

Universität Hohenheim  
Fakultät für Agrarwissenschaften  
Institut für Pflanzenproduktion und Agrarökologie in den Tropen und Subtropen



## **Untersuchungen zur Salztoleranz von *Jatropha curcas L.***

Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung  
des akademischen Grades Bachelor of Science

Christina Seckinger  
Esslingen

Abgabedatum: 27.10.10

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	II
Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	VI
Abkürzungsverzeichnis .....	VII
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation .....	1
1.1.1 Versuchsaufbau .....	1
1.2 <i>Jatropha curcas</i> L. Verbreitung und Verwendung.....	2
1.2.1 Verbreitung.....	2
1.2.2 Verwendung .....	3
2 Material und Methoden .....	4
2.1 Material.....	4
2.1.1 Versuchsaufbau .....	4
2.2 Methoden.....	5
2.2.1 Messung des pH-Wertes.....	5
2.2.2 Bestimmung des Topfsättigungspunktes.....	5
2.2.3 Herstellung der Salzlösungen .....	5
2.2.4 Bestimmung der täglichen und stündlichen Wasserabgaberraten .....	6
2.2.5 Bestimmung des Sättigungsdefizits.....	7
2.2.6 Einfluss des Sättigungsdefizits stündliche Wasserabgaberraten .....	8
2.2.7 Stündliche Wasserabgaberraten korrigiert um das Sättigungsdefizit .....	8
2.2.8 Bestimmung der Natrium- und Kaliumgehalte .....	9
2.2.9 Gaswechsel .....	9
2.2.10 Bestimmung der Bestandwasserabgabe.....	10
2.2.11 Statistik .....	11
2.2.12 Messung des EC- Wertes.....	11
2.2.13 Blattflächenbestimmung.....	11
2.2.14 Bestandeswasserabgabe-und Blattflächenzuwachs .....	12
2.2.15 $ci\ ca^{-1}$ Verhältnis in % zum EC-Wert des Bodensubstrates.....	12
3 Ergebnisse und Diskussion.....	13
3.1 Ergebnisse.....	13

3.1.1	Wasserabgaberraten .....	13
3.1.2	Einfluss des Sättigungsdefizits auf die Wasserabgaberraten .....	15
3.1.3	Wasserverbrauch korrigiert um das Sättigungsdefizit.....	16
3.1.4	Natrium- und Kalium-Anreicherung im Blattgewebe.....	17
3.1.5	Reaktionen der Pflanzen auf osmotischen Stress .....	18
3.1.6	Bestandeswasserabgabe im Vergleich zur Transpiration .....	18
3.1.7	Statistische Auswertung .....	21
3.1.8	EC-Wert des Bodensubstrats .....	22
3.1.9	Einteilung von Pflanzen nach FAO .....	23
3.2	Diskussion .....	27
3.2.1	Wasserabgaberraten der unterschiedlichen Behandlungen.....	27
3.2.2	Einfluss des Sättigungsdefizits auf die Wasserabgaberraten .....	27
3.2.3	Natrium- und Kalium-Gehalte im Blattgewebe .....	28
3.2.4	Beobachtungen an den Pflanzen nach Salzgabe.....	29
3.2.5	Blattwachstum unter Salzstressbedingungen .....	30
3.2.6	EC-Wert des Bodensubstrats .....	31
3.2.7	Strategien von <i>Jatropha curcas</i> L. zu Bewältigung der Stressphase ...	31
3.2.8	Salztoleranz von <i>Jatropha curcas</i> L.....	32
4	Schlussfolgerung und Ausblick.....	33
5	Anhang .....	34
	Literaturverzeichnis.....	VIII

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Salztoleranz der Kulturpflanzen; FAO [29]; Ertrag (in %) in Abhängigkeit des EC-Wertes des Bodensubstrates (in  $\text{dS m}^{-1}$ ). ..... 2
- Abbildung 2: Stündliche Wasserabgaberraten während der Lichtphase (in  $\text{g H}_2\text{O Topf}^{-1} \text{h}^{-1}$ ; Mittelwerte +/- Standardabweichungen) von *Jatropha curcas* L. bei der Applikation von unterschiedlich konzentrierten Salzlösungen (in  $\text{mmol NaCl L}^{-1}$ ). Lösungen verschiedener Salzkonzentration wurden an 5 Tagen (siehe Pfeile) während der Versuchsdauer von 22 Tagen gegeben..... 13
- Abbildung 3: Stündliche Wasserabgaberraten von *Jatropha curcas* L. (in  $\text{g H}_2\text{O Topf}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) in Abhängigkeit zum Sättigungsdefizits (in kPa) des Wasserdampfes in der Atmosphäre. 15
- Abbildung 4: Stündliche Wasserabgaberraten von *Jatropha curcas* L. (in  $\text{g H}_2\text{O Topf}^{-1} \text{h}^{-1}$ ; Mittelwerte +/-Standardabweichung) und Sättigungsdefizit des Wasserdampfes in der Atmosphäre in  $\text{kPa}^{-1}$  in der Lichtphase bei der Zufuhr von unterschiedlichen Salzlösungen in  $\text{mmol L}^{-1}$  an 5 Tagen (siehe Pfeile) bei einer Versuchsdauer von 22 Tagen. .... 16
- Abbildung 5: Die Natrium- und Kaliumgehalte der Blatttrockenmasse von *Jatropha curcas* L. (in  $\text{mg Na bzw. Ka g}^{-1}$  Trockenmasse; Mittelwert +/- Standardabweichung) der verschiedenen Behandlungen (in  $\text{mmol NaCl L}^{-1}$ ) gemessen am Ende des Versuches. .... 17
- Abbildung 6: Bestandeswasserabgabe (in  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; Mittelwert +/- Standardabweichung) von *Jatropha curcas* L. resultierend aus der Bewässerung mit unterschiedlichen Konzentrationen an Salzlösungen (in  $\text{mmol NaCl L}^{-1}$ ). ..... 19
- Abbildung 7: Transpirationsraten (in  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; Mittelwert +/- Standardabweichung) im Gaswechsel von *Jatropha curcas* L. am 10. Versuchstag in einem Salzstressversuch. Messdaten wurden mittels 3 Wiederholungen bei der Kontrolle, 60  $\text{mmol NaCl L}^{-1}$  und 120  $\text{mmol NaCl L}^{-1}$  Behandlung erhoben..... 20
- Abbildung 8: Transpirationsraten (in  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; Mittelwert +/- Standardabweichung) im Gaswechsel von *Jatropha curcas* L. am 13. Versuchstag in einem Salzstressversuch.

Messdaten wurden mittels 3 Wiederholungen bei der Kontrolle, 60 mmol NaCl L <sup>-1</sup> und 120 mmol NaCl L <sup>-1</sup> Behandlung erhoben.....	20
Abbildung 9: EC-Wert (in dS m <sup>-1</sup> ; Mittelwerte +/- Standardabweichung) des Bodensubstrats in Bezug zu den Salzmengen, die den 2,5 Liter Pflanzentöpfen über die Salzlösung verabreicht wurden.....	22
Abbildung 10: %Bestandeswasserabgabe (in g H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ; relative Mittelwerte +/- Standardabweichung) von <i>Jatropha curcas</i> L. in Abhängigkeit vom EC-Wert (in dS m <sup>-1</sup> ) des gesättigten Bodensubstrats auf Grundlage der FAO. Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Bestandeswasserabgabe und dem EC-Wert des Bodensubstrates; Beweisführung siehe Anhang.....	24
Abbildung 11: % Blattflächenzuwachs (in cm <sup>2</sup> d <sup>-1</sup> ; Mittelwert +/- Standardabweichung) in Abhängigkeit des EC- Wertes (in dS m <sup>-1</sup> ) des Bodensubstrats bei <i>Jatropha curcas</i> L. auf Grundlage der FAO. Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Blattflächenzuwachs und dem EC-Wert des Bodensubstrates. Beweisführung siehe Anhang .....	25
Abbildung 12: ci ca <sup>-1</sup> Verhältnis (in %; Mittelwerte +/- Standardabweichung) in Abhängigkeit des EC-Wertes (in dS m <sup>-1</sup> ) gemessen bei <i>Jatropha curcas</i> L. in einem Salzstressversuch. Einteilung der Salzempfindlichkeit erfolgte auf Grundlage der FAO. Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem ci ca <sup>-1</sup> Verhältnis und dem EC-Wert des Bodensubstrates; Beweisführung siehe Anhang.....	26

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Natriumchloridgehalt der unterschiedlich konzentrierten Salzlösungen (in g NaCl L <sup>-1</sup> ).....	6
Tabelle 2: Assimilationsraten (in $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), ci ca <sup>-1</sup> Verhältnisse und stomatare Leitfähigkeiten (in $\sigma \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) bei <i>Jatropha curcas</i> L. gemessen im Gaswechsellmessgerät am 10. Versuchstag. Messwerte stellen Mittelwerte; +/- Standardabweichungen dar.....	18
Tabelle 3: Behandlung mit Salzlösung (in mmol NaCl L <sup>-1</sup> ) und die dazugehörigen Mittelwerte der Bestandwasserabgabe (in g H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ), des Blattflächenzuwachses pro markiertem Blatt (in cm <sup>2</sup> d <sup>-1</sup> ), des Natriumgehalt (in mg Na g <sup>-1</sup> Trockenmasse) und des Kaliumgehalt (in mg Ka g <sup>-1</sup> Trockenmasse). Mittelwerte mit gleichem Buchstaben sind nicht signifikant verschieden. P-Werte des Signifikanztestes: *** höchst signifikant;* signifikant.....	21
Tabelle 4: lineare Regression des EC-Wertes (unabhängige Variable) und der Bestandeswasserabgabe, $H_0: \beta_1=0$ ; $H_A: \beta_1 \neq 0$ ; $t_{0,975;5}=2,571$ , verwerfe Nullhypothese da $8,01 > 2,571$ . Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Bestandeswasserabgabe und dem EC-Wert des Bodensubstrates.....	34
Tabelle 5: lineare Regression des EC-Wertes (unabhängige Variable) und des Blattflächenzuwachses (abhängige Variable), $H_0: \beta_1=0$ ; $H_A: \beta_1 \neq 0$ ; $t_{0,975;5}=2,571$ , verwerfe Nullhypothese da $9,86 > 2,571$ . Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Blattflächenzuwachs und dem EC-Wert des Bodensubstrates.....	36
Tabelle 6: lineare Regression des EC-Wertes (unabhängige Variable) und des ci ca <sup>-1</sup> Verhältnisses (abhängige Variable), $H_0: \beta_1=0$ ; $H_A: \beta_1 \neq 0$ ; $t_{0,975;1}=12,706$ , verwerfe Nullhypothese da $16,21 > 12,706$ . Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Blattflächenzuwachs und dem EC-Wert des Bodensubstrates.....	38

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.= Abbildung

a= Grenzwert in  $\text{dS m}^{-1}$

b= Steigung, %Ertragsabnahme pro Einheit  $\text{EC}_e$ -Wert Erhöhung

bzw.= beziehungsweise

d= Tag

e= Dampfdruck in Pascal, temperaturabhängig

E= Sättigungsdampfdruck in Pascal, temperaturabhängig

F= relative Luftfeuchte

g= Gramm

h= Stunde

ha= Hektar

$\text{H}_2\text{O}$ = Wasser

km= Kilometer

kPa= kiloPascal

L= Liter

meter= Meter

ml= Milliliter

mm= Niederschlagsmenge in Millimeter

NaCl= Natriumchlorid

ppm= parts per million

T= Temperatur in Celsius

TM= Trockenmasse

s= Sekunde

Y= Ertrag

y= Jahr

$\text{EC}_e$ = EC Wert des Bodensubstrates

$\sigma$  =Leitfähigkeit

%= Prozent

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

### 1.1.1 Versuchsaufbau

Unter dem Namen „Nationale Mission für Biodiesel,“ wurde durch die indische Regierung ein Pilotprojekt gestartet, bei dem Jatropha-Pflanzen auf circa 4000 km<sup>2</sup> Ödland angebaut werden sollen [1]. In ariden und semiariden Erdregionen sind Salinität und Sodizität häufig auftretende Erscheinungen [2]. Mittlerweile leiden schon circa 6-8% [3,4] der Landoberfläche und circa 30% der bewässerten Ackerflächen unter Salzproblemen [3]. Böden die salzbeeinflusst sind werden in Saline- und Alkali-Böden unterteilt [5]. Durch die Bewässerung der Kulturpflanzen in ariden und semiariden Regionen wird das Problem der Salinität immer ernstzunehmender [5]. Zur Folge hat dies eine sekundäre Versalzung der Böden [6]. Folgende zwei konventionelle Lösungsansätze, um dem Effekt der Salzanreicherung auf bewässerten Ackerflächen entgegenzuwirken, sind gegeben. Zum einen die Auswaschung des Salzes aus der Wurzelzone heraus in tiefere Bodenschichten [7] oder die Verwendung salztolerante Pflanzen auf solchen Böden [8]. Dafür soll es nun eine Lösung in Form des Anbaus von Jatropha-Pflanzen geben. Diese Pflanze soll in der Lage sein, auf normalerweise für die Menschen nicht nutzbaren Böden zu wachsen. Deswegen soll in dieser wissenschaftlichen Arbeit „Untersuchungen zur Salztoleranz von *Jatropha curcas* L.“ herausgefunden werden, wie die Pflanze auf hohe Salzgehalte im Bodensubstrat reagiert. Daraufhin soll die Jatropha-Pflanze dann als salzempfindlich oder salztolerant klassifiziert werden können. Bei dem Versuch wurden Wasserabgaberraten, Blattflächenzuwachs, Transpiration und auch Natrium- und Kaliumakkumulation im Gewebe der Pflanzen untersucht.



