

Gentechnik-Nachrichten Spezial 15

Februar 2004

Transgene dürre- und salztolerante Pflanzen

INHALT

Einleitung	2
Zunehmender Wassermangel und Ernährungssicherung	2
Die zunehmende Versalzung landwirtschaftlicher Nutzfläche	2
Überlebensstrategien der Pflanzen bei Wassermangel und Bodenversalzung	3
Die abiotischen Stressfaktoren Wassermangel und Bodenversalzung	3
Morphologische Schutzmechanismen	4
Physiologische Schutzmechanismen	5
Forschungsaktivitäten zu transgenen dürre- und salztoleranten Pflanzen.....	6
Funktionale Proteine	6
Osmoprotektoren.....	6
Schutzfaktoren der Makromoleküle.....	9
Proteine der Zellmembran.....	9
Detoxifikationsenzyme	10
Regulative Proteine.....	11
Transkriptionsfaktoren.....	11
Perspektiven und Risiken	11
Können transgene Nutzpflanzen einen wesentlichen Beitrag zur Sicherung der Welternährung leisten ?	11
Spezifische Risiken transgener dürre- und salztoleranter Nutzpflanzen.....	13
Alternative Lösungen zur Gentechnik.....	13
Quellen.....	15

Einleitung

Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Verknappung der weltweiten Wasserressourcen wird in vielen Ländern an der Entwicklung von transgenen dürrerotoleranten Pflanzen geforscht. Aufgrund der weiten Verbreitung versalzter Böden in ariden und semi-ariden Regionen, häufig verursacht durch unsachgemäße Bewässerung, spielt auch die Herstellung von salztoleranten Pflanzen durch die Gentechnik eine immer größere Rolle¹.

Der Kenntnisstand über die vergleichsweise komplexen physiologischen und biochemischen Mechanismen, die bei Pflanzen zu Toleranzen gegenüber abiotischen Stressfaktoren führen, ist nach wie vor relativ gering. Entsprechende Eigenschaften beruhen höchstwahrscheinlich auf einer Vielzahl von Genen und komplexen Regulationsmechanismen. Deshalb hatte die Entwicklung von transgenen stresstoleranten Nutzpflanzen lange Zeit nur eine geringe Bedeutung. In den letzten Jahren wurden allerdings erhöhte Forschungsanstrengungen zur Herstellung von stresstoleranten transgenen Pflanzen unternommen (Schmitz & Schütte 2000).

Mit einer Marktreife der ersten transgenen stresstoleranten Sorten kann allerdings frühestens in fünf bis zehn Jahren gerechnet werden. Freisetzungsversuche werden bisher nur in sehr geringem Umfang durchgeführt.

Zunehmender Wassermangel und Ernährungssicherung

Weltweit ist das Wasserangebot der wichtigste landwirtschaftliche Produktionsfaktor. In Zukunft wird deshalb Wasser der limitierende Faktor für eine Erhöhung der Nahrungsmittelproduktion sein. Mindestens 70% des weltweiten Wasserverbrauchs entfällt derzeit auf die landwirtschaftliche Produktion¹ (Inocencio et al. 2003). Derzeit werden etwa 18% der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche weltweit bewässert. Dies entspricht einer Fläche von über 240 Millionen Hektar. Auf dieser Fläche werden etwa 40% der globalen Nahrungsmittel produziert (Supper 2003; Somerville & Briscoe 2001).

Vor allem in einigen südlichen Entwicklungsländern herrscht Wasserknappheit. Die fortschreitende Inanspruchnahme der Grundwasserleiter, steigende Konkurrenz um Wasserressourcen und die Klimaerwärmung werden in Zukunft weiter zunehmen. Ständiger Wassermangel und häufige auftretende Dürreperioden bedrohen besonders die Kapazität des afrikanischen Kontinents, seine Bevölkerung ausreichend zu ernähren. Laut „Global Environment Outlook 2000“ der UN werden im Jahr 2025 insgesamt 25 Länder Afrikas von akutem Wassermangel oder zumindest von einer angespannten Situation betroffen sein. Heute befinden sich mindestens schon 14 Länder in dieser Lage. Auch in weiten Teilen Asiens ist die Versorgungssituation mit Süßwasser bereits ein akutes Problem¹. Eine Studie des „International Water Management Institute“ (IWMI) besagt, dass im Jahr 2025 ein Drittel der Erdbevölkerung in wasserarmen Regionen leben wird².

Auch in den südlichen Staaten der USA kam es aufgrund von Dürreperioden in den letzten vier Jahren zu einer Verknappung der Wasservorräte. Erstmals wurden 2001 Landwirte in Georgia dafür bezahlt, dass sie auf eine Bewässerung der Felder verzichteten (N.N. 2002).

Die zunehmende Versalzung landwirtschaftlicher Nutzfläche

Unter Versalzung versteht man die Anreicherung von wasserlöslichen Salzen im Boden. Die wichtigsten Salze sind in diesem Zusammenhang Natriumchlorid (NaCl), Natriumcarbonat (Na₂CO₃) und zum Teil auch Kalziumchlorid (CaCl₂). Neben natürlichen Bodenversalzungen, die hauptsächlich durch kapillaren Aufstieg und anschließende Verdunstung von salzhaltigem Bodenwasser entstehen (das Salz verbleibt im Boden), kommt es auch zu anthropogen verursachten Versalzungsschäden. Besonders die Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen in ariden Gebieten führt zur Versalzung: Durch die Bewässerung wird der Grundwasserspiegel angehoben, was einen Anstieg der Verdunstung

¹ <http://www.whybiotech.com/index.asp?id=2967>

² <http://www.iwmi.cgiar.org/water/Achieve2.htm>

zur Folge hat. Zudem wird der Versalzungsprozess dadurch verstärkt, indem für die Bewässerung fast ausschließlich Grund- und Oberflächenwasser verwendet wird, das im Vergleich zu Regenwasser deutlich höhere Salzgehalt aufweist (Supper 2003). Die Versalzung landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Bewässerung nimmt derzeit stetig zu. In Zukunft wird mit dem zunehmendem globalen Wassermangel auch eine Verschlechterung der Qualität des Beregnungswassers einhergehen. Höhere Salzgehalte lassen dann die beregneten Flächen noch schneller versalzen (Lewis 2002). Große Probleme mit versalzten Böden haben vor allem China, Indien, Thailand, Indonesien, Australien und eine Reihe von Regionen in Zentralasien. In China wurden 1998 rund 52,3 Millionen Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche beregnet. Aufgrund von Versalzungen werden auf 40% dieser Flächen nur verminderte Erträge erzielt (Hu 2003). Natürlich vorkommende Salzböden finden sich häufig in Küstenregionen. In einigen Ländern wie Ägypten oder Israel erschwert in machen Regionen salzhaltiges Grundwasser den Anbau von Nutzpflanzen.

In den USA sind versalzten Böden für eine jährliche Ertragsminderung von schätzungsweise insgesamt 25% verantwortlich, so der Wissenschaftler Richard R.-C. Wang, der an der Entwicklung von salztolerantem Weizen arbeitet. Im westlichen Teil der USA wird zum Beispiel ein großflächiger Getreideanbau mit künstlicher Bewässerung betrieben. In solchen nicht nachhaltig bewirtschafteten und von zunehmender Versalzung bedrohten Anbaugebieten besteht ein großes ökonomisches Interesse an der Entwicklung von transgenen salztoleranten Kulturpflanzen (Wood 2003).

Eine Erhöhung des Salzgehaltes im Boden führt nicht nur zu direkten Schädigungen der Pflanzen, sondern ist stets auch mit einer Erhöhung des pH-Wertes im Boden verbunden. Dies ist insofern problematisch, weil nur wenige Nutzpflanzen auf alkalischen Böden gut gedeihen. Versalzungen tragen zudem zur Destabilisierung des Bodengefüges bei, was Oberbodenverschlammungen und eine Verminderung des Gasaustausches im Boden zur Folge haben kann. Eine drastische Verringerung des Artenspektrums durch hohe Salzgehalte im Boden trägt indirekt zur Verschlechterung des Bodengefüges bei. Alle diese Folgen der Versalzung führen zur Verminderung der landwirtschaftlichen Erträge und können Böden für die landwirtschaftliche Nutzung gänzlich unbrauchbar machen (Supper 2003). So entfallen global derzeit etwa zehn Millionen Hektar der landwirtschaftlichen Nutzung aufgrund der zu hohen Salzgehalte (Hu 2003).

Hohe Salzgehalte im Boden, ob nun anthropogen verursacht oder natürlich vorkommend, sind bei etwa einem Drittel der globalen Anbauflächen für schlechte Wachstumsbedingungen und geringe Erträge verantwortlich (ca. 491 Millionen ha) (N.N. 2002b). Weltweit sind schätzungsweise ein Viertel der bewässerten Flächen von Versalzungsschäden betroffen (Lewis 2002). Dies entspricht einer Fläche von mehr als 60 Millionen Hektar (Zhang & Blumwald 2001).

Überlebensstrategien der Pflanzen bei Wassermangel und Bodenversalzung

Die abiotischen Stressfaktoren Wassermangel und Bodenversalzung

Abiotischer Stress, insbesondere Wassermangel und hohe Salzgehalte, sind ein komplexes morphologisches und physiologisches Phänomen in Pflanzen.

Infolge von Wassermangel entsteht in den Pflanzenzellen sogenannter osmotischer Stress. Aufgrund der Konzentrationssteigerung von in der Zellumgebung gelösten, osmotisch wirksamen Stoffen, wird das osmotische Gleichgewicht (Wasserhaushalt) zwischen der Zelle und ihrer Umgebung gestört. Dies führt dann zu einer Wasserabgabe der Zelle an ihre Umgebung. Damit verbunden ist eine starke Strapazierung von Makromolekülen und Zellmembranen durch die Verringerung des Zellurgors (osmotischer Innendruck der Zelle) und die Erhöhung der Konzentration intrazellulär gelöster Stoffe. Wenn die Photosynthese bei akutem Wassermangel verhindert wird und die Chloroplasten¹ weiterhin starker Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, kommt es zudem zur Produktion von Sauerstoffradikalen, wie Superoxiden und Peroxiden. Diese schädigen die Zelle, indem sie Enzyme und Zellmembrane zerstören (Holmberg & Bülow 1998).

Zu den wichtigsten Auswirkungen der Versalzung auf die Pflanzen gehört die Störung der Wasseraufnahme. Pflanzen nehmen über die Wurzeln nur dann Wasser auf, wenn ein osmotisches

Die Gentechnik-Nachrichten sind im Internet zu finden unter: <http://www.oeko.de/gennews.htm>.

Sie können auch per e-mail abonniert werden:

E-mail senden an listserv@oeko.de, OHNE Betreff, Text: [subscribe gen-news@oeko.de](mailto:subscribe%20gen-news@oeko.de)

Potentialgefälle zwischen dem Boden und der Pflanze besteht. Diese Differenz verringert sich durch die Erhöhung der Salzkonzentration im Bodenwasser (Supper 2003). Ein versalzter Boden führt für die meisten Pflanzen also ebenfalls zu Wassermangel und den bereits beschriebenen negativen Folgen für die Pflanzenzellen (Moffat 2002). Viele Elemente, die bei einer Versalzung verstärkt auftreten, wirken zudem in hohen Konzentrationen für die Mehrzahl der Pflanzen toxisch (z.B. Chlor und Bor) (Supper 2003). Durch überhöhte Natriumwerte werden biochemische Prozesse gestört, indem zum Beispiel Enzyme blockiert werden (Schmitz & Schütte 2000) (Zhang & Blumwald 2001).

Fast alle wichtigen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen sind empfindlich gegenüber Wassermangel und hohen Salzgehalten. Während nur sehr wenige Nutzpflanzen wie Zuckerrüben und Baumwolle relativ gut unter solchen Stressbedingungen wachsen, gibt es viele wilde widerstandsfähige Pflanzenarten (Hanson 1998).

Welche Schutzmechanismen sich gegenüber Wassermangel und hohen Salzgehalten im Pflanzenreich finden beziehungsweise bisher bekannt sind, soll im Folgenden kurz dargestellt werden.

Morphologische Schutzmechanismen

Im Laufe der Evolution haben sich Pflanzen entwickelt, die zumindest zeitweise extremen Wassermangel ertragen können. Solche Pflanzen werden als Xerophyten bezeichnet. Diese Pflanzen können durch bestimmte Einrichtungen die Wasserabgabe an die Umgebung reduzieren und verfügen meist über ein tiefes Wurzelsystem. Die Sprossachsen und Blätter sind häufig besonders stabil gebaut und behalten selbst bei starkem Wasserverlust ihre Festigkeit (Strasburger 2002).

Die oberirdischen Pflanzenteile geben normalerweise aufgrund des Dampfdruckgefälles ständig Wasser an ihre Umgebung ab. Dies geschieht einerseits über die Spaltöffnungen, die sich auf der Unterseite der Blätter befinden (stomatäre Transpiration) und andererseits über die gesamte Oberfläche einer Pflanze (cuticuläre Transpiration) (Nultsch 2001).

Über die Spaltöffnungen (Stomata) der Blätter können über 90% der Gesamttranspiration einer Pflanze erfolgen (Nultsch 2001). Der komplexe biologische Regulationsmechanismus der Stomata ist bereits relativ detailliert bekannt. Die Spaltöffnungen bestehen aus zwei bohnenförmigen Schließzellen, die in manchen Fällen noch von speziellen Nebenzellen umgeben sind. Die Schließzellen berühren sich nur an den Enden, so dass in der Mitte ein Spalt ausgespart bleibt. Der Mechanismus der Schließbewegung ist auf Turgoränderungen zurückzuführen. Infolge lokaler Verdickungen der Schließzellenwände führt die Turgorzunahme zu einer Krümmung (Öffnung des Spalts), die Turgorabnahme zu einer Streckung der Schließzellen (Spalt bleibt geschlossen). Die Regelfaktoren für die Öffnung der Spaltöffnungen sind neben Wasser die Kohlendioxid-Konzentration, Licht, Abscisinsäure (Pflanzenhormon) und Kalium-Ionen.

Die Spaltöffnungen sind bei den meisten Pflanzen in feuchter Umgebung geöffnet und in trockener Umgebung geschlossen. Bei geöffneten Spalten stellt sich ein Gleichgewicht zwischen den Wasserdampfkonzentrationen der Atmosphäre und der Atemhöhle (einen Teil des Interzellularsystems des Blattgewebes, der unter den Schließzellen liegt) ein. Solange der Wassernachschub sichergestellt ist, bleiben die Spalten offen.

Bei den meisten Pflanzenarten sind die Spaltöffnungen bei Dunkelheit geschlossen. Licht fördert das Öffnen. Eine niedrige Kohlendioxid-Konzentration (in der Atemhöhle) führt zu einer Spaltenöffnung, eine hohe zu Spaltenverschluss. Bei Dunkelheit entsteht in pflanzlichen Geweben durch Atmung reichlich Kohlendioxid, so dass die Spalten geschlossen bleiben. Mit dem ersten Tageslicht kann die Photosynthese unverzüglich einsetzen, weil ausreichend Kohlendioxid akkumuliert worden ist. Da die Schließzellen im Unterschied zu den Nebenzellen Chloroplasten enthalten, findet in ihnen auch eine Photosynthese statt, und diese Aktivität wiederum steht im Zusammenhang mit dem Anstieg des osmotischen Werts und damit der Öffnung der Spalte.

Es hat sich gezeigt, dass der Wasseraufnahme in die Schließzellen eine Kalium-Aufnahme vorangeht. Kalium-Ionen werden durch aktiven Transport (eine Kalium-Pumpe) aus den Nebenzellen in die Vakuolen der Schließzellen verlagert. Dies führt zu der für die Schließbewegung erforderlichen Turgorzunahme.

Bei Wasserdefizit produziert die Pflanze in verstärktem Maße das Pflanzenhormon Abscisinsäure, die aktiv zu den Schließzellen transportiert und in ihnen gespeichert wird. Sie wiederum hemmt die Kalium-Ionenpumpe, verhindert damit den Aufbau eines osmotischen Drucks und bewirkt Spaltenverschluss³ (Nultsch 2001).

Als zusätzlichen Schutz sind oberirdische Pflanzenteile von einer dünnen Cutinschicht (wachsähnliche Substanz) überzogen, der Cuticula. Trotz der wasserabweisenden Eigenschaften des Cutins gibt die Pflanze ständig eine kleine Menge Wasserdampf durch die Cuticula an ihre Umgebung ab. Im Einzelfall hängt der Anteil der cuticulären Transpiration von der Durchlässigkeit der Cuticula ab. Bei Xerophyten ist die cuticuläre Transpiration durch Verstärkung der Cuticula oft in hohem Maße herabgesetzt (Nultsch 2001).

Ein sehr häufig auftretender und effektiver Schutz gegen Verdunstung ist die Reduktion der transpirierenden Oberflächen im Verhältnis zum Gesamtvolumen der Pflanze. Dies wird zum Beispiel erreicht, indem Pflanzen zu Beginn einer Trockenzeit Blätter abwerfen. Eine große Anzahl von Xerophyten sind neben der starken Einschränkung der Wasserabgabe an die Umgebung auch zur Wasserspeicherung in speziellen Wassergeweben befähigt. Solche Pflanzen mit typisch fleischig-saftigen Organen werden als Succulenten bezeichnet. Sie können das Wasser kurzer Regenperioden entweder in Wurzeln, Stamm oder Blättern als Vorrat für lange Dürreperioden speichern. Entsprechend spricht man von Wurzel-, Stamm- oder Blattsucculenten (Strasburger 2002).

Pflanzen, die natürliche Schutzmechanismen gegen hohe Salzgehalte im Boden entwickelt haben, werden als Halophyten bezeichnet. Küsten- und Wüstenhalophyten kompensieren durch die Aufnahme entsprechend hoher NaCl-Mengen in die Zellsäfte die erschwerte Wasseraufnahme in versalzten Böden (In versalzten Böden herrscht ein sehr hoher osmotischer Wert des Wassers). Die Salzkonzentration des Bodenwassers wird also von der Salzkonzentration des Zellsaftes überboten (Strasburger 2002).

Einige salztolerante Pflanzen scheiden nachts über spezielle Drüsen das Salz in Form von Natrium- und Chlorid-Ionen aus (Lewis 2002). Pflanzen wie Tamarisken, die in Salzwüsten gedeihen, erscheinen dann tagsüber von ausgeschiedenen Salzkristallen wie grau bestäubt.

Viele der salztoleranten Pflanzen sind wie die Xerophyten stark succulent. Die Succulenz der Halophyten steht jedoch nicht im Zusammenhang mit einer Wasserspeicherung, da sie im Gegensatz zu den succulenten Xerophyten keine Einrichtungen zur Transpirationseinschränkung besitzen.

Physiologische Schutzmechanismen

Die Antworten von Pflanzen auf abiotischen Stress sind komplex und vielfältig. Sie finden auf molekularer, zellulärer und physiologischer Ebene statt (Krishna 2002).

Auf molekularer und zellulärer Ebene stehen den Pflanzenzellen eine Reihe von zusätzlichen biochemischen Schutzreaktionen zur Verfügung. Die Pflanzenzellen können Ionen exportieren oder den Eintritt bestimmter Ionen verhindern. Auch Zellwandänderungen (höhere Flexibilität), osmotische Anpassungsmechanismen und die Bildung von Substanzen, die die Stabilität von Membranen und Makromolekülen erhöhen können (Osmoprotektion), schützen die Pflanzenzellen bei Wassermangel. Des Weiteren haben Pflanzenzellen Enzymsysteme, die Zwischenprodukte von Sauerstoffradikalen beseitigen können, wie zum Beispiel Peroxidasen und Superoxid Dismutasen (Holmberg & Bülow 1998).

Eine recht verbreitete Strategie der Pflanzen, um bei Versalzung negativen Auswirkungen von überhöhten Na-Konzentrationen zu entgehen, ist die Ablagerung von Natrium-Ionen in den Zellvakuolen – die damit quasi als Abfalleimer dienen (Lewis 2002).

³ <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/d32/32f.htm>

Forschungsaktivitäten zu transgenen dürre- und salztoleranten Pflanzen

In den letzten Jahren begann die Grundlagenforschung die molekulare Basis der abiotischen Stresstoleranz zu enträtseln (Krishna 2002).

Die Stresstoleranz bei Pflanzen beruht in der Regel auf einem Zusammenspiel eines ganzen Netzwerks von unterschiedlichen Genen. Die meisten der bisherigen gentechnischen Forschungsansätze setzen jeweils an einzelnen Komponenten dieser komplexen Eigenschaften an, auch wenn die Wissenschaft davon ausgeht, dass nur die Übertragung von mehreren Stressantworten in eine Pflanze die Möglichkeit darstellt, wirklich hochgradig stresstolerante Pflanzen herzustellen (Holmberg & Bülow 1998). Als ein Schlüsselfaktor wird das Wissen um die regulativen Gene angesehen, die die komplexen Genantworten auf abiotischen Stress in den Pflanzen koordinieren (Datta 2002). Bei Dürreperioden werden oftmals die gleichen Gene aktiv wie bei erhöhten Salzwerten im Boden oder bei Frost. Dies lässt auf die Existenz ähnlicher Reaktionsmechanismen auf unterschiedliche Stressfaktoren schließen (Moffat 2002).

Allgemein können die Produkte der Gene, die durch abiotischen Stress aktiviert werden, in zwei Kategorien eingeteilt werden. Zur ersten Gruppe kann man die Proteine zählen, von denen eine direkte Wirkung ausgeht (funktionale Proteine). Andere Proteine dagegen sind indirekt beteiligt und haben eine regulative Funktion bei der Weitergabe von Signalen und der Aktivierung bestimmter Gene (regulative Proteine) (Yamaguchi-Shinozaki et al. 2002).

Die Anzahl und der Koordinationsmechanismus der Gene, die bei abiotischem Stress bei Pflanzen aktiviert werden, ist bisher noch weitgehend unbekannt. Auch die biochemischen Funktionsmechanismen von Substanzen, die die Pflanzen während abiotischem Stress schützen, sind nicht bekannt (Datta 2002).

Die bisherigen Forschungsergebnisse an transgenen stresstoleranten Pflanzen basieren fast alle ausschließlich auf Gewächshausversuchen, die nicht einfach auf die Bedingungen im Freiland übertragen werden können.

Einige ausgewählte Forschungsansätze und -ergebnisse sollen im Folgenden dargestellt werden.

Funktionale Proteine

Osmoprotektoren

Ende der 70er Jahre wurde erstmals einer der wichtigsten Schutzmechanismen der Pflanzen gegen abiotischen Stress entdeckt, die Produktion von sogenannten Osmoprotektoren. Sie haben in den Pflanzenzellen osmotisch wirksame Eigenschaften und schützen dadurch die Pflanzen vor Austrocknung (Yamaguchi-Shinozaki et al. 2002). Die osmotisch wirksamen Moleküle werden in der Zelle durch einen aktiven Transportmechanismus akkumuliert. In Folge der höheren Konzentration gelöster Stoffe wird das Wasser stärker in den Zellen zurückgehalten (Datta 2002). Diese Substanzen können schädliche Auswirkungen sowohl bei Dürreperioden als auch bei versalzten Böden vermindern. Verbindungen wie Prolin (freie Aminosäure), Glycin Betain (quartäres Amin) und verschiedene Zucker (Mannitol, Fructan, Trehalose) sind solche Osmoprotektoren. Osmotisch wirksame Verbindungen in den Pflanzen können nach mehreren Untersuchungen die Toleranz gegenüber Wassermangel erhöhen. Die Verbindungen wirken jedoch unterschiedlich. Während zum Beispiel Mannitol hinsichtlich der Dürreverträglichkeit nur in einem bestimmten Entwicklungsstadium der Pflanzen wirksam wird, zeigt Trehalose bei jungen und alten Pflanzen eine schützende Wirkung (Holmström et al. 1996).

Der Großteil der Forschungsprojekte der letzten Jahre wurde an Tabak und der Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) durchgeführt (Datta 2002).

In mehreren Laboren gelang es allerdings auch, die Fähigkeit der Synthese von Osmoprotektoren auf eine Reihe von Kulturpflanzen (Kartoffeln, Reis, Raps) zu übertragen. Allerdings wurden in den transgenen Pflanzen kaum adäquate Mengen dieser Substanzen gebildet. Eine aktuelle Strategie ist nun, die Mechanismen zu identifizieren, die die Produktion der Moleküle auslösen und diese anschließend zu manipulieren. Damit erhofft man sich, einen Einfluss auf die Menge der gebildeten

Stoffe zu gewinnen (Moffat 2002).

Glycin Betain: Einer der effektivsten Osmoprotektoren ist Glycin Betain. Diese Substanz kommt in vielen wilden Pflanzenarten vor, die einen hohen Grad an Dürre- oder Salzverträglichkeit aufweisen. Auch einzelne Kulturpflanzen wie zum Beispiel Zuckerrüben und Baumwolle sind zur Bildung von Glycin Betain befähigt. In den meisten stressempfindlichen Kulturpflanzen wie dem Großteil der Gemüse- und Fruchtarten werden jedoch keine nennenswerten Mengen an osmoprotektiven Substanzen produziert.

Die Stoffwechselfvorgänge und zwei Enzyme, die für die Bildung von Glycin Betain zuständig sind, wurden bereits identifiziert. Beide Enzyme sind in den Chloroplasten⁴ lokalisiert. Die für die Produktion dieser beiden Enzyme zuständigen Gene wurden später in Tabakpflanzen übertragen. Das Ergebnis war zwar eine messbare erhöhte Stresstoleranz der transgenen Tabakpflanzen, jedoch war die produzierte Menge der Enzyme nicht ausreichend für eine tatsächliche Dürre- oder Salztoleranz. In Zukunft wird es das Ziel sein, durch weitere gentechnische Maßnahmen die produzierte Menge an Glycin Betain zu erhöhen (Hanson 1998).

Mannitol: Nach den bisherigen Forschungsergebnissen kann der Zucker Mannitol eine wichtige Rolle in der osmotischen Adaption spielen und zu einer erhöhten Dürre- und Salztoleranz bei Pflanzen führen (Datta 2002).

An der Oklahoma State University wird an der Entwicklung von transgenen salz- und dürretoleranten Weizensorten gearbeitet. Eine Strategie ist die Übertragung eines Gens, das für die Synthese der Verbindung Mannitol zuständig ist. Das übertragene Gen ist aus Genbestandteilen von Mais und zwei verschiedenen Bakterien zusammengestellt worden. Transgene Versuchspflanzen, die Mannitol in ihren Blättern anreichern, zeigten bereits eine verbesserte Produktivität bei Wassermangel und hohen Salzkonzentrationen. Bereits seit 1996 wird an dem stress-toleranten Weizen geforscht. Erste Freisetzungsversuche sind für das Jahr 2004 beantragt. Folglich wurden die Pflanzen bisher noch nicht unter realistischen Bedingungen getestet. Wenn die Entwicklungen unter Freilandbedingungen gut funktionieren, soll es nach Aussage der Pflanzenzüchter allerdings noch mindestens zehn Jahre dauern, bis marktreife Sorten mit den entsprechenden Eigenschaften angeboten werden könnten.

Da Mannitol eine in vielen Nahrungspflanzen natürlich vorkommende Verbindung ist und häufig als Zusatzstoff in der Lebensmittelverarbeitung Verwendung findet, erhoffen sich die Züchter eine gute Akzeptanz solcher transgenen Weizensorten (Abebe et al. 2003).

Trehalose: Der Zweifachzucker Trehalose unterstützt Zellstrukturen und -funktionen, wenn zeitweise starker Wassermangel herrscht. Trehalose wirkt in den Pflanzenzellen als Wasserersatz, indem es sich an die Oberfläche von Makromolekülen anlagert. Proteine und andere Makromoleküle werden dadurch vor Austrocknung geschützt und ihre Stabilität wird erhalten. Die Pflanzen werden somit vor dem Absterben geschützt.

Bis vor kurzem wurde Trehalose nur in einigen wenigen, sehr dürretoleranten pflanzlichen Organismen entdeckt (in sog. „resurrection plants“), zu denen zum Beispiel auch die Moosart *Xerophyta viscosa* gehört. Nun ist auch bei einer Reihe weiterer höherer Pflanzen die Fähigkeit entdeckt worden, Trehalose zu synthetisieren. Das erlaubt die Vermutung, dass Gene für die Trehaloseproduktion im Pflanzenreich weiter verbreitet sind als bisher angenommen.

In bisherigen Studien wurde die Rolle von Trehalose für den Schutz der Pflanzen vor abiotischem Stress untersucht. Bei Tabak und Kartoffeln konnten durch den Einbau des für die Trehalosesynthese zuständigen Gens aus Hefe oder *Escherichia coli* der Trehalosegehalt in den Zellen gesteigert werden. Die Folge war eine erhöhte Dürretoleranz der transgenen Pflanzen. Unter normalen Wachstumsbedingungen zeigten die Pflanzen aber stets auch ungewollte, negative Effekte. So kam es neben krüppelhaftem Wachstum auch zu Wurzelveränderungen und Veränderungen im Kohlenhydratmetabolismus (Wu & Garg 2003). Bei Versuchen an Tabak zeigten die transgenen

⁴ Zellstruktur in Pflanzen in der die Photosynthese stattfindet

Pflanzen nur unter sonst optimalen Bedingungen eine gesteigerte Toleranz gegen Wassermangel und hatten gleichzeitig eine zwischen 30 und 50% geringere Wachstumsrate (Holmström et al. 1996)

Im November 2002 wurde über die Entwicklung einer neuen Reislinie berichtet, die angeblich eine Dürretoleranz aufweist und auf Grenzstandorten anbaufähig ist. Allerdings wurde dies bisher nicht unter realistischen Bedingungen geprüft. Der Schlüssel für diese Entwicklung wurde in extrem überlebensfähigen Pflanzen wie der oben schon genannten Moosart *Xerophyta viscosa* gefunden. Auch hier wurde das für die Produktion der Trehalose zuständige Gen wurde isoliert und in eine Reissorte übertragen¹. Nachdem vorherige Gentransfers stets zu einer anhaltenden Produktion von Trehalose in den Pflanzenzellen führten, ist es nun erstmals bei der Entwicklung der transgenen Reispflanzen gelungen, die Trehaloseproduktion auf Stresssituationen zu reduzieren. Dies wurde durch eine Übertragung eines Promotors erreicht, der erst durch Wasserstress aktiviert wird. Die Reispflanzen zeigten in Folge keine ungewünschten Effekte, wuchsen auch unter normalen Bedingungen gut und sind zudem fertil.

Es wird davon ausgegangen, dass diese Technik in Zukunft auch auf andere wichtige Nutzpflanzen übertragen werden kann⁵ (Wu & Garg 2003).

Es gibt eine Reihe von Hinweisen, dass der Trehalose nicht nur bei Wassermangel, sondern auch bei Frost und Bodenversalzung eine Schutzfunktion zukommt. Auch die Verbesserung von Lagereigenschaften des Erntegute erhofft man durch eine gentechnische Veränderungen der Trehalose-Biosynthese zu erreichen (Holmström et al. 1996)

Prolin: Die genauere Bedeutung der Aminosäure Prolin bei der Reaktion der Pflanzen auf abiotischen Stress ist noch nicht geklärt. Eine Zusammenhang zwischen der Akkumulation von Prolin und abiotischem Stress konnte aber nachgewiesen werden (Datta 2002).

Die durch gentechnische Manipulation verursachte Überproduktion von Prolin in Tabak und Reis führte zu einem verstärkten Wurzelwachstum und erhöhter Blütenbildung unter Wasserstress. Studien mit transgenen Sojabohnen gaben weitere Hinweise, dass ein Zusammenhang zwischen der Anreicherung von Prolin in den Pflanzenzellen und einer erhöhten Dürretoleranz besteht (Datta 2002).

Fructane: Viele Pflanzen und Bakterien sind zur Bildung von Fructanen (Mehrfachfruchtzucker) befähigt. Eine große Anzahl von Pflanzenarten nutzen Fructane als Speicherkohlenhydrate. Im Gegensatz zu Stärke, die auch viele Pflanzen als Speicherkohlenhydrate nutzen, sind Fructane wasserlöslich. Aus diesem Grund wurde vermutet, dass Fructane eine Rolle bei osmotischen Anpassungsmechanismen spielen. Die funktionelle Bedeutung der Fructane wurden in Versuchen mit transgenem Tabak näher untersucht. Den Tabakpflanzen, die normalerweise kein Fructan bilden, wurde durch die Übertragung eines Gens aus dem Bakterium *Bacillus subtilis* die Fähigkeit vermittelt, Fructan zu akkumulieren. Die transgenen Tabakpflanzen konnten dann im Vergleich mit herkömmlichem Tabak auf Dürretoleranz untersucht werden.

Die Übertragung des bakteriellen Gens führte bei den Tabakpflanzen zu einer verstärkten Widerstandsfähigkeit gegenüber künstlich induziertem Wasserstress. Ansonsten zeigten die transgenen Pflanzen keine Unterschiede zu herkömmlichen Tabakpflanzen. Es konnte eine Korrelation der beobachteten Dürretoleranz und der akkumulierten Menge an Fructan beobachtet werden. Verglichen mit dem Gehalt anderer Zucker in den Pflanzen war die Fructosekonzentration so niedrig, dass dies kaum osmotische Effekte auslösen kann. Deshalb scheinen Fructane weitere Funktionsweisen zu besitzen. Die bisherigen Daten lassen allerdings noch keine klare Aussage über die zu der Dürretoleranz führenden Mechanismen zu (Pilon-Smits et al. 1995). Sicher scheint zu sein, dass Fructane den Prozess der Wurzelverzweigung fördern und somit Einfluss auf die Ausprägung der Wurzeloberfläche und folglich auch auf die Wasseraufnahme haben (Datta 2002).

Einige Jahre nach der Studie an Tabak wurden die wesentlichen Ergebnisse auch bei Versuchen mit transgenen Zuckerrüben bestätigt. Die Versuche mit Zuckerrüben fanden unter realistischeren Dürrebedingungen statt (Pilon-Smits 1999).

⁵ http://www.news.cornell.edu/releases/Nov02/trehalose_stress.hrs.html

Schutzfaktoren der Makromoleküle

Sogenannte LEA-Proteine (late embryogenesis abundant proteins) und Chaperone (Proteine, die bei Hitzestress gebildet werden) sind beim Schutz von Makromolekülen wie Enzymen, Lipiden und mRNA vor Austrocknung beteiligt (Yamaguchi-Shinozaki et al. 2002). Die LEA-Proteine wurden erstmals in Baumwolle entdeckt. Im späten Stadium der Samenreife lagern sich diese Proteine hauptsächlich im Embryo ein. Basierend auf Gemeinsamkeiten in der Aminosäuresequenz werden die LEA-Proteine in drei Hauptgruppen eingeteilt. Mehrere Untersuchungen weisen darauf hin, dass LEA-Proteine der 3. Gruppe eine Rolle für die Stresstoleranz bei Pflanzen spielen. So wurde bei vielen Pflanzen eine Korrelation zwischen der Expression von LEA-Genen bzw. Akkumulation von LEA-Proteinen und Stresstoleranz nachgewiesen. Trotzdem ist die genaue Funktion der LEA Proteine bislang weitgehend unbekannt (Xu et al. 1996).

Bei dem Großteil der in den letzten Jahren durchgeführten Versuche zu LEA-Proteinen und Chaperonen wurde mit der Pflanze *Arabidopsis thaliana* experimentiert (Datta 2002).

Durch die Übertragung eines LEA-Protein Gens des Roggens mit dem Namen HVA1 in Reis kam es zu einer Anhäufung des Proteins in Blättern und Wurzeln der Reispflanzen. Die zweite Generation der Reispflanzen wies eine erhöhte Toleranz gegenüber Wassermangel und Salz auf. Diese zeigte sich in einer höheren Wachstumsrate, in später einsetzenden Schädigungen und in einer schnelleren Erholung der transgenen Pflanzen bei Stress im Vergleich zu den unveränderten Testpflanzen. Diese Studie hat die Hypothese unterstützt, dass LEA Proteine eine wichtige Rolle für den Schutz der Pflanzen bei Dürre- und Salzstress spielen.

Es existieren allerdings auch Studien, in denen kein Zusammenhang zwischen der Akkumulation spezifischer LEA-Proteine und Stresstoleranz nachgewiesen werden konnte. Bei einer Studie mit Sojabohnen konnte eine Stresstoleranz nur im Zusammenspiel mit einem löslichen Zucker (Osmoprotektor) erreicht werden. Durch die ausschließliche Erhöhung von LEA-Proteinen konnte hingegen keine Wirkung erzielt werden (Xu et al. 1996).

Proteine der Zellmembran

Kanalproteine und andere Transportproteine in der Zellwand regeln den Wasserdruck der Pflanzenzellen (osmotischer Druck). Bei Stress werden Wasser, Zucker oder die Aminosäure Prolin durch die Plasmamembrane in das Zellinnere transportiert. Dem Wasserverlust der Zelle wird dadurch bei Wassermangel entgegengewirkt (Yamaguchi-Shinozaki et al. 2002).

Im Jahr 2001 gelang es näheres über den Aufnahmemechanismus von Salz in die Pflanzen zu erfahren. Mit der Identifizierung eines Proteins (AtHKT1), das für den Transport von Natrium-Ionen in die Wurzelzellen zuständig ist, wurde erstmals ein Aufnahmemechanismus entdeckt. Anstatt die Salzaufnahme zu vermeiden, haben die Pflanzen eine Strategie entwickelt, mit dem Salz umzugehen und es zu verkräften (N.N. 2002b). Bei der im Rahmen gentechnischer Experimente oft genutzten Pflanze *Arabidopsis thaliana* (Ackerschmalwand) wurde eine höhere Salztoleranz durch die Manipulation der Salzaufnahme erreicht. Das Protein AtHKT1 wurde in diesem Zusammenhang ausgeschaltet (Moffat 2002).

Relativ viel Aufmerksamkeit hat die Herstellung einer transgenen salztoleranten Tomatensorte durch den US-amerikanischen Wissenschaftler Eduardo Blumwald und sein Forschungsteam erregt. Betrachtet wurde ein von *Arabidopsis thaliana* gebildetes Protein, das die Pflanze gegen Versalzung schützen kann. Das untersuchte Protein mit dem Namen AtNHX1 befindet sich in Membranen der Zellvakuolen. Dort hat es die Aufgabe, Na-Ionen aus dem Cytoplasma⁶ in die Vakuolen⁷ zu pumpen. In den Vakuolen abgelagertes Natrium ist für die Pflanze unschädlich. Durch eine gentechnisch hervorgerufene Steigerung der Expression des AtNHX1 Gens konnte eine erhöhte Salztoleranz infolge der gesteigerten Bildung des Transportproteins erreicht werden. Der selbe Ansatz wurde für die

⁶ Hauptsächlich aus Proteinen bestehende Grundsubstanz der Zellen.

⁷ Mit Zellsaft erfüllter, von Cytoplasma umgebener Innenraum der Pflanzenzelle.

Entwicklung von transgenen Gewächshaustomaten genutzt. Eine durch Veränderung der zuständigen Gensequenz ausgelöste Überproduktion des Proteins bewirkte einen Schutz der Tomaten vor hohen Salzkonzentrationen (Moffat 2002). Die transgenen Tomaten können das Salz in den Zellvakuolen ihrer Blättern speichern, während die Salzkonzentration der Früchte niedrig bleibt. Ein Qualitätsverlust der Früchte und toxische Effekte der Na-Ionen in den Zellen werden dadurch verhindert. Die normalerweise eintretende Behinderung der Nährstoffaufnahme durch zu hohe Salzgehalte konnte überwunden werden. Die Früchte der transgenen Pflanzen waren etwas kleiner, ansonsten wurden keine Unterschiede zu den herkömmlichen Pflanzen festgestellt (Zhang & Blumwald 2001).

Entgegen der weit verbreiteten Annahme, dass eine Stresstoleranz bei Pflanzen nur durch die Veränderung mehrerer Charaktereigenschaften erreicht werden kann, wurde hier durch Veränderung nur eines einzigen Charakterzugs eine hochgradige Salztoleranz erreicht. Einige Forscher hoffen nun, dass möglicherweise entgegen der bisherigen Meinung auch durch die Manipulation nur weniger Gene eine Salztoleranz bei verschiedenen Nutzpflanzen erreicht werden könnte (Zhang & Blumwald 2001). Für 2003 wurden Freisetzungsversuche mit den transgenen Tomaten beantragt (Moffat 2002).

Inzwischen hat das Unternehmen Seaphire International mit Sitz in Phoenix (USA) die Lizenz auf das in diesem Zusammenhang entwickelte gentechnische Verfahren erworben. Die Firma Seaphire hat zum Ziel, landwirtschaftliche Produktionssysteme mit salztoleranten Nutzpflanzen zu entwickeln. In trockenen Küstenregionen sollen die Pflanzen mit Meerwasser bewässert werden. Dabei wird eine Verbindung von Aquakultur und dem Einsatz von salztoleranten Pflanzen angestrebt. Derzeit experimentieren Mitarbeiter von Seaphire International in Arizona und Mexiko⁸.

Detoxifikationsenzyme

Verschiedenen abiotische Stressfaktoren wie intensive Sonneneinstrahlung, Hitze oder Wassermangel führen in den Pflanzenzellen zur Produktion von reaktiven Sauerstoffverbindungen (z. B. Peroxide, Superoxide). Die übermäßige Produktion dieser zelltoxischen Substanzen wird als oxidativer Stress bezeichnet. Dies ist einer der wichtigsten Gründe für Schädigungen an Pflanzen, die durch abiotische Stressfaktoren ausgelöst werden (Sunkar et al. 2003). Verschiedene Enzyme sind an der Beseitigung toxischer Zwischenprodukte von reaktivem Sauerstoff beteiligt und schützen somit die Zellen (Yamaguchi-Shinozaki et al. 2002).

In Freilandversuchen wurden bereits transgene Baumwollpflanzen mit dem Gen für die Produktion des Enzyms Ascorbatperoxidase (APX) getestet. Auf trockenen Standorten zeigten die transgenen Pflanzen gegenüber den herkömmlichen Pflanzen deutlich höhere Erträge (Moffat 2002).

Nach den Versuchen mit Baumwolle wurde das Gen für die Produktion des Enzyms Ascorbatperoxidase (APX) sowie das Gen für ein weiteres Enzym (Glutathion Peroxidase) auf Tabakpflanzen übertragen. Die Enzyme sollen die Fähigkeit besitzen, Peroxide zu neutralisieren. Unter im Gewächshaus induzierten Stressbedingungen konnten die transgenen Tabakpflanzen die Photosyntheseleistung aufrechterhalten. Gegenüber herkömmlichen Pflanzen erbrachten die transgenen Tabakpflanzen unter Stressbedingungen eine um 50 % höhere Photosyntheseleistung¹ (Moffat 2002).

An der Universität in Bonn wurde eine starke Ähnlichkeit eines Gens des Ackerschmalwands (*Arabidopsis thaliana*) mit einem Gen des Mooses *Xerophyta viscosa* entdeckt. Dieses Gen ist bei Wassermangel aktiv und codiert die Bildung des Enzyms Aldehyddehydrogenase (ALDH). Das Enzym hilft der Pflanze, toxische Substanzen, die sich unter Trockenheit vermehrt in den Zellen bilden, zu verkraften. Durch die gentechnische Veränderung des ALDH-Gens (Ath-ALDH3) bei einer Arabidopsis-Variante konnte eine erhöhte ALDH Produktion, verbunden mit einer erhöhten Überlebensfähigkeit bei Wassermangel, erreicht werden⁹.

In den letzten Jahren wurden weitere Versuche mit Detoxifikationsenzymen durchgeführt. Hauptsächlich wurde mit Tabak und Luzerne gearbeitet (Datta 2002).

⁸ <http://www.gene.ch/genet/2002/Jul/msg00043.html>

⁹ <http://www.seedquest.com/News/releases/2003/august/6378.htm>

Regulative Proteine

Transkriptionsfaktoren

Transkriptionsfaktoren sind DNA-bindende Proteine, die sich im Zellkern an das Erbmateriale anlagern und an der Regulation der Genaktivität beteiligt sind.

Bei Tomaten wurde eine Erbanlage identifiziert, die für die übergeordnete Regulierung von Transkriptionsfaktoren zuständig sein soll. Transkriptionsfaktoren steuern auch die Produktion von Chaperonen. Chaperone sind Hitzestress-Proteine, die bei Hitze die Pflanzenzellen vor schädlichen Einflüssen schützen können. Im Erbgut der bisher untersuchten Pflanzen hat man stets etwa 20 Erbanlagen für solche Hitzestress-Transkriptionsfaktoren gefunden. Dies bedeutet, dass die Antwort auf schädliche Umwelteinflüsse über ein außerordentlich feines Regelwerk gesteuert wird. Solch ein Regelwerk bedingt eine übergeordnete Koordination. In diesem Zusammenhang wurden WissenschaftlerInnen auf den Transkriptionsfaktor *At* (*HsfAt*) aufmerksam, da er nicht wie die anderen Transkriptionsfaktoren nur bei Hitze produziert wird, sondern immer in den Pflanzenzellen bereit steht. Um die Funktion dieses speziellen Transkriptionsfaktors zu ergründen, wurden zwei transgene Tomatenlinien hergestellt: Eine, die den Steuerungsfaktor in zehnmal so großer Menge produziert wie normale Pflanzen und eine weitere, die ihn gar nicht produziert. Es stellte sich heraus, dass die Pflanzen mit der überhöhten Produktion widerstandsfähiger gegenüber Hitze waren als die normalen Pflanzen. Die Gewächse ohne *HsfAt* erlitten durch die Einwirkung von Hitze schwere Schäden (Wandtner 2002).

Auch in einem anderen Forschungsprojekt wurden transgene Tomaten mit erhöhter Toleranz gegenüber Wassermangel entwickelt. Auch in diesem Fall konnte die Aktivität eines Gens (*CBF1*) erhöht werden, das wahrscheinlich als regulative Einheit bei der Reaktion von Pflanzen auf abiotischen Stress funktioniert. Unter normalen Wachstumsbedingungen waren die transgenen Pflanzen allerdings den herkömmlichen Pflanzen in einigen Merkmalen unterlegen. So waren die transgenen Pflanzen kleiner, hatten eine geringere Frischmasseproduktion und wiesen eine reduzierte Samen- und Fruchtzahl auf. Der Grund für die erhöhte Wasserstresstoleranz der Tomaten wird in der Aktivierung von Genen, die für Detoxifikationsenzyme codieren, vermutet (Krishna 2002).

Perspektiven und Risiken

Die Existenz vieler Landsorten mit ausgeprägten Toleranzen gegen abiotische Stressfaktoren zeigt, dass durch klassische Züchtungsmethoden seit langem solche Sorten geschaffen wurden und im Gebrauch sind. Gentechnisch veränderte stresstolerante Pflanzen werden das Anwendungsstadium voraussichtlich frühestens in fünf bis zehn Jahren erreicht haben.

Können transgene Nutzpflanzen einen wesentlichen Beitrag zur Sicherung der Welternährung leisten ?

Ob transgene Nutzpflanzen der sogenannten 3. Generation (Anwendbarkeit noch relativ weit entfernt und Wissen über komplexe Vererbungsmechanismen gering) in Zukunft einen wesentlichen Beitrag zur Bekämpfung des Hungers leisten können, ist aufgrund des monokausalen Ansatzes und der gegebenen Risiken sehr umstritten.

Das Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen (UN Development Programme) forderte in seinem jährlichen „Human Development Report 2001“ einen höheren Forschungsaufwand für leistungsstarke und dürreretolerante Kulturpflanzen. Diese sollen vor allem im subsaharischen Afrika und in Süd-Asien helfen, die Unterernährung zu bekämpfen. Einigen westlichen Ländern wird in dem Bericht vorgeworfen, durch ihre restriktive Haltung gegenüber der Gentechnik, Fortschritte in diesem Bereich zu blockieren (N.N. 2001).

Der Bedarf an Nahrungsmitteln wird sich in den Entwicklungsländern aufgrund des starken Bevölkerungswachstums voraussichtlich bis zum Jahr 2025 verdoppeln. Die jährlichen Ertragszuwächse je Hektar nehmen bei Getreide derzeit aber ständig ab und die Möglichkeiten zur

Erschließung neuer landwirtschaftlicher Nutzflächen sind sehr begrenzt. Dies bedeutet, dass der in Zukunft erhöhte Lebensmittelbedarf in erster Linie über die Nutzung bereits kultivierter Flächen erfolgen muss (Somerville & Briscoe 2001).

Eine zu geringe Produktivität ist heute in der Regel nicht die Ursache der globalen Nahrungsmittelknappheit. Hunger ist die Folge verschiedener Faktoren wie ungerechter Verteilung von Reichtum, Krieg oder Misswirtschaft. Eine entscheidende Rolle für die Ernährungssicherung weiter Teile der unterernährten Bevölkerung spielen besonders der Zugang zu Land, sauberem und keimfähigem Saatgut sowie den einheimischen Märkten.

Wenn die Prognosen zutreffen, dass sich der Nahrungsmittelbedarf in den Entwicklungsländern bis zum Jahr 2025 verdoppeln wird, dann wird die Frage der Produktivität eine zunehmende Rolle spielen. Der Bericht „World agriculture: towards 2015/2030“ der FAO (Food and agriculture organisation of the united nations) besagt allerdings, dass auch bis zum Jahr 2030 für die angewachsene Bevölkerung weltweit ausreichend Nahrungsmittel erzeugt werden können. Die eigentlichen Ursachen des Hungers liegen also auch in der Zukunft in sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen.

In einer umfangreichen, von der Universität Essex (GB) durchgeführten wissenschaftlichen Studie, wurden Projekte und Initiativen nachhaltiger Landwirtschaftssysteme (ohne den Einsatz von GVO) untersucht. Solche Systeme versuchen die Nahrungsversorgung für die Menschen vor Ort durch eine Vielzahl verschiedener Maßnahmen zu verbessern. Einige solcher Maßnahmen bestehen in der Intensivierung von Hausgärten, verbessertem Bewässerungsmanagement oder der Einführung neuer Elemente in ein Agrarsystem wie etwa der Fischzucht in Reisfeldern oder einer Agro-Forst-Wirtschaft. Diese Ansätze müssen nicht zwangsläufig mit einer Erhöhung der Hektarerträge einer bestimmten Marktfrucht verbunden sein, bieten aber ein großes Potential für die Nahrungsmittelsicherung einer wachsenden Weltbevölkerung vor allem in ruralen Regionen (Pretty & Hine 2001). Gerade dort sind Armut und Hunger am weitesten verbreitet (FAO 2003). Die Auswertung von 96 verschiedenen Projekten, für die eine verlässliche Datengrundlage hinsichtlich der Erträge, der kultivierten Fläche und der Anzahl an Bäuerinnen und Bauern vorhanden war, ergaben eine mittlere jährliche Steigerung der Lebensmittelproduktion um 73 % je Haushalt. Aber auch bei einzelnen Feldfrüchten wie Kartoffeln sind durch verbesserte Anbautechniken jährlich mittlere Ertragssteigerungen von bis zu 150% je Hektar erreicht worden (Pretty & Hine 2001).

Obwohl bereits transgene dürre- und salztolerante Pflanzen entwickelt wurden, stellen anbaufähige Sorten derzeit noch eine hypothetische Anwendungsform der Gentechnik dar. Die meisten Versuchsergebnisse beruhen auf Untersuchungen unter nicht realistischen Umweltbedingungen im Gewächshaus. Es kann davon ausgegangen werden, dass nur 5% der erwarteten Entwicklungen realistisch sind. Diese 5% müssten dann gegen die Risiken abgewogen werden¹⁰.

Von Protagonisten der Grünen Gentechnik wird häufig argumentiert, dass salztolerante transgene Nutzpflanzen auf ehemals unkultivierbaren Standorten angebaut werden könnten und dadurch zusätzliche landwirtschaftliche Nutzflächen erschlossen würden. Dies gilt allerdings nur für vereinzelte Regionen, wie beispielsweise Teilen Israels oder Ägyptens, in denen salzhaltiges Grundwasser die landwirtschaftliche Nutzung stark einschränkt oder verhindert (N.N. 2002b). Ein großer Teil der weltweit versalzten Böden ist jedoch durch nicht nachhaltige Bewässerungstechniken entstanden. Salztolerante transgene Nutzpflanzen stellen daher im Bezug auf anthropogen verursachte Versalzungen nur einen symptomorientierten Lösungsansatz dar. Die Bekämpfung der Ursache der Versalzung muss jedoch Priorität haben. Dies gilt um so mehr, als man in Zukunft vor großen Herausforderung bei der Bereitstellung von sauberem Wasser stehen wird. Durch eine schlechte Qualität des Beregnungswassers wird eine Bodenversalzung beschleunigt. Infolge einer weiteren Versalzung durch künstliche Beregnung von Anbauflächen wird der Salzgehalt in den Böden in einem Ausmaß ansteigen, bei dem auch keine transgenen, salztoleranten Sorten mehr helfen (Lewis 2002).

¹⁰ http://www.transgen.de/dgg/Proto_runde2/DP_Sonnewald_vanAken.pdf

Spezifische Risiken transgener dürre- und salztoleranter Nutzpflanzen

Abiotische Umweltbedingungen wie Wasserangebot, Salzgehalt, Nährstoffangebot, Kälte, Hitze oder toxische Metalle stellen für Pflanzen Faktoren mit hohem Einfluss auf ihre geographische Verbreitung dar (N.N. 2002). Ökologische Risiken stresstoleranter transgener Nutzpflanzen könnten deshalb durch die Besiedlung neuer ökologisch sehr wertvoller Flächen und durch die Verdrängungen seltener Arten entstehen. Aufgrund des frühen Stadiums in der Entwicklung von stresstoleranten Pflanzen wurden bisher noch kaum Risikobewertungen durchgeführt. Grundsätzlich gilt aber für solche Pflanzen, dass das Potential für eine Verbreitung als Unkraut mit der Ausprägungsstärke der Stresstoleranz zunimmt. Wenn der entsprechende Stressfaktor, der in der Entwicklung einer transgenen Pflanze berücksichtigt wurde, für eine Pflanzenpopulation einen limitierenden Faktor darstellt, besteht eine besondere Gefahr einer Etablierung der transgenen Pflanzen als Unkraut (Schmitz & Schütte 2000).

Alternative Lösungen zur Gentechnik

Weltweit existiert eine Vielzahl von sogenannten Landsorten (farmers' varieties) die einen hohen Grad an Toleranz gegen ungünstige Umweltbedingungen aufweisen. Am Beispiel Reis zeigt die indische Nichtregierungsorganisation Navdanya anhand eines Sortenregisters das Potential an salz- und dürretoleranten Sorten, das den Bauern zur Verfügung steht. Obwohl im Zuge der Grünen Revolution unzählige der über Hunderte von Jahren von den Bauern gezüchteten traditionellen Sorten verloren gegangen sind, gibt es immer noch eine beträchtliche Anzahl wertvoller Sorten. Das Saatgutregister der NGO Navdanya soll dazu dienen, in der indigenen Bevölkerung Bewusstsein für das Erbe der genetischen Vielfalt der Sorten zu schaffen.

Allein im kleinen indischen Bundesstaat West Bengalen gibt es dem Register zu Folge 78 Reissorten, die an trockene Bedingungen angepasst sind. In Kerala, einem anderen indischen Bundesstaat, gibt es rund 40 dürretolerante Reissorten. Auch salztolerante Reissorten sind noch in vielen Regionen Indiens weit verbreitet. Die Bäuerinnen und Bauern im indischen Uttararnchal kultivieren derzeit noch 54 dürretoleranten Reissorten. Die Sorten können nur erhalten bleiben, wenn sie weiterhin angebaut und auch konsumiert werden.

Robuste Sorten, die das Ergebnis des Anbaus und der Züchtung der indigenen Bevölkerung sind, haben sich über Hunderte von Jahren an die ökologischen Standortbedingungen angepasst. Auch die Pflanzenzüchter wissen den Wert der alten Sorten und der damit verbundenen genetischen Vielfalt zu schätzen, denn sie sind auch die Grundlage ihrer Arbeit. Paradoxerweise verdrängen aber Neuentwicklungen von Hochleistungssorten oft die alten Landsorten und somit ihre eigene Existenzgrundlage.

WissenschaftlerInnen des indischen Agricultural Research Institute halten die Einführung von transgenen Pflanzen für überflüssig, wenn entsprechende traditionelle Sorten vorhanden sind. Für wichtig wird aber die Entwicklung neuer Sorten dort erachtet, wo die Bauern keinen Zugang zu adäquaten traditionellen Landsorten mehr haben. Problematisch wird die Situation spätestens dann, wenn Saatgutunternehmen auf Grundlage der alten Sorten neue Sorten herstellen und mit einem Patent belegen. Die Bäuerinnen und Bauern könnten dann diese neuen Sorten nicht mehr selber vermehren, obwohl Sie und ihre Vorfahren die genetische Grundlage für diese Sorten geschaffen haben (Mishra 2002).

WissenschaftlerInnen des Nationalen Forschungszentrums für Gentechnik in Bangkok haben salztolerante Reissorten entdeckt. Diese wurden im Rahmen einer Überprüfung indigener Reissorten einer thailändischen Saatgutbank gefunden. Diese Saatgutbank umfasst rund 7.000 verschiedene Sorten. 230 davon wurden in einem Laborversuch auf ihre Salzverträglichkeit hin geprüft. Die Pflanzen wurden mit Wasser gegossen, das 2-3% Natriumchlorid enthielt. Das entspricht fast dem Salzgehalt von Meerwasser. Vier der geprüften Reissorten überlebten unter diesen Bedingungen und wurden für weitere Versuche ausselektiert. Die Untersuchungen waren Teil eines größeren Projektes, das die Identifizierung von salztoleranten Kulturpflanzen zum Ziel hat, die vor allem im Nordosten

des Landes angebaut werden können (s. Gentechnik-Nachrichten 30).

Seit den letzten zehn Jahren haben besonders WissenschaftlerInnen einiger Entwicklungsländern auch ohne den Einsatz der Gentechnik erhebliche Erfolge in der Züchtung von dürrerotoleranten Nutzpflanzen erzielen können. Die Kombination der klassischen Pflanzenzüchtung mit molekularen Markertechnologien war ein entscheidender Schritt zur Verbesserung der Züchtung auch ohne den Einsatz von Gentechnik. Markertechnologien erlauben eine sehr zielgerichtete Identifikation von erwünschten Charaktereigenschaften des Kreuzungsmaterials (Moffat 2002). Zum Beispiel wurde 2001 eine neue Maissorte (ZM521) vom Südafrikanischen Landwirtschaftsministerium zugelassen, die unter trockenen Bedingungen bis zu 50% höhere Erträge erbringt, als die in Südafrika von Kleinbauern traditionell angebauten Sorten. Diese Sorte wurde von WissenschaftlerInnen und Wissenschaftlern des CGIAR (Consultive Group on International Agricultural Research) und südafrikanischen AgrarwissenschaftlerInnen und Agrarwissenschaftlern entwickelt. Die neue Maissorte Zm521 wurde speziell auf die Eigenschaft hin gezüchtet, auch auf nährstoffarmen Böden und bei Dürresituationen ausreichende Erträge zu erzielen. Die Züchtung erfolgte im Rahmen eines Projektes, in dem speziell Maissorten entwickelt werden sollten, die besser an die Bedingungen der kleinbäuerlichen Landwirtschaftssysteme in Südafrika angepasst sind.

Eine neue Weizensorte mit sehr hoher Wassereffizienz ist das Resultat der Forschungsarbeiten von WissenschaftlerInnen und Wissenschaftlern der CSIRO Plant Industry und der Australian National University (ANU). Diese Sorte, die ohne die Anwendung gentechnischer Verfahren gezüchtet wurde, kann gegenüber vergleichbaren Weizensorten unter trockenen Bedingungen einen Mehrertrag von bis zu 10% erbringen. Dies resultiert aus einem effizienteren Austausch von atmosphärischem Kohlendioxid und Wasser bei der Photosynthese. Zugleich besitzt die Sorte auch einen hohen Grad an Widerstandsfähigkeit gegenüber allen wichtigen Getreidekrankheiten und liefert eine gute Qualität des Erntegutes. Diese neue Sorte mit den Namen Drysdale semi-dwarf ist die erste Pflanze, die mit einer neuen Züchtungsmethode geschaffen wurde. Die innovative Technik basiert auf einem bisher nicht genutzten Messkriterium für die Erkennung von Genen durch charakteristische Kohlenstoffisotope. Diese neue Züchtungsmethode hat viel Aufmerksamkeit erregt, da sie ein enormes Verbesserungspotential in der Züchtung für Hohertragsorten verspricht, die speziell für den Anbau in Dürreregionen geeignet sind. Die Weizensorte Drysdale wird bereits kommerziell angeboten¹¹.

In Indien wurden zwei dürrerotolerante Kichererbsensorten gezüchtet. Diese Kichererbsen wurden unter Anwendung von klassischen Züchtungsmethoden entwickelt. Das indische Institut ICRISAT war maßgeblich an der Züchtung beteiligt und hat dadurch eine wichtige Lösung für die immer wieder von Dürreperioden bedrohte Nutzpflanze gefunden. Als weiterer Lösungsansatz wurden von ICRISAT Kichererbsensorten eingeführt, die in nur 85-100 Tagen reifen. Dadurch sind sie nicht von der in Indien jährliche eintretenden Dürre am Ende der Ackerbausaison betroffen¹².

Bei klassischen Züchtungsmethoden wird das Problem gesehen, dass es schwierig ist, nur einzelne Merkmale der Pflanzen zu verändern. Dies ist zudem zeit- und arbeitsintensiv (Holmberg & Bülow 1998). Da Toleranzen gegen abiotische Stressfaktoren einer sehr komplexen Vererbung unterliegen, ist aber auch mit gentechnischen Methoden nicht wie bei bisherigen Entwicklungen von transgenen Pflanzen durch die Übertragung nur eines Gens (z. B. BT-Mais, RR-Soja) mit baldigen praxisfähigen Ergebnissen zu rechnen.

Insgesamt gilt, das Dürre- und Salztoleranz komplex gesteuerte Eigenschaften von Pflanzen sind. Darüber hinaus sind durch jahrhundertlange Züchtungsarbeit bereits eine Vielzahl von Landsorten entwickelt worden, die die gewünschten Eigenschaften in regional angepassten Varietäten aufweisen. Aufbauend auf diesen Schatz lassen sich gegenüber der Gentechnik viel schneller und effizienter angepasste Sorten entwickeln, wie die Erfolge mit markergestützten Züchtungen beweisen.

¹¹ <http://www.gene.ch/genet/2002/Oct/msg00046.html>

¹² <http://www.gene.ch/genet/2000/May/msg00027.html>

Quellen

- ABEBE, T.; MARTIN, B.; CUSHMAN, J. (2003). Engineering wheat with sugar alcohol-producing gene helps plants resist drought and salt. *Plant Physiology*, April 2003.
- DATTA, S. K. (2002). Recent developments in transgenics for abiotic stress tolerance in rice. JIRCAS Working Report 2002.
- FAO (2003). World agriculture: towards 2015/20. An FAO perspective.
- HANSON, A. D. (1998). Metabolic Engineering of Crops for Drought and Salt Tolerance. NRI research highlights, United States Department of Agriculture.
- HOLMBERG, N. & BÜLOW, L. (1998). Improving stress tolerance by gene transfer. *Trends in plant science* **3** (2).
- HOLMSTRÖM, K.-O.; MÄNTYLÄ, E.; WELLN, B.; MANDAL, A.; PALVA, E.T.; TUNNELA, O.E.; LONDESBOROUGH, J. (1996). Drought tolerance in tobacco. *Nature* **379**.
- HU, Z.-M. (2003). Salt tolerance transferred from wild triticeae species into wheat. ISB news report, February 2003
- INOCENCIO, A.; SALLY, H.; MERREY, D. J. (2003). Innovative approaches to agricultural water use for improving food security in sub-saharan Africa. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- KRISHNA, P. J. (2002). Enhanced resistance to water deficit stress in transgenic tomatoes. ISB News Report, December 2002.
- LEWIS, R. (2002). Using transgenesis to create salt-tolerant plants. *The Scientist*, March 2002
- MISHRA, S. (2002). Genetically engineered rice? Take a look at farmers' varieties. *Hindustan Times*, India, December 12.
- MOFFAT, A. S. (2002). Finding new ways to protect drought-stricken plants. *Science Magazine*, May 2002.
- N.N. (2001). western GMO opponents threaten efforts to feed world's poor. <http://un.newsedge-web.com>
- N.N. (2002). Altered genes may lower cotton's need for water. 01/23/2002 USA Today.
- N.N. (2002A). Environmental Effects of Transgenic Plants: The Scope and Adequacy of Regulation. Committee on Environmental Impacts Associated with Commercialization of Transgenic Plants Board on Agriculture and Natural Resources Division on Earth and Life Studies National Research Council. National Academic Press, Washington, D. C.
- N.N. (2002B). Aget Mitteilung, Stand 4. Januar. <http://www.plant.uoguelph.ca/safefood/archives/agnet-archives.htm>
- NULTSCH, W. (2001). Allgemeine Botanik. 11. Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- WANDTNER, R. (2002). Stressbewältigung bei Tomaten. *FAZ*, 15. Juli, Nr. **136**, S. 48, Feuilleton.
- PILON-SMITH, E.; EBSKAMP, M.; PAUL, M.; JEUKEN, M.; WEISBEEK, P.; SMEEKENS, S. (1995). Improved Performance of Transgenic Fructan-Accumulating Tobacco under Drought Stress. *Plant Physiology* **107**.
- PILON-SMITH, E.; TERRY, N.; SEARS, T.; VAN DUN, K. (1999). Enhanced drought resistance in fructan-producing sugar beet. *Plant Physiology Biochem.* **37** (4)
- PRANGE, A. (2003). Gefährliche Pollenflüge über dem Acker. *Rheinischer Merkur*, 31. Juli.
- PRETTY, J. & HINE, R. (2001). Reducing Food Poverty with Sustainable Agriculture: A Summary of New Evidence. Centre for Environment and Society, University of Essex, UK.
- RADFORD, T. (2001). Discovery heralds way for plants to survive drought. *The Guardian*, June 28.

- SCHMITZ, G. & SCHÜTTE, G. (2000). Plants resistant against abiotic stress. University of Hamburg
- SOMERVILLE, C. & BRISCOE, J. (2001). Genetic engineering and Water. Science, June 2001
- STRASBURGER, E. (2002). Lehrbuch der Botanik. 35. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin.
- SUNKAR, R.; BARTELS, D.; KIRCH, H. H. (2003). Overexpression of a stress-inducible dehydrogenase gene from *Arabidopsis thaliana* in transgenic plants improves stress tolerance. *The Plant Journal* **35**.
- SUPPER, S. (2003). Verstecktes Wasser. *Sustainable Austria*, Nr. **25** – Dezember 2003.
- WOOD, M. (2003). New plants shrug of salinity. *Agricultural Research magazine*, Januar 2003
- WU, R. & GARG, