

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Landwirtschaftliche Fakultät

BACHELORARBEIT

im Rahmen des Bachelorstudienganges

Agrarwissenschaften

Zur Erlangung des Grades

„Bachelor of Science“

Potenzial von Halophyten für stoffliche und energetische Nutzung am Beispiel von *Salicornia*

Vorgelegt von:

Hannah Fischer
2632876

Vorgelegt am:
29.9.2016

1. Prüfender: Herr Dr. rer. hort. Kraska
2. Prüfende: Frau Dr. rer. nat. Bornemann

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Bonn, 29.9.2016

Unterschrift der/des Studierenden

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Einleitung	1
2 Saline Agriculture	3
3 Halophytische Anpassungsmechanismen	4
3.1 Schadwirkung durch Salzstress	5
3.2 Anpassungsmechanismen von Halophyten.....	6
3.3 Eigenschaften von Halophyten für den kommerziellen Anbau	9
4 <i>Salicornia</i>	11
4.1 Botanische Grundlagen.....	11
4.2 Anbaumethoden und -bedingungen	12
4.2.1 Kultivierung auf Sandboden	15
4.2.2 Hydroponik.....	16
5 Nutzungsmöglichkeiten	17
5.1 Nahrungsmittel.....	17
5.2 Ölsaat	18
5.3 Futtermittel	19
5.4 Biokraftstoff	21
5.5 Phytoremediation und Biofilter.....	24
5.6 Salz-recycling in „Bioregenerativen Life Support Systems“ (BLSS)	28
6 Abschlussbetrachtung.....	31
Literaturverzeichnis	34

Abkürzungsverzeichnis

Aireg – Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V.

BLSS – Bioregenerative Life Support System

C.R.O.P.[®] – Combined Regenerative Organic-food Production

Cu – Kupfer

Fe – Eisen

HEFA – Hydrotreated Esters and Fatty Acids

ISEAS – Integrated Seawater Energy Agricultural System

Mn – Mangan

NaCl – Natriumchlorid, Kochsalz

ROS – Reactive Oxygen Species, reaktive Sauerstoffspezies

TDS – Total Dissolved Solids

TM – Trockenmasse

WUE – Water Use Efficiency, Wassernutzungseffizienz

Zn – Zink

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einfluss von NaCl auf salzsensitive Glycophyten und salztolerante Halophyten (Gorham 1996, S.32).....	4
Abbildung 2: Anpassung an NaCl, Strategien, Auswirkung und Mechanismen der Pflanze....	9
Abbildung 3: Blütenstand von <i>Salicornia bigelovii</i> (D) und <i>Salicornia perennans</i> (E) (Kadereit et al. 2007, S.1145).....	11
Abbildung 4: Salicorniapflanzen; links nach der Behandlung von wöchentlich 25 ml Salzwasser; rechts: ohne zusätzliches Salzwasser.....	12
Abbildung 5: Einfluss von NaCl auf das Wachstum von <i>Salicornia</i> auf Versuchsgut der Universität Bonn, Klein Altendorf.....	13
Abbildung 6: Überstaubewässerung von <i>Salicornia</i> mit Abwasser aus Aquakulturen (Ventura und Sagi 2013, S.149).....	14
Abbildung 7: <i>Salicornia</i> auf Sandboden mit Tröpfchenbewässerung (Ventura und Sagi 2013, S.149).....	15
Abbildung 8: schwimmende Styroporgefäße auf Wasseroberfläche im hydroponischen Anbau (Ventura und Sagi 2013, S.149).....	16
Abbildung 9: Produktivität von konventionellen Ölsaaten und <i>Salicornia bigelovii</i> (Panta et al. 2014, S.77).....	18
Abbildung 10: Konzept der „Integrated Seawater Farms“ (Sustainable Bioenergy Research Consortium (SBRC) 2014).....	23
Abbildung 11: Na ⁺ -Gehalte in Spross und Wurzel von <i>Salicornia europaea</i> nach 21 Tagen Behandlung mit verschiedenen NaCl-Konzentrationen (Lv et al. 2012, S.49).....	26
Abbildung 12: Produktionsschema für die Inklusion von <i>Salicornia</i> in einem BLSS (verändert nach: Balhokin et al. 2010, S.774).....	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: verschiedene Arten von <i>Salicornia</i> und ihre geographische Verteilung (Patel 2016, S.2).....	11
Tabelle 2: verschiedene Arten von <i>Salicornia</i> und deren optimale NaCl-Konzentration für maximalen Wachstum (in Anlehnung an: Singh et al. 2014, S.17).....	14
Tabelle 3: Ölzusammensetzung von <i>Salicornia bigelovii</i> und Distelöl (Anwar et al. 2002, S.4211).....	19

1 Einleitung

Im Laufe der letzten Jahre sieht sich die Landwirtschaft vermehrt mit der Problematik der zunehmenden Bodenversalzung und schwindenden Frischwasserquellen konfrontiert.

Aufgrund von natürlichen Ursachen wie salzhaltigem Grund- oder Meereswasser oder hohen Verdunstungsraten in ariden und semiariden Klimata, aber auch durch anthropogene Einflüsse wie Einträge aus der Landwirtschaft und der Industrie oder zu intensive Bewässerung verlieren wir weltweit immer mehr Anbau- und Ackerflächen für unsere Kulturpflanzen. (Cunningham et al. 1995, S.393)

Während somit die globalen Anbauflächen und Frischwasserressourcen stetig vermindert werden, wächst die zu ernährende Weltbevölkerung und damit auch der Druck auf die moderne Landwirtschaft mit ihren kommerziellen Nutzpflanzen kontinuierlich.

Die Welternährung ist dabei abhängig von wenigen salzsensitiven Kulturpflanzen. So decken nur vier Kulturen (Reis, Mais, Weizen und Soja) 80% der weltweit konsumierten Kalorien. (Hendricks et al. 2011, S.3) Diese Abhängigkeit von extrem wenigen Pflanzen, die in ihren Ansprüchen ähnlich und auf das Vorhandensein von sauberen und salzfreien Böden und Wasser angewiesen sind, macht die moderne Landwirtschaft zunehmend angreifbar und könnte im Ernstfall zu ernstzunehmenden Nahrungskrisen führen.

Folglich ist die Entwicklung alternativer Methoden, die es der Menschheit ermöglicht, salzkontaminierte Böden zu reinigen oder nutzbar zu machen, unausweichlich.

97% des Wassers weltweit ist Meerwasser und 20% der Erdoberfläche ist Wüste. (Reals 2015, S.20) Mit einer Methode, diese ungenutzten Ressourcen für den landwirtschaftlichen Anbau unserer Kulturpflanzen nutzbar zu machen, würden sich uns ungefähr 130 Millionen Hektar neu gewonnene Ackerflächen erschließen. (Glenn et al. 1998, S.77)

Aus dieser Problematik entwickelte sich ein alternativer Zweig zur konventionellen Landwirtschaft: die *saline agriculture*.

Diese setzt sich zum Ziel, durch den Einsatz von salztoleranten Pflanzen nicht nur neue Anbauflächen zu erschließen, da somit der Anbau von Kulturpflanzen auf salzbelasteten Böden ermöglicht wird, sondern auch große Mengen an Frischwasser einzusparen, indem die Pflanzen aufgrund ihrer Salztoleranz mit Brack- oder Meerwasser bewässert werden können. (Glenn et al. 1998, S.77)

Als ein vielversprechendes Beispiel lässt sich hier die Pflanze *Salicornia* anführen.

Durch ihre Fähigkeit, hohe Salzkonzentrationen von bis zu 100g NaCl/L zu tolerieren und insbesondere aufgrund ihrer vielseitigen und weitreichenden Nutzungsmöglichkeiten, steht *Salicornia* schon seit einiger Zeit im Fokus der Forschung. (Glenn et al. 1998, S.79)

So lässt sich die Biomasse nicht nur als Nahrungs- und Futtermittel verwenden, sondern auch als Biofilter zur Aufreinigung von Abwässern aus Aquakulturen oder zur Rehabilitierung von salzhaltigen Böden können die Pflanzen genutzt werden, da sie in der Lage sind, große Mengen an Salz (NaCl) in ihrem Spross zu akkumulieren.

Insbesondere für die Herstellung von Biokraftstoffen gewinnt *Salicornia* immer mehr an Bedeutung und bietet somit eine vielversprechende Alternative zu fossilen Brennstoffen, aber auch zu anderen nachwachsenden Rohstoffen, die aufgrund ihrer Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion immer mehr in die Kritik geraten. (Swingle et al. 1996, S.139; Manousaki und Kalogerakis 2011, S.657; Reals 2015, S.20)

Denn im Gegensatz zu Mais oder Raps können die salzbelasteten Anbauflächen, auf denen *Salicornia* angepflanzt wird, nicht zum Anbau anderer konventioneller Nutzpflanzen genutzt werden und auch aufgrund der Doppelnutzung von Biomasse und Samen steht *Salicornia* in keinerlei Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion.

Im Rahmen meiner Arbeit soll erörtert werden, welche Mechanismen Halophyten dazu befähigen, unter extremen Bedingungen ihre Produktivität aufrecht zu erhalten.

Anhand der verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten soll dann im Folgenden gezeigt werden, in welchen Bereichen Halophyten wie *Salicornia* eingesetzt werden können.

Zusammenfassend soll die Frage geklärt werden, inwieweit Anbau und Nutzung von *Salicornia* bereits Teil der praktischen Realität sind und welche Produkte schon auf dem Markt verfügbar sind. Es gilt zu klären, ob diese Produkte tatsächlich eine effiziente und kostengünstige Alternative zu anderen konventionellen Nutzpflanzen und deren Produkten bieten und ob die Voraussetzungen für den kommerziellen Anbau und eine Durchsetzung auf dem Weltmarkt erfüllt sind.

2 Saline Agriculture

Fast ausschließlich alle Nutz- und Futterpflanzen, die in der modernen Landwirtschaft angebaut werden, gehören zu den salzsensitiven Pflanzen (Glycophyten), die nur eine sehr geringe Salzkonzentration in ihrer Wurzelzone tolerieren können. Wird diese Salzkonzentration überschritten, zeigt die Pflanze ein reduziertes Wachstum und Ertragsminderungen oder stirbt sogar vollkommen ab. So zeigen die meisten Glycophyten bereits bei einer Salzkonzentration von 3,9 g/L (50mM/L) ein vermindertes Wachstum und andere Stresssymptome. (Christie 1987; Gorham 1996, S.32) Die konventionelle Landwirtschaft ist somit vollkommen abhängig von Frischwasserressourcen sowie fruchtbaren und entsalzten Böden, die jedoch durch zunehmende Industrialisierung und Urbanisierung immer weiter schwinden. (Panta et al. 2014, S.71-72)

Als Alternative wird deshalb vermehrt an salztoleranten Arten (Halophyten) für den kommerziellen Anbau und deren Nutzung geforscht. Die sogenannte *saline agriculture* führt somit nicht nur zur Erschließung neuer Anbauflächen, die ansonsten nicht für landwirtschaftliche Zwecke genutzt werden können, sondern insbesondere in ariden und semiariden Klimata zur Einsparung von wertvollem Frischwasser, da die meisten Halophyten mit Meer- oder Brackwasser aus verschiedensten Quellen bewässert werden können. (Choukr-Allah 1996, S.4-5; Singh et al. 2014, S.2)

Aufgrund der vielen verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten der Halophyten leisten diese somit nicht nur einen Beitrag zur Welternährung, sondern auch zur Revegetation und Remediation von verunreinigten Flächen (Huesemann et al. 2003), der Gewinnung von Biokraftstoffen (Reals 2015, S.20), als Bioindikator für Schwermetallbelastungen (Smilie 2015, S.76) und als Futtermittel in der Tiermast (Swingle et al. 1996, S.139) ohne Waldrodungen oder aufwändige Reinigungsmaßnahmen von salzbelasteten Flächen. (Glenn et al. 1998, S.77) Die *saline agriculture* verfolgt hierbei zwei verschiedene Ansätze: zum einen die Erzeugung von Salztoleranz in Glycophyten mittels Züchtung und Gentechnik und zum anderen die Domestizierung von Halophyten, die bereits eine natürliche Salztoleranz aufweisen und teilweise durch NaCl sogar in ihrem Wachstum stimuliert werden.(siehe Abbildung 1) (Glenn et al. 1998, S.77; Katschnig et al. 2013, S.35) Salz ist somit weniger eine Bedrohung für landwirtschaftliche Zwecke, sondern vielmehr eine Ressource, die von den Pflanzen genutzt werden kann. (Singh et al. 2014, S.2)

Salztoleranz in Pflanzen ist jedoch sowohl physiologisch als auch genetisch eine hochkomplexe Eigenschaft, die sich nicht nur auf ein Gen zurückführen lässt, sondern vielmehr auf ein molekulares Netzwerk, das verantwortlich ist für Stresswahrnehmung,

Signalübertragung und schließlich Expression bestimmter Gene und Metaboliten. (Türkan und Demiral 2009, S.4-5)

Aus diesem Grund konnten bislang sowohl mit Selektionszüchtung als auch mithilfe von Gentechnik noch keine signifikanten Erfolge bei der Züchtung von salztoleranten Glycophyten erzielt werden. (Flowers und Yeo 1995; Panta et al. 2014, S.73) Die höchste natürliche Salztoleranz, die von Glycophyten erreicht wird, ist die der Dattelpalme mit einem Wert von 10g NaCl/L (128mM/L), was weniger als 15% des Salzgehaltes von Meerwasser entspricht. (Glenn et al. 1998, S. 77) Halophyten dagegen erreichen optimale Wachstumsbedingungen bei einem Salzgehalt von 7,8-15,6 g/L (100-200mM/L). Eine Konzentration, bei der die meisten Glycophyten nicht mehr überlebensfähig sind oder Stresssymptome zeigen, die sie ökonomisch unbrauchbar machen. (Flowers 1985, S.5)

Deshalb ist der zweite Ansatz der *saline agriculture*, die Domestizierung von Halophyten, die von Natur aus eine hohe Salztoleranz aufweisen, durchaus vielversprechender.

Manche halophytischen Pflanzen wie beispielsweise *Salicornia*, können sogar noch bei einem Salzgehalt von 100g/L ihre volle Produktivität aufrechterhalten, was mehr als der dreifachen Konzentration von Salzwasser entspricht. (Glenn et al. 1998, S.79)

Im Folgenden sollen die Mechanismen der Halophyten genauer beschrieben werden, die sie dazu befähigen, trotz hoher Salzgehalte ihre Produktivität aufrecht zu erhalten.

3 Halophytische Anpassungsmechanismen

Halophyten sind Pflanzen, die aufgrund ergänzender morphologischer, physiologischer und biochemischer

Anpassungsmechanismen nicht nur in der Lage sind saline Standorte zu tolerieren, sondern teilweise sogar von hohen Salzkonzentrationen in ihrer Bodenlösung profitieren. (Koyro et al. 2011, S.5)

So zeigen manche Halophyten unter Salzeinfluss zwar deutliche höhere Wachstumsraten, sind aber in ihrem Wachstum nicht zwangsläufig auf NaCl angewiesen.

