zählt botanisch nicht mehr zu den Liliengewächsen. *Gemüse*, 43, 12, S. 35.
- Paschold, P.-J.** (2010): Bewässerung im Gartenbau. Stuttgart, Ulmer-Verlag
- Patzwahl, W.** (2007): Bewässerung im Weinbau. 15 Tabellen. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (Rebe & Wein).
- Pena-Méndez, E.M.; Havel, J.; Patočka, J.** (2004): Humic substances ñ compounds of still unknown structure: applications in agriculture, industry, environment, and biomedicine (Review), *Journal of applied biomedicine*, 3: 13-24, 2005. University of South Bohemia, Czech Republic.
- Peterson, R.S.** (2005): Evaluating asparagus productivity by assessing farm practices, irrigation methods and harvest pressure. Master Thesis, Utah state university.
- Piepenbrock, W.** (2002): Untersuchungen zum Einfluss der Bewässerung und Bewässerungssteuerung auf Ertrag und Qualität beim Spargel. Beuren, Stuttgart: Grauer.
- Qin, S.; Xing, K.; Jiang, J.-H.; Xu, L.-H.; Li, W.-J.;** (2011): Biodiversity, bioactive natural products and biotechnological potential of plant-associated endophytic actinobacteria, *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 89, no. 3, p. 457-473.

- Rabea**, E.I.; El Badawy, M.T.; Stevens, C.V.; Smagghe, G.; Steurbaut, W. (2003): Chitosan as antimicrobial agent: Applications and mode of action. *Biomacromolecules*, 4, 1457–1465.
- Ramser**, E. (2014): Das neue Schema zur Klassifizierung der Böden auf den Dispersitätsklassen von Atterberg und neue kulturtechnische Untersuchungsmethoden. Artikel. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.5169/seals-210091>.
- Rehage**, G. (1964): *Kolloid-Z. & Z. Polymere*
- Reichwein**, S. (2002): Baumwurzeln unter Verkehrsflächen. Untersuchungen zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln and Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidung. Hannover: Inst. für Grünplanung und Gartenarchitektur (Beiträge zur räumlichen Planung, 66).
- Reuther**, H. (2004): *Bewässerung. Planung & Umsetzung: was ist zu beachten?* 1. Aufl. Neustadt/Weinstrasse: Meininger (Tipps für die Praxis).
- Richter**, G. (1998): *Stoffwechselfysiologie der Pflanzen. Physiologie und Biochemie des Primär- und Sekundärstoffwechsels : 10 Tabellen.* 6. Aufl. Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Rowell**, D.L. & **Börsch-Supan**, M. (1997): *Bodenkunde. Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen ; mit 103 Tabellen.* Berlin [u.a.]: Springer.
- Scheffer**, F.; Schachtschabel, P.; Blume, H.-P. (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde.* 16. Aufl. Heidelberg ;, Berlin: Spektrum, Akad. Verl.
- Schinner**, F. (1993): *Bodenbiologische Arbeitsmethoden.* 2. Aufl. Berlin, New York: Springer-Verlag.
- Schinner**, F. & **Sonnenleitner**, M. (2012): *Bodenökologie: Mikrobiologie Und Bodenenzymatik Band I. Grundlagen, Klima, Vegetation und Bodentyp.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schlichting**, E.; Blume, H.-P.; Stahr, K. (1995): *Bodenkundliches Praktikum. Pareys Studentexte 81,* Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 295 S.
- Schmidt**, P. (1994): *Bewässerung in Trockengebieten.* 3. Aufl. Stuttgart: IRB (IRB-Literaturauslese, 2533).
- Schopfer**, P. (1989): *Experimentelle Pflanzenphysiologie.* Berlin [u.a.]: Springer.
- Senesi**, N.; Miano, T.M.; Provenzano, M.R.; Brunetti, G. (1991): Characterization, differentiation, and classification of humic substances by fluorescence spectroscopy. In: *Soil Science.* 152 (4): 259-271.
- Shiklomanov**, I.A. (1993): *World Freshwater Resources.* In Gleik, P.H. (edt.) (1993): *Water in Crisis. A Guide to the World's Fresh Water Resources.* Oxford University Press, New York.
- Shiklomanov**, I.A. & **Rodda**, J.C. 2003: *World water Resources at the beginning of the 21th century.* Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Snoek, H. & Wülfrath, H.** (1995): Das Buch vom Steinmehl. Entstehung, Verwendung und Bedeutung im Land- und Gartenbau. Holm: Deukalion.
- Sonnenberg, A.; Chapagain, A.; Geiger, M.; August, D.** (2009): Der Wasser-Fußabdruck Deutschlands: Woher stammt das Wasser, das in unseren Lebensmitteln steckt? WWF Deutschland, Frankfurt.
- Sourell, H.** (2009): Bewässerungstechnik: Wasserverteilung mit Blick in die Zukunft, Freilandberegnung. Dirksmeyer, W.; Sourell, H. (2009): Wasser im Gartenbau. Tagungsband zum Statusseminar am 9. und 10. Februar 2009 im Forum des vTI in Braunschweig. Braunschweig: vTI (Landbauforschung Sonderheft, 328).
- Sposito, G.** (1998): Bodenchemie. Stuttgart: Enke.
- Stahl, M.** (1970): Die Wurzelfäule des Spargels. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz 77: 354-367
- Stahr, K. Kandeler, E.; Herrmann, L.; Streck, T.** (2012): Bodenkunde und Standortlehre. [Grundwissen Bachelor]; 42 Tabellen. Stuttgart: Ulmer.
- Strasburger, E.; Bresinsky, A.; Körner, C.; Kadereit, J. W.; Neuhaus, G.; Sonnewald, U.** (2008): Lehrbuch der Botanik. 36. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- SSSA** (2013): Glossary of soil science terms. Online verfügbar: [www.soils.org/publications/soils-glossary#](http://www.soils.org/publications/soils-glossary#) (Stand Feb. 2013)
- Supper, S.** (2003): Verstecktes Wasser. Schriftenreihe Sustainable Austria Nr. 25 der Forschungsgesellschaft für Solidarität, Ökologie und Lebensstil. Dezember 2003, Österreich. Online verfügbar: <http://www.fg-sol.at/fg1.php>
- Swett, C.** (1975): Outpatient phenothiazine use and bone marrow depression. A report from the drug epidemiology unit and the Boston collaborative drug surveillance program. In: *Arch. Gen. Psychiatry* 32 (11), S. 1416–1418.
- Tanaka, F.** (2011): Polymer Physics. Applications to Molecular Association and Thermoreversible Gelation. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Taylor, R.** (2007): Das Geheimnis und die Magie der ORMUS-Elemente, NEXUS Magazin 10 (April-Mai 2007), <http://www.nexus-magazin.de/artikel/lesen/das-geheimnis-und-die-magie-der-ormus-elemente> (Stand Juni 2014)
- Tillmann, D.; Küffer, D.; Schön, U.; Stursberg, S.; Grab-Hartmann, G.** (2004): Kostbares Nass – Investitionschancen am Wassersektor, SAM (Sustainable Asset Management) Studie, 2. Auflage. Zürich, Schweiz
- Tischelmayer, N.** (2001): Norbert Tischelmayers Wein-Glossar; 2777 Begriffe rund um den Wein, -St. Pölten; Wien; Linz: NP-Buchverl.
- Troch, P. De & Vanderleyden, J.** (1996): Surface properties and motility of Rhizobium and Azospirillum in relation to plant root attachment, *Microbiol. Ecol.* 32, pp. 149–169.
- Umali-Garcia, M.; Hubbell, D.H.; Gaskins, M.H.; Dazzo, F.B.** (1980): Association of Azospirillum with grass roots, *Appl. Environ. Microbiol.* 39, pp. 219–226.

- UN** (2006): World Population Prospect: The 2006 Revision. (United Nations publication, forthcoming), New York.
- UNESCO** (2003): "Water for People, Water for Life: The United Nations World Water Development Report." Paris/Oxford
- Vogt, E. & Schruft, G.** (2000): Weinbau. Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart (Hohenheim)
- Wallace, A. & Terry, R. E.** (1998): Handbook of soil conditioners. Substances that enhance the physical properties of soil. New York: Marcel Dekker.
- Walter, H.** (1979): Vegetations- und Klimazonen. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag
- Weiler, E.W.; Nover, Lutz; Nultsch, Wilhelm** (2008): Allgemeine und molekulare Botanik. 30 Tabellen. Stuttgart, New York, NY: Thieme.
- Weis, W.** (1975): Ascorbic acid and biological systems. Ascorbic acid and electron transport. In: *Annals of the New York Academy of Sciences* 258, S. 190–200.
- Weiss, R.G. & Térech, P.** (2006): Introduction. In: Richard G. Weiss und Pierre Terech (Hg.): *Molecular Gels*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, S. 1–13.
- Wolterstorff, B.** (1990): Befall mit *Fusarium* gefährdet den Spargelanbau. *Gartenbau* 37: 169-171
- World Economic Forum** (2008): Managing our Future Water Needs for Agriculture, Industry, Human Health and the Environment. Discussion Document for the World Economic Forum Annual Meeting.
- WWF - World Wide Fund For Nature** (2009): Studie: Der Wasser-Fußabdruck Deutschlands. WWF Deutschland, Frankfurt am Main
- Zeuke, M.** (2005): Superabsorber aus nachwachsenden Rohstoffen. Die gezielte Synthese mit nachwachsenden Rohstoffen. In: *CHEMKON* 12 (4), S. 155–159.
- Zimmer, D. & Renault, D.** (2003): Virtual water in food production and global trade: review of methodological issues and preliminary results. Proceedings of the expert meeting held 12-13 December 2002. Delft, The Netherlands. Editor Arjen Hoekstra, UNESCO-IHE.

#### **INTERNETQUELLEN:**

- Firma Hydrip (2013): Pdf-Dokument „HYDRIP im Weinbau“, Referenzversuch, <http://www.hydrrip.at/de/agro.html> (Stand Oktober 2014)
- Naturscheck Winter (2011): Interview mit Roland Plocher, [http://www.plocher.de/deutsch/plocher\\_philosophie.php](http://www.plocher.de/deutsch/plocher_philosophie.php) (Stand Juni 2014)
- DBU-Projekt der LfL (Bay. Landesanstalt für Landwirtschaft): Hopfenbewässerung. [http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/hopfen\\_dbu\\_projekt\\_bew\\_\\_sserung.pdf](http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/hopfen_dbu_projekt_bew__sserung.pdf) (Stand Juli 2015)

## Liste der verwendeten Bodenhilfsstoffe samt Hersteller und Internetquelle

Produkt	Hersteller	Internetquelle (Stand Juli 2014)
Perligran®	Knauf Perlite	<a href="http://www.knauf-aquapanel.com/produkte/gartenbau/perligran-als-mineralischer-zuschlagsstoff/anwendung.html">http://www.knauf-aquapanel.com/produkte/gartenbau/perligran-als-mineralischer-zuschlagsstoff/anwendung.html</a>
Alginit™	TNR	<a href="http://www.alginit.com/index.php?id=4">http://www.alginit.com/index.php?id=4</a>
Axis™ Regular	Consagro	<a href="http://www.consagros.de/axis-regular.html">http://www.consagros.de/axis-regular.html</a>
Betasoil™	Tech consult limited	Broschüre von tech consult limited
Naturzeolith	Zeolithwelt GmbH	<a href="http://www.zeolithwelt.de/bodenverbesserung/65/bodenverbesserer-5-kg?c=23">http://www.zeolithwelt.de/bodenverbesserung/65/bodenverbesserer-5-kg?c=23</a>
Bentonit SandbodenVerbesserer	Neudorff	<a href="http://www.neudorff.de/produkte/bodenverbesserung/bentonit-sandbodenverbesserer.html">http://www.neudorff.de/produkte/bodenverbesserung/bentonit-sandbodenverbesserer.html</a>
UrgesteinsMehl	Neudorff	<a href="http://www.neudorff.de/produkte/bodenverbesserung/neudorffs-urgesteinsmehl.html">http://www.neudorff.de/produkte/bodenverbesserung/neudorffs-urgesteinsmehl.html</a>
GEOHUMUS™	Geohumus GmbH	<a href="http://www.geohumus.com/de/produkte/geohumus.html">http://www.geohumus.com/de/produkte/geohumus.html</a>
Humusziegel (Kokosfaser)	Canna	<a href="http://www.humusziegel.de/shop/quellerde-anzucht-aussaaterde/1-x-kokoserde-humusziegel-kokosziegel-kokohumus-a-650-gramm/">http://www.humusziegel.de/shop/quellerde-anzucht-aussaaterde/1-x-kokoserde-humusziegel-kokosziegel-kokohumus-a-650-gramm/</a>
Floratorf	Floragard	<a href="https://www.floragard.de/Produkte/Die-Bodenverbesserer/Floragard-Floratorf%C2%AE">https://www.floragard.de/Produkte/Die-Bodenverbesserer/Floragard-Floratorf%C2%AE</a>
BlackJak SC	Lances Link SA	<a href="http://www.intrachem-bio.de/produkte/pflanzenstaerkungsmittel/blackjakr-sc/">http://www.intrachem-bio.de/produkte/pflanzenstaerkungsmittel/blackjakr-sc/</a>
Nitrovin	Project Acon	übersetzte Produktbeschreibung der Firma The Gene Tech
Biomagic	Bioagro/e-nema	
Biorend	Sojall Pro Natura	<a href="http://www.sojall-naturen.at/index.php/sojall-vitana">http://www.sojall-naturen.at/index.php/sojall-vitana</a>
Sojall-Vitana A		
Sojall-Vitana B		
Sojall-Vital A	Sojall Pro Natura	<a href="http://www.sojall-naturen.at/index.php/sojall-vital">http://www.sojall-naturen.at/index.php/sojall-vital</a>
Sojall-Vital B		
Humibak	Humital	<a href="http://www.humital.de/humibak.html">http://www.humital.de/humibak.html</a>
Azotovit/Phosphatovit	Project Acon	Broschüre; <a href="http://www.project-acon.de/">http://www.project-acon.de/</a>

## ANHANG

Tab. 1: Marktübersicht weiterer fester Bodenhilfsstoffe (Stand März 2015)

Hersteller	Produkt	Bestandteile	Aufwandmenge kg/m <sup>2</sup>	Preis €/kg
aqua terra Bioprodukt GmbH	Bio-alghum "Bodengranulat Plus"	Braunalgen, Bio-Saccharide	0,063	-
aqua terra Bioprodukt GmbH	Bio-alghum Ton-Boden-Pulver	Montmorillonit-Ton-Kolloiden, Braunalgen, Bio-Saccharide	0,300	-
Bactiva	Bactiva®	Bakterien, Pilze, Algenextrakt, Aminosäuren u.a.	0,100	
Beckmann & Brehm	Boden-Aktiv-Plus	Humus, Urgesteinsmehl, Algenkalk	0,125	1,30
Beckmann & Brehm	Hornspäne	Hornspäne	0,070	2,63
Beckmann & Brehm	Bentonit	Tonminerale	0,125	0,93
Beckmann & Brehm	Urgesteinsmehl	Urgesteinsmehl	0,225	0,42
bioteiga	Zelikat	Granit+Kalkhydrat	0,035	4,99
Deutsche Cuxin Marketing GmbH	DCM VIVISOL®		0,150	
Deutsche Cuxin Marketing GmbH	DCM BENTONIT PROFI	Gesteinsmehl		1,59
Deutsche Cuxin Marketing GmbH	DCM URGESTEINSMEHL PROFI	Basalt, Lava		0,60
Deutsche Cuxin Marketing GmbH	DCM BODENAKTIVATOR PROFI	Dünger+Urgesteinsmehl	0,075	1,52
Deutsche Cuxin Marketing GmbH	DCM MYKO-AKTIV	Dünger+Mykorrhiza	0,125	2,32
GEFA Fabritz GmbH	Stockosorb	Wasserspeicher aus Copolymer	0,100	5,35
GEFA Fabritz GmbH	GEFA Arbovit	Stockosorb+Tonminerale	5 kg/m <sup>3</sup>	5,25
GEFA Fabritz GmbH	GEFA Alginat Granulat	Braunalgen	1,5-2 kg/m <sup>3</sup>	1,75
GEFA Fabritz GmbH	Gefa Algosorb	Alginat+Stockosorb	5 kg/m <sup>3</sup>	5,25
GEFA Fabritz GmbH	Perlhumus	Humus auf Basis von Leonardit	5-10 kg/m <sup>3</sup>	0,53
GEFA Fabritz GmbH	Powhumus	Kaliumsalz der Huminsäure aus Braunkohle	0,055	11,2
Hanse Handelskontor Stralsund GmbH	BAT - Mineral P2		0,0008	-
Hartsteinwerke Schicker	Diabas Urgesteinsmehl	Urgesteinsmehl	0,150	0,64
Karner Düngerproduktion GmbH	AKRA Granulat Kombi	Zeolithe, Acenobacter	0,040	-
Lava Union GmbH	Eifelgold Urgesteinsmehl	Urgesteinsmehl	0,100	0,73
Lava Union GmbH	Eifel-Lava Streu-Gut	Steinmehl aus Eifellava	0,100	0,71
Ludwig Engelhart	Engelharts Gartenton	Steinmehl	0,230	1,15
Ludwig Engelhart	Biolit	Diabastgesteinsmehl	0,300	1,04
MikroVeda GmbH	ProMilieu GARTENBOKASHI	Getreidekleie, Zuckerrohrmelasse, Urgesteinsmehl	0,300	2,90
MikroVeda GmbH	ProMilieu Zeolithpulver	Zeolith	1,000	6,56
MikroVeda GmbH	ProMilieu Dolomitpulver	Basaltgesteinsmehl		0,99
multikraft	EM-KERAMIKPULVER	Ton+Mikroorganismen		14,30
multikraft	BIO BOKASHI TERRA			2,80
Mykonor	Mykonor BIO-NPK Pulver	Mikroorganismen	0,00005	
Neudorff	Azet RasenBodenAktivator	Humuskonzentrat	0,125	1,49
Neudorff	Azet Vitalkalk	kohlensaurer Kalk+Mg+Fe	0,075	0,97
Neudorff	Full Humin Bodenaktivator	Dauerhumus-Konzentrat aus Braunkohle+Basaltmehl	0,100	1,59
Neudorff	UrgesteinsMehl	Basaltmehl	0,250	0,73
Oscorna Dünger	Oscorna BodenAktivator	Org. Substanz+Algenkalk	0,250	1,28 (amazon)
Plagron	Mega Worm	Wurmhumus	0,2501	4,95/1
ProGreen	BIO BonaSol	Nebenprodukt a. d. Lebensmittelproduktion	0,140	-
ProSoil GmbH	HumiComplete			
ProSoil GmbH	Humentos			
PRP TECHNOLOGY DE	PRP SOL	CaCO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub> , Mineralstoffe	0,025	0,60
Sanoway	Sanoplant	natürliche Silikate	0,750	11,9
Sanoway	Sanovit	Sanoplant+Lavagranulat	0,600	12,9
Schacht	Algenkalk	Algenkalk	0,800	0,87
Schacht	Bentonit	Tonminerale		1,30
Schacht	Schachtelhalm mit Bodenverbesserer	Tonminerale+Pflanzenextrakte		13,29
SOBAC	Quaterna® Terra	Mikroorganismen	0,030	
Suserra	Urgesteinsmehl	Urgesteinsmehl	-	0,65
Suserra	Betonit	Betonit	-	0,75
Suserra	Bimssand	Bimssand	-	0,45
Suserra	Lavasand	Lavasand	-	0,45
Suserra	Pflanzenkohle	Pflanzenkohle	-	0,81
Suserra	Quarzsand	Quarzsand	-	0,44
Suserra	Zeolithsand	Zeolithsand	-	1,07
Suserra	Zeolithmehl	Zeolithmehl	3,500	1,07
terraconet	Arpolith	Gesteinsmehl, Sand, mineralische Zusätze in Arpomatrix	0,200	13,33

Tab. 2: Marktübersicht weiterer **flüssiger** Bodenhilfsstoffe (Stand März 2015)

Hersteller	Produkt	Bestandteile	Aufwandmenge l/m <sup>2</sup>	Preis €/l
aqua terra Bioprodukte GmbH	Bio-algihum Flüssigkonzentrat B	Braunalgen, Bio-Saccharide		9,9
Ata Zyme	Atami			9,95
Biomasters Inc.	MicroSoil®	Mikroorganismen	0,0001	
Biomasters Inc.	BioTech/AgriZymes™	Multienzymlösung		
BioMyc Environment GmbH	BioMyc™ Org. Wasserspeicher	Mykorrhizapilz-Konzentrat		
Deutsche Cuxin Marketing GmbH	DCM REDU BAC	Bakterien, org. Säuren	0,008	
Emiko	EM 1	Effektive Mikroorganismen	0,01	23,49
GEFA Fabritz GmbH	GEFA Alginat Konzentrat	Braunalgen		1,90
GEFA Fabritz GmbH	Powhumus	Kaliumsalz der Huminsäure aus Braunkohle	300 g/1000 l	11,2 kg
Hesi	Power Zyme	Enzymextrakte		18,9
Mack bio-agrar GmbH	BonaVita®			
MikroVeda GmbH	EM-FARMING™ PLUS	Mikroorganismen	0,02	25,4
MikroVeda GmbH	EM-FARMING™	Mikroorganismen	0,02	23,4
MikroVeda GmbH	ProMilieu® TERRA	Kräuterextrakt+Urgesteinsmehl	0,02	7,11
MikroVeda GmbH	Greengold	NS, Aminosäuren, Humusstoffe u.a.		30
multikraft	Effektive Mikroorganismen Urlösung	Mikroorganismen, Zuckerrohrmelasse, Wasser		20,76
multikraft	Effektive Mikroorganismen aktiv	EM-Urlösung, Zuckerrohrmelasse, Wasser		2,18
multikraft	TERRAFERT BODEN	Mikroorganismen, Mikronährstoffe		8,28
Mykonor	Mykonor BIO-NPK flüssig	Mikroorganismen	0,00015	
Mykonor	Mykonor BIO-Schutz	Mikroorganismen	0,0000375	
SOURCON PADENA	SALAVIDA	Mikroorganismen, Magermilchpulver		
Vossen Laboratories	Bio Terra I	Kräuterextrakt	0,35	
Vossen Laboratories	Bio Terra II	Bakterien	0,035	

## **DANKSAGUNG**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Dr. Manfred Trimborn gilt mein ganz besonderer Dank nicht nur für die freundliche und unermüdliche Unterstützung, sondern auch für die ständige und konstruktive Diskussionsbereitschaft. Danke auch für die tatkräftige und tolle Zusammenarbeit im Projekt.

Bei Herrn Prof. Dr. Heiner Goldbach bedanke ich mich herzlich für die Überlassung des Themas und den konstruktiven Gesprächen in der IPLer Goldbach Gruppe.

Herrn PD Dr. Gerhard Welp danke ich sehr für die spontane und freundliche Übernahme des Korreferates.

Großen Dank schulde ich Herrn PD Dr. Thomas Eichert, der mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand und mir vor allem bei den Statistikfragen, die im Rahmen dieser Arbeit anfielen, stets geduldig auf die Sprünge geholfen hat. Auch sonst war er ein wichtiger Diskussionspartner.

Einen großen Dank möchte ich auch an Herrn Dr. Frank Gresens weiter geben. Danke für deine Hilfs- und Diskussionsbereitschaft.

Ein weiteres Dankeschön geht an Herrn Sven Berkau, der mich mit seiner tatkräftigen Hilfe und beruhigenden Art bei der Anlegung des Versuchs in Portugal sehr stark unterstützt hat.

Für die gute Zusammenarbeit möchte ich mich auch ganz herzlich bei allen NILE-Projektpartnern bedanken. Es war eine wunderbare Zeit mit tollen und interessanten Menschen. Im Besonderen möchte ich danken: Herrn Stefan Glaser und Herrn Philipp Mehlhorn für den konstruktiven Wissensaustausch, sowohl in den Meetings als auch in gemütlicher Feierabendrunde; Herrn Dr. Oliver Schmittmann für eine immer offen stehende Tür und die gemeinsamen Projektreisen.

Meinen beiden studentischen Hilfskräften Christian Michalski und Julian Gödde bin ich sehr dankbar für die tatkräftige Unterstützung bei der Ernte und Vermahlen unzähliger Pflanzenproben, sowie für die Hilfe im Labor und in den Gewächshausversuchen.

Bei meinen Mitdotorandinnen und Mitdotoranden des INRES möchte ich mich vor allem ganz herzlich für die tollen Stunden außerhalb des Institutes bedanken.

Bedanken möchte ich mich natürlich auch bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz, Abteilung Pflanzenernährung, für die tolle Zusammenarbeit in Theorie und Praxis, dienstlich wie privat. Ganz besonderer Dank gilt den TAs Brigitte Überbach und Angelika Glogau für ihre Hilfe im Labor und sonstigen Anliegen; Frau Waltraud Köhler für ihre ständige Hilfsbereitschaft rund um das Thema Vegetationshalle.

Zuletzt gilt natürlich ein ganz besonderer Dank an meine Eltern, die mich bis zum heutigen Zeitpunkt immer unterstützt haben. Ebenfalls möchte ich meiner Schwester Judith an dieser Stelle ein ganz großes Dankeschön für ihr Korrekturlesen aussprechen. Danke an Euch für die stetige Rückendeckung und die moralische Unterstützung in verzweifelten Situationen. Danke auch an Carolin Winkel, die oft die Launen eines Doktoranden erleben musste und stets aufmunternde Worte gefunden hat.

Danke an alle, die mir in irgendeiner Weise geholfen haben. Leider kann ich nicht jeden Einzelnen hier anführen.