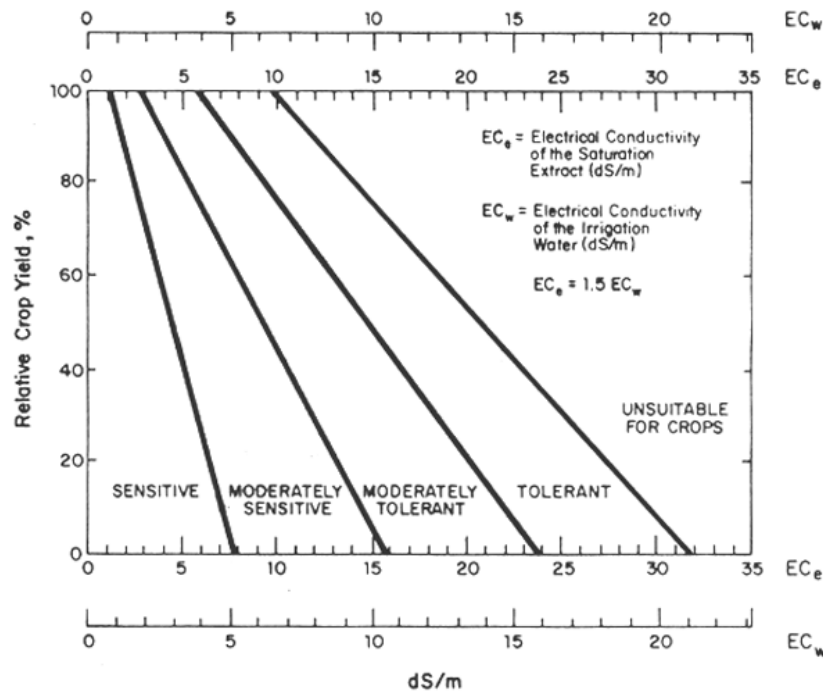


Abbildung 1: Salztoleranz der Kulturpflanzen; FAO [29]; Ertrag (in %) in Abhängigkeit des EC-Wertes des Bodensubstrates (in  $dS m^{-1}$ ).

Die Abb. 1 dient als Grundlage für die Einteilung der Salztoleranz für Kulturpflanzen. Sie wurde für die Ermittlung der Salztoleranz von *Jatropha curcas L.* geringfügig abgewandelt. Erwartet wurde eine hohe Salztoleranz, da Jatrochapflanzen als sehr widerstandsfähig gelten. Das Ergebnis fiel dabei anders aus, als zunächst erwartet wurde.

## 1.2 *Jatropha curcas L.* Verbreitung und Verwendung

### 1.2.1 Verbreitung

Mexico und Mittelamerika stellen den natürlichen Lebensraum von *Jatropha curcas L.* dar [9]. Entgegen der Annahme das *Jatropha curcas L.* in den ariden und semiariden Regionen Südamerikas sowie in den Tropen vorkäme [10], ist sie vorwiegend in Gebieten mit Niederschlagsmengen von mehr als  $944 \text{ mm y}^{-1}$  vorzufinden [11]. *Jatropha curcas L.* ist dennoch in der Lage, sich auf degradierte Böden anzusiedeln und auf trockenen Standorten zu wachsen. Dagegen kann bei einer Niederschlagsmenge von circa 200 [12]-300 [13]  $\text{mm y}^{-1}$  eine Limitierung des Anbaus vorherrschen. Unter dem Gesichtspunkt der

Ertragsmenge, lassen sich diese unterschiedlichen Behauptungen jedoch gut zusammenführen. Bei einer ausreichenden Wasserverfügbarkeit fällt die Ertragshöhe mit 5 Tonnen Trockensamenertrag  $\text{ha}^{-1}$  fast doppelt so hoch aus, wie in trockneren Gebieten, in denen nur 2-3 Tonnen Trockensamenertrag  $\text{ha}^{-1}$  geerntet werden können [14]. Trotzdem, schneidet *Jatropha curcas* L. hinsichtlich der Wassernutzungseffizienz in ariden und semiariden Gebieten gut ab [12].

Um eine gewisse Rentabilität des Ertrages zu erreichen, werden *Jatropha*-Plantagen häufig bewässert. Zum Beispiel wird in Ägypten zum Beispiel eine Fläche von 400 ha mit aufbereitetem Abwasser bewässert [15]. Kenntnisse hinsichtlich der Trockentoleranz und Salztoleranz von *Jatropha curcas* L. sind unabdingbar um einen ausgeklügelten Bewässerungsplan zu erstellen. [15].

### 1.2.2 Verwendung

*Jatropha curcas* L. ist eine Ölfrucht und kann zur Biodieselproduktion verwendet werden. Ihre Vorteile liegen dabei klar auf der Hand. Ihre Früchte sind für den menschlichen Verzehr ungeeignet, weshalb der Anbau für Biodieselproduktion nicht in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion steht [16]. Der Anbau von *Jatropha curcas* L. ist sowohl in ariden als auch in semiariden Gebieten möglich [16]. Sie zeichnet sich durch schnelles Wachstum, Trockentoleranz, hohe Widerstandsfähigkeit und durch einen hohen Ölgehalt in ihren Samen aus [16]. Zudem kann sie mit unterschiedlichsten agro- klimatischen Bedingungen umgehen und ihre Nutzung als Ganzes ist vielseitig möglich [16]. Die Biodieselproduktion aus *Jatropha*-Öl erreichte im Jahr 2004-2005 mit 2,36 Millionen Tonnen bereits eine wenn auch nur leicht höhere Wachstumsrate als die der Bioethanolproduktion [17]. In den nächsten Jahren wird ihr eine noch größere Bedeutung zukommen [17]. Somit wird sich der Anbau von *Jatropha curcas* L. noch weiter ausweiten.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Material

#### 2.1.1 Versuchsaufbau

Der Salzstressversuch fand in einem Gewächshaus statt, in dem während des Versuchs eine durchschnittliche Temperatur von 25,5°C und eine relative Luftfeuchte von durchschnittlich 38,2 % herrschte. Die Daten der Temperatur und der relativen Luftfeuchte wurden von einem im Gewächshaus installierten Datenlogger Tinytag, der Firma Meaco Measurement and Control, über den gesamten Versuchszeitraum viertelstündlich gemessen. Aus den gesammelten Daten wurden dann die Mittelwerte gebildet. Es wurden für den Versuch 2-jährige *Jatropha curcas* L. Pflanzen verwendet. 35 Pflanzen, mit einer Höhe zwischen 40-69 cm wurden dafür ausgesucht. Auf einem 1,5 x 7 Arbeitstisch wurden die Pflanzen mittels Augenmaß nach ihrer gesamten Erscheinung sortiert. Als Kriterien standen hierbei vor allem Pflanzenhöhe, Blattfläche sowie der Stammdurchmesser im Vordergrund. Anschließend an diese Sortierung, wurden die Pflanzen in Blöcke unterteilt. In den so entstandenen fünf Blöcken, fungierte jeweils eine Pflanze als Kontrolle und weitere 6 Pflanzen wurden jeweils einer Behandlung zugeschrieben. Block 1 enthielt somit die größten Pflanzen, und durch die subjektiv vorgenommene Abstufung befanden sich die kleinsten Pflanzen im 5. Block. Nach dem Zufallsprinzip tauschten alle Pflanzen innerhalb eines Blockes jeden Tag einmal ihre Plätze. Dadurch ließen sich Mikroklimaunterschiede wie z.B. Licht ausgleichen. Durch an die Pflanzentöpfe angepasste Abdeckscheiben wurde die Bodenevaporation minimiert. Zwischen dem oberen Rand des Topfes und der Scheibe wurde ein kleiner Spalt, mithilfe von Knetmasse, erzeugt. Dieser sollte anaerobe Milieubedingungen in den Pflanzentöpfen vermeiden. Einmal pro Woche wurde eine Grunddüngung, mit Wuxal Universaldünger des Herstellers MANNA, für die Nährstoffversorgung der Pflanzen durchgeführt. Der Mittelwert des pH-Wert des Bodensubstrates betrug 5,31; Standardabweichung +/- 0,17.

## 2.2 Methoden

### 2.2.1 *Messung des pH-Wertes*

Der pH-Wert wurde nach Beendigung des Versuchs bestimmt. Hierzu wurden aus allen Töpfen Bodenproben mithilfe eines Korkbohrers entnommen und im Gewächshaus luftgetrocknet. Von jeder Bodenprobe wurden 10 g abgewogen und mit 25 ml 0,01molarer Calciumchlorid-Lösung versetzt und anschließend 2 Stunden auf einen Horizontalschüttler mit Kreisbewegungen „GFL 3020“ gestellt. Mit dem Messgerät pH526/pH538 Mikroprozessor pH-mV-Meter und einer Elektrode pH-Einstabmeßkette mit integrierter Temperaturföhlung wurde nach einer 2-Punkt Kalibrierung mit Standardlösungen in der Bodensuspension der pH-Wert gemessen.

### 2.2.2 *Bestimmung des Topfsättigungspunktes*

Der Topfsättigungspunkt wurde bestimmt, in dem die Pflanzentöpfe mit destilliertem Wasser aufgegossen wurden, bis zu dem Moment, an dem das Wasser am Boden der Töpfe auszutreten begann und somit die Wasserhaltekapazität der Töpfe überstieg. Das aus dem Topf ausgetretene Wasser wurde in den Topfuntersetzern aufgefangen und den Pflanzen nochmals zugeführt. Diese Prozedur wurde nach einer Stunde wiederholt. Danach wurden die Töpfe gewogen und die jeweiligen Topfsättigungsgewichte in g auf ihnen notiert.

### 2.2.3 *Herstellung der Salzlösungen*

Zum Ansetzen der Salzlösungen wurde Natriumchlorid verwendet. Es wurden sechs verschieden konzentrierte Salzlösungen hergestellt, indem NaCl mit einer Analysenwaage abgewogen und in einem Messkolben mit destilliertem Wasser aufgefüllt wurde. Die für den Versuchszeitraum erforderliche Menge wurde abgeschätzt und in beschrifteten 10 Liter Kanistern vorbereitet.

Die Konzentrationen der Salzlösungen betragen  $30 \text{ mmol L}^{-1}$ ,  $60 \text{ mmol L}^{-1}$ ,  $120 \text{ mmol L}^{-1}$ ,  $180 \text{ mmol L}^{-1}$ ,  $240 \text{ mmol L}^{-1}$  und  $300 \text{ mmol L}^{-1}$ .

**Tabelle 1: Natriumchloridgehalt der unterschiedlich konzentrierten Salzlösungen (in  $\text{g NaCl L}^{-1}$ )**

$\text{mmol NaCl L}^{-1}$	0	30	60	120	180	240	300
$\text{g NaCl L}^{-1}$	0	1,753	3,501	7,013	10,519	14,026	17,532

#### 2.2.4 Bestimmung der täglichen und stündlichen Wasserabgaberraten

Täglich wurden die Pflanzentöpfe auf einer Plattformwaage gewogen, und die Differenz zum Topfsättigungspunkt ermittelt und notiert. Danach wurde das Gewicht mittels destillierten Wassers wieder auf das Topfsättigungsniveau angehoben. Am 2. und 3. Versuchstag wurden den Pflanzen erstmalig die unterschiedlichen Salzlösungen anstelle des destillierten Wassers zugeführt, ausgenommen hiervon blieben die Kontrollbehandlungen, bei denen weiterhin mit destilliertem Wasser aufgefüllt wurde. Am 4. Tag erfolgte eine Ausgleichsbehandlung, damit jeder Pflanzentopf derselben Behandlung gleich viel Salz bekam. Zur Referenzwertbestimmung wurde jeweils die Pflanze aus einer Behandlung, die in den zwei Tagen zuvor die höchsten Mengen an Salzlösung in g bekommen hatte, gewählt. Den übrigen Pflanzen der Behandlung wurde die fehlende Menge an Salz in g zum Referenzwert zugeführt. Zu diesem Zeitpunkt wurde im Habitus der Pflanzen ein negativer Heliotropismus beobachtet. Auf Grund dieser Beobachtung wurde die weitere Zufuhr von Salzlösung vorerst eingestellt. Weiterhin wurde jeden Tag mit destilliertem Wasser auf den Topfsättigungspunkt der Pflanzen aufgefüllt. Am 8. Versuchstag wurden die Pflanzen wieder mit den Salzlösungen gegossen. Zwei Tage später erfolgte erneut eine Ausgleichsbehandlung. Die letzten zwei Applikationen mit den Salzlösungen fanden am 13. Tag und am 14. Tag des Versuchs statt. Die letzte Ausgleichsbehandlung wurde am 17. Versuchstag durchgeführt. Danach wurde bis zum Versuchsende am 22. Tag ausschließlich mit destilliertem Wasser gegossen. Täglich wurde die Differenz zum Topfsättigungspunkt durch wiegen ermittelt und anschließend die fehlende Menge wieder aufgeossen. Diese Menge stellte die tägliche Wasserabgaberrate in  $\text{g H}_2\text{O Topf}^{-1} \text{ d}^{-1}$  der Pflanzen dar. Die Wasserabgaberraten pro Stunde

wurden berechnet, indem durch die Anzahl der Stunden zwischen den Bewässerungen geteilt wurde. Da aber während der Dunkelphase fast keine Wasserabgabe stattfand, wurde die Anzahl der Stunden zwischen 21 Uhr abends und 6 Uhr morgens nicht mit einbezogen. Die stündlichen Wasserabgaberraten in  $\text{g H}_2\text{O Topf}^{-1} \text{h}^{-1}$  bezogen sich deshalb nur auf die Lichtphase. Es wurden anhand der 5 Wiederholungen pro Behandlung die Mittelwerte und die Standardabweichungen berechnet.

### 2.2.5 Bestimmung des Sättigungsdefizits des Wasserdampfes in der Atmosphäre

Die Daten für die Berechnung des Sättigungsdefizits wurden dem Datenlogger Tinytag, der Firma Meaco Measurement and Control, entnommen. Dieser war über dem Pflanzenbestand angebracht und bestimmte die Lufttemperatur sowie die relative Luftfeuchtigkeit in einem vorgegebenen Zeitintervall von 15 Minuten. Die Messgenauigkeit belief sich bei der Temperatur auf  $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  und bei der relativen Luftfeuchte auf  $\pm 3\%$ . Der Sättigungsdampfdruck konnte näherungsweise mit der Magnusformel errechnet werden.

$$E = 6,107800 \text{ Pa} \times 10^{\frac{17,625T}{243,04+T}}$$

Für die Berechnung des Sättigungsdefizits wurde die relative Luftfeuchtigkeit herangezogen.

Das Sättigungsdefizit ist definiert als die Differenz zwischen Dampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck bei einer bestimmten Temperatur.

$$\Delta e = E - \left( \left( \frac{E}{100} \right) \times f \right)$$

Die durchschnittlichen Temperaturen und die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit, wurden für die Zeitspanne zwischen den einzelnen Bewässerungen ermittelt. Dafür wurde, mithilfe der viertelstündig erhobenen Messwerte, der jeweilige Mittelwert pro Tag gebildet. Die Messwerte zwischen 21 Uhr und 6 Uhr wurden nicht in die Berechnung mit einbezogen. Über diese Mittelwerte wurde das Sättigungsdefizit des Wasserdampfes in der

Luft in kPa zwischen zwei Messungen berechnet und als tägliches Sättigungsdefizit in kPa definiert.

### *2.2.6 Einfluss des Sättigungsdefizits auf die stündliche Wasserabgaberaten der Kontrollbehandlung*

Die stündlichen Wasserabgaberaten wurden mit dem Sättigungsdefizit in Beziehung gesetzt. Hierfür wurden die stündlichen Wasserabgaberaten in  $\text{g H}_2\text{O Topf}^{-1} \text{ h}^{-1}$  der Kontrollbehandlung zu dem täglichen Sättigungsdefizit in Abhängigkeit gesetzt und in einem x/y Diagramm dargestellt (Abb. 3). Die unabhängige Variable war das Sättigungsdefizit in kPa der jeweiligen Tage, die abhängige Variable war die stündliche Wasserabgaberrate in  $\text{g H}_2\text{O Topf}^{-1} \text{ h}^{-1}$  der Kontrollbehandlung. Überprüft wurde, in wie weit das Sättigungsdefizit Einfluss auf die Wasserabgaberaten bei nicht salzgestressten Pflanzen nimmt und ob eine Korrektur der Wasserabgaberaten notwendig ist.

### *2.2.7 Stündliche Wasserabgaberaten korrigiert um das Sättigungsdefizit*

Das Sättigungsdefizit in kPa wurde anhand der obigen Formeln (siehe Abschnitt 2.2.5) für den jeweiligen Tag ausgerechnet. Danach wurden die stündlichen Wasserabgaberaten in  $\text{g H}_2\text{O Topf}^{-1} \text{ h}^{-1}$  für alle Behandlungen durch das jeweilige tägliche Sättigungsdefizit dividiert (Abb. 4). Dies stellt die Korrektur der Wasserabgaberaten um das Sättigungsdefizits des Wasserdampfes in der Atmosphäre dar.

### 2.2.8 Bestimmung der Natrium- und Kaliumgehalte in der Blatttrockenmasse

Nach Versuchsende wurden die Bestandteile der Pflanzen den Kategorien markierte Blätter, Stängel, Stiele, Zuwachs und Restblätter zugeordnet. Die Restblätter wurden auf Natrium- und Kaliumgehalte untersucht. Dazu wurden 2 g der jeweiligen Probe entnommen und für die Zerkleinerung in eine Kugelmühle gegeben. Die 2 g entsprachen circa 10% der Gesamtrestblattmasse. Die zerkleinerten Proben wurden mittels Analysewaage auf 250 mg abgewogen, in kleine Gefäße gefüllt und mit 15 ml Reinstwasser aufgefüllt. Daraufhin kamen die Proben in einen Autoklav, Wolf SANOclav. Die entstandene Suspension wurde danach abfiltriert. An einem Flammen-Photometer PFP7, der Firma Jenway, wurden die Proben auf ihre Natrium- und Kaliumgehalte gemessen. Zuvor wurden mit den Flammenphotometer-Standards Natrium und Kalium aus der Stammlösung 1000 ppm die verdünnten Lösungen 100 ppm, 50 ppm, 25 ppm und 12,5 ppm hergestellt. Da ppm ein relatives Verhältnis darstellt, wurden diese Lösungen benötigt um eine Eichkurve zu erzeugen. Die Proben der Restblatttrockenmasse wurden bei den Salzbehandlungen bis 60 mmol NaCl L<sup>-1</sup> 1:10 verdünnt, bei den höheren Behandlungen wurde 1:20 verdünnt. Die gemessenen Messwerte wurden an die Funktion der Eichkurve angeglichen. Die Menge an Natrium- und Kalium in der Restblatttrockenmasse wurde anhand der folgenden Formel berechnet.

$$\text{mg Na g}^{-1} \text{DrM} = \frac{\text{ppm} \times \text{Verdünnung} \times \text{Extrahiertes Volumen}}{1000 \times \text{Einwaage in g}}$$

### 2.2.9 Gaswechsel

Für die Untersuchungen auf Salzstress, wurde das Gaswechsellmesssystem GFS 3000 Portable Gas Exchange Fluorescence System verwendet, welches von der Heinz Walz GmbH hergestellt wird. Hiermit wurde der Gasaustausch zwischen den Pflanzen und der Atmosphäre gemessen. Aus diesem dynamischen Prozess wurden Momentaufnahmen der Messwerte gewonnen. Visuell und dynamisch ließ sich das mit dem dazugehörigen Computerprogramm darstellen. Gaswechsellmessdaten wurden am 10. und 13. Versuchstag erhoben. Bevor mit den Messungen begonnen werden konnte, musste das Gaswechsellmessgerät mittels eines an einer Teleskopstange befestigten Schlauchs, mit der



Aussenluft verbunden werden. Eine Pumpe zog die Luft in das Gaswechsellmessgerät, die Sogkraft wurde auf  $700 \mu\text{mol s}^{-1}$  eingestellt. Die Lichtsättigung in der Küvette betrug  $1000 \mu\text{mol Quanten m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Es wurde gewartet bis das Gerät warm gelaufen und der  $\text{CO}_2$  Gehalt der Aussenluft im Messgerät stabil war. Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit wurden in der Messküvette konstant auf  $27^\circ\text{C}$  und  $35\%$  gehalten. Auf einer Messfläche von  $4 \text{ cm}^2$  wurden Assimilationsraten in  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $\text{ci ca}^{-1}$  Verhältnisse, stomatare Leitfähigkeit in  $\sigma \text{ H}_2\text{O mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  und Transpirationsraten in  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  an den Pflanzen gemessen. Diese Messung wurde an der Kontrollbehandlung,  $60 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  und  $120 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  mit drei Wiederholungen bei konstanter Blockwahl durchgeführt. Aus den Wiederholungen wurden die Mittelwerte und die Standardabweichungen berechnet. Im Ergebnisteil werden die unterschiedlichen Salzbehandlungen miteinander verglichen. Die Transpirationsraten in  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  wurden berechnet indem, die Transpirationsraten in  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  vom 12. Versuchstag im Gaswechsel gemessen wurden. Aus den Behandlungen wurden von Kontrolle,  $60 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  und  $120 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  die Mittelwerte nach Durchführung von drei Wiederholungen berechnet. Mithilfe der molaren Masse von  $\text{H}_2\text{O}$ , welche circa  $18,02 \text{ g mol}^{-1}$  beträgt und der Aufsummierung der Sekunden eines Tages ließ sich die Transpirationsrate in  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  errechnen.

#### *2.2.10 Bestimmung der Bestandwasserabgabe*

Aus den letzten drei Tagen wurde der Mittelwert der täglichen Wasserabgaberaten in  $\text{g H}_2\text{O Topf}^{-1} \text{ d}^{-1}$  berechnet und durch die Blattfläche in  $\text{m}^2$  des jeweiligen Topfes dividiert. Man erhielt somit die Bestandeswasserabgabe in  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Aus den 5 Wiederholungen pro Behandlung wurde der Mittelwert; +/- Standardabweichung gebildet.

Die letzten drei Tage wurden gewählt, weil bei diesen die Änderung der täglichen Wasserabgaberaten am deutlichsten zu sehen war und sich die Wasserabgaberaten der Behandlungen an den 3 Tagen auf gleichem Niveau innerhalb einer Behandlung befanden.

Die Gesamtblattfläche der einzelnen Pflanzen wurde bei der „Ernte“ im Anschluss an das Versuchsende mit einem Blattflächenmessgerät, Area-Meter-MK 2, bestimmt.

### *2.2.11 Statistik*

Es wurde eine 1-faktorielle Varianzanalyse mit mutiplem Mittelwertvergleich, an den Messdaten der Bestandeswasserabgabe, des Blattflächenzuwachses und den Natrium- und Kaliumgehalten mit dem Statistikprogramm SAS durchgeführt. Dafür wurde ein Datenblatt vorbereitet. In dem ersten Block war die Salzkonzentration aufgeführt, die darauffolgenden Blöcke beinhalteten die dazugehörigen Messwerte. Das Signifikanzniveau betrug 5%, daneben berechnete das Programm die Freiheitsgrade pro Fehler, den mittleren quadratischen Fehler, kritische Werte von t und die Grenzdifferenz. Die Mittelwerte pro Behandlung wurden miteinander verglichen. Überschritt diese absolute Differenz die berechnete Grenzdifferenz war der Vergleich signifikant verschieden.

### *2.2.12 Messung des EC- Wertes*

Am Ende des Versuchs wurden Bodenproben aus jedem Topf entnommen und luftgetrocknet. Mit einer Analysewaage wurden von ihnen 2,5 g abgewogen und im Verhältnis 1:10 in Reinstwasser aufgeschwemmt, nach 30 Minuten auf dem Kreis-Schüttler wurden die Proben in kleine Gefäße abgefüllt. Das Digital Conductivity Meter, ein EC-Meter, der Firma AMBER SCIENCE INC, wurde mit einer Standardlösung  $1413\mu\text{S cm}^{-1}$  geeicht. Von jeder Behandlung wurden die Mittelwerte und die Standardabweichungen berechnet. Die Angaben des EC- Wertes erfolgten in  $\text{dS m}^{-1}$ . Die gegebenen Salzmengen pro Topf und Behandlung wurden mit den gemessenen EC-Werten in Abhängigkeit gesetzt.

### *2.2.13 Blattflächenbestimmung*

Zu Beginn des Versuchs wurden pro Pflanze jeweils zwei Blätter markiert. Sie wurden einzeln mit Millimeterpapier untergelegt und fotografiert. Mit der Computersoftware „Mesurim pro 08“ wurde von den Blattbildern die Fläche bestimmt. Die zweite Messung

der Blattfläche erfolgte am „Erntetermin“. Der ermittelte Flächenzuwachs pro Blatt wurde durch die Anzahl der Versuchstage dividiert.

#### *2.2.14 Bestandeswasserabgabe-und Blattflächenzuwachs in % im Vergleich zum EC-Wert des Bodensubstrates*

Die Mittelwerte der unterschiedlichen Behandlungen sowie deren Standardabweichung wurden von absoluten in relative Größen umgewandelt. Da die Salzmenge pro Topf und Behandlung in Beziehung mit dem EC-Wert des Bodens gesetzt wurde, konnte anschließend auch die relative Bestandeswasserabgabe im Bezug zu ihren absoluten Messwerten in Verbindung zum EC-Wert des Bodens gesetzt werden. In gleicher Vorgehensweise wurde beim Blattflächenzuwachs verfahren.

#### *2.2.15 $ci\ ca^{-1}$ Verhältnis in % zum EC-Wert des Bodensubstrates*

Um einen Bezug zwischen  $ci\ ca^{-1}$  Verhältnis in % und dem EC-Wert herzustellen, wurde am 10. Versuchstag das  $ci\ ca^{-1}$  Verhältnis an den Behandlungen der Kontrolle, 60 mmol NaCl L<sup>-1</sup> und 120 mmol NaCl L<sup>-1</sup> gemessen. Je Behandlung wurden drei Wiederholungen durchgeführt. Berechnet wurden die Mittelwerte und die Standardabweichungen der einzelnen Behandlungen. Diese absoluten Angaben wurden in relative umgewandelt. Aus der den Töpfen bis dahin zugeführten Salzmenge, wurde nun mit Hilfe einer Näherungsfunktion (Abbildung 9) der EC-Wert des Bodensubstrates ermittelt.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Ergebnisse

##### 3.1.1 Wasserabgaberraten

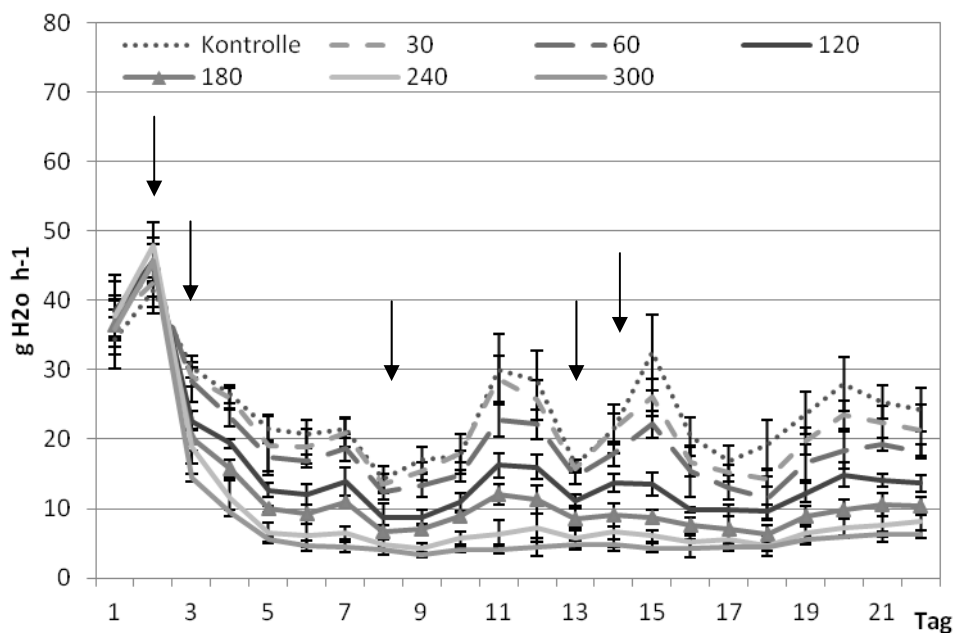


Abbildung 2: Stündliche Wasserabgaberraten während der Lichtphase (in  $\text{g H}_2\text{O Topf}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ; Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichungen) von *Jatropha curcas* L. bei der Applikation von unterschiedlich konzentrierten Salzlösungen (in  $\text{mmol NaCl L}^{-1}$ ). Lösungen verschiedener Salzkonzentration wurden an 5 Tagen (siehe Pfeile) während der Versuchsdauer von 22 Tagen gegeben.

Abbildung 2 stellt die Wasserabgaberraten pro Stunde von *Jatropha curcas* L. während der gesamten Versuchsdauer von 22 Tagen dar. Während der ersten 2 Tage wiesen alle Behandlungen sehr hohe Wasserabgaberraten mit Werten zwischen  $30\text{-}52 \text{ g H}_2\text{O h}^{-1}$  auf, wobei das Maximum mit  $52 \text{ g H}_2\text{O h}^{-1}$  am zweiten Tag erreicht wurde. In den Folgetagen war ein deutlicher Rückgang der Wasserabgaberraten festzustellen. Lediglich am 11. und 15. Tag traten bei der Kontrolle lokale Maxima auf, die aber nicht mehr die hohen Werte der Abgaberraten der ersten 2 Tage erreichten. Nach der ersten Applikation der NaCl-Lösungen am 2. Tag traten bei allen Behandlungen Effekte in den Wasserabgaberraten entsprechend ihrer zugeteilten Salzkonzentration auf.

Diese Effekte wurden am 3. Tag sichtbar, an diesem wies die Kontrolle die höchste Abgaberate an Wasser an ihre Umwelt mit  $30 \text{ g H}_2\text{O h}^{-1}$  auf und die verschiedenen Behandlungen mit Salzlösung lagen in ihren Wasserabgaberraten entsprechend darunter. Die Behandlung mit  $300 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  hatte eine mittlere Abgaberate von  $15 \text{ g H}_2\text{O h}^{-1}$ , was eine Reduktion gegenüber der Kontrollbehandlungen um die Hälfte bedeutete. Die Wasserabgaberraten fielen weiter und erreichten ihr Minimum am 8. Tag. Die Wasserabgaberraten der Pflanzen der Behandlungsreihen mit  $240$  und  $300 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  sanken bereits am 5. Tag unter  $10 \text{ g H}_2\text{O h}^{-1}$  und stiegen während des gesamten verbliebenden Versuchszeitraums nicht mehr über diesen Wert. Die Wasserabgaberraten der anderen Salzbehandlungen lagen entsprechend ihrer Konzentration auf einem Niveau unterhalb der Kontrollwerte und über den Werten der zweithöchsten Salzbehandlungen. Weiter ist darauf hinzuweisen, dass bei diesen Behandlungen bei einem Anstieg der Werte der Kontrollbehandlung auch ähnliche Amplituden - lediglich von niedrigeren Ausgangswerten ausgehend - zu beobachten waren. Die weiteren Salzgaben schienen keinen weiteren Einfluss auf die Wasserabgaberraten zu haben, entweder befanden sie sich schon auf einem niedrigen Niveau oder sie stiegen an.

### 3.1.2 Einfluss des Sättigungsdefizits auf die Wasserabgaberraten

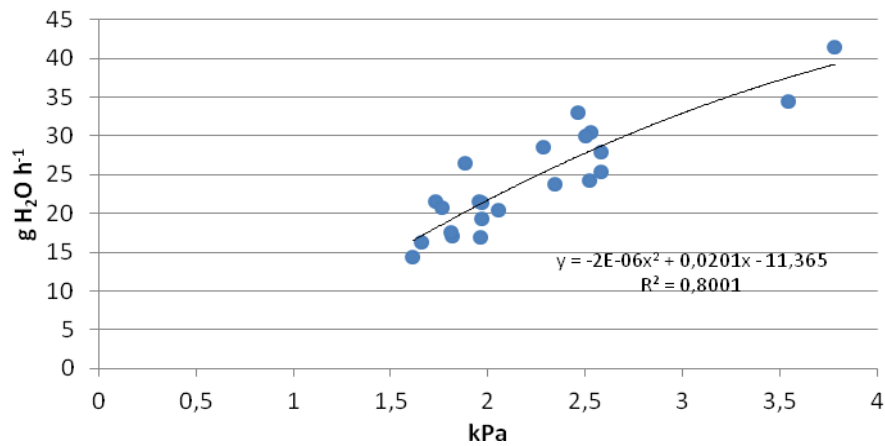


Abbildung 3: Stündliche Wasserabgaberraten von *Jatropha curcas* L. (in g H<sub>2</sub>O Topf<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) in Abhängigkeit zum Sättigungsdefizits (in kPa) des Wasserdampfes in der Atmosphäre.

Das Sättigungsdefizit nahm Einfluss auf die Wasserabgaberraten. Diese stiegen bei Erhöhung des Sättigungsdefizits an. Es wurde eine straff positiv gerichtete Korrelation zwischen der x- und y-Achse festgestellt. Das Sättigungsdefizit stellte dabei die unabhängige Variable dar, während die Wasserabgaberrate als abhängige Variable klassifiziert wurde. Das Bestimmtheitsmaß der Funktion lag bei über 0,8.

### 3.1.3 Wasserverbrauch korrigiert um das Sättigungsdefizit des Wasserdampfes in der Atmosphäre

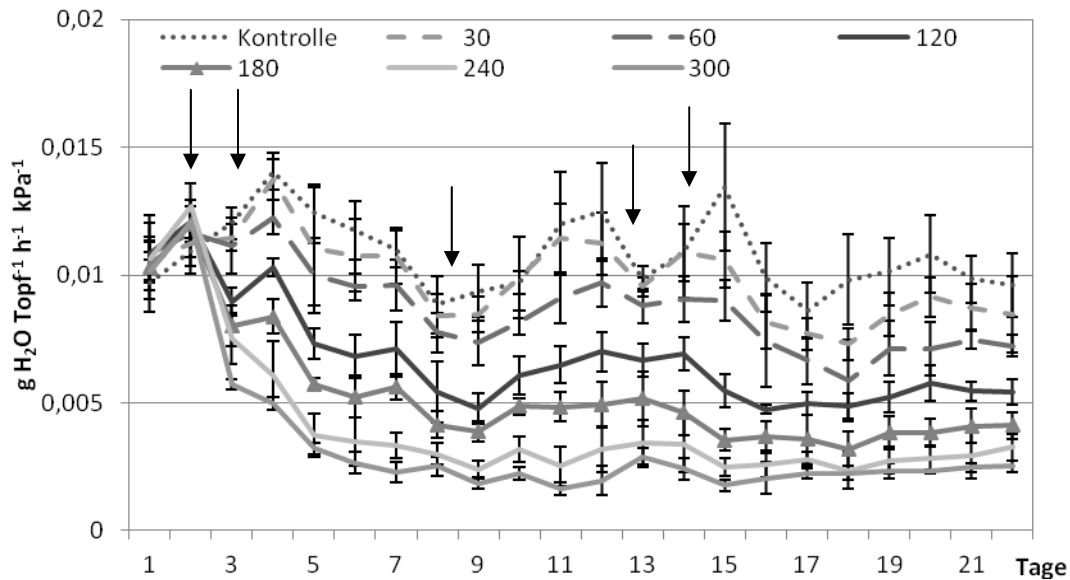


Abbildung 4: Stündliche Wasserabgaberraten von *Jatropha curcas* L. (in  $\text{g H}_2\text{O Topf}^{-1} \text{h}^{-1}$ ; Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung) und Sättigungsdefizit des Wasserdampfes in der Atmosphäre in  $\text{kPa}^{-1}$  in der Lichtphase bei der Zufuhr von unterschiedlichen Salzlösungen in  $\text{mmol L}^{-1}$  an 5 Tagen (siehe Pfeile) bei einer Versuchsdauer von 22 Tagen.

Die Wasserabgaberraten in Abbildung 2 wiesen insbesondere bei der Kontrollbehandlung zwischen den einzelnen Tagen eine hohe Variation auf. Aus diesem Grund erfolgte eine Korrektur um das Sättigungsdefizit des Wasserdampfes in der Atmosphäre. In Abbildung 4 waren die Amplituden des globalen Maximums und der lokalen Maxima der Wasserabgaberraten weniger ausgeprägt.

Nach der Korrektur waren die Wasserabgaberraten der Pflanzen während der ersten zwei Tage in allen Behandlungen sehr ähnlich. Erkennbar wurde, dass sich die Behandlungen nach der ersten Salzapplikation, welche am zweiten Tag erfolgte, am dritten Tag in zwei Gruppen aufspalteten. Salzlösungen bis  $60 \text{ mmol L}^{-1}$  zeigten noch keine Auswirkungen auf die Wasserabgaberraten der Pflanzen, während bei Gabe von Lösungen über  $60 \text{ mmol L}^{-1}$  ein Abfallen der Wasserabgaberraten zu beobachten war. Erst nach der zweiten Gabe von Salzlösung ließen sich auch ersichtliche Veränderungen bei der Salzbehandlung mit  $60 \text{ mmol L}^{-1}$  feststellen. Die  $30 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  Behandlung wies Abgaberraten auf, die denen der Kontrolle ähnelten. Die Pflanzen der  $30 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  Behandlung reagierten erst

nach der 5. Gabe von Salzlösung mit einem Rückgang der Wasserabgaberate. Nach einer Erholungsphase zwischen 3. und 4. Gabe zeigten auch die anderen Behandlungen spätestens nach der 5. Gabe nochmals eine Reduktion in ihren Wasserabgaberraten.

### 3.1.4 Natrium- und Kalium-Anreicherung im Blattgewebe

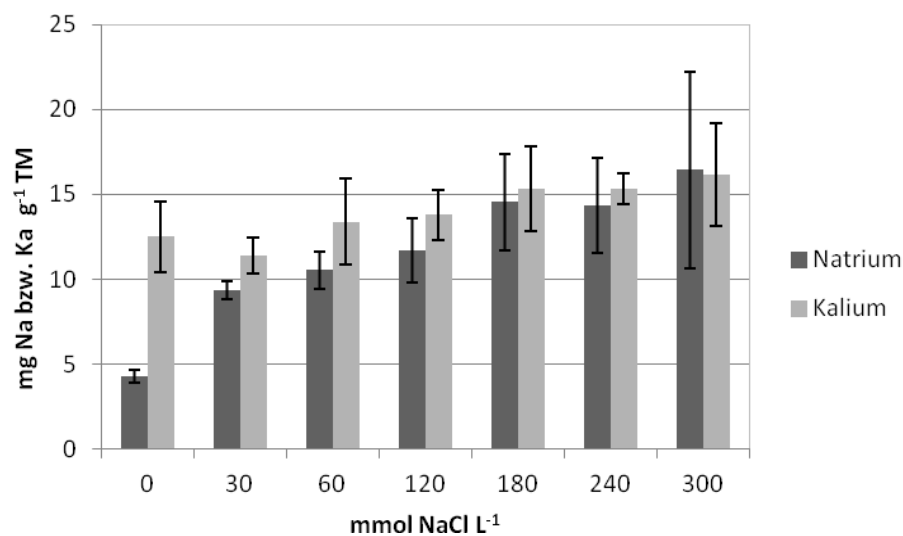


Abbildung 5: Die Natrium- und Kaliumgehalte der Blatttrockenmasse von *Jatropha curcas* L. (in mg Na bzw. Ka g<sup>-1</sup> Trockenmasse; Mittelwert +/- Standardabweichung) der verschiedenen Behandlungen (in mmol NaCl L<sup>-1</sup>) gemessen am Ende des Versuches.

Die Natriumgehalte (Abb. 5) in der Blattmasse der Jatrofapflanzen lagen bei der Kontrollbehandlung unter 5 mg Na pro g<sup>-1</sup> TM. Die Pflanzen der 30 mmol NaCl L<sup>-1</sup> Behandlung wiesen im Vergleich zur Kontrolle einen signifikant höheren Natriumgehalt in ihrer Blatttrockenmasse auf. Bei den mit höher konzentrierten Salzlösungen behandelten Pflanzen, war ein weiterer Anstieg des Natriumgehaltes zu messen. Lediglich zwischen der 180 mmol NaCl L<sup>-1</sup> und der 240 mmol NaCl L<sup>-1</sup> Behandlung sank der Natriumgehalt im Blattgewebe leicht ab. Das Absinken des Natriumgehaltes stellte sich aber als nicht signifikant dar. Der höchste Natriumgehalt in der Blatttrockenmasse wurde bei den Pflanzen gemessen, welche mit der höchstkonzentrierten Salzlösung behandelt wurden. Im Mittel wurden 15 mg Na g<sup>-1</sup> TM, was eine Verdreifachung gegenüber der Messung der Kontrollbehandlung bedeutet, in ihnen gemessen.



Bei den Mittelwerten der Kaliumgehalte konnte kein solch starker Anstieg nachgewiesen werden. Sie lagen in ihrem Mittel zwischen 12 und 16 mg g<sup>-1</sup> TM.

### 3.1.5 Veränderungen im Gaswechsel der Pflanzen aufgrund von osmotischem Stress

**Tabelle 2:** Assimilationsraten (in  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $c_i \text{ ca}^{-1}$  Verhältnisse und stomatäre Leitfähigkeiten (in  $\sigma \text{H}_2\text{O mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) bei *Jatropha curcas* L. gemessen im Gaswechsellmessgerät am 10. Versuchstag. Messwerte stellen Mittelwerte; +/- Standardabweichungen dar.

$\text{mmol L}^{-1}$	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$c_i \text{ ca}^{-1}$	$\sigma \text{H}_2\text{O mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
<b>0</b>	6,96	0,56	72,28
+/- <b>SD</b>	3,29	0,04	43,16
<b>60</b>	4,46	0,50	39,54
+/- <b>SD</b>	1,91	0,04	16,50
<b>120</b>	2,32	0,46	18,76
+/- <b>SD</b>	1,53	0,03	12,28

Die Tabelle 2 zeigt die erhaltenen Messwerte aus dem Gaswechsel. Sowohl die Assimilationsrate in  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , als auch das  $c_i \text{ ca}^{-1}$  Verhältnis und die stomatäre Leitfähigkeit in  $\text{gH}_2\text{O mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  verringerten sich bei den Behandlungen, die höher konzentrierte Salzlösungen bekamen. Die Messung wurde am 10. Versuchstag, nach der dritten Gabe an Salzlösung vorgenommen. Die Standardabweichung fiel bei dem  $c_i \text{ ca}^{-1}$  Verhältnis recht konstant aus, wohingegen sie bei der stomatären Leitfähigkeit, insbesondere bei der Kontrollbehandlung, sehr hoch ausfiel. Bei Erhöhung der Salzkonzentration verringerte sie sich.

### 3.1.6 Bestandeswasserabgabe im Vergleich zur Transpirationsrate im Gaswechsel

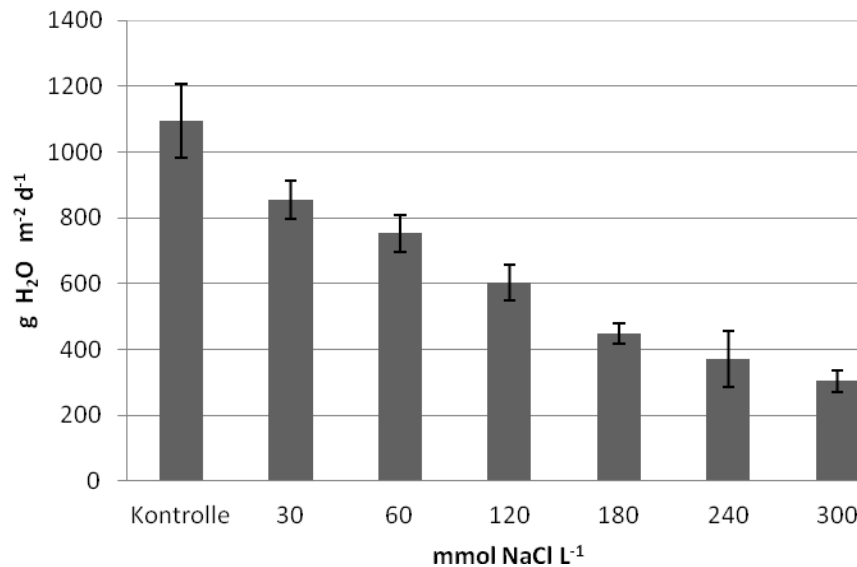


Abbildung 6: Bestandeswasserabgabe (in  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) von *Jatropha curcas L.* resultierend aus der Bewässerung mit unterschiedlichen Konzentrationen an Salzlösungen (in  $\text{mmol NaCl L}^{-1}$ ).

Abbildung 6 zeigt den Einfluss von Salzgaben auf die Bestandeswasserabgabe in  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$  von *Jatropha curcas L.* Diese nahm mit Erhöhung der Konzentration in der Salzapplikation monoton fallend ab. Auffallend ist die geringe Standardabweichung. Die Pflanzen der Kontrolle erreichten Werte zwischen 1000- 1200  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , während bereits bei der Gabe von 30  $\text{mmol NaCl L}^{-1}$  nur noch 800-900  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$  erreicht wurden. Pflanzen, die einer Salzlösung mit 60  $\text{mmol L}^{-1}$  ausgesetzt waren, verringerten ihre Bestandeswasserabgabe nur geringfügig gegenüber der 30  $\text{mmol NaCl L}^{-1}$  Behandlung. Bei 120  $\text{mmol NaCl L}^{-1}$  wurden im Mittel der 5 Wiederholungen 600  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$  transpiriert, was einer Reduktion der Bestandstranspiration um annähernd die Hälfte zum Referenzwert der Kontrolle bedeutete. Bei noch höherer Salzgabe, war nur noch eine schwächer ausgeprägte Verminderung der Bestandeswasserabgabe zu sehen.

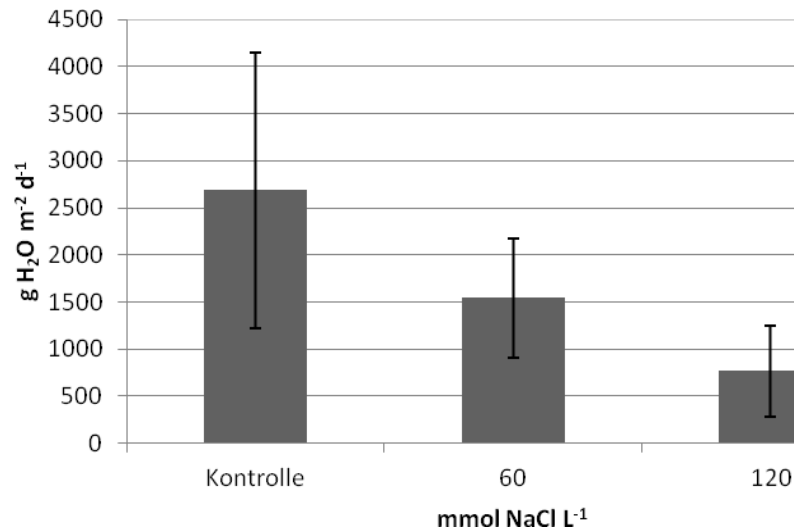


Abbildung 7: Transpirationsraten (in g H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; Mittelwert +/- Standardabweichung) im Gaswechsel von *Jatropha curcas* L. am 10. Versuchstag in einem Salzstressversuch. Messdaten wurden mittels 3 Wiederholungen bei der Kontrolle, 60 mmol NaCl L<sup>-1</sup> und 120 mmol NaCl L<sup>-1</sup> Behandlung erhoben.

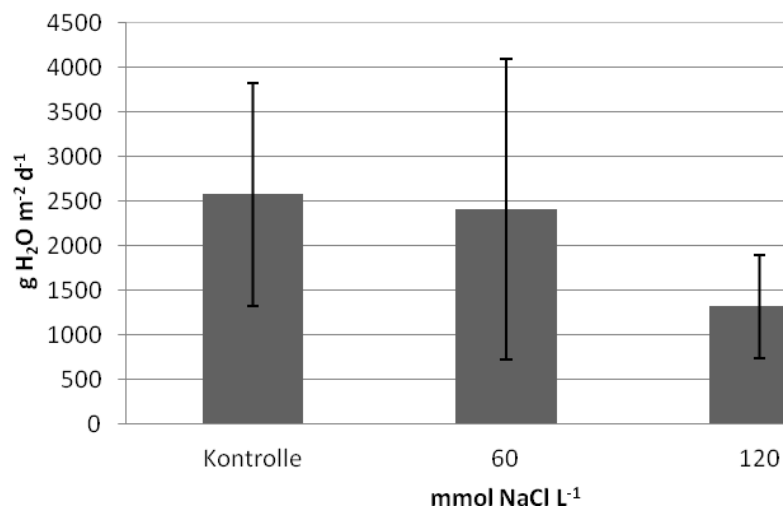


Abbildung 8: Transpirationsraten (in g H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; Mittelwert +/- Standardabweichung) im Gaswechsel von *Jatropha curcas* L. am 13. Versuchstag in einem Salzstressversuch. Messdaten wurden mittels 3 Wiederholungen bei der Kontrolle, 60 mmol NaCl L<sup>-1</sup> und 120 mmol NaCl L<sup>-1</sup> Behandlung erhoben.

Die Transpirationsraten einzelner Blätter wurden mit einem Gaswechsellmessgerät gemessen. Die Pflanzen der Kontrolle erreichten im Mittel einen Transpirationswert von über 2500 g H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Abb. 7). Die Pflanzen der 60 mmol NaCl L<sup>-1</sup> Behandlung wiesen einen Wert von 1500 g H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> auf, was ca. 60% des Messwertes der Kontrolle entspricht und die 120 mmol NaCl L<sup>-1</sup> Behandlung mit 750 g H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> also ca. 30% der

Transpirationsrate der Kontrolle. Auch beim zweiten Messtermin (Abb. 8), der am 13. Versuchstag stattfand, erhielt man ähnliche Werte für die Kontrolle. Auffallend zum Ersttermin waren jedoch die relativ stark abweichenden Ergebnisse der Pflanzen die mit 60/120 mmol NaCl L<sup>-1</sup> gegossen wurden. Die Behandlung mit der 60 mmol L<sup>-1</sup> Salzlösung wies nahezu identische Werte wie die der Kontrolle auf und auch bei der 120 mmol L<sup>-1</sup> Salzlösung stiegen die Transpirationsraten im Vergleich zum ersten Messtermin von 30% auf etwa 50% im Bezug zur Kontrolle an.

An beiden Messterminen wurden pro Behandlung drei Wiederholungen gemessen. Innerhalb dieser war in jeder Behandlung eine enorm hohe Standardabweichung gegeben. Dies ließ eine signifikante Aussage über einen Einfluss der Salzgabe auf die Transpirationsraten im Gaswechsel nicht zu.

### 3.1.7 Statistische Auswertung der Bestandeswasserabgabe, des Blattflächenzuwachs der Na<sup>+</sup> und Ka<sup>+</sup> Gehalte

**Tabelle 3: Behandlung mit Salzlösung (in mmol NaCl L<sup>-1</sup>) und die dazugehörigen Mittelwerte der Bestandswasserabgabe (in g H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), des Blattflächenzuwachses pro markiertem Blatt (in cm<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>), des Natriumgehalt (in mg Na g<sup>-1</sup> Trockenmasse) und des Kaliumgehalt (in mg Ka g<sup>-1</sup> Trockenmasse). Mittelwerte mit gleichem Buchstaben sind nicht signifikant verschieden. P-Werte des Signifikanztestes: \*\*\* höchst signifikant; \* signifikant.**

mmol NaCl L <sup>-1</sup>	0	30	60	120	180	240	300	Bewertung
g H <sub>2</sub> O d <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	1094.66 a	854.39 b	754.01 c	603.30 d	447.65 e	371.03 ef	303.25 f	***
cm <sup>2</sup> d <sup>-1</sup>	5.1724 a	5.1571 a	4.3105 ab	4.0356 abc	3.5732 bc	3.1776 bc	2.5949 c	*
Na <sup>+</sup>	4.280 d	9.352 c	10.532 c	11.694 bc	14.552 ab	14.366 ab	16.439 a	***
Ka <sup>+</sup>	11.395 c	12.506 c	13.395 bc	13.781 abc	15.326 ab	15.322 ab	16.158 a	*

Die Ergebnisse der Signifikanz-Tests zeigten, dass die Bestandeswasserabgabe in  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$  zwischen der  $30 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  Behandlung und der Kontrolle signifikant verschieden waren, während der Blattflächenzuwachs zwischen diesen Behandlungen noch keine signifikanten Unterschiede zeigte. Die Behandlungen mit 240- und 300  $\text{mmol NaCl L}^{-1}$  zeigten in keinem der Tests signifikante Unterschiede. Bei der Bestandeswasserabgabe traten infolge erhöhter Salzkonzentration signifikante Unterschiede bis zu der Salzlösungsgabe von  $180 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  auf. Die Erhöhung der Natriumgehalte (in  $\text{mg Na g}^{-1}$  Trockenmasse) erwies sich als höchst signifikant. Die  $120 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  Salzlösung wies weder bei dem Blattflächenzuwachs noch bei den Kaliumgehalten signifikante Unterschiede zu der Kontrollbehandlung und der  $300 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  Behandlung auf.

### 3.1.8 EC-Wert des Bodensubstrats

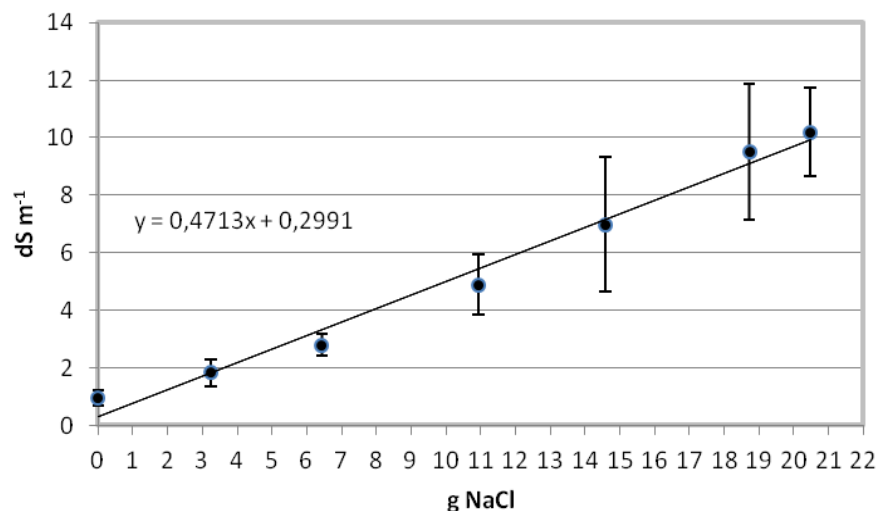


Abbildung 9: EC-Wert (in  $\text{dS m}^{-1}$ ; Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung) des Bodensubstrats in Bezug zu den Salzmengen, die den 2,5 Liter Pflanzentöpfen über die Salzlösung verabreicht wurden.

Die Erhöhung der Salzmenge in g pro Topf erhöht den EC-Wert gemessen in  $\text{dS m}^{-1}$  des Bodensubstrats (Abb. 9). Eine Gabe von  $10,9 \text{ g}$  Natriumchlorid in einem Pflanzentopf hatte einen  $\text{dS m}^{-1}$  von  $4,9$  zur Folge, während bei  $20,5 \text{ g NaCl}$  ein  $\text{dS m}^{-1}$  von ca.  $10,2$  gemessen wurde. Die Verdopplung der Menge an Salz führte zu einer Verdopplung des

EC- Wertes. Die Standardabweichung war bei niedrigen Salzmengen im Topf gering, erhöhte sich aber auffallend ab einer Salzmenge von 10,9 g.

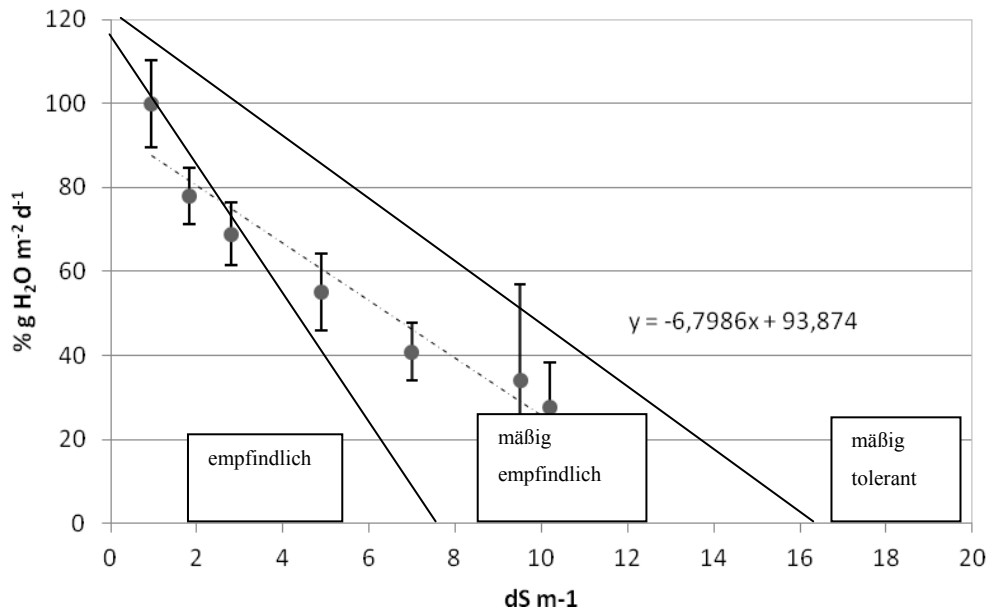
### *3.1.9 Einteilung von Pflanzen nach ihrer Salztoleranz auf Grundlage eines Schemas der FAO*

Die Salztoleranz einer Kulturpflanze kann mithilfe einer linearen Funktion des relativen Ertrags zur Bodensalinität beschrieben werden [29].

$$Y = 100 - b(EC_e - a)$$

In den folgenden drei Abbildungen wurde anstelle der Änderung des Ertrages, die Änderung der Bestandeswasserabgabe, des Blattflächenzuwachses und die Änderung des  $ci\ ca^{-1}$  Verhältnis in Abhängigkeit zum EC-Wert graphisch dargestellt.

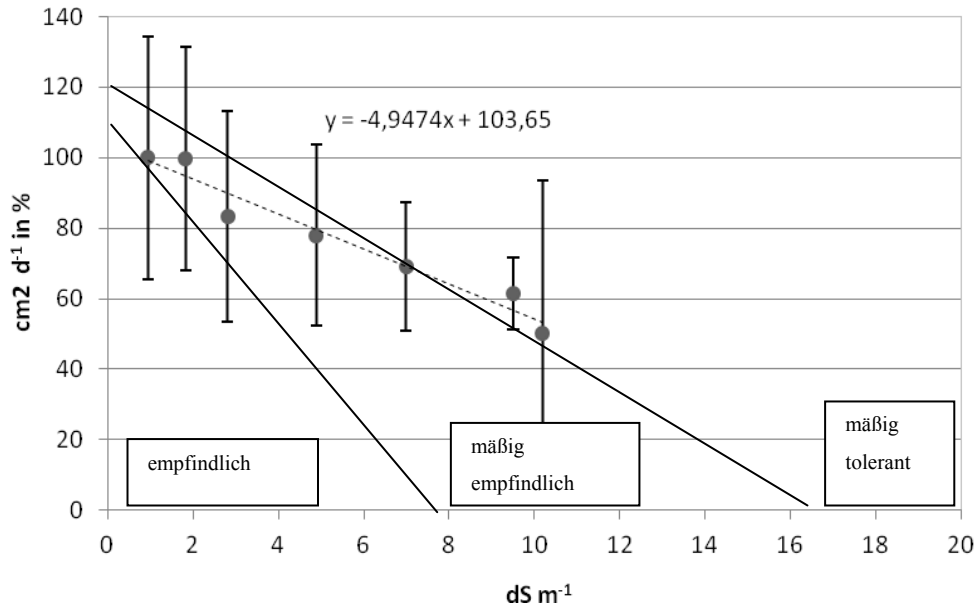
Dabei wurden die Mittelwerte +/- Standardabweichung, je Behandlung in relativen Zahlen angegeben. Der Grenzwert ist der EC-Wert, bei dem eine Abnahme gegenüber dem Höchstwert in 100% erstmalig gegeben ist.



**Abbildung 10:** %Bestandeswasserabgabe (in  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; relative Mittelwerte +/- Standardabweichung) von *Jatropha curcas* L. in Abhängigkeit vom EC-Wert (in  $\text{dS m}^{-1}$ ) des gesättigten Bodensubstrats auf Grundlage der FAO. Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Bestandeswasserabgabe und dem EC-Wert des Bodensubstrates; Beweisführung siehe Anhang.

Die Änderung der relativen Bestandeswasserabgabe in  $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , steht in signifikantem Zusammenhang zum EC-Wert des Bodensubstrats in  $\text{dS m}^{-1}$ . Der Grenzwert in a, bei dem eine Änderung der Bestandeswasserabgabe festzustellen war, lag bei  $0 \text{ dS m}^{-1}$ . Dies deutet auf eine sofortige Abnahme der Bestandeswasserabgabe bei Erhöhung des EC-Wertes im Boden hin. Die negative Steigung betrug 6,8. Die Bestandeswasserabgabe der Jatrofapflanzen wurde von Anfang an vom EC-Wert des Bodens beeinflusst. Die geringe Steigung führte dazu, dass bei weiterer Erhöhung des EC-Wertes die Bestandeswasserabgabe in den mäßig sensiblen Bereich wanderte.

$$\text{Bestandeswasserabgabe \%} = 100 - 6,8 (\text{EC}_e - 0)$$

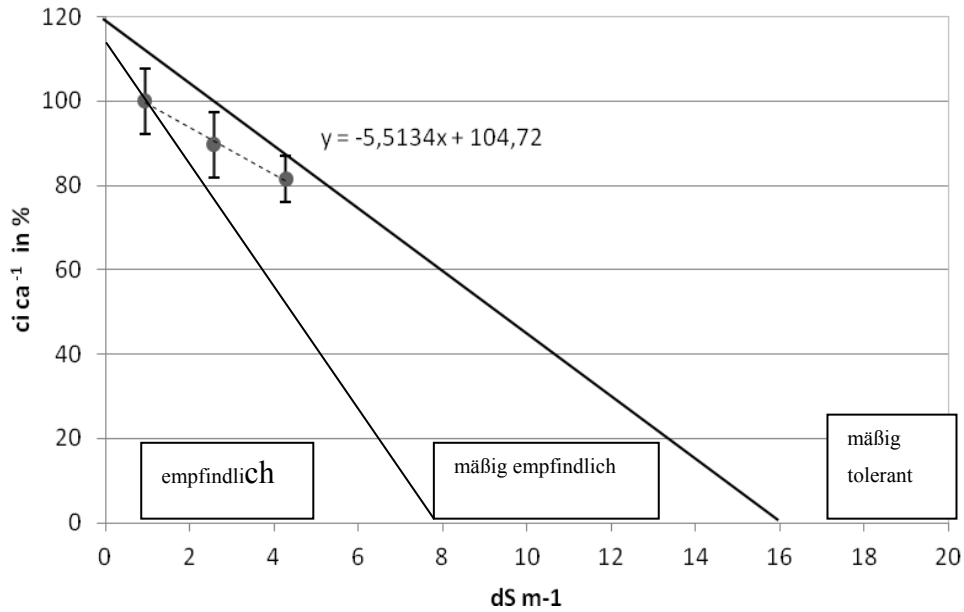


**Abbildung 11:** % Blattflächenzuwachs (in  $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$ ; Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) in Abhängigkeit des EC-Wertes (in  $\text{dS m}^{-1}$ ) des Bodensubstrats bei *Jatropha curcas* L. auf Grundlage der FAO. Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Blattflächenzuwachs und dem EC-Wert des Bodensubstrates. Beweisführung siehe Anhang

Die Änderung des relativen Blattflächenzuwachses in  $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$  steht in signifikantem Zusammenhang zum EC-Wert des Bodensubstrates in  $\text{dS m}^{-1}$ . Der Grenzwert in a, bei dem eine Änderung des Flächenzuwachses festzustellen war, lag bei  $1 \text{ dS m}^{-1}$ , dies deutet auf eine baldige Abnahme des Blattflächenzuwachses bei Erhöhung des EC-Wertes im Boden hin. Die negative Steigung betrug 5,0. Diese Steigung fiel geringer aus als bei der Bestandeswasserabgabe und führte dazu, dass bei sehr hohen EC-Werten des Bodensubstrats die Pflanzen im mäßig toleranten Bereich lagen.

$$\text{Blattflächenzuwachs \%} = 100 - 5,0 (\text{EC}_e - 1)$$





**Abbildung 12:**  $ci\ ca^{-1}$  Verhältnis (in %; Mittelwerte +/- Standardabweichung) in Abhängigkeit des EC-Wertes (in  $dS\ m^{-1}$ ) gemessen bei *Jatropha curcas* L. in einem Salzstressversuch. Einteilung der Salzempfindlichkeit erfolgte auf Grundlage der FAO. Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem  $ci\ ca^{-1}$  Verhältnis und dem EC-Wert des Bodensubstrates; Beweisführung siehe Anhang.

Die Änderung des relativen  $ci\ ca^{-1}$  Verhältnisses steht in signifikantem Zusammenhang zum EC-Wert des Bodensubstrates in  $dS\ m^{-1}$ . Der Grenzwert in a, bei dem eine Änderung des Flächenzuwachses festzustellen war, lag bei  $1\ dS\ m^{-1}$ . Dies deutet auf eine baldige Abnahme des  $ci\ ca^{-1}$  Verhältnisses, bei Erhöhung des EC-Wertes im Boden hin. Die negative Steigung betrug 5,5. Die Reaktion der Pflanze, ist im mäßig sensiblen Bereich einzuordnen.

$$ci\ ca^{-1}\ Verhältnis\ \% = 100 - 5,5 (EC_e - 1)$$

## 3.2 Diskussion

### 3.2.1 Wasserabgaberraten der unterschiedlichen Behandlungen

Bei Erhöhung der Salzkonzentration im Boden, wurde eine Verminderung der Wasserabgaberrate von *Jatropha curcas* L. beobachtet. Dieses lässt sich mit der Tatsache erläutern, dass die erhöhte Konzentration von Salzionen im Bereich der Wurzelzone das Bodenwasserpotential herabsetzt. Dies hat dann zur Folge, dass die Wasserverfügbarkeit der Pflanzen eingeschränkt wird [18]. Die Pflanzen versuchen durch Minimieren ihres Wasserverlustes dem osmotischen Stress entgegen zu wirken [19]. So scheint es, umso höher der osmotische Stress für die Pflanzen ist, desto niedriger sind die Wasserabgaberraten. Die im Bodenwasser befindlichen osmotischen Bestandteile tragen zusätzlich zur Schließung der Spaltöffnungen bei [20]. So bestimmt neben Blattfläche und Anzahl der Stomata, die Öffnungsweite der Spaltöffnungen die Transpirationsmenge. Abschließend kann hier gesagt werden, umso höher die Konzentration von Salz im Bodensubstrat, desto weniger Wasser nehmen die Pflanzen aus diesem auf. Ausschlaggebend dafür ist das Bodenwasserpotenzial, welches dem Wassertransport der Pflanze entgegenwirkt, sowie die Grenzwelle, bei der die Natrium- und Chloridakkumulation toxisch wirkt und zu Nährstoffmangel führt [21].

### 3.2.2 Einfluss des Sättigungsdefizits der Atmosphäre auf die Wasserabgaberraten

Das veränderte Sättigungsdefizit beeinflusst die stomatäre Leitfähigkeit und die Transpiration [22]. Je größer das Sättigungsdefizit, desto höher fällt der atmosphärische Verdunstungsbedarf aus [23]. Die Transpiration nimmt dabei linear zum Sättigungsdefizit zu [23]. Der lineare Anstieg der Wasserabgaberraten bei Erhöhung des Sättigungsdefizits lässt sich anhand der Kontrollbehandlung zeigen. Jedoch ist die Erhöhung der Transpirationsrate üblicherweise begrenzt. Bei einem Sättigungsdefizit von circa 2 kPa stellt sich die Grenze der maximalen Transpirationsrate ein [24,25]. Bei einem Sättigungsdefizit von mehr als 3,5 kPa, fallen die Wasserabgaberraten der Kontrollen von *Jatropha curcas* L. deutlich höher aus als beispielsweise bei einem Sättigungsdefizit von

2,0 kPa. Dieses könnte auf eine schlechte Wassernutzungseffizienz der Pflanzen, bei einer mehr als ausreichenden Bodenfeuchte, hindeuten. Ein Grund könnte dafür sein, dass den Jatropha-Pflanzen genügend Wasser in ihrem ursprünglich natürlichen Habitat zur Verfügung steht, so dass eine Regulierung bei Erhöhung des Sättigungsdefizits nicht nötig ist. In einem Feldversuch ist die geringste Wassernutzungseffizienz von Jatropha-Pflanzen bei einer Wasserapplikation von 125% der potentiellen Evapotranspiration gegeben. Bei einer Wasserapplikation von 100 % der potenziellen Evapotranspiration ist die höchste Wassernutzungseffizienz gegeben. Doch auch bei einer Wasserapplikation von 50 % der potenziellen Evapotranspiration stellt sich eine hohe Wassernutzungseffizienz ein [12]. Um diese Behauptungen belegen zu können, sollten weitere Untersuchungen der Wassernutzungseffizienz und der Salztoleranz mit trockenem Bodensubstrat durchgeführt werden.

Besondere Beachtung sollte auf das Sättigungsdefizit gelegt werden, da dieses einen deutlichen Einfluss auf die Wasserabgaberraten hatte.

### 3.2.3 Natrium- und Kalium-Gehalte im Blattgewebe

Der Natriumgehalt steigt in den Blattproben signifikant an. Es werden Höchstwerte von bis zu  $16 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$  erreicht. Eine sich ebenfalls mit den Natriumgehalten von Jatropha-Pflanzen bei Salzlösungsapplikation befassende wissenschaftliche Arbeit kam auf das Ergebnis, dass bei einer Behandlung mit  $100 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  Natriumgehalte von  $350 \text{ mmol kg}^{-1}$  in der Trockenmasse gemessen wurden [26]. Das entspricht circa  $7 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ , und stellt damit eine Abweichung von rund  $5 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$  gegenüber der in diesem Versuch untersuchten  $120 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  Behandlung dar. Außerdem konnte bei den brasilianischen Untersuchungen mit steigender Konzentration der Natriumchlorid-Lösung ein Absinken der Kaliumgehalte nachgewiesen werden [26]. Im Vergleich zu diesen, sind die eigenen Befunde der Untersuchungen zur Salztoleranz von *Jatropha curcas* L. kontrovers. Hier befinden sich die Kaliumgehalte von *Jatropha curcas* L. auf dem Niveau der Kontrolle, bzw. ist ein leichter Anstieg bei Erhöhung der Salzkonzentration festzustellen. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass die Proben im Flammenphotometer ab einer Behandlung mit  $120 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  von 1:10 auf 1:20 verdünnt wurden. Somit werden sie in einen genaueren Messbereich transferiert, bei dem der Messfehler geringer ausfällt. Doch ist diese Erklärung noch nicht plausibel genug.

Eine weitere Erklärungsmöglichkeit für die hohen Kaliumgehalte bietet sich in der Annahme, dass über einen Zeitraum, der mindestens 3 Tage beansprucht, in welchem keine Gabe von Salzlösung vorgenommen wird, ein Prozess der Regeneration der Kaliumionen in Gang gesetzt wird [10]. Für Ihre Salzaufnahmefähigkeit sind Jatrofapflanzen bekannt [27]. Besondere Bedeutung kommt dem Stamm sowie den Ästen von *Jatropha curcas* L. zu, da diese sukkulent sind. Dadurch kann im Gewebe von *Jatropha curcas* L. mehr Salz als in Gewebe von nichtsukkulenten Pflanzen akkumuliert werden [28]. Vor allem in den sukkulenten Ästen, den Blättern sowie den Wurzeln ließen sich erhöhte Natriumgehalte nachweisen. Je höher die Salzkonzentration im Wasser ausfiel, desto größer war die Natriumakkumulation [28]. Bei den Pflanzen, die über eineinhalb Jahre mit 5-9 dS m<sup>-1</sup> bewässert und dann geerntet wurden, konnten Natriumgehalte von beinahe 30 mg g<sup>-1</sup> TM nachgewiesen werden [28].

#### 3.2.4 Beobachtungen an den Pflanzen nach Salzgabe

Wird die Pflanze mit einer Salzlösung gegossen, reagiert sie daraufhin mit einer Absenkung ihrer Transpirationsrate [15]. Die Jatrofapflanze hält ihre Spaltöffnung bei Salzstress geschlossen. Sie minimiert damit die Transpiration, was anhand der stomatären Leitfähigkeit und der Transpirationsrate im Gaswechsellmessgerät nachgewiesen werden konnte. Im Vergleich der Messdaten aus dem Gaswechsel vom 10. und 13. Versuchstags, lässt sich eine Erhöhung der Transpirationsraten bei den Behandlungen mit 60- und 120 mmol NaCl L<sup>-1</sup> am 13. Versuchstag feststellen. Bei einer ausreichend langen Erholungsphase (hier 5 Tagen), stellt sich die Pflanze auf die veränderten Bedingungen so ein, dass sie wieder erhöhte Transpiration betreibt. Besonders deutlich wird dies, bei der Behandlung mit 60 mmol NaCl L<sup>-1</sup>. Diese Pflanzen wiesen nach 5 Tagen fast gleich hohe Transpirationsraten wie die Kontrollbehandlung auf. Die tatsächlich gemessene Bestandwasserabgabe (Abb. 6) ist niedriger als die theoretisch ermittelten Transpirationsraten im Gaswechsellmessgerät (Abb. 7-8). Ausschlaggebend hierfür, ist der Aspekt, dass die Transpiration der Jatrofapflanzen größten Teils am Tage stattfindet und nicht in der Nacht. Im Gaswechsellmessgerät wurde lediglich die Transpiration am Tage berücksichtigt und dann auf 24 Std. aufsummiert. Steigt die Transpirationsrate an, nimmt dementsprechend auch die Biomasseproduktion zu [15].

Schafft es die Pflanze weiterhin Bodenwasser aufzunehmen und Transpiration zu betreiben, kann von einer Salztoleranz ausgegangen werden [15].

### 3.2.5 Blattwachstum unter Salzstressbedingungen

Bei Pflanzen die unter Salz- oder Wasserstressbedingungen leiden, ist zum einen eine Blattflächenabnahme [29] sowie eine sich frühzeitig einstellende maximale Blattausdehnung nachweisbar [30,31]. Bei dem Befund des Blattflächenzuwachses der Versuchspflanzen, kann allerdings zwischen der Kontrollbehandlung und den Behandlungsstufen bis  $120 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  kein signifikanter Unterschied pro markiertes Blatt festgestellt werden.

Dieser Befund kann mit der Untersuchung untermauert werden, in der bei *Jatropha*-Stecklingen bis zur einer Behandlung mit  $100 \text{ mmol L}^{-1}$  Salzlösung kein auffälliger Unterschied in der Biomasse aufgetreten war [32]. Daneben traten noch weitere Effekte auf, die auf die unterschiedliche Anfangsgröße der Pflanzen zurückzuführen sind. Die Pflanzen aus den Blöcken 4 und 5 waren zu Beginn des Versuchs deutlich kleiner. Dieser Größeneffekt brachte eine unterschiedliche Auswirkung des Salzstresses mit sich. Durch den geringeren Salzstress und besonders durch die verbesserten Lichteigenschaften, holten die kleineren Pflanzen in ihrem Wachstum trotz der Salzgabe bis zu einer Behandlung mit  $180 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  auf. Dies spiegelte sich am Ende des Versuchs darin wieder, dass die Pflanzen sich in Höhe und Anzahl der Blätter den Pflanzen der Blöcke 1,2 und 3 angleichen. Der Effekt der Salzbehandlung auf das Blattflächenwachstum hebt sich somit, innerhalb eines Blockes betrachtet, durch die veränderten Mikroklimabedingungen, gegenseitig auf. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass Pflanzen bei länger andauernde Bewässerung mit sehr hohen Konzentrationen an Natriumchlorid ihr Wachstum verringern.

Dies wurde in einem Versuch, bei dem *Jatropha curcas* L. 163 Tage nach der Aussaat untersucht wurde, nachgewiesen [33]. Die Pflanzen bekamen über diesen Zeitraum hinweg salzhaltiges Wasser mit einem EC-Gehalt von  $3 \text{ dS m}^{-1}$  und es kam zu Reduzierungen von Pflanzenhöhe (9%), Stammdurchmesser (17 %), Blattanzahl (23 %) und Blattfläche (42 %) [33].

### 3.2.6 *EC-Wert des Bodensubstrats*

Die in der Bodenlösung gemessenen EC-Werte wuchsen bei Erhöhung der Salzkonzentration schrittweise an [34]. Diese Erkenntnis zeigte sich auch in dieser Untersuchung. Bei der Kontrollbehandlung erhielten die Töpfe ausschließlich destilliertes Wasser, dennoch wurde in den entnommenen Bodenproben ein EC-Wert von  $1 \text{ dS m}^{-1}$  gemessen. Zurückführen lässt sich dies, aller Wahrscheinlichkeit nach, auf die Gabe von flüssigem Mineraldünger, da in ihm auch Ionen gelöst sind.

### 3.2.7 *Strategien von *Jatropha curcas* L. zu Bewältigung der Stressphase*

Die Anreicherung osmotisch wirksamer Substanzen in den Blättern, wird von der Pflanze hauptsächlich durch die Akkumulation von  $\text{Na}^+$ - und  $\text{Cl}^-$ -Ionen erreicht [26]. Sie erhöhen das Wasserpotential und halten den Wassergehalt der Blätter aufrecht. Im Vergleich zur Kontrolle blieb der Wassergehalt der Blätter unverändert [10]. Dies gilt aber nicht für beliebig hohe  $\text{NaCl}$ -Lösungen. Die Blätter der  $300 \text{ mmol NaCl L}^{-1}$  fühlten sich am 13. Versuchstag schlaff an. Über die Transpiration versuchen die Pflanzen den Wasserverlust zu verringern, was als Vermeidungsstrategie angesehen werden kann [10]. Durch die Schließung der Stomata kommt es zu einer Reduktion der Photosyntheserate.

Resultierend daraus kommt es, durch die Blattflächenzuwachsrate nachgewiesen, zu Wachstumshemmungen [10]. In den Untersuchungen zur Salztoleranz am 10. Versuchstag waren die Transpirationsrate, die stomatäre Leitfähigkeit, die Assimilationsrate und das  $\text{ci}$   $\text{ca}^{-1}$  Verhältnis erniedrigt. Durch die Schließung der Stomata verliert die Pflanze auf der einen Seite weniger Wasser, auf der anderen jedoch, kann kein  $\text{CO}_2$  ins Innere des Blattes transportiert werden.

### 3.2.8 Einordnung von *Jatropha curcas* L. ob diese Pflanze eher salzempfindlich oder eher salztolerant ist

Um *Jatropha curcas* L. nach FAO einordnen zu können [35], muss auf die zwei Punkte Grenzwert und Steigung geachtet werden. Der Grenzwert bei dem sich eine Änderung bei Jatrophapflanzen einstellt, ist sehr niedrig. Bei *Sorghum bicolor* L. liegt dieser Grenzwert z.B. bei  $6,8 \text{ dS m}^{-1}$ , während bei *Jatropha curcas* L. ein Wert von  $0-1 \text{ dS m}^{-1}$  ermittelt wurde. Dadurch zeigt sie frühzeitig empfindliche Reaktionen auf die Erhöhung des EC-Wertes. Die Steigung gibt die Stärke der Änderung an und fällt bei *Jatropha curcas* L. gering aus. Das heißt, je mehr vom Optimum abgewichen wird, desto weniger Auswirkungen hat dies auf die Pflanze.

So ist *Jatropha curcas* L. auch noch auf stark versalzten Böden in der Lage zu überleben. Pflanzen mit einer hohen Steigung hingegen, stellen an solchen Standorten das Wachstum ein. Wie aus Abb. 11 zu entnehmen ist, kann *Jatropha curcas* L., wenn anstelle von 100 % Blattflächenzuwachs nur noch 50 % erwartet werden, dies mit einem EC-Wert von  $10 \text{ dS m}^{-1}$  noch erreichen. Bei der Bestandeswasserabgabe können 50 % noch bei einem EC-Wert über  $6,8 \text{ dS m}^{-1}$  erreicht werden. Bei *Sorghum* liegt hier der Grenzwert, bei dem überhaupt erst eine Reduktion im Ertrag stattfindet. Sie wird jedoch als mäßig tolerant eingestuft, da die Pflanze in ihrem Ertrag eine Negativsteigung von 16 aufweist [35]. Es ist schwer zu sagen, ob *Jatropha* nun mäßig empfindlich oder mäßig tolerant ist. In anderen Untersuchungen wird dahingehend die Aussage getroffen, dass die Sojabohne als mäßig tolerante Kulturpflanze eine ähnliche Salzstressfunktion wie *Jatropha* aufweist [15].

## 4 Schlussfolgerung und Ausblick

In Hinblick auf das Ergebnis, *Jatropha curcas* L. sei eine mäßig empfindliche/tolerante Pflanze was ihre Salztoleranz angeht, sollten die Untersuchungen weiter fortgeführt werden. Es wäre interessant herauszufinden, inwieweit der Ertrag aufgrund von erhöhten Salzgehalten in der Wurzelzone beeinflusst wird. Auch stellt sich die Frage wie man die Salztoleranz von *Jatropha* verbessern kann. Zum Beispiel könnten die Pflänzchen, vor der Umsetzung ins Freie, mit arbuskuläre *Mhykorriza*-Pilzen geimpft, oder direkt mit diesen gezüchtet werden [34].



## 5 Anhang

Tabelle 4: lineare Regression des EC-Wertes (unabhängige Variable) und der Bestandeswasserabgabe,  $H_0: \beta_1=0$ ;  $H_A: \beta_1 \neq 0$ ;  $t_{0,975;5}=2,571$ , verwirfe Nullhypothese da  $8,01 > 2,571$ . Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Bestandeswasserabgabe und dem EC-Wert des Bodensubstrates.

AUSGABE:

ZUSAMMENFASSUNG

Regressions-Statistik	
Multipler	
Korrelationsko	0.96314
effizient	338
Bestimmtheits	0.92764
maß	516
Adjustiertes	
Bestimmtheits	0.91317
maß	419
	7.68769
Standardfehler	71
Beobachtungen	7

ANOVA

	Freiheits	Quadrats	Mittlere	Prüfgr
	grade	ummen	Quadratsum	öße
	(df)	(SS)	me (MS)	(F) F krit
				0.000
		3788.583		64.10 4910
Regression	1	27	3788.58327	38791 4
		295.5034		
Residue	5	33	59.1006867	
		4084.086		
Gesamt	6	7		

	Koeffizienten	Standardfehler	t-Statistik	P-Wert	Untere 95%	Oberere 95%	Untere 95.0%	Oberere 95.0%
					80.08	107.6		107.6
Schnittpunkt	93.8741025	5.36238834	17.5060246	1.1151E-05	96445	58561	80.0896445	58561
					-	-		-
					8.981	4.615	-	4.615
X Variable 1	6.79862802	0.84913966	-8.00648981	0.00049104	41101	84504	8.98141101	84504

**Tabelle 5: lineare Regression des EC-Wertes (unabhängige Variable) und des Blattflächenzuwachses (abhängige Variable),  $H_0: \beta_1=0$ ;  $H_A: \beta_1 \neq 0$ ;  $t_{0,975;5}=2,571$ , verwirfe Nullhypothese da  $9,86 > 2,571$ . Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Blattflächenzuwachs und dem EC-Wert des Bodensubstrates.**

AUSGABE:

ZUSAMMENFASSUNG

Regressions-Statistik	
Multipler	
Korrelationskoeffizient	0.97522
Bestimmtheitsmaß	0.95106
Standardfehler	755
Beobachtungen	7

ANOVA

	Freiheitsgrade (df)	Quadratsummen (SS)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	F krit
					0.000
Regression	1	2006.26494	2006.26494	97.16	1831
Residue	5	103.235479	20.6470958		
Gesamt	6	2109.500			

	Koeffizien	Standardfehler	t-Statistik	P-Wert	Untere 95%	Oberere 95%	Untere 95.0%	Oberere 95.0%
	103.651	3.169505		5.023	95.50	111.7		111.7
Schnittpunkt	761	32	32.7028198	9E-07	6	4	42886	4
	-				-	-		-
	4.94739	0.501894		0.000	6.237	3.657	-	3.657
X Variable 1	976	4	-9.85745165	18312	8	3	56038	3

**Tabelle 6: lineare Regression des EC-Wertes (unabhängige Variable) und des  $ci\ ca^{-1}$  Verhältnisses (abhängige Variable),  $H_0: \beta_1=0$ ;  $H_A: \beta_1 \neq 0$ ;  $t_{0,975;1}=12,706$ , verwerfe Nullhypothese da  $16,21 > 12,706$ . Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Blattflächenzuwachs und dem EC-Wert des Bodensubstrates.**

AUSGABE:

ZUSAMMENFASSUNG

Regressions-Statistik	
Multipler	
Korrelationsko	0.99810
effizient	183
Bestimmtheits	0.99620
maß	727
Adjustiertes	
Bestimmtheits	0.99241
maß	454
	0.80356
Standardfehler	09
Beobachtungen	3

ANOVA

	Freiheits	Quadrats	Mittlere	Prüfgr	
	grade	ummen	Quadratsum	öße	F krit
	(df)	(SS)	me (MS)	(F)	
					0.039
Regression	1	169.603676	169.603676	262.6	2311
		0.645710		62254	5
Residue	1	12	0.64571012		
		170.2493			
Gesamt	2	86			

	Koeffizien	Standardfehler	t-Statistik	P-Wert	Untere 95%	Oberere 95%	Untere 95.0%	Oberere 95.0%
Schnittpunkt	101.733633	0.83864607	121.306993	0.00524789	91.077	112.312	91.077	112.312
	-	-	-	-	-	-	-	-
X Variable 1	4.96374131	0.30627412	-16.2068582	0.03923115	3.230	1595	3.230	1595

## Literaturverzeichnis

- [1] S.K. Singh (2007) Global agriculture information network (GAIN), Report IN7047, India Biofuels Annual, 5–12.
- [2] K.V. Madhava Rao, A.S. Raghavendra, K. Janardhan Reddy (Eds.) (2006) Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants, Springer, 41-99.
- [3] R. Munns, M. Tester (2008) Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review Plant Biology 59, 651-681.
- [4] I. Szabolcs (1979) Review of research on salt affected soils. Natural Resource Research, IS, UNESCO, Paris.
- [5] G. Singh (2009) Salinity-related desertification and management strategies: Indian experience. Land Degrad. Develop. 20, 367–385.
- [6] M.G. Pitman, A. Läuchli (2002) Global impact of salinity and agricultural ecosystems: Salinity, Environment–Plants–Molecules. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 3–20.
- [7] W.J. Bond (1998) Effluent irrigation-an environmental challenge for soil science. Aust. J. Soil Res. 36, 543–555.
- [8] K.K. Tanji, N.C. Kielen (2002) Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas, FAO irrigation and drainage paper n. 61.
- [9] J. Heller (1996) Physic nut, *Jatropha curcas* (L.), promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 1. Gatersleben, Germany: Institute of Plant Genetic and Crop. Plant Research/Rome, Italy, International Plant Genetic Resource Institute.
- [10] E.N. Silva, R.V. Ribeiro, S.L. Ferreira-Silva, R.A. Viégas, J.A.G. Silveira (2010) Comparative effects of salinity and water stress on photosynthesis, water relations and growth of *Jatropha curcas* plants. J. Arid Environ. 74, 1130-1137.
- [11] W.H. Maes, A. Trabucco, W.M.J. Achten, B. Muys (2009) Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L. Biomass and Bioenergy 33, 1481–1485.

- [12] A.A.A. Kheira, N.M.M. Atta (2009) Response of *Jatropha curcas* L. to water deficit: yield, water use efficiency and oilseed characteristics, biomass and bioenergy 33, 1481–1485.
- [13] ICRAF (International Centre for Research in AgroForestry) (2008) A tree species reference and selection guide – *Jatropha curcas*.
- [14] G. Francis, R. Edinger, K. Becker (2005) A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations. Nat. Resour. Forum 29, 12–24.
- [15] H. Fujimaki, N. Kikuchi (2010) Drought and salinity tolerances of young *Jatropha*. Int. Agrophysics 24, 121-127.
- [16] B.N. Divakara, H.D. Upadhyaya, S.P. Wani, C.L. Laxmipathi Gowda (2010) Biology and genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: A review. Applied Energy 87, 732–742.
- [17] OECD-FAO (2008) Agricultural outlook 2008–2017, 23.
- [18] J. Lloyd, P.E. Kriedmann, D. Aspinnall (1989) Comparative sensitivity of ‘Prior Lisbon’ lemon and ‘Valencia’ orange trees to foliar sodium and chloride concentrations. Plant Cell Environ. 12, 529-540.
- [19] H.W. Koyro (2006) Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of the potential cash crop halophyte *Plantago coronopus* (L.). Environ. Exp. Bot. 56, 136–146.
- [20] R. Munns (2002) Comparative physiology of salt and water stress. Plant Cell Environ. 25, 239–250.
- [21] P. Neumann (1997) Salinity resistance and plant growth revisited. Plant Cell Environ. 20, 1193–1198.
- [22] E.G. Bobich, G. A. Barron-Gafford, K.G. Rascher, R. Murthy (2010) Effects of drought and changes in vapour pressure deficit on water relations of *Populus deltoides* growing in ambient and elevated CO<sub>2</sub>. Tree Physiology 30, 866–875.
- [23] T.R. Sinclair, J.M. Bennett, Water, in: T.R. Sinclair, F.P. Gardner (Eds.) (1998) Principles of Ecology in Plant Production, CAB International. 103–120.



- [24] J. Comstock, J. Ehrlinger (1993) Stomatal response to humidity in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), implications for maximum transpiration rate, water-use efficiency and productivity. *Aust. J. Plant Physiol.* 20, 669–691.
- [25] N.C. Turner, E.D. Schulze, T. Gollan (1984) The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content, I. Species comparisons at high soil water contents. *Oecologia* 63, 338–342.
- [26] E.N. Silva, J.A.G. Silveira, C.R.F. Rodrigues, C.S. Lima, R.A. Viégas (2009) Contribuição de solutos orgânicos e inorgânicos no ajustamento osmótico de pinhão-mansô submetido à salinidade, *Pesq. agropec. bras.*, Brasília 44 n.5, 437-445.
- [27] E.N. Silva, J.A.G. Silveira, C.R.F. Rodrigues, A.T.B. Dutra, R.M. Aragão (2009) Ion uptake and growth of physic nut under different salinity levels. *Rev. Ciên. Agron.* 40, 25–32.
- [28] J.C. Dagar, O.S. Tomar, Y. Kumar, H. Bhagwan, R.K. Yadav, N.K. Tyagi (2006) Performance of some under-explored crops under saline irrigation in a semiarid climate in northwest India, *Land Degrad. Develop.* 17, 285-299.
- [29] P. Rodríguez, A. Torrecillas, M.A. Morales, M.F. Ortuño, M.J. Sánchez-Blanco, Effects of NaCl salinity and water stress on growth and leaf water relations of *Asteriscus maritimus* plants. *Environ. Exp. Bot.* 53, 113–123.
- [30] K. Matsuda, A. Riazi (1981) Stress-induced osmotic adjustment in growing regions of barley leaves. *Plant Physiol.* 68, 571–576.
- [31] J.J. Alarcón, M.J. Sánchez-Blanco, M.C. Bolarín, M.C., A. Torrecillas (1993) Water relations and osmotic adjustment in *Lycopersicon esculentum* and *L. pennellii* during short-term salt exposure and recovery. *Physiol. Plant.* 89, 441–447.
- [32] S. Gao, C. Ouyang, S. Wang, Y. Xu, L. Tang, F. Chen (2009) Effects of salt stress on growth, antioxidant enzyme, and phenylalanine ammonia-lyase activities in *Jatropha curcas* L. seedlings, *Plant Soil* 54, 374-381.
- [33] A.R. Nery, L.N. Rodrigues, M.B.R. Silva, P.D. Fernandes, L.H.G. Chaves, J.D. Neto, H.R. Gheyi, Crescimento do pinhão-mansô irrigado com águas Salinas em ambiente protegido, Growth of *Jatropha* irrigated with saline water in greenhouse, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.* 13 n.5 (2009) 551–558.

- [34] A. Kumar, S. Sharma, S. Mishra (2010) Influence of Arbuscular Mycorrhizal (AM) Fungi and Salinity on Seedling Growth, Solute Accumulation, and Mycorrhizal Dependency of *Jatropha curcas* L. J Plant Growth Reg. 29, 297–306.
- [35] <http://www.fao.org/DOCREP/005/Y4263E/y4263e0e.htm#TopOfPage>