(Lüttge und Kluge 2012, S.221)

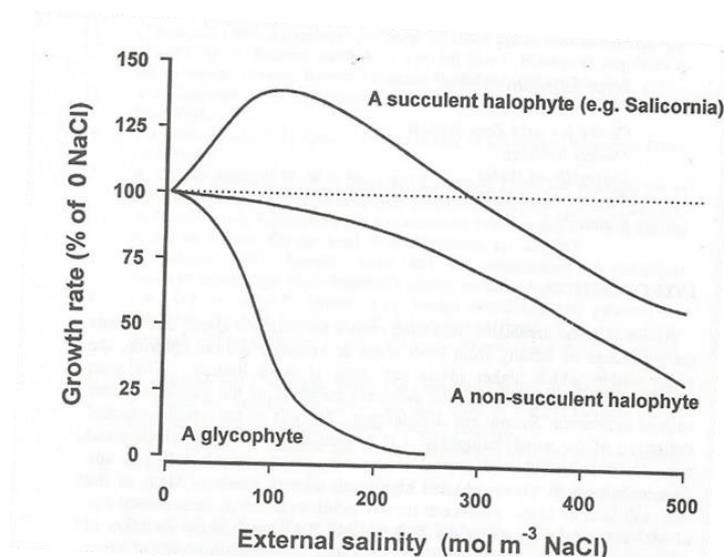


Abbildung 1: Einfluss von NaCl auf salzsensitive Glycophyten und salztolerante Halophyten (Gorham 1996, S.32)

Um ein besseres Verständnis von den Anpassungsmechanismen der Halophyten zu erlangen, muss zunächst veranschaulicht werden, wie sich Salzstress grundlegend auf Pflanzen und deren Stoffwechsel auswirkt.

3.1 Schädigung durch Salzstress

Saline Standorte sind geprägt durch hohe Gehalte an Natrium (Na^+) und Chlorid (Cl^-), die in Verbindung mit einer geringen Wasserkonzentration und in größeren Mengen zu hohem osmotischen Stress, Ionen-Toxizität und Mangelernährung der Pflanze führen. (Zhu 2001, S.66)

Wasser bewegt sich zwischen zwei Systemen immer in Richtung des niedrigeren osmotischen Potentials. Aufgrund des geringen Wasserpotentials (hohen osmotischen Potentials) salziger Böden kommt es zum Austritt von Wasser aus den Pflanzenzellen. Der Wasserentzug durch den Boden induziert in der Pflanze osmotischen Stress, der sich meist in starken Welkeerscheinungen äußert. Um diesem Stress zu begegnen, muss die Pflanze ihr eigenes osmotisches Potenzial anpassen, indem sie selbst Salz aufnimmt und somit ein Konzentrationsgefälle entlang der Membran aufbaut. (Gorham 1996, S.34)

Salztoleranz ist demnach nicht nur eine Frage des Ausschlusses aus dem Organismus, sondern vielmehr die Balance zwischen Salzinclusion zum Zweck der osmotischen Anpassung und Salzexklusion, um toxische Konzentrationen zu vermeiden. (Gorham 1996, S.38)

Deshalb darf der Zustrom von Salz nicht unkontrolliert stattfinden. Denn zu hohe Salzgehalte wirken sich negativ auf die empfindlichen Organellen im Cytoplasma aus und inhibieren bestimmte Enzyme und somit die Proteinbiosynthese der Pflanzen. (Greenway und Osmond 1972, S.257)

Einen ähnlichen Effekt übt auch die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies (ROS), die unter Salzstress in der Pflanze gebildet werden, auf den Stoffwechsel aus. Um diesem oxidativen Stress zu begegnen, synthetisiert die Pflanze antioxidative Stoffe, wie z.B. Polyphenole, Ascorbinsäure, β -Carotene und Ureide. (Zhu 2001, S.66; Parida und Das 2005, S.34)

Des Weiteren ist die Pflanze durch zu hohe Salzgehalte gezwungen, mit ihrem Wasser zu haushalten, um das Gleichgewicht zwischen Wasser und gelösten Ionen in den Zellen aufrecht zu halten. Infolgedessen werden die Stomata der Pflanze geschlossen, um Transpiration und daraus resultierende Dehydrierung zu verhindern. Somit wird zwar der Wasserverlust vermindert, aber es kann auch kein CO_2 über die Stomata aufgenommen werden. Dies hat eine verringerte Kohlenstofffixierungsrate zur Folge und auch die netto-Photosyntheserate

geht zurück. Die Pflanze kann somit nur wenig neue Biomasse bilden, um die großen aufgenommenen Salzmengen zu deponieren. (Gorham 1996, S.34-35)

Darüber hinaus führen zu hohe Salzgehalte zu Mangelernährung der Pflanze, da durch die hohe Ionenkonzentration an Natrium und Chlorid die Aufnahme und Assimilierung von anderen Nährstoffen wie Kalium, Calcium, Magnesium, Nitrat oder Phosphat gehemmt werden. (Grattan und Grieve 1992, S.284-292; Gorham 1996, S.35)

Gleichzeitig ist Salinität nicht nur charakterisiert durch hohe NaCl-Gehalte, sondern auch durch im Übermaß vorhandenen Sulfaten, Carbonaten und auch Bor und Selenium, die sich ebenfalls toxisch auf den Stoffwechsel der Pflanzen auswirken. (Gorham 1996, S.33)

Salinität ist meist nicht uniform und unterliegt sowohl zeitlichen als auch räumlichen Schwankungen. Durch Regenfälle, Evapotranspiration oder auch Gezeitenwechsel in Küstennähe verändert sich der Salzgehalt von Böden im Jahres- und Tagesverlauf. Auch innerhalb verschiedener Bodentiefen oder zwischen benachbarten Flächen können häufig deutliche Unterschiede gemessen werden. Aufgrund dieser auftretenden Diversität müssen auch die Anpassungsmechanismen der Halophyten sehr komplex und variabel sein, um diese räumlichen, zeitlichen und chemischen Schwankungsbreiten abdecken zu können. (Gorham 1996, S.33)

3.2 Anpassungsmechanismen von Halophyten

Bei den Anpassungsmechanismen von Pflanzen an Salzstress unterscheidet man in Mechanismen, die die Aufnahme von Salz in den Organismen möglichst verhindern bzw. auf ein Minimum reduzieren (*Avoidance, Resistance*) und in Prozesse, die es der Pflanze ermöglichen, Salz kontrolliert aufzunehmen und hohe interzellulärer Konzentrationen zu tolerieren (*Tolerance*). (siehe Abbildung 2) (Gorham 1996, S.38-39)

Kurzlebige annuelle Pflanzen meiden in ihrer Entwicklung die trockensten Jahreszeiten und vermeiden somit einen übermäßigen Salzstress. Durch tiefe Wurzeln erreichen sie Bodenschichten mit geringeren Salzgehalten und mehr verfügbarem Wasser. (Batanouny 1996, S.78)

Kann ein erhöhter Salzeintritt nicht länger vermieden werden, ermöglichen weitere morphologische Anpassungsmechanismen den Halophyten sich trotz hoher NaCl-Gehalte ohne Einbußen in Wachstum oder Produktivität weiter zu entwickeln.

Während junge wachsende Blätter oft mit kaliumreichen Lösungen durch das Phloem versorgt werden, werden ältere Blätter meist mit Natrium beladen und abgestoßen, um die interzelluläre Salzkonzentration zu verringern. (Gorham 1996, S.43) Dies hat den zusätzlichen Vorteil, dass

somit auch weniger Blattoberfläche für Transpiration zu Verfügung steht. (Batanouny 1996, S.80)

Eine ähnliche Strategie verfolgen auch sukkulente Pflanzenarten. Durch die Ausbildung dicker, fleischiger Blätter, großer Zellen (insbesondere im Schwammparenchym), hoher Elastizität der Zellwände, wenig relativer Oberfläche, wenigen Stomata und großer Zellvakuolen kommt es zur Einsparung von Wasser und zu einem Verdünnungseffekt der toxischen Ionenkonzentration. Die fleischige Rinde der Sukkulenten akkumuliert außerdem während ihrer Entwicklung erhebliche Mengen an Salz und wird dann mit der Ausbildung eines Phellogens (Korkkambium) abgestoßen. (Batanouny 1996, S.80-81; Gorham 1996, S.39)

Ein weiterer Anpassungsmechanismus an Salzstress ist die Ausbildung von Salzdrüsen oder Blaszellen, um überschüssiges Salz über die Blätter zu sekretieren. Das Salz wird unter Energieaufwendung mittels einer Ionen-Pumpe in den Zellen angereichert und im Falle der Salzdrüsen sekretiert, die Blaszellen dagegen platzen auf oder werden abgeschnürt, so dass sich das Salz in kristalliner Form auf der Blattoberfläche absetzt. (Batanouny 1996, S.80-81; Gorham 1996, S.40-41)

Die Cuticula der Halophyten ist meist mit einer Wachsschicht überzogen, was zum einen der Vermeidung von Transpirationsverlusten dient und auch die Reabsorbierung des abgesonderten Salzes verhindert. (Gorham 1996, S.41)

Wie bereits erwähnt, ist die Pflanze bei der osmotischen Anpassung dazu gezwungen NaCl als Osmotikum aufzunehmen, um den osmotischen Druck anzupassen und um mit dem umgebenden Medium um Wasser konkurrieren zu können. Durch die selektive Aufnahme der Ionen wird das osmotische Potenzial erhöht und Wasser strömt in die Pflanzenzellen. (Parida und Das 2005, S.327)

Da viele Organellen und Enzyme im Cytoplasma jedoch empfindlich auf Salz in ihrer Umgebung reagieren, kommt es zu einer NaCl-Kompartimentierung in den Vakuolen. Mithilfe von H⁺-Pumpen an Plasmalemma und Tonoplast wird Natrium in der Zellvakuole durch den Antiport von H⁺/Na⁺ angereichert. (Lüttge und Kluge 2012, S.221)

Um den entstandenen Konzentrationsunterschied zwischen Vakuole und Cytoplasma wieder auszugleichen, synthetisiert die Pflanze osmotisch aktive Metabolite, sogenannte kompatible Substanzen, wie z.B. Proline (Aminosäure), Glucose, Fructose, Polyole und Betaine. (Parida et al. 2002, S.33; Lüttge und Kluge 2012, S.222)

Glycophyten sind, im Gegensatz zu Halophyten, nicht in der Lage, Natrium für osmotische Anpassung zu nutzen, sondern sind gezwungen, Osmotika neu zu bilden. Diese Neusynthese geht mit einem hohen Kohlenstoffverbrauch und somit auch hohen Ertragsverlusten einher. (Raven 1985, S.55-56)

Ein weiterer wichtiger Mechanismus für den Ladungsausgleich im Cytosol ist das selektive Be- und Entladen des Xylems durch Plasmodesmen. (Gorham 1996, S.43)

Da Salztransport aus den Wurzeln in erster Linie mit dem Transport von Wasser zum Spross zusammenhängt, ist die Wassernutzungseffizienz (WUE – Water Use Efficiency) der Halophyten deutlich angepasst, so dass weniger Wasser für den Aufbau neuer Biomasse verwendet wird. Indem somit die Transpirationsrate verringert wird, wird auch weniger NaCl mit dem Wasser in den Spross transportiert und eine Anreicherung in den Blättern wird vermindert. (Gorham 1996, S.43)

Während die entwickelten Halophyten durch ihre vielzähligen Anpassungsmechanismen eine sehr hohe Salztoleranz aufzeigen, werden Keimungsrate und Entwicklung der Keimlinge durch Salzgehalte allerdings gehemmt. Deshalb keimen die meisten Samen auf salzhaltigen Böden erst aus, wenn die Salzkonzentration nach starken Regenfällen durch Auswaschung abfällt.

Manche Mangrovenarten sind deshalb vivipar. Die Keimlinge sind während ihrer Entwicklung noch mit der Mutterpflanze verbunden und somit fest im Boden verankert und werden über die Mutterpflanze mit Wasser versorgt. (Batanouny 1996, S.83)

Eine große Vielfalt an Mechanismen ermöglicht es den Halophyten, Standorte zu besiedeln, auf denen die meisten konventionellen Nutzpflanzen nicht überlebensfähig sind.

Im Folgenden soll nun geklärt werden, welche Voraussetzungen erfüllt werden müssen, damit Halophyten und halophytische Produkte als ökonomisch interessant und als wirkliche Alternative zu konventionellen landwirtschaftlichen Pflanzen angesehen werden.

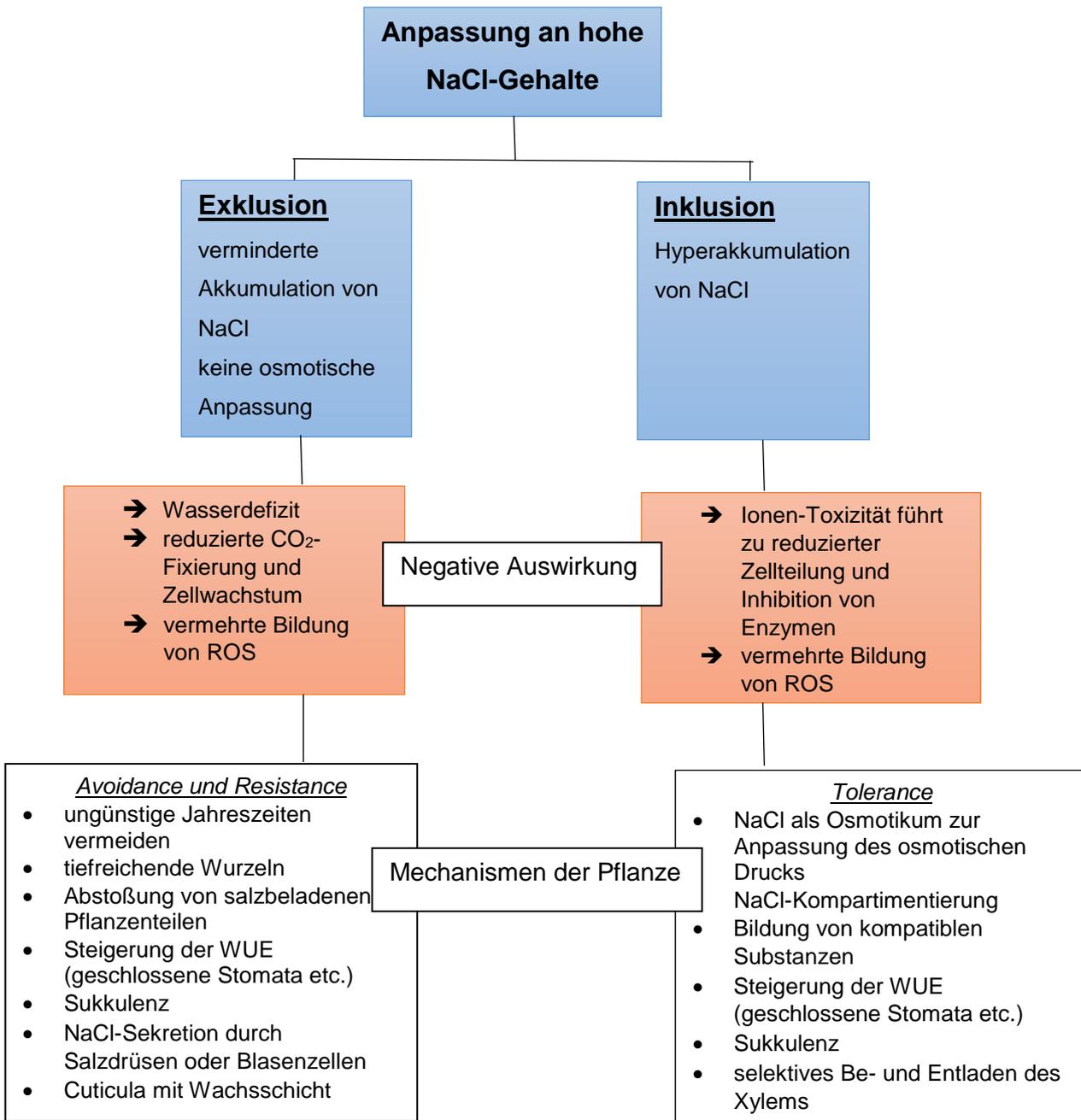


Abbildung 2: Anpassung an NaCl, Strategien, Auswirkung und Mechanismen der Pflanze

3.3 Eigenschaften von Halophyten für den kommerziellen Anbau

Damit Halophyten als ernstzunehmende alternative Feldfrucht in der modernen Landwirtschaft angesehen werden, müssen sie verschiedene Kriterien erfüllen. Dazu gehört in erster Linie ein hoher potentieller Ertrag. Des Weiteren sollten die Bewässerungsansprüche in einem ähnlichen Bereich liegen wie die von konventionellen Feldfrüchten. (Balnokin et al. 2010, S.770) Zuletzt ist es wichtig, dass Halophyten in ihren Eigenschaften Produkte von konventionellen Nutzpflanzen ersetzen können und darüber hinaus eine hohe

gesellschaftliche Akzeptanz genießen, damit sie als ökonomisch interessant und vermarktbar gelten. (Glenn et al. 1999, S.240)

Darüber hinaus müssen für den kommerziellen Anbau alle Kultivierungsschritte kontrollierbar, voraussehbar und übertragbar sein. (Singh et al. 2014, S.2)

Innerhalb der großen Variabilität der Halophyten zeigen sich große Schwankungen in Salztoleranz und Wachstumsrate zwischen den verschiedenen Gattungen. Allerdings gibt es durchaus einige Halophyten, die trotz Bewässerung mit salzhaltigem Meerwasser ähnlich hohe oder sogar höhere Biomasse- und Samenerträge erbringen als konventionelle Feldfrüchte, die mit Frischwasser bewässert wurden. (Glenn et al. 1998, S.4)

Für den Einsatz im Bereich der Phytoremediation oder als Biofilter für Abwässer sollten die Pflanzen darüber hinaus in der Lage sein, möglichst viel NaCl im Spross zu akkumulieren. (Balnokin et al. 2010, S.770)

Viele Halophyten wurden schon seit der Antike als Nahrungsmittel für medizinische Zwecke und aufgrund ihres hohen Salzgehaltes angebaut und werden mittlerweile auch aufgrund vieler anderer potentieller Nutzungsmöglichkeiten untersucht. (Ventura und Sagi 2013, S.144-145)

Als vielversprechender Kandidat der Halophyten lässt sich hier *Salicornia* anführen, die in den nachfolgenden Kapiteln eingehend im Hinblick auf verschiedene Nutzungsmöglichkeiten analysiert werden soll.

4 *Salicornia*

4.1 Botanische Grundlagen

Salicornia, im deutschen Sprachgebrauch auch als „Seespargel“ oder „Queller“ bekannt, ist eine einjährige, sukkulente Pflanze der Familie der *Chenopodiaceae*. (Waisel 1972, S.305; Davy et al. 2001, S.681)

Als physiologische Anpassung an salzhaltige Böden sind die Blätter so stark zurückgebildet, dass Stängel und Äste blattlos erscheinen. Die Blüten sind in dichten, terminalen, dornen-ähnlichen Thyrsen angeordnet. (siehe Abbildung 3) (Kadereit et al. 2007, S.1143)

Salicornia wächst überwiegend in periodisch feuchten, salzigen Küsten- und Inlandshabitaten wie Salzmarschen, Salzseeufeln, Wattmeeren oder Salzpflanzen und ist weit verbreitet in borealen, gemäßigten und subtropischen Regionen der nördlichen Hemisphäre und in Südafrika. (Kadereit et al. 2007, S.1144)

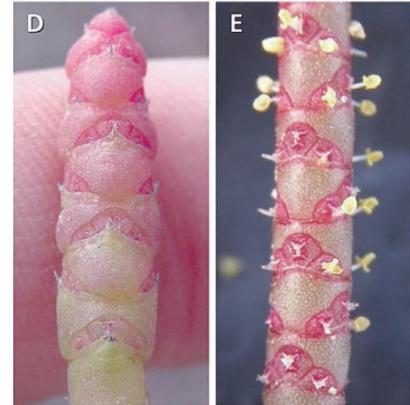


Abbildung 3: Blütenstand von *Salicornia bigelovii* (D) und *Salicornia perennans* (E) (Kadereit et al. 2007, S.1145)

Die taxonomische Einordnung gestaltet sich sehr schwer, da aufgrund der Sukkulenz die Morphologie der Pflanze stark reduziert ist. Außerdem sind die Standorte von *Salicornia* meist geprägt durch starke Schwankungen in Wasser- und Salzgehalten, da sich im Laufe des Jahres oft Perioden von Staunässe, Trockenheit, Überflutung, starker Evaporation und Niederschlag abwechseln. Demnach müssen die Pflanzen an diesen Standorten physiologisch ebenso vielfältig und anpassungsfähig sein wie ihre Umweltbedingungen, was die taxonomische Zuordnung der Arten im Weiteren erschwert. (Kadereit et al. 2007, S.1145)

Grob geschätzt umfasst die Gattung 25-30 verschiedene Arten. In Tabelle 1 sind die Arten, die am intensivsten erforscht wurden, und ihre globale Verbreitung dargestellt. Häufig werden die Namen *Salicornia europaea* oder *Salicornia herbacea* im weiteren Sinne verwendet, um die meisten Arten in einer Gattung zusammenzufassen. (Kadereit et al. 2007, S.1143-1144)

Tabelle 1: verschiedene Arten von *Salicornia* und ihre geographische Verteilung (Patel 2016, S.2)

No.	Botanical name	Common names	Geographical Range
1	<i>Salicornia europaea</i>	Common glasswort	Britain, France, Ireland
2	<i>Salicornia bigelovii</i>	Dwarf glasswort	USA, Mexico
3	<i>Salicornia brachiata</i>	Umari keerai	India
4	<i>Salicornia virginica</i>	American glasswort, pickleweed	Canada, USA, Mexico
5	<i>Salicornia maritima</i>	Slender glasswort	Canada, USA, Mexico
6	<i>Salicornia ramosissima</i>	Purple glasswort	France, Iberia
7	<i>Salicornia herbacea</i>	–	Korea
8	<i>Salicornia persica</i>	–	Iran

Salicornia ist in der Lage große Mengen an Salz in Spross und Blättern zu akkumulieren und zeigt optimale Wuchsbedingungen bei ca. 75% des NaCl-Gehaltes von Meerwasser. (Balnokin et al. 2010, S.771-772; Ventura et al. 2011a, S.191) Aber auch bei weit höheren



Abbildung 4: Salicorniapflanzen; links nach der Behandlung von wöchentlich 25 ml Salzwasser; rechts: ohne zusätzliches Salzwasser

Konzentrationen ist eine vollständige Entwicklung möglich, wodurch eine Bewässerung mit unverdünntem Meerwasser ermöglicht wird. (Glenn et al. 1998, S.79; Glenn et al. 1999, S.240)

So zeigten Salicorniapflanzen bei Versuchen der Uni Bonn unter Salzeinfluss deutlich höhere Biomasserträge. Bei einer wöchentlichen Zugabe von 25 ml Salzwasser (3 gNaCl/L) betrug die Ernte durchschnittlich 63,45 g/Pflanze, während Pflanze, die kein zusätzliches Salzwasser erhielten durchschnittlich nur 24,02 g/Pflanze Frischmasse bildeten. (siehe Abbildung 4)

Obwohl *Salicornia* auch hierzulande in Küstenregionen und Wattmeeren wächst, ist sie in Deutschland noch weitestgehend unbekannt und wird auf dem europäischen Markt bislang eher als Nischenprodukt aufgrund ihres salzigen Geschmacks und ihres ernährungsphysiologischen Mehrwertes als Gemüse für die Gourmetküche gehandelt. (Ventura und Sagi 2013, S.146)

Doch im Hinblick auf die verstärkte Problematik der schwindenden Frischwasserquellen und der zunehmenden Bodenversalzung wird *Salicornia* vermehrt durch verschiedene Züchtungs- und Forschungsprogramme auf Eigenschaften landwirtschaftlicher Wichtigkeit geprüft und zu einheitlichen Pflanzen mit hohen Erträgen gezüchtet, um den kommerziellen Anbau in die Wege zu leiten. (Zerai et al. 2010, S.738; Ventura und Sagi 2013, S.144)

Zerai et al. (2010) konnten in einem Züchtungsprogramm 1997 bereits zeigen, dass *Salicornia bigelovii* empfänglich für Züchtungsfortschritte durch Pedigree-Züchtung und Hybridisierung ist, da Steigerungen in Ertrag und Ölgehalt der Samen erzielt wurden. (Zerai et al. 2010, S.737-738)

4.2 Anbaumethoden und -bedingungen

Die meisten der Studien, die sich mit *Salicornia* befassen, fokussieren sich mehr auf den Nachweis extremer Salzkonzentration oder auf die Mechanismen von *Salicornia*, hohe Salzmengen zu tolerieren, aber lassen das kommerzielle Potential als landwirtschaftliches Produkt der Pflanze außer Acht. (Ventura und Sagi 2013, S.144-145)

Außerdem ist kritisch zu sehen, dass die meisten Studien bislang selten unter Feldbedingungen, sondern in kontrollierter Umgebung in Gewächshäusern durchgeführt wurden. Daten zu Erträgen, Belichtung und Salzgehalt sind meist Hochrechnungen aus Modellversuchen und beziehen andere Faktoren wie Witterung oder Pflanzdichte nicht mit ein. (Flowers und Colmer 2008, S.956) Dies erschwert die Entwicklung eines optimalen landwirtschaftlichen Systems für den kommerziellen Anbau.

Bei der Kultivierung von *Salicornia* wird zunächst grundlegend in den Anbau auf Sandböden und in Hydrokulturen (Hydroponik) unterschieden. Die Kultivierungsmethoden müssen dabei an die gegebenen Umweltbedingungen der Anbauregion und an das gewünschte Zielernteprodukt (Samen, Frisch- oder Trockenmasse) angepasst werden. (Ventura und Sagi 2013, S.148)

Für die Keimung der Samen werden diese zunächst 50 Tage bei 7°C gelagert, um die Stratifikation zu stimulieren. (Katschnig et al. 2013, S.33)

Für die Anzucht der Pflanzen ist zunächst zu beachten, dass die Samen salzempfindlich sind. Unter natürlichen Bedingungen keimen sie deshalb meist im Winter oder Frühling aus, wenn der Salzgehalt in der Bodenlösung geringer ist. (Ventura und Sagi 2013, S.147) Somit zeigten Samen in Versuchen von Ventura et al. (2011b) eine signifikant geringere Keimungsrate ab einer Salzkonzentration, die 50% des Salzgehaltes von Meerwasser (15g NaCl/L) überstieg. Aus diesem Grund werden Samen für die Auskeimung meist auf Perlit ausgebracht und mit Leitungswasser bewässert. Nach der Keimung werden die Sämlinge dann je nach Anbaumethode in andere Substrate transferiert. (Ventura et al. 2011b, S.511)

Während der Keimling eher empfindlich auf zu hohe NaCl-Gehalte reagiert, wird die Jungpflanze dagegen sogar in ihrem Wachstum durch Salzeinfluss stimuliert. (Katschnig et al. 2013, S.35)



Abbildung 5: Einfluss von NaCl auf das Wachstum von *Salicornia* auf Klein Altendorf; links: Pflanzen wurden mit Meerwasser bewässert; rechts: Pflanzen wurden ohne NaCl bewässert

Um einen osmotischen Schock zu vermeiden, werden die Pflanzen durch eine langsame Steigerung an die angestrebte Salzkonzentration gewöhnt. (Ventura et al. 2011b, S.511)

Im Hinblick auf die NaCl-Konzentration gibt es leichte Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten. (siehe Tabelle 2) So zeigte beispielsweise *Salicornia europaea* optimale Wuchsbedingungen bei einer Konzentration von 280mM/L (ca. 75% des NaCl-Gehaltes von Meerwasser). (Balnokin et al. 2010, S.771-772).

Tabelle 2: verschiedene Arten von *Salicornia* und deren optimale NaCl-Konzentration für maximalen Wachstum (in Anlehnung an: Singh 2014, S.17)

Salicorniaart	Optimale NaCl-Konzentration (in mM/L)
<i>Salicornia europaea</i>	280
<i>Salicornia persica</i>	200
<i>Salicornia brachiata</i>	200
<i>Salicornia bigelovii</i>	170-340
<i>Salicornia brachystachya</i>	170-340

Die maximale Toleranzgrenze liegt für alle Arten allerdings weit über diesen Werten. *Salicornia bigelovii* beispielsweise toleriert Gehalte von 100g NaCl/L, so dass auch bei einer Bewässerung mit einem Salzgehalt von 40g/L (100% Meerwasserkonzentration) noch Erträge von 18 t/ha erreicht werden. (Glenn et al. 1999, S.240)

Zwar werden durch die Bewässerung mit Meerwasser Frischwassermengen eingespart, insgesamt übersteigt die benötigte Wassermenge für den Anbau von *Salicornia* jedoch die von vielen konventionellen Pflanzen um ca. 35%. Denn der Bewässerungsfluss muss reichlich und stetig konstant gehalten werden, um die Anreicherung von Salzmengen in der Wurzelzone zu verhindern. (Glenn et al. 1997, S.725) Deshalb bietet sich bei anderen Kultivierungsmethoden



Abbildung 6: Überstaubewässerung von *Salicornia* mit Abwasser aus Aquakulturen (Ventura und Sagi 2013, S.149)

als hydroponischen Systemen neben der stetigen Tröpfchenbewässerung die Überstaubewässerung als Bewässerungsmethode an. Hierbei wird das Feld geflutet, um eine ständige Wasserversorgung zu gewährleisten. (siehe Abbildung 5) (Glenn et al. 1998, S.78)

Da Meer- oder Abwässer, die für die Bewässerung verwendet werden, jedoch nicht aus drastischen Tiefen gepumpt werden müssen, wie es bei Frisch- und Grundwasserressourcen der Fall ist, kommt es in der Gesamtbilanz wieder zu einer Kosten- und Arbeitseinsparung. (Glenn et al. 2013, S.113)

Des Weiteren wird das Ertragspotential durch verschiedene Erntesysteme beeinflusst. Vor allem beim Anbau von *Salicornia* als Gemüse (Ernteprodukt Frischbiomasse) ist die mehrfache Ernte innerhalb einer Vegetationsperiode zu empfehlen, da die akkumulierten Frischbiomassenerträge eines repetitiven Erntesystems die einer einmaligen Beerntung nicht nur übersteigen, sondern auch die Produktqualität der jungen Sprossspitzen deutlich höher ist. (Ventura und Sagi 2013, S.147)

Ventura et al. (2011a) zeigten in Versuchen, dass das optimale Zeitintervall für maximale Erträge drei Wochen beträgt. (Ventura et al. 2011a, S.191-192) Hierzu wird *Salicornia* erstmals bei einer Sprosslänge von 10-15 cm und dann in dreiwöchigen Abständen auf 5 cm gestutzt. Somit werden bei einer Vegetationsperiode von 205-250 Tagen bis zu 6 Erntedurchgänge und ein maximaler Biomasseertrag von 16 kg/m² ermöglicht sowie die Verholzung der jungen Sprosse vermieden. (Ventura et al. 2011a, S.190+195; Falasca et al. 2014, S.8683)

Für den Anbau von *Salicornia* als Ölsaart mit den Samen als Ernteprodukt konnten mit einer einmaligen Ernte Erträge von 0,2-0,25 kg Samen/m² erzielt werden. (Glenn et al. 1998, S.79)

Für den Anbau von *Salicornia* wird teilweise spezielles Equipment benötigt. Zum Beispiel müssen Plastikrohre für die Bewässerung installiert werden, da Metallrohre durch den Kontakt mit Salzwasser rosten können. Darüber hinaus müssen die Felder gegebenenfalls für Überstaubewässerung geeignet angelegt werden. Für die Ernte der Samen kann allerdings ein herkömmlicher Mähdrescher verwendet werden. (Glenn et al. 1998, S.78)

4.2.1 Kultivierung auf Sandboden

In Israel wird *Salicornia* bereits für die Gemüseproduktion unter Netzen oder in Gewächshäusern auf Sandböden angebaut und mittels Tröpfchenbewässerung konstant mit salzhaltigem Wasser versorgt. Diese Art des Anbaus ist allerdings nur in Gebieten, die durch wenig Regenfälle, eine lockere Bodenstruktur und kein flachgründiges Grundwasser charakterisiert sind, möglich, da ansonsten die Gefahr besteht, dass sich Salz in der Wurzelzone anreichert oder ins Grundwasser gelangt. (Pasternak und Malach 1995, S.128; Ventura und Sagi 2013, S.148) Für Standorte, die diese Ansprüche nicht erfüllen, wurden verschiedene „bodenlose“ Kultivierungsmethoden entwickelt. (Ventura und Sagi 2013, S.148)



Abbildung 7: *Salicornia* auf Sandboden mit Tröpfchenbewässerung (Ventura und Sagi 2013, S.149)

4.2.2 Hydroponik

Die bodenlose Kultivierung in Hydroponik ist zwar kostenintensiver, hat allerdings zum Vorteil, dass die Salzkonzentration mit dem Bewässerungssystem genau kontrolliert und angepasst werden kann.

Diese Anbaumethode wird meist in geschlossenen Gewächshäusern durchgeführt, was außerdem die Kontrolle weiterer Faktoren, wie Temperatur und Belichtungsdauer ermöglicht.

Mit abnehmender Tageslänge im späten Sommer wird nicht nur die sexuelle Reproduktion mit der Blütenbildung eingeleitet, sondern es verlangsamt sich auch das vegetative Wachstum. Die Pflanze bringt weniger Erträge und wird in ihrem Marktwert gemindert. Deshalb ist es beim kommerziellen Anbau wichtig, die kritische Tageslänge nicht zu unterschreiten, um eine ungewollte Blühinduktion zu vermeiden. (Ventura et al. 2011b, S.515)

Gemäß den verschiedenen Arten von *Salicornia* gibt es hier einige Abstufungen. Ventura et al. (2011b) konnten in Studien zeigen, dass Arten aus den nördlichen Breitengraden bereits bei der Unterschreitung von 18 Stunden Tageslänge zu blühen begannen, während Arten aus dem Süden Israels noch bei einer Tageslänge von 13,5 Stunden Blütenbildung vollständig inhibierten. (Ventura et al. 2011b, S.515)

Ergebnissen von Balnokin et al. (2010) zufolge nimmt *Salicornia europaea* selbst unter 24 Stunden Beleuchtung keinerlei Schaden und wies sogar eine höhere Wachstumsrate auf. (Balnokin et al. 2010, S.773)

Aufgrund der durchgehenden Beleuchtung werden darüber hinaus die Temperaturschwankungen weitestgehend minimiert. In der vorliegenden Literatur wurde bei



Abbildung 8: schwimmende Styroporgefäße auf Wasseroberfläche im hydroponischen Anbau (Ventura und Sagi 2013, S.149)

dem Versuchsaufbau mit *Salicornia* die Temperatur meist bei 20-24°C gehalten. (Tikhomirova et al. 2005, S.1590; Balnokin et al. 2010, S.769)

Des Weiteren wird das Medium in hydroponischen Systemen durch Wasserzirkulation mithilfe einer Pumpe mit Sauerstoff angereichert. Auf der Wasseroberfläche dienen Styroporplatten als Grundlage für die Pflanzen. (Singh et al. 2014, S.6)

Die Biomasseerträge von *Salicornia* (*S. dolichostachya*) in Hydroponik zeigten hierbei leicht höhere Erträge als die Kultivierung von *Salicornia* auf Sandböden. (Singh et al. 2014, S.17)

5 Nutzungsmöglichkeiten

5.1 Nahrungsmittel

In vielen Teilen der Welt waren und sind Halophyten, wie *Salicornia*, immer noch wichtige Nahrungsmittel mit bedeutender Rolle in der Welternährung. (Mudie et al. 2005, S.112)

Auf dem europäischen Markt wird *Salicornia* bislang eher als Nischenprodukt gehandelt.

Die dickfleischigen Sprosse der Pflanze werden gedämpft, frittiert, als eingelegte Delikatesse oder roh als Snack oder im Salat verzehrt. (Ventura et al. 2011a, S.189)

In manchen Ländern werden die Sprosse der Pflanze in Getränken verarbeitet, wie beispielsweise *nuruk*, eine Starterkultur für die Fermentation von Reiswein, *makgeolli* (koreanischer Reiswein) oder Essig. (Seo 2010, S.1322)

Salicornia ist als Gemüse nicht nur bekannt für ihren salzig-würzigen Geschmack, sondern auch für ihren hohen Gehalt an Phenolen, Flavonoiden, Alkaloiden, Mineralien, Vitaminen und Antioxidantien. (Seo 2010, S.3)

Die hochwertigen Inhaltsstoffe der Pflanze sind auf die Anpassungsmechanismen von dieser an Salzstress zurückzuführen. Durch die Aufnahme von NaCl und der Kompartimentalisierung in der Vakuole entsteht ein Ionenungleichgewicht in den Pflanzenzellen, das durch die Bildung von osmotisch aktiven Metaboliten ausgeglichen wird. Folglich kommt es zu einer Anreicherung von Zuckern, wie Fructose, Glucose und Saccharose in den Blättern. (Parida et al. 2002, S.33)

Des Weiteren werden infolge von Salzstress reaktive Sauerstoffspezien (ROS) gebildet, denen die Pflanze mit der Bildung von antioxidativen Stoffen und Enzymen, wie beispielsweise Polyphenole, Ascorbinsäure, β -Carotene und Ureiden begegnet. (Parida und Das 2005, S.330)

Ein weiterer Stoff, der ursprünglich zum Schutz der Pflanze vor Salzstress gebildet wird, gleichzeitig aber zum Potential der Pflanze als „super food“ beiträgt, ist der Gehalt an ungesättigten Fettsäuren, wie Omega-3-Fettsäuren in der Chloroplastenmembran. (Ventura et al. 2011a, S.190)

Folglich hat *Salicornia* viele gesundheitsfördernde Effekte auf den menschlichen Organismus. Durch die vielen verschiedenen hochwertigen Inhaltsstoffe wirkt diese Pflanze antibakteriell, hepatoprotektiv, antidiabetisch, krebs- und entzündungshemmend und senkt den Cholesterinspiegel. (Seo 2010, S.3-5)

Die genaue Nährstoffzusammensetzung der Produkte ist hierbei von verschiedenen Faktoren, wie Pflanzenart, Entwicklungsstufe, Anbaumethode und Salzgehalt der Bewässerung abhängig. (Swingle et al. 1996, S.138)

Da die saline Landwirtschaft bzw. der Anbau von Halophyten noch wenig verbreitet ist, fehlt es dem Agrarmarkt vorerst an kultiviertem Pflanzmaterial, das einheitliche und ansprechende Produkte hervorbringt. Der Anbau von *Salicornia* muss sich für den Landwirt ökonomisch rentieren und das Produkt die Ansprüche des Konsumenten erfüllen. (Schippmann et al. 2006, S.83)

Es ist allerdings zu erwarten, dass die Weltmarktpreise von konventionellen Produkten aufgrund der Verluste von hochqualitativen Flächen und Frischwasserressourcen weiterhin steigen werden, so dass die Nachfrage nach alternativen Produkten aus der salinen Landwirtschaft, wie beispielsweise *Salicornia* deutlich ansteigen könnte. (Rozema et al. 2013, S.2)

5.2 Ölsaat

Wenn die Äste der Salicorniapflanzen sich von grün nach gelb verfärben und leicht verholzen, sind die Samen erntereif. (Glenn et al. 1991, S.1066)

Für die Ernte können herkömmliche Mähdrescher genutzt werden, um die Samen von der restlichen Biomasse zu trennen. (Glenn et al. 1998, S.80)

Die Erträge belaufen sich auf ca. 2 t/ha und sind damit genauso hoch bzw. teilweise höher als die Erträge von Frischwasser-Ölsaaten, wie Sojabohne (1,7-2,04 t/ha) oder Sonnenblume (1,02-1,59 t/ha). (Glenn et al. 1991, S.1066; Milner 1992, S.25)

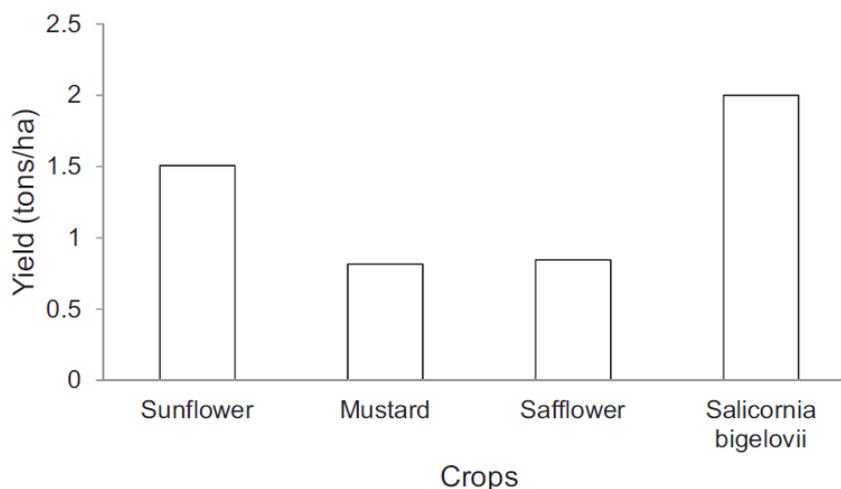


Abbildung 9: Produktivität von konventionellen Ölsaaten und *Salicornia bigelovii* (Panta et al. 2014, S.77)

Mit einer Mühle kann das Öl extrahiert werden. Als Nebenprodukt fällt hierbei das Mehl der Samen an, das als Proteinsupplement in der Tiermast eingesetzt wird. (Glenn et al. 1991, S.1066; Glenn et al. 1998, S.79)

Während die Pflanze in der grünen Biomasse große Mengen an Salz akkumuliert, sind die Samen dagegen weitestgehend salzfrei und enthalten 26-33% Öl und 31% Proteine. (Milner 1992, S.18) Das Öl ist leicht nussig im Geschmack und reich an mehrfach ungesättigten Fettsäuren (90%). (Glenn et al. 1999, S.240; Glenn et al. 1998, S.78)

Die Ölzusammensetzung ist mit der von Distelöl zu vergleichen (siehe Tabelle 3) und enthält große Anteile an Linolsäure, der eine antisklerotische, krebs- und entzündungshemmende

Tabelle 3: Ölzusammensetzung von *Salicornia bigelovii* und Distelöl (Anwar et al. 2002, S.4211)

constituent	<i>S. bigelovii</i>	safflower
oil (%)	29.70 ± 2.04 (27.2–32.0)	34.03 ± 1.70 (31.9–36.7)
protein (%)	33.07 ± 1.67 (31.00–35.51)	31.64 ± 2.00 (28.52–35.00)
fiber (%)	5.79 ± 1.50 (4.80–7.99)	7.70 ± 1.47 (6.05–9.80)
ash (%)	6.06 ± 1.10 (5.60–8.10)	6.58 ± 1.50 (5.02–8.11)

Wirkung nachgesagt wird. (Milner 1992, S.25; Pfeuffer et al. 2007)

^a Values are means ± SD calculated as percentage of dry seed weights for five *S. bigelovii* and four safflower seeds analyzed individually in triplicate.

Ein Nachteil von *Salicornia* als Ölsaart ist die erschwerte Ernte aufgrund der kleinen Samengröße (0,6-1,2mg) und der ungleichen Samenabreife. Die Pflanze bildet weiterhin Blüten, auch wenn die ersten Samen schon reif sind und abfallen. Folglich werden bei einer Ernte von Hand deutlich höhere Erträge erzielt. Die mechanische Ernte ist zwar weniger arbeits- und kostenintensiv, allerdings gehen hier ungefähr 50% des potentiellen Ernteertrages verloren. (Glenn et al. 2013, S.113)

5.3 Futtermittel

In Gebieten, in denen Halophyten natürlich wachsen, wurden diese schon seit jeher von Tieren gegraut. (Choukr-Allah 1996)

In der modernen Landwirtschaft können Halophyten Teile der Futterration von Masttieren ersetzen. Die erfolgreiche Nutzung ist hierbei abhängig von Biomasseproduktion, Nährstoffgehalt und Akzeptanz der Tiere. (Norman et al. 2013, S.97)

Versuche von Swingle et al. (1996) haben gezeigt, dass Mastsysteme für Wiederkäuer, in denen *Salicornia bigelovii* bis zu 30% der Futterration einnahm, gut von den Tieren angenommen wurden. (Swingle et al. 1996, S.139)

S. bigelovii wurde hier entweder in Form von Stroh, das nach dem Dreschen der Samen anfällt, getrocknet und zerkleinert zugefüttert oder als Samenmehl, welches nach der Extraktion von Öl zurückbleibt, in die Ernährung der Tiere eingearbeitet. (Swingle et al. 1996, S.139)

Im Vergleich zu Grasfuttermitteln zeigten Futtermittel auf Salicorniastrohbasis höhere Mineral- und Aschegehalte, einen geringeren Rohproteingehalt und eine geringere Rohfaser-Verdaulichkeit. (Swingle et al. 1996, S.141-143) Aufgrund des höheren Aschegehaltes und der geringeren Verdaulichkeit steht den Tieren weniger verdauliche Biomasse zur Verfügung, was in eine erhöhte Futteraufnahme resultiert. Folglich ist die Futtereffizienz der Futterrationen mit Salicorniastroh niedriger. (Swingle et al. 1996, S.141-143) Dennoch lassen sich mit *Salicornia* gleiche und teilweise sogar höhere Gewichtszunahmen während einer Mastperiode erzielen, da die geringeren Gehalte an verdaulicher Biomasse durch eine erhöhte Futteraufnahme kompensiert werden. (Swingle et al. 1996, S.146)

Allerdings sind Halophyten bzw. *Salicornia* aufgrund ihres hohen Salzgehaltes und anderer antinutritiven Substanzen nicht uneingeschränkt in der Masttierernährung einsetzbar. (Glenn et al. 1999, S.244)

Denn durch den hohen Salzgehalt ist auch die Wasseraufnahme der Tiere deutlich erhöht. So konsumierten Lämmer in Studien von Swingle et al. (1996) 110% mehr Wasser pro Tag. (Swingle et al. 1996, S.143) Die erhöhte Wasseraufnahme beeinflusst außerdem das Gewicht der Tiere, wodurch andere Parameter neben Lebendgewicht herangezogen werden müssen, um eine Aussage über den Mastzustand der Tiere zu machen. (Panta et al. 2014, S.76)

Ökologisch betrachtet kommt es in der Gesamtbilanz trotz alledem zu einer Netto-Einsparung an Frischwasser, da die Einsparung an Frischwasser beim Anbau von *Salicornia* den zusätzlichen Verbrauch durch die Masttiere deutlich übersteigt. (Swingle et al. 1996, S.147)

Das aufgenommene Salz wird über die Nieren wieder ausgeschieden. Somit wird durch die vermehrte Salzaufnahme auch die für den Stoffwechsel benötigte Energie erhöht. (Panta et al. 2014, S.76) Dies bedeutet jedoch keinesfalls, dass *Salicornia* als Futtermittel in der Tiermast ungeeignet ist, sondern eher in Kombination mit energieliefernden Getreidekomponenten zugefüttert werden sollte. (Norman et al. 2013, S.99)

Die Samen der Pflanzen sind dagegen jedoch weitestgehend salzfrei. Allerdings enthalten sie Saponine, die bei der Extraktion des Öls im Mehl verbleiben und, vor allem in der Geflügelmast, zu einer Wachstumsinhibierung führen. Diese Wirkung kann mithilfe der Supplementierung von Cholesterin aufgehoben werden. (Attia et al. 1997, S.262; Glenn et al. 1999, S.245)

So konnte in Versuchen gezeigt werden, dass Salicorniasamenmehl problemlos 2% der Futterration von Mastgeflügel einnehmen kann ohne eine Reduktion im Wachstum der Tiere

zu erhalten und somit beispielsweise Sojabohnenmehl vollständig ersetzen könnte. (Glenn et al. 1999, S.245)

Wiederkäuer dagegen sind Saponinen gegenüber weniger empfindlich. Auch hier konnte gezeigt werden, dass das Samenmehl konventionelles Baumwollsamemehl mit 10% Inklusionsrate problemlos substituieren konnte, ohne die Leistung der Masttiere zu beeinflussen. (Glenn et al. 1999, S.245)

Stickstoff liegt in Halophyten zu 50% in Form von Glycin-Betainen und Prolinen als Nicht-Protein-Stickstoff vor. In dieser Form kann der Stickstoff in Verdauungsprozessen nicht aufgenommen und verwertet werden und wird wieder ausgeschieden. Tiere, vor allem Wiederkäuer wie Kamele, Schafe und Ziegen in ariden Gebieten, die sich über die Zeit an salzhaltige Standorte angepasst haben, verfügen über bestimmte Pansenbakterien, die sie dazu befähigen, diese Stoffe in ihre Aminosäuren aufzuspalten und somit für die Tiere verfügbar zu machen. (Glenn et al. 1999, S.244)

Des Weiteren ist auch die Schlachtkörperqualität der Masttiere nicht negativ durch eine Ernährung mit Anteilen von Halophyten beeinflusst. (Swingle et al. 1996, S.147)

So konnte zum Beispiel in Versuchen durch das „International Center for Biosaline Agriculture“ (ICBA) (2007) gezeigt werden, dass Ziegen und Schafe, bei denen 70% der Futterration aus Halophyten bestand, ein besseres Fleisch-Fett-Knochen-Verhältnis zeigten als die Kontrollgruppe. (International Center for Biosaline Agriculture (ICBA) 2007, S.34)

5.4 Biokraftstoff

Zunehmender Energiebedarf und steigende Ölpreise bilden die treibende Kraft der Forschung nach neuen Energieressourcen. (Cybulska et al. 2014, S.165)

Salicornia rückt hierbei vermehrt als nachwachsender Rohstoff in den Fokus der Wissenschaft, da sie sich dadurch auszeichnet, dass ausnahmslos alle Pflanzenteile verwertet werden können. So können sowohl die Samen zur Biodieselherstellung verwendet werden und auch die Lignocellulose, die aus der Biomasse des Sprosses gewonnen wird, ist eine vielversprechende Alternative, die zur Produktion von Bioethanol, Biogas und anderen hochwertigen Nebenprodukten geeignet ist. (Cybulska et al. 2014, S.165)

Insbesondere die Luftfahrtindustrie zeigt großes Interesse am Anbau von *Salicornia* als Ölquelle zur Herstellung von Biokraftstoffen.

Im Hinblick auf die Zielsetzung, CO₂-Emissionen in der Luftfahrt trotz prognostiziertem Wachstum nachhaltig zu reduzieren, ist der Anbau von *Salicornia* als nachwachsender Rohstoff ein vielversprechender Ansatz. (Hendricks et al. 2011, S.2) So setzte sich

beispielsweise die „Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V.“ (aireg), eine Initiative bestehend aus 31 Mitgliedern und Organisationen aus Forschung und Wissenschaft, das Etappenziel, bis 2025 10% des getankten Kerosins in Deutschland aus alternativen Rohstoffen zu beziehen. (aireg e.V. 2012, S.4)

Während andere nachwachsende Rohstoffe vermehrt in Rahmen der „Tank-Teller-Debatte“ in die Kritik geraten, steht *Salicornia* aufgrund ihrer Nutzung, Standort- und Bewässerungsansprüche in keinerlei Konkurrenz mit dem Anbau von konventionellen Nahrungspflanzen. (Hendricks et al. 2011, S.3)

Als geeignetes Produktionsverfahren lässt sich hier der Konversionsprozess über die Hydrierung von Pflanzenölen anführen (HEFA – Hydrotreated Esters and Fatty Acids).

Hierbei werden pflanzliche und tierische Öle und Fette sowie Fettsäuren hydriert. Die entstehenden Kohlenwasserstoffketten werden isomerisiert, so dass die Kerosinfraktion abgetrennt werden kann. (aireg e.V. 2012, S.25)

Das somit entstehende Biokerosin zeigt die gleichen Eigenschaften wie fossiles Kerosin und ist kompatibel mit bestehender Flugzeugtechnik, so dass keinerlei Änderungen an Tanklagern von Flughäfen oder Flugzeugturbinen vorgenommen werden müssen. (aireg e.V. 2012, S.5+14)

Dies wurde auch durch einige Testflüge verschiedener Airlines wie beispielsweise Lufthansa und der US Air Force bestätigt. (Hendricks et al. 2011, S.2)

Bislang darf Biokerosin nicht als Reinkraftstoff verwendet werden, sondern wird zu einem Anteil von 50% zu fossilem Kerosin beigemischt. (aireg e.V. 2012, S.15)

Die Menge an ausgestoßenem CO₂ ist bei Biokerosin zwar nicht geringer als bei herkömmlichen Kerosin, allerdings gibt es Unterschiede im CO₂-Kreislauf. Denn während für die Gewinnung von fossilem Kerosin Kohlenstoff aus Rohöl bezogen wird, das unter der Erdoberfläche in gebundener Form vorliegt, binden nachwachsende Rohstoffe, wie *Salicornia* atmosphärisches CO₂. Es entsteht also ein Kreislauf, in dem das durch den Einsatz von Biokerosin ausgestoßene CO₂ von Salicorniapflanzen im Zuge der Photosynthese wieder gebunden wird. (aireg e.V. 2012, S.14)

Trotz alledem kann man in Verbindung mit Biokerosin nicht von einem „CO₂-neutralen Einsatz“ sprechen, da durch Verarbeitung und Transport der Rohstoffe Emissionen freigesetzt werden. So existiert bislang noch keine geeignete Bioraffinerie in Deutschland, in der Biokerosin für die Luftfahrt hergestellt werden kann, und auch für die benötigten Mengen an Biokerosin müsste Biomasse in Drittländern produziert werden, um die benötigten Mengen des nationalen Bedarfs zu decken. (aireg e.V. 2012, S.5+17)

Weltweit existieren 4 großtechnische Bioeraffinerien, die sich auf die Produktion von zertifizierten Kraftstoffen aus Pflanzenölen spezialisiert haben. Diese Umwandlung ist zwar auch in klassischen Mineralöleraffinerien möglich, allerdings lassen sich Biokerosin und fossiles Kerosin nach der Produktion nicht mehr voneinander trennen. (aireg e.V. 2012, S.26)

Ein weiteres großes Projekt, das für das vielversprechende Potential von *Salicornia* als Quelle für Biokraftstoffe spricht, wird von „Global Seawater Inc.“ in Sonora, Mexiko betrieben. Auf 5000 Hektar lassen sich hier 850-950 L Biodiesel/ha gewinnen. (Panta et al. 2014, S.78)

Darüber hinaus wird am Masdar Institute of Science and Technology in Abu Dhabi an einem „Integrated Seawater Energy Agricultural System“ (ISEAS) geforscht, das von Unternehmen wie Boeing, Etihad Airways und Honeywell UOP unterstützt wird. In diesem Projekt werden Halophyten in einem Modellökosystem angebaut, in dem Wasser aus dem Meer für eine Fisch- und Shrimpzucht gepumpt wird. Das anfallende Abwasser aus der Aquakultur wird für die Bewässerung von *Salicornia* umgeleitet, die zusätzlich noch Nährstoffe aus dem verschmutzten Wasser gewinnen können. Das somit vorfiltrierte Wasser wird dann zur Bewässerung über ein Mangrovenfeld zurück ins Meer geleitet. (Reals 2015, S.20)

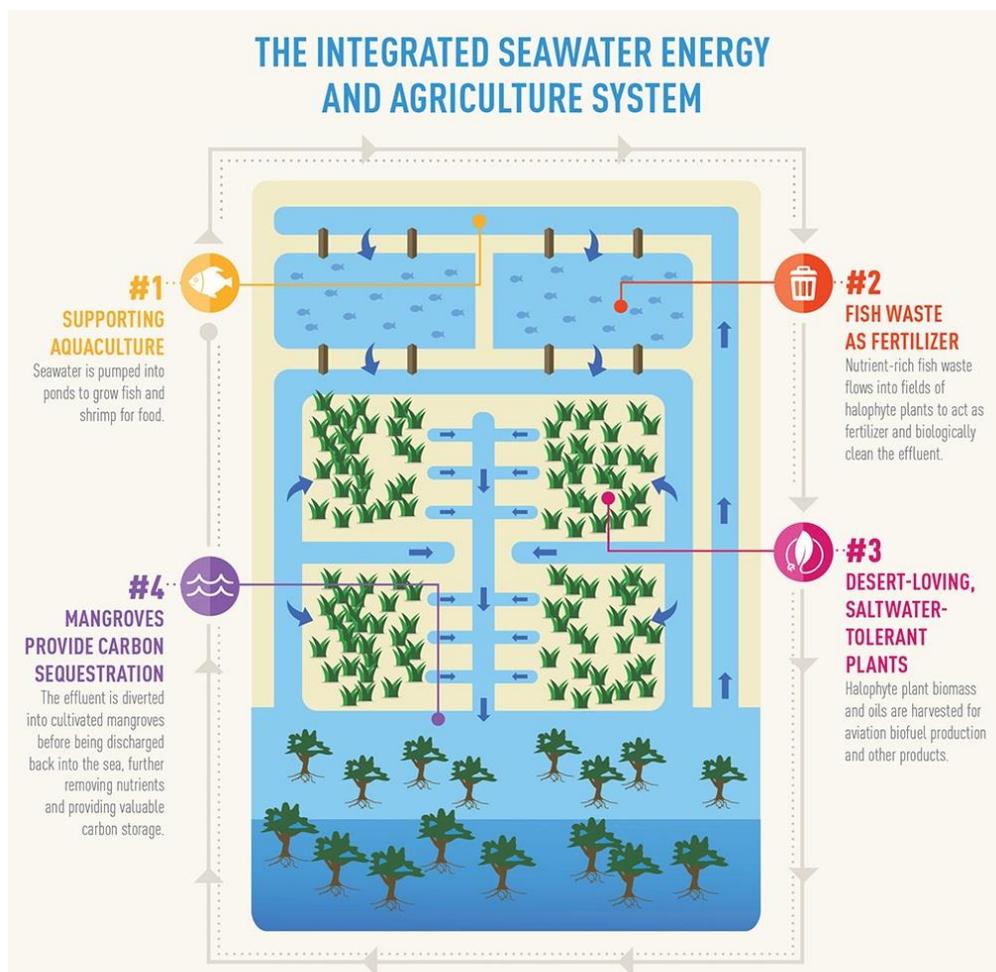


Abbildung 10: Konzept der „Integrated Seawater Farm“ (Sustainable Bioenergy Research Consortium (SBRC) 2014)

Das Abwasser aus den Aquakulturen, das normalerweise durch starke Verunreinigung eine Bedrohung für die Umwelt darstellen würde, dient auf diese Weise als Dünger für die Pflanzen und kann gereinigt zurück ins Meer geleitet werden.

Sowohl die Biomasse der *Salicornia*-Pflanzen als auch von den Mangrovenbäumen dient dann der Gewinnung von Bioethanol. Hierzu muss die Biomasse vorerst mit Frischwasser von Salz befreit werden. Danach wird durch thermische Vorbehandlung Cellulose und Hemicellulose in einzelne Zucker gespalten, die dann durch die Zugabe von speziellen Hefen (*Saccharomyces cerevisiae*) zu Alkohol fermentiert werden. (Cybulska et al. 2014, S.166-167)

Salicornia bigelovii zeigt hier ein deutlich höheres Potential für die Bioethanolproduktion mit Erträgen von 300-350 kg Ethanol/t TM als beispielsweise Mangrovenblätter (100kg Ethanol/t TM), Makroalgen oder Tierdung (Ashraf et al. 2016, S.103-104) und liegt ungefähr in der gleichen Produktionsklasse wie Mais (300-340L/t) (Panta et al. 2014, S.78)

Die mögliche Mehrfachnutzung durch Filterwirkung und gleichzeitige Verwertung von Samen und Biomasse macht diese Pflanze als nachwachsenden Rohstoff ökonomisch und ökologisch äußerst attraktiv. (Reals 2015, S.20)

5.5 Phytoremediation und Biofilter

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, benötigen Pflanzen zwar eine bestimmte Menge an Mineralien und Salzen, um den für die Wasseraufnahme benötigten osmotischen Druck aufrecht zu erhalten, in zu hohen Konzentrationen wirken sie jedoch toxisch. Ähnlich verhält es sich mit einigen Schwermetallen, wie beispielsweise Kupfer oder Zink. Diese Metalle sind in geringeren Mengen zwar für die optimale Entwicklung eines Pflanzenbestandes essentiell, allerdings kann ein Überschuss dieser Stoffe sich negativ auf die Pflanzenentwicklung und auch auf die Gesundheit des Menschen auswirken, wenn diese mit der Ernährung aufgenommen oder durch Regen, falsche Bewässerung oder Oberflächenabfluss in andere Gebiete oder Grundwasser gelangen. (Schilling und Kerschberger 2000, S.157-159)

Leider hat die Bodendegradation durch anthropogene Einflüsse wie Industrialisierung und Urbanisierung oder auch durch Einträge aus der Landwirtschaft durch falsche Düngung oder Bewässerung in den letzten Jahren stark zugenommen, so dass viele Gebiete mit Schwermetallen oder Salzen kontaminiert sind und somit der Anbau der meisten Pflanzen auf diesen Flächen unmöglich ist. (Cunningham et al. 1995, S.393)

In semiariden und ariden Gebieten wird Salz durch unangemessene Bewässerung und steigende Grundwasserspiegel aus tieferen Bodenschichten gelöst und durch hohe Evaporation- und Transpirationsraten in höhere Bodenschichten gezogen.

Weltweit sind ungefähr 10% der Erdoberfläche als salzbelastete Böden zu beschreiben. (Squires und Ayoub 1994, S.20)

Anhand der FAO/UNESCO world map von 1970-1980 schätzt die FAO die weltweite Fläche, die durch Salze kontaminiert ist, auf 831 Millionen Hektar. (FAO)

Betroffen sind hierbei nicht nur Wüstengebiete, sondern auch Alluvialböden, Flussbette und Küstenregionen überall auf der Welt. (Squires und Ayoub 1994, S.20)

Aufgrund der Entwicklung effizienter Toleranzmechanismen sind Halophyten wie *Salicornia* nicht nur an Salzstress, sondern auch an andere Stressfaktoren der Umwelt wie Frost, Hitze, Trockenheit und Schwermetalle angepasst. (Manousaki und Kalogerakis 2011, S.656)

Die Salztoleranz ist eng mit der Toleranz gegenüber Schwermetallen verbunden und basiert auf den gleichen physiologischen Anpassungsmechanismen, wie beispielsweise der Bildung von kompatiblen Substanzen und Antioxidantien oder der Kompartimentierung von schädlichen Substanzen in der Vakuole. (Manousaki und Kalogerakis 2011, S.656) Folglich zeigt *Salicornia* ein großes Potential für den Anbau zum Zwecke der Phytoremediation von gleichermaßen salz- und schwermetallbelasteten Böden. (Manousaki und Kalogerakis 2011, S.659)

Bei der Phytoremediation werden Pflanzen genutzt, um Kontaminationen in Boden und Wasser zu degradieren, zu immobilisieren und zu extrahieren. (Manousaki und Kalogerakis 2011, S.657) Da bisweilen die Reinigung von kontaminierten Flächen meist mit sehr aufwändigen und kostenintensiven Methoden verbunden ist, bietet die Phytoremediation eine umweltfreundliche und kostengünstige *in-situ* Alternative. (Garbisu und Alkorta 2001, S.229)

Neben anderen Prozessen spielen insbesondere Phytostabilisation und Phytoextraktion bei der Phytoremediation mithilfe von Halophyten eine wichtige Rolle. (Manousaki und Kalogerakis 2011, S.657)

Bei der Phytostabilisierung wird die Mobilität und Bioverfügbarkeit von Kontaminationen vermindert, indem die Pflanze diese in der Wurzelzone bindet und somit eine Migration in umgebende Bereiche, Grundwasser oder Atmosphäre verhindert. (Garbisu und Alkorta 2001, S.231; Schwitzguébel et al. 2009, S.7)

So sind die Wurzeln von *Salicornia* meist von einer Eisen(III)-oxid-hydroxidschicht ummantelt, die der Immobilisierung von anderen Metallen im Bodensubstrat dient (Hansel et al. 2001,

S.3863) und somit folglich die Pflanzenverfügbarkeit der Metalle durch die Bindung in der Wurzelzone für sich selbst erhöht. (Blute et al. 2004, S.6074)

Die Phytoextraktion nutzt Pflanzen, um Kontaminationen aus dem Substrat in den oberirdischen Pflanzenteilen zu akkumulieren und dann mit der Ernte der Pflanze von der Fläche zu beseitigen. (Kumar et al. 1995, S.1232-1233)

Unter der Phytoextraktion lässt sich auch die Phytodesalinisation anführen. Hierbei werden hyperakkumulierende Halophyten angepflanzt, um Natrium aus dem Boden zu beseitigen. (Zorrig et al. 2012, S.299)

Die Einsatzmöglichkeiten von *Salicornia* sind bei der Phytoremediation sehr vielseitig und auf viele verschiedene Kontaminationen anwendbar.

Als Hyperakkumulator akkumuliert *Salicornia* bis zu 300 mg Na⁺ pro g Trockenmasse in ihrem Spross, was ungefähr einem Drittel der Gesamtsprossmasse entspricht. (Lv et al. 2012, S.48)

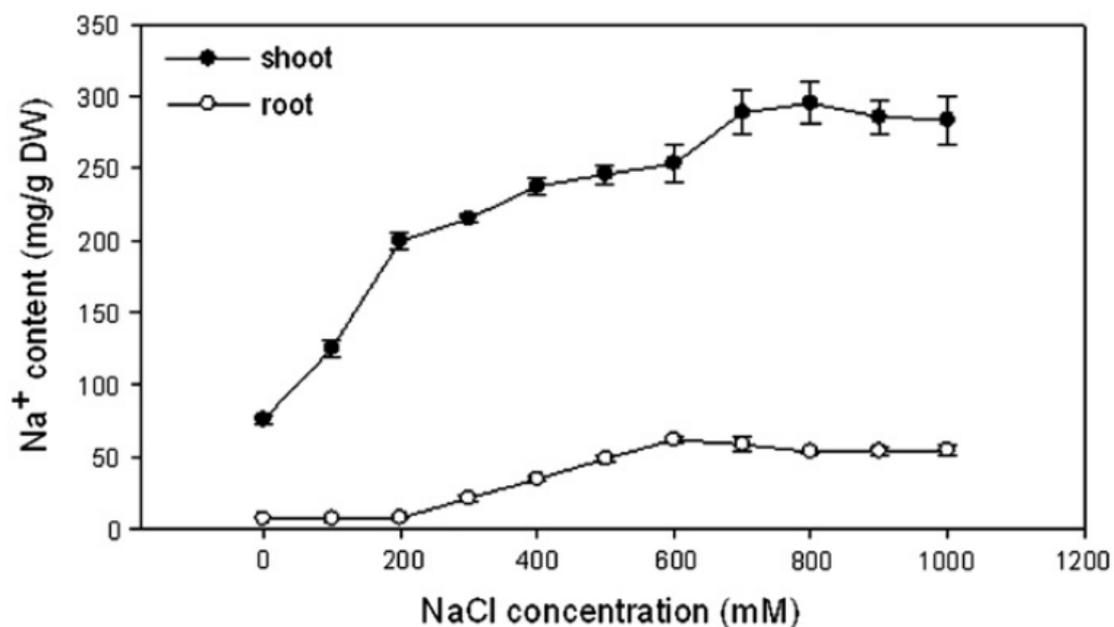


Abbildung 11: Na⁺-Gehalte in Spross und Wurzel von *Salicornia europaea* nach 21 Tagen Behandlung mit verschiedenen NaCl-Konzentrationen (Lv et al. 2012, S.49)

So kann *Salicornia* nicht nur Böden von überhöhten Salzgehalten befreien, sondern auch Abwässer aus der Industrie oder Aquakulturen filtrieren und reinigen, die ansonsten eine Bedrohung für die Umwelt darstellen und durch aufwändige Reinigungsverfahren von Verunreinigungen befreit werden müssen.

Ausgehend davon, dass sich diese Eigenschaft mit einem hohen Biomasseertrag vereinbaren lässt, können mithilfe von *Salicornia* sogenannte „Integrated Seawater Energy Agriculture

Systems“ entstehen, wie sie bereits in Mexico oder Abu Dhabi existieren. (Siehe 2.4.3. Ölsaar) (Panta et al. 2014, S.78; Reals 2015, S.20)

Aufgrund von Futterüberschuss und Exkrementen der kultivierten Organismen sind Abwässer aus Aquakulturen meist reich an Stickstoff und Phosphor, die durch den kombinierten Anbau mit *Salicornia* als Nährstoffe für die Pflanzen recycelt werden können. (Briggs und Funge-Smith 1994, S.803)

Hierzu werden die Pflanzen in nachgestellten, künstlich angelegten Sumpfgebieten angepflanzt, durch die das Abwasser der Fischzucht geleitet wird. (Buhmann und Papenbrock 2013, S.123) Anschließend werden die Pflanzen für die Produktion von Biokraftstoffen und anderen Produkten verwendet. (Hodges 2007, S.1)

Versuchen von Brown et al. (1999) zufolge ist *Salicornia* in der Lage, 98% des Gesamtstickstoffes und 99% des Gesamtphosphors aus Abwässern von Fisch- und Shrimpkulturen aufzunehmen. Zwar wurde durch zunehmende Salzgehalte in der Lösung die Effizienz des Reinigungseffekt gesteigert, die Gesamtnährstoffaufnahme wurde allerdings vermindert. Denn zu hohe Salzgehalte führen zu einer Inhibierung der Wachstumsrate, die in einem direkten Zusammenhang mit der Filterkapazität steht. (Brown et al. 1999, S.265)

Als weiteres Anwendungsbeispiel konnte Kannan et al. (2009) in seinen Versuchen demonstrieren, dass *Salicornia* außerdem als kostengünstige Reinigungsmethode in Gerbereien eingesetzt werden kann. Im Anschluss können die Pflanzen zur Konservierung der Produkte eingesetzt werden, indem mit den stark salzhaltigen Pflanzen eine Lösung angesetzt wird, in der die Felle und Häute eingelegt werden. (Kannan et al. 2009, S.6)

In den Versuchen konnte *Salicornia* 32-41% des Total Dissolved Solids (TDS), also der Gesamtheit aller gelösten anorganischen und organischen Stoffe, aufnehmen. (Kannan et al. 2009, S.3)

Des Weiteren zeigen Halophyten einige Vorteile gegenüber Glycophyten zur Phytoremediation von schwermetallbelasteten Flächen, da die Anwesenheit von Salzkationen in der Bodenlösung essentiell für die Translokation von der Wurzel in die oberirdischen Pflanzenorgane ist. Die Bioverfügbarkeit der Metalle im Boden wird durch die Salzkationen gesteigert, da das Salz die Metalle von Bindungsstellen in der Bodenmatrix verdrängt und in eine lösliche Form überführt. (Manousaki und Kalogerakis 2011, S.658)

So zeigte *Salicornia ramosissima* in Versuchen von Pedro et al. (2013) beste Eigenschaften für den erfolgreichen Einsatz zur Phytoremediation, indem es als Bioakkumulator von Cadmium diente. (Pedro et al. 2013, S.204)

Außerdem konnte Smilie (2015) im Rahmen von Experimenten zeigen, dass *Salicornia* sowohl zur Nutzung für Phytoextraktion als auch als „Biomonitor“ bzw. Indikator für den Gehalt von verschiedenen Schwermetallen geeignet ist. Während die Gehalte von Eisen (Fe) und Mangan (Mn) keine signifikante Beziehung zur Konzentration im Boden zeigten, spiegelten die Kupfer (Cu)- und Zink (Zn)-Gehalte die vorliegende Menge im Substrat wieder. Somit lässt sich anhand der Analyse der Pflanzen eine genaue Aussage über die Schwermetallkonzentrationen von Cu und Zn im Boden treffen. (Smilie 2015, S.76-77)

Abschließend lässt sich sagen, dass durch den Anbau von *Salicornia* kontaminierte Flächen nicht wieder gänzlich rehabilitiert werden können, allerdings können belastete Flächen wieder produktiv genutzt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Pflanzen, die für die Reinigung von schwermetallbelasteten Flächen genutzt wurden, aufgrund der Anreicherung von Metallen für den menschlichen oder tierischen Verzehr ungeeignet sind.

Gleiches gilt für Pflanzen, die mit Abwasser aus Aquakulturen bewässert wurden, da sich hier neben Schwermetallen auch Antibiotika akkumulieren können, die ein Gesundheitsrisiko darstellen könnten. Die Nutzung als Ölsaat zur Herstellung von Biokraftstoffen ist allerdings weiterhin unbedenklich, da die Akkumulation bedenklicher Stoffe sich meist auf die Sprossmasse beschränkt und nicht in Samen nachweisbar ist. (Buhmann und Papenbrock 2013, S.131)

5.6 Salz-recycling in „Bioregenerativen Life Support Systems“ (BLSS)

Dem Menschen gehen täglich 4-5g Natrium mit dem Urin verloren, die im Idealfall mithilfe einer ausgewogenen Ernährung kompensiert werden sollten. (White et al. 1968; Balnokin et al. 2010, S.768) Dies stellt normalerweise kein Problem dar, doch in geschlossenen Systemen, wie beispielsweise bei Langzeitaufenthalten in der Raumfahrt, sind viele Nährstoffe limitiert und müssen mithilfe von „Bioregenerativen Life Support Systemen“ (BLSS) recycelt und wieder zugeführt werden. (Tikhomirova et al. 2005, S.1591; Hauslage 2012, S.2)

BLSS sind biologische Lebenserhaltungssysteme, die dem Menschen eine autarke Versorgung mit Lebensmitteln und Frischwasser mithilfe von landwirtschaftlichen Projekten und Abfallverwertung ermöglichen sollen. (Carton et al. 2009, S.2)

Darüber hinaus scheidet der Mensch neben Natrium täglich ungefähr 30g Harnstoff mit 46% Stickstoff aus, was wiederum sinnvoll als Dünger für Pflanzen und Gemüse wiederverwertet werden kann und somit einen ressourcenschonenden Kreislauf von Nährstoffen bildet. (Hauslage 2012, S.2)

Salicornia zeigte in Versuchen von Tikhomirova et al. (2005) und Balnokin et al. (2010) beste Eigenschaften für die Integration in BLSS. Die bevorzugte Nutzung von Harnstoff als

Hauptstickstoffquelle, ihrer Fähigkeit, sich auch unter einer ständigen Beleuchtungsdauer von 24 Stunden ohne Produktionseinbußen zu entwickeln und die Akkumulation hoher Konzentrationen von NaCl in ihrem Spross, befähigen *Salicornia* zu optimalem Wuchs auf der Basis von menschlichem Urin. (Tikhomirova et al. 2011, S.381; Balnokin et al. 2010, S.773)

Unter optimalen Wachstumsbedingungen zeigte *Salicornia europaea* Frischmasseerträge von 180-240g pro Pflanze mit einem Natriumgehalt von ca. 2,03g. Folglich müsste ein Mensch täglich ungefähr 360g *Salicornia*-Frischmasse (ungefähr 2 Pflanzen) konsumieren, um seinen täglichen Verlust an 4-5g Natrium zu decken. (Balnokin et al. 2010, S.772)

Als weiteres Argument für die Eingliederung von *Salicornia* in BLSS lassen sich außerdem die in dem vorangegangenen Kapitel (2.4.1. Nahrungsmittel) beschriebenen gesundheitsfördernden Effekte anführen. Aufgrund der Inhaltsstoffe der Pflanze werden somit mit der Ernährung nicht nur Salze, sondern auch Antioxidantien, Vitamine, Zucker und ungesättigte Fettsäuren zugeführt. (Parida et al. 2002, S.33; Seo 2010, S.3; Ventura et al. 2011a, S.190)

In geschlossenen Systemen findet der Anbau der Pflanzen zur besseren Handhabung der Nährstoffkonzentration in hydroponischen Pflanzensystemen statt. (Tikhomirova et al. 2005, S.1590)

Ausgehend von einer Wachstumsperiode von 50 Tagen veranschaulicht Balnokin et al. (2010) anhand einer Hochrechnung, wie ein Produktionssystem für eine Person zur NaCl-Wiederverwertung in einem BLSS aussehen müsste:

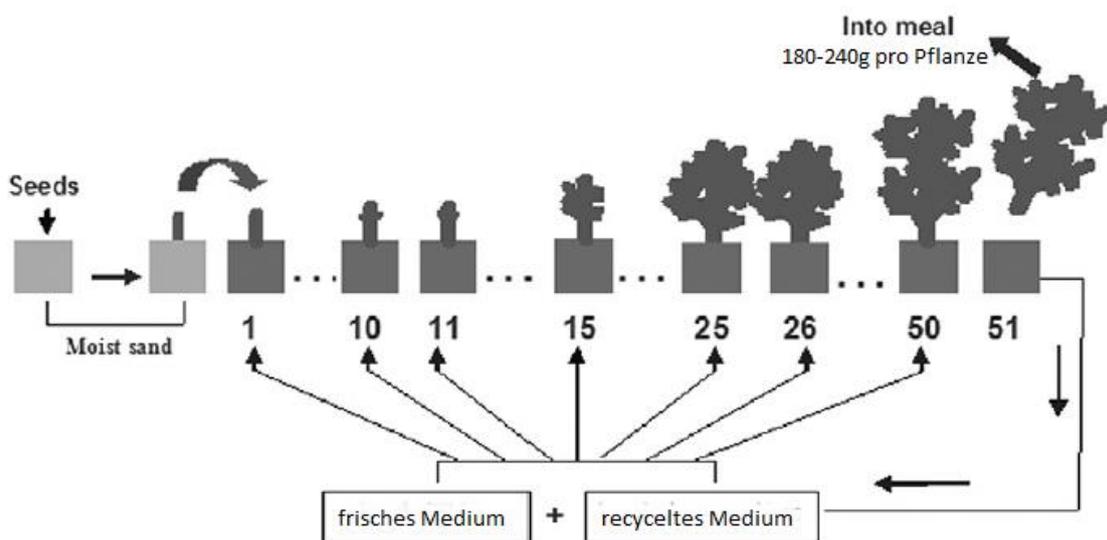


Abbildung 12: Produktionsschema für die Inklusion von *Salicornia* in einem BLSS (verändert nach: Balnokin et al. 2010, S.774)

Da jeden Tag zwei Pflanzen (360g) für die Ernährung benötigt werden, um die NaCl-Bilanz neutral zu halten, müssen 100 Pflanzen unterschiedlicher Entwicklungsstadien vorhanden sein, um eine tägliche Ernte zu ermöglichen. (Balnokin et al. 2010, S.772-773)

Je zwei Pflanzen werden pro Behälter (15 x 15 x 7,5cm) angepflanzt, was zu einem Flächenanspruch von ca. 0,9m² führt. (Balnokin et al. 2010, S.774)

Pro Pflanze werden während einer Vegetationsperiode insgesamt 3L Wasser evaporiert.

Da während dieser Zeit nur etwa ein Drittel des gesamten NaCl aus der Nährlösung entzogen wird, kann dieses nach der Ernte der Pflanzen weiterverwendet werden, da ein vollständiger Austausch größere Kapazitäten an Nährlösungen erfordern würde. (Balnokin et al. 2010, S.771+773) Dies hat zum Nachteil, dass sich somit im Nährmedium giftige Stoffwechselprodukte anreichern können. (Balnokin et al. 2010, S.773)

Um mögliche Schadstoffe und Keime zu mindern und eine bessere Stickstoffverfügbarkeit für Pflanzen zu gewährleisten, forscht das Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin an einem Biofiltersystem (C.R.O.P.® - Combined regenerative organic-food production) in Kombination mit hydroponischen Pflanzensystemen in BLSS. Das System basiert auf einer mit Lavagestein gefüllten Filterröhre, welches Lebensraum für viele Mikroorganismen bietet. Durch das vorherrschende Milieu werden Keime reduziert und es kommt zur Entgiftung von Schadstoffen durch mikrobiellen Abbau. (Hauslage 2012, S.2+7)

Da sich Harnstoff aus dem Urin in das pflanzenschädliche Ammoniak aufspaltet, muss dieses vor der Ausbringung zu Nitrat oxidiert werden, damit Stickstoff in einer pflanzenverfügbaren Form vorliegt. Dies wird durch die Aktivität von aeroben und anaeroben Organismen im Filtersystem gewährleistet. (Hauslage 2012, S.7)

Zwar kann *Salicornia* Nitrat als Stickstoffquelle nutzen, allerdings zeigte sie deutlich bessere Wachstumserfolge und NaCl-Aufnahme mit der Zudüngung von Stickstoff in Form von Harnstoff. (Tikhomirova et al. 2011, S.381)

6 Abschlussbetrachtung

Die Weltmarktpreise für fossile Rohstoffe, aber auch für Nahrungsmittel steigen kontinuierlich an, da einhergehend mit der wachsenden Weltbevölkerung auch die Nachfrage nach qualitativ hochwertigen Produkten aus der Landwirtschaft steigt. Gleichzeitig ist der zunehmende Verlust von Anbau- und Ackerflächen aufgrund von Versalzung und Einträgen aus Industrie und Landwirtschaft nicht länger nur ein Problem der Entwicklungsländer, sondern betrifft viele Gebiete weltweit. (Cunningham et al. 1995, S.393)

Ausgehend von den vielseitigen und weitreichenden Nutzungsmöglichkeiten und der hohen Produktion von *Salicornia*, könnte diese Pflanze potentiell eine wichtige Rolle in der ökonomischen Nutzung von Halophyten in der modernen Landwirtschaft spielen und einige ressourcenschonende Alternativen für Produkte von konventionellen Nutzpflanzen darstellen.

In der Öffentlichkeit ist *Salicornia* zwar noch weitestgehend unbekannt, doch die wichtigsten Kriterien, die Voraussetzung für den kommerziellen Anbau und eine Durchsetzung auf dem Weltmarkt sind, werden von ihr erfüllt.

So erreicht sie selbst mit der Bewässerung von Meerwasser noch Erträge, die genauso hoch sind, wie die von konventionellen Feldfrüchten, die mit Frischwasser bewässert wurden. Der Samenertrag übersteigt den von konventionellen Ölsaaten sogar deutlich. (Glenn et al. 1998, S.4)

Die Bewässerungsansprüche von *Salicornia* sind zwar deutlich höher als die von anderen Kulturpflanzen und auch in der Tiermast zeigten die Tiere eine erhöhte Wasseraufnahme durch den hohen Salzgehalt der Pflanzen. Da allerdings kein Frischwasser aus extremen Tiefen heraufgepumpt werden muss, kommt es in der Gesamtbilanz wiederum zu Kosteneinsparungen. (Swingle et al. 1996, S.143; Glenn et al. 1997, S.725)

Zuletzt kommt *Salicornia* für den kommerziellen Anbau zugute, dass alle Teile der Pflanze verwertbar und vielfältig und weitreichend in verschiedensten Bereichen einsetzbar sind.

In Anbetracht der vorliegenden Literatur und dem Stand der Forschung lässt sich außerdem schlussfolgern, dass *Salicornia* nicht mehr länger nur als Versuchspflanze in Experimenten und Gewächshäusern angebaut wird, sondern bereits in der Praxis großflächig angebaut und in vielen verschiedenen Bereichen Anwendung findet.

So ist in Israel der Anbau von *Salicornia* als Gemüsepflanze schon lange Realität. Forscher des „PERES Center for Peace“ entwickelten ein System, das die ganzjährige kommerzielle Produktion mit einem Ertrag von 9 t auf 700 m² ermöglicht. (Pohoryles 2007, S.6) Auch in Thoren, Niederlande verkauft das Unternehmen „GrovisCo“ *Salicornia*, die zuvor mit Abwasser bewässert wurde, auf Gemüsemärkten. (GrovisCo 2016)

Zahlreiche wissenschaftliche Studien belegen darüber hinaus gesundheitsfördernde Effekte von Spross und Öl, die schon durch die pharmazeutischen Anwendungen von Halophyten in der Antike angedeutet wurden und werben somit für die Etablierung von *Salicornia* als neues „super food“ auf dem Markt. (Parida und Das 2005, S.330; Seo 2010, S.3-5; Ventura et al. 2011a, S.190)

Des Weiteren kann *Salicornia* problemlos in Form von Stroh oder Samenmehl Anteile von bis zu 30% in Futtermitteln von Wiederkäuern einnehmen ohne jegliche Einbußen in Mastgewicht oder Schlachtkörperqualität. Insbesondere Tiere wie Ziegen und Schafe in Wüstengebieten zeigten beste Verträglichkeit und Leistung, da sie über bestimmte Pansenbakterien verfügen, die es ihnen ermöglicht, den in Halophyten schwer verfügbaren Stickstoff aufzuspalten und zu verwerten. (Swingle et al. 1996, S.136; Glenn et al. 1999, S.244)

Zu den vielversprechendsten Verwendungsmöglichkeiten zählt jedoch die Nutzung von *Salicornia* zur Produktion von Biokraftstoffen wie Biodiesel, Bioethanol und Biogas. Aufgrund ihrer Standort- und Bewässerungsansprüche steht *Salicornia* hierbei in keinerlei Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion und stellt zusätzlich durch die mögliche Mehrfachfachnutzung von Biomasse und Samen eine lukrative Alternative zu fossilen Brennstoffen dar. So schätzt Glenn et al. (1991), dass durch den großflächigen Anbau von *Salicornia* ca. 480.000 Quadratmeilen (ca. 124.319.429 ha) ungenutzte Fläche für die Landwirtschaft gewonnen werden könnte. Auf dieser Fläche ließe sich mithilfe von *Salicornia* genug Öl produzieren, um 35% des jährlichen Bedarfs an flüssigen Brennstoffen der USA zu decken. (Bassam 2010, S.317)

Insbesondere die Beteiligung von angesehenen Firmen wie Boeing, Etihad Airways, Lufthansa und der US Air Force an Projekten wie den „Integrated Seawater Energy Agricultural System“ in Abu Dhabi und Mexiko lässt auf eine zukunftsnahe Durchsetzung von *Salicornia* als nachwachsenden Rohstoff hoffen. So ließ „Global Seawater Inc.“ in den kargen Küstenregionen des kalifornischen Golfstromes in Sonora, Mexico bereits auf 5.000 Hektar „Seawater Farms“ entstehen, die aus einer Kombination von Aquakulturen und Landwirtschaft bestehen und *Salicornia*-Pflanzen als Biofilter von Abwasser und zur Herstellung von Biokraftstoffen nutzen. (Hodges 2007, S.1)

Auch in Rotterdam nutzt die „Happy Shrimp Farm“ *Salicornia*, um Abwasser aus Aquakulturen zu recyceln. (Buhmann und Papenbrock 2013, S.130)

Aber nicht nur im Rahmen von ISEAS oder Aquakulturen lässt sich die Filterwirkung von *Salicornia* nutzen, sondern auch zum Zwecke der Phytoremediation von salz- oder schwermetallbelasteten Böden. Denn *Salicornia* ist als Hyperakkumulator in der Lage, große Mengen an Schwermetallen und Salz aufzunehmen und im Spross zu speichern. (Lv et al. 2012, S.48; Pedro et al. 2013, S.204) Zwar ist hierbei fraglich, ob Flächen durch den Anbau

von *Salicornia* wieder vollkommen rehabilitiert werden können. Allerdings ist es eine kostengünstige Alternative zu aufwändigen Reinigungsmethoden und eine Möglichkeit, belastete Flächen wieder produktiv zu nutzen.

Eine weitere Verwendungsmöglichkeit von *Salicornia* in BLSS scheint vielleicht weniger realitätsnah für die breite Gesellschaft, für die Raumfahrt bietet sie allerdings einen vielversprechenden Ansatz und findet vielleicht auch irgendwann in dicht besiedelten Räumen Anwendung, um dort die Abwasserentsorgung zu minimieren und eine autarke Versorgung mit Frischwasser und Gemüse zu gewährleisten.

Letztlich gilt es jedoch trotz der vielversprechenden Ansätze, die zur Etablierung von *Salicornia* auf dem Agrarmarkt und in unserer Gesellschaft beitragen, noch einige Gesichtspunkte zu verbessern und auszubauen.

In erster Linie muss mittels Züchtung produktives und einheitliches Pflanzenmaterial gezüchtet werden, um vorhersehbare und gleichmäßig qualitativ hochwertige Produkte zu erhalten. Denn aufgrund der unregelmäßigen Abreife gehen bei der mechanischen Ernte bis zu 50% des potentiellen Ertrages verloren und die arbeitsintensive Ernte per Hand ist wenig lukrativ. (Glenn et al. 2013, S.113)

Darüber hinaus sind Biokraftstoffe bislang noch deutlich teurer als fossile Kraftstoffe und dürfen in der Luftfahrt nur zu Anteilen von maximal 50% zu herkömmlichen Kerosin beigemischt werden. (aireg e.V. 2012, S.15) Erst ein Ausbau der Produktion und des Anbaus könnte dazu beitragen, dass die Preise für Biokraftstoffe wettbewerbsfähig werden und die Nachfrage gesteigert würde.

Zuletzt müssten auch in der Landtechnik und in der Industrie geeignete Maschinen entwickelt werden, die durch die hohen Salzgehalte der Bewässerung und der Ernteprodukte keinen Schaden nehmen und an die Besonderheiten von Ernte und Verarbeitung der Pflanzen angepasst sind. Somit soll eine ertragreiche mechanische Ernte, eine Bewässerung mit salzhaltigem Wasser oder auch ein Pumpsystem für Meerwasser und die Verarbeitung der Halophyten ermöglicht werden.

Abschließend lässt sich sagen, dass das vielversprechende Potential von *Salicornia* bereits von vielen Wissenschaftlern, Firmen und Einrichtungen erkannt wurde. Im Rahmen verschiedenster Studien und Projekte konnte bewiesen werden, dass diese Pflanze eine sinnvolle und ressourcenschonende Alternative zu konventionellen Nutzpflanzen darstellt und längst in vielen Ländern in großem Maßstab angebaut wird. Mithilfe der Entwicklung geeigneter Systeme können somit karge Wüstengebiete, Küstenregionen und stark verunreinigte Wasserquellen für die Landwirtschaft nutzbar gemacht werden. Ein Gewinn für die moderne Landwirtschaft nicht nur in Entwicklungsländern und ariden Gebieten, sondern weltweit für den Umweltschutz und die Luft- und Raumfahrt.

Literaturverzeichnis

- aireg e.V. (2012): Klimafreundlicher Fliegen. Zehn Prozent alternative Flugkraftstoffe 2025. Hg. v. Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V.
- Anwar, Farooq; Bhangar, M. I.; Nasir, M. Khalil A.; Ismail, Sarwat (2002): Analytical Characterization of *Salicornia bigelovii* Seed Oil Cultivated in Pakistan. J. Agric. Food Chem. 50 (15): S. 4210–4214. DOI: 10.1021/jf0114132.
- Ashraf, Muhammad; Fang, Chuanji; Bochenski, Tomasz; Cybulska, Iwona; Alassali, Ayah; Sowunmi, Akinleye et al. (2016): Estimation of Bioenergy Potential for Local Biomass in the United Arab Emirates. Emir. J. Food Agric: S. 99-106. DOI: 10.9755/ejfa.2015-04-060.
- Attia, F. M.; Alsobayel, A. A.; Kriadees, M. S.; Al-Saiady, M. Y.; Bayoumi, M. S. (1997): Nutrient composition and feeding value of *Salicornia bigelovii* torr meal in broiler diets. Animal Feed Science and Technology 65 (1-4): S. 257–263. DOI: 10.1016/S0377-8401(96)01074-7.
- Balnokin, Yurii; Nikolai, Myasoedov; Larisa, Popova; Alexander, Tikhomirov; Sofya, Ushakova; Christophe, Lasseur; Jean-Bernard, Gros (2010): Use of halophytic plants for recycling NaCl in human liquid waste in a bioregenerative life support system. Advances in Space Research 46 (6): S. 768–774. DOI: 10.1016/j.asr.2010.03.020.
- Bassam, N. E. (2010): Handbook of Bioenergy Crops: A Complete Reference to Species, Development and Applications: Taylor & Francis. Routledge.
- Batanouny, Kamal H. (1996): Ecophysiology of Halophytes and their traditional use in the arab world: S.73-94. In: Halophytes and biosaline agriculture. Redouane Choukr-Allah (Hg.). 1. print. New York: Dekker.
- Blute, Nicole Keon; Brabander, Daniel J.; Hemond, Harold F.; Sutton, Stephen R.; Newville, Matthew G.; Rivers, Mark L. (2004): Arsenic Sequestration by Ferric Iron Plaque on Cattail Roots. Environ. Sci. Technol. 38 (22): S. 6074–6077. DOI: 10.1021/es049448g.
- Briggs, M.R.P.; Funge-Smith, S. J. (1994): A nutrient budget of some intensive marine shrimp ponds in Thailand. Aquaculture Res 25 (8): S. 789–811. DOI: 10.1111/j.1365-2109.1994.tb00744.x.
- Brown, J.Jed; Glenn, Edward P.; Fitzsimmons, Kevin M.; Smith, Steven E. (1999): Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. Aquaculture 175 (3-4): S. 255–268. DOI: 10.1016/S0044-8486(99)00084-8.

- Buhmann, Anne; Papenbrock, Jutta (2013): Biofiltering of aquaculture effluents by halophytic plants. Basic principles, current uses and future perspectives. *Environmental and Experimental Botany* 92: S. 122–133. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012.07.005.
- Carton, Matthew; Fanchiang, Christine; Hale, Griffin; Hava, Heather; Havens, Keira; Holquist, Jordan (2009): Bioregenerative Life Support System (BLSS) for Long Duration Human Space Missions. Hg. v. University of Colorado Boulder.
- Choukr-Allah, Redouane (1996): The Potential of Halophytes in the Development and Rehabilitation of arid and semi-arid zones. S.3-13 In: *Halophytes and biosaline agriculture*. Redouane Choukr-Allah (Hg.): 1. print. New York: Dekker.
- Christie, Bertram R. (Hg.) (1987): *CRC handbook of plant science in agriculture*. Boca Raton, Fla.: CRC Pr (CRC series in agriculture).
- Cunningham, Scott D.; Berti, William R.; Huang, Jianwei W. (1995): Phytoremediation of contaminated soils. *Trends in Biotechnology* 13 (9): S. 393–397.
DOI: 10.1016/S0167-7799(00)88987-8.
- Cybulska, Iwona; Chaturvedi, Tanmay; Brudecki, Grzegorz P.; Kádár, Zsófia; Meyer, Anne S.; Baldwin, Robert M.; Thomsen, Mette Hedegaard (2014): Chemical characterization and hydrothermal pretreatment of *Salicornia bigelovii* straw for enhanced enzymatic hydrolysis and bioethanol potential. *Bioresource Technology* (153): S. 165–172.
- Davy, A. J.; Bishop, G. F.; Costa, C. S. (2001): *Salicornia* L. (*Salicornia pusilla* J. Woods, *S. ramosissima* J. Woods, *S. europaea* L., *S. obscura* P.W. Ball & Tutin, *S. nitens* P.W. Ball & Tutin, *S. fragilis* P.W. Ball & Tutin and *S. dolichostachya* Moss). *Journal of Ecology* 89 (219): S. 681–707.
- Falasca, S. L.; Ulberich, A.; Acevedo, A. (2014): Identification of Argentinian saline drylands suitable for growing *Salicornia bigelovii* for bioenergy. *International Journal of hydrogen energy* 39 (16): S. 8682–8689.
- FAO: Extent of salt-affected soils. Hg. v. FAO. Online verfügbar: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/more-information-on-salt-affected-soils/en/> [Stand: 05.09.2016].
- Flowers, T. J. (1985): Physiology of halophytes. *Plant Soil* 89 (1-3): S. 41–56.
DOI: 10.1007/BF02182232.
- Flowers, T. J.; Yeo, A. R. (1995): Breeding for Salinity Resistance in Crop Plants. Where Next? *Aust J Plant Physio.* 22 (6): S. 875. DOI: 10.1071/PP9950875.
- Flowers, Timothy J.; Colmer, Timothy D. (2008): Salinity tolerance in halophytes. *The New phytologist* 179 (4): S. 945–963. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2008.02531.x.

- Garbisu, Carlos; Alkorta, Itziar (2001): Phytoextraction. A cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology* 77 (3): S. 229–236. DOI: 10.1016/S0960-8524(00)00108-5.
- Glenn, Edward; Brown, J. Jed; O'Leary, James W. (1998): Irrigating Crops with Seawater. *Scientific American* (279): S. 30.
- Glenn, Edward P.; Anday, Tekie; Chaturvedi, Rahul; Martinez-Garcia, Rafael; Pearlstein, Susanna; Soliz, Deserie et al. (2013): Three halophytes for saline-water agriculture. An oilseed, a forage and a grain crop. *Environmental and Experimental Botany* 92: S. 110–121. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012.05.002.
- Glenn, Edward P.; Brown, J. Jed; Blumwald, Eduardo (1999): Salt Tolerance and Crop Potential of Halophytes. *Critical Reviews in Plant Sciences* 18 (2): S. 227–255 DOI: 10.1080/07352689991309207.
- Glenn, Edward P.; Miyamoto, Seiichi; Moore, David; Brown, J. Jed; Thompson, T. Lewis; Brown, Paul (1997): Water requirements for cultivating *Salicornia bigelovii* Torr. with seawater on sand in a coastal desert environment. *Journal of Arid Environments* (36): S. 711–730.
- Glenn, Edward P.; O'Leary, James W.; Watson, M. Carolyn; Thompson, T. Lewis; Kuehl, Robert O. (1991): *Salicornia bigelovii* Torr.: An Oilseed Halophyte for seawater irrigation. *Science* (251): S. 1065–1067.
- Gorham, John (1996): Mechanisms of Salt Tolerance of Halophytes. S.31-53. In: Halophytes and biosaline agriculture. Redouane Choukr-Allah (Hg.). 1. print. New York: Dekker.
- Grattan, S. R.; Grieve, C. M. (1992): Mineral element acquisition and growth response of plants grown in saline environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 38 (4): S. 275–300. DOI: 10.1016/0167-8809(92)90151-Z.
- Greenway, H.; Osmond, C. B. (1972): Salt Responses of Enzymes from Species Differing Salt Tolerance. *Plant Physiology* (49): S. 256–259.
- GrovisCo (2016): Projecten. Hg. v. Groente en Viskwekerij Cornelisse B.V. Online verfügbar unter <http://www.grovisco.eu/projecten/> [Stand: 06.09.2016].
- Hansel, Colleen M.; Fendorf, Scott; Sutton, Steve; Newville, Matt (2001): Characterization of Fe Plaque and Associated Metals on the Roots of Mine-Waste Impacted Aquatic Plants. *Environ. Sci. Technol.* 35 (19): S. 3863–3868. DOI: 10.1021/es0105459.
- Hauslage, Jens (2012): C.R.O.P.: Combined regenerative organic-food production. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Köln. Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin.

-
- Hendricks, Robert C.; Bushnell, Dennis M.; Shouse, Dale T. (2011): Aviation Fueling. A Cleaner, Greener Approach. *International Journal of Rotating Machinery* 2011 (5): S. 1–13. DOI: 10.1155/2011/782969.
- Hodges, Carl N. (2007): Global Warming: Effect, Solution, Opportunity. *Seawater Farms Bahia Kino, Mexico*.
- Huesemann, Michael H.; Hausmann, Tom S.; Fortman, Tim J.; Thom, Ronald M. (2003): Using Eelgrass (*Zostera marina*) for Phytoremediation of PAH-contaminated marine sediments. *Battelle – Marine Sciences Laboratory Sequim*.
- International Center for Biosaline Agriculture (ICBA) (2007): Optimizing management practices for maximum production of two salt-tolerant grasses. *Annual Report 2006*.
- Kadereit, Gudrun; Ball, Peter; Beer, Svetlana; Mucina, Ladislav; Sokoloff, Dmitry; Teege, Patrick et al. (2007): A taxonomic nightmare comes true: phylogeny and biogeography of glassworts (*Salicornia L.*, Chenopodiaceae). *TAXON* 56 (4): S. 1143–1170.
- Kannan, Ramesh P.; Kanth, Swarna V.; Chandrasekaran, B.; Raghavarao, J.; Gnanasekaran, C. S.; Rengasamy, R. (2009): Phytoremediation of tannery wastewater treated lands: Part 1: Accumulation of Na⁺ and Cl⁻ in *Salicornia Brachiata*. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists* 6 (93): S. 233–239.
- Katschnig, Diana; Broekman, Rob; Rozema, Jelte (2013): Salt tolerance in the halophyte *Salicornia dolichostachya* Moss. Growth, morphology and physiology. *Environmental and Experimental Botany* 92: S. 32–42. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012.04.002.
- Koyro, Hans-Werner; Khan, M. Ajmal; Lieth, Helmut (2011): Halophytic crops: A resource for the future to reduce the water crisis? *Emirates Journal of Food and Agriculture* (23): S. 1–16.
- Kumar, P. B.; Dushenkov, V.; Motto, H.; Raskin, I. (1995): Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental science & technology* 29 (5): S. 1232–1238. DOI: 10.1021/es00005a014.
- Lüttge, Ulrich; Kluge, Manfred (2012): *Botanik. Die einführende Biologie der Pflanzen*. 6. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH.
- Lv, Sulian; Jiang, Ping; Chen, Xianyang; Fan, Pengxiang; Wang, Xuchu; Li, Yinxin (2012): Multiple compartmentalization of sodium conferred salt tolerance in *Salicornia europaea*. *Plant physiology and biochemistry : PPB / Société française de physiologie végétale* 51: S. 47–52. DOI: 10.1016/j.plaphy.2011.10.015.

-
- Manousaki, Eleni; Kalogerakis, Nicolas (2011): Halophytes Present New Opportunities in Phytoremediation of Heavy Metals and Saline Soils. *Ind. Eng. Chem. Res.* 50 (2): S. 656–660. DOI: 10.1021/ie100270x.
- Milner, C. (1992): Saline agriculture: Salt-tolerant plants for developing countries (report of a panel of the board of science and technology for international development office of international affairs national research council). national academy press.
- Mudie, Petra J.; Greer, Sheila; Brakel, Judith; Dickson, James H.; Schinkel, Clara; Peterson-Welsh, Ruth et al. (2005): Forensic palynology and ethnobotany of *Salicornia* species (Chenopodiaceae) in northwest Canada and Alaska. *Can. J. Bot.* 83 (1): S. 111–123. DOI: 10.1139/b04-159.
- Norman, Hayley C.; Masters, David G.; Barrett-Lennard, Edward G. (2013): Halophytes as forages in saline landscapes. Interactions between plant genotype and environment change their feeding value to ruminants. *Environmental and Experimental Botany* 92: S. 96–109. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012.07.003.
- Panta, Suresh; Flowers, Tim; Lane, Peter; Doyle, Richard; Haros, Gabriel; Shabala, Sergey (2014): Halophyte agriculture. Success stories. *Environmental and Experimental Botany* 107: S. 71–83. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2014.05.006.
- Parida, Asish; Das, Anath Bandhu; Das, Premananda (2002): NaCl stress causes changes in photosynthetic pigments, proteins, and other metabolic components in the leaves of a true mangrove, *Bruguiera parviflora*, in hydroponic cultures. *J. Plant Biol.* 45 (1): S. 28–36. DOI: 10.1007/BF03030429.
- Parida, Asish Kumar; Das, Anath Bandhu (2005): Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and environmental safety* 60 (3): S. 324–349. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2004.06.010.
- Pasternak, D.; Malach, Y. de (1995): Irrigation with brackish water under desert conditions X. Irrigation management of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mills) on desert sand dunes. *Agricultural Water Management* 28 (2): S. 121–132. DOI: 10.1016/0378-3774(95)01171-E.
- Patel, Seema (2016): *Salicornia*. Evaluating the halophytic extremophile as a food and a pharmaceutical candidate. *3 Biotech* 6 (1): S.1-10. DOI: 10.1007/s13205-016-0418-6.
- Pedro, Carmen A.; Santos, Márcia S.S.; Ferreira, Susana M.F.; Concales, Sílvia C. (2013): The influence of cadmium contamination and salinity on the survival, growth and phytoremediation capacity of the saltmarsh plant. *Marine environmental research* (92): S. 197–205.

-
- Pfeuffer, M.; Fielitz, K.; Helwig, U.; Winkler, P.; Laue, C.; Rubin, D. et al. (2007): Wirkung von konjugierter Linolsäure im Vergleich zu Distelöl auf endotheliale Funktion sowie Körpergewicht und verschiedene Entzündungsparameter bei übergewichtigen Männern. *Akt Ernähr Med* 32 (05). DOI: 10.1055/s-2007-992286.
- Pohoryles, Samuel (2007): *The Culture of Water; Final Report of the First Stage 2003-2007.* The Andreas Agricultural Development Trust.
- Raven, John A. (1985): Regulation of pH and generation of osmolarity in vascular plants: A cost-benefit analysis in relation to efficiency of use of energy, nitrogen and water. *New Phytologist* (101): S. 25–77.
- Reals, Kelly (2015): *Salicornia Dreaming.* Flight International 2014, 28.04.2015 (5436): S. 20–21.
- Rozema, Jelte; Muscolo, Adele; Flowers, Tim (2013): Sustainable cultivation and exploitation of halophyte crops in a salinising world. *Environmental and Experimental Botany* 92: S. 1–3. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2013.02.001.
- Schilling, Günther; Kerschberger, Manfred (2000): *Pflanzenernährung und Düngung.* 164 Tabellen. Stuttgart: Ulmer (UTB für Wissenschaft Agrarwissenschaften, 8189).
- Schippmann, Uwe; Leaman, Danna; Cunningham, A. B. (2006): A Comparison of Cultivation and Wild Collection of Medicinal and Aromatic Plants Under Sustainability Aspects. Robert J. Bogers, Lyle E. Craker und Dagmar Lange (Hg.): *Medicinal and Aromatic Plants*, Bd. 17. Dordrecht: Springer Netherlands (Wageningen UR Frontis Series): S. 75–95.
- Schwitzguébel, J.-P.; Kumpiene, J.; Comino, E.; Vanek, T. (2009): From green to clean: a promising and sustainable approach towards environmental remediation and human health for the 21st century. *Agrochimika* (53): S.1-29.
- Seo, Ha Na (2010): Effect of Glasswort (*Salicornia herbacea L.*) on Microbial Community Variations in the Vinegar-making Process and Vinegar Characteristics. *J. Microbiol.Biotechnol.* 20 (9): S. 1322–1330. DOI: 10.4014/jmb.1003.03041.
- Singh, D.; Buhmann, A. K.; Flowers, T. J.; Seal, C. E.; Papenbrock, J. (2014): *Salicornia* as a crop plant in temperate regions. Selection of genetically characterized ecotypes and optimization of their cultivation conditions. *AoB PLANTS* 6: S. 1-20. DOI: 10.1093/aobpla/plu071.
- Smilie, C. (2015): *Salicornia spp.* as a biomonitor of Cu and Zn in salt marsh sediments. *Ecological indicators* 56: S. 70–78.

- Squires, Victor R.; Ayoub, Ali T. (1994): Halophytes as a resource for livestock and for rehabilitation of degraded lands. Dordrecht: Springer Netherlands (Tasks for Vegetation Science, 0167-9406, 32).
- Sustainable Bioenergy Research Consortium (SBRC) (Hg.) (2014): Growing Sustainable Fuel in the Desert.
- Swingle, R. S.; Glenn, E. P.; Squires, V. (1996): Growth performance of lambs fed mixed diets containing halophyte ingredients. *Animal Feed Science and Technology* 63 (1-4): S. 137–148. DOI: 10.1016/S0377-8401(96)01018-8.
- Tikhomirova, N. A.; Ushakova, S. A.; Kovaleva, N. P.; Gribovskaya, I. V.; Tikhomirov, A. A. (2005): Influence of high concentrations of mineral salts on production process and NaCl accumulation by *Salicornia europaea* plants as a constituent of the LSS phototroph link. *Advances in Space Research* 35 (9): S. 1589–1593. DOI: 10.1016/j.asr.2005.01.055.
- Tikhomirova, N. A.; Ushakova, S. A.; Kudenko, Yu.A.; Gribovskaya, I. V.; Shklavtsova, E. S.; Balnokin, Yu.V. et al. (2011): Potential of salt-accumulating and salt-secreting halophytic plants for recycling sodium chloride in human urine in bioregenerative life support systems. *Advances in Space Research* 48 (2): S. 378–382. DOI: 10.1016/j.asr.2011.03.016.
- Türkan, Ismail; Demiral, Tijen (2009): Recent developments in understanding salinity tolerance. *Environmental and Experimental Botany* 67 (1): S. 2–9. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2009.05.008.
- Ventura, Yvonne; Sagi, Moshe (2013): Halophyte crop cultivation. The case for *Salicornia* and *Sarcocornia*. *Environmental and Experimental Botany* 92: S. 144–153. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012.07.010.
- Ventura, Yvonne; Wuddineh, Wegi A.; Myrzabayeva, Malika; Alikulov, Zerekbay; Khozin-Goldberg, Inna; Shpigel, Muki et al. (2011a): Effect of seawater concentration on the productivity and nutritional value of annual *Salicornia* and perennial *Sarcocornia* halophytes as leafy vegetable crops. *Scientia Horticulturae* 128 (3): S. 189–196. DOI: 10.1016/j.scienta.2011.02.001.
- Ventura, Yvonne; Wuddineh, Wegi A.; Shpigel, Muki; Samocha, Tzachi M.; Klim, Brandon C.; Cohen, Shabtai et al. (2011b): Effects of day length on flowering and yield production of *Salicornia* and *Sarcocornia* species. *Scientia Horticulturae* 130 (3), S. 510–516. DOI: 10.1016/j.scienta.2011.08.008.

- Waisel, Yoav (1972): Biology of halophytes. Oxford: Elsevier Science (Physiological ecology).
Online <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10700935>
[Stand: 12.9.2016].
- White, Abraham; Philip, Handler; Smith, Emil L. (1968): Principles of Biochemistry.
4. Aufl. New York.
- Zerai, Desale B.; Glenn, Edward P.; Chattervedi, Rahul; Lu, Zhongjin; Mamood, Amed N.;
Nelson, Stephen G.; Ray, Dennis T. (2010): Potential for the improvement of *Salicornia
bigelovii* through selective breeding. Ecological engineering: the journal of
ecotechnology 36 (5), S. 730–739.
- Zhu, Jiang-Kang (2001): Plant Salt Tolerance. Trends in Plant Science 6 (2), S. 66–71.
- Zorrig, Walid; Rabhi, Mokded; Ferchichi, Siwar; Smaoui, Abderrazak; Abdelly, Chedly (2012):
Phytodesalination: a Solution for Salt-affected Soils in Arid and Semi-arid Regions.
Journal of Arid Lands (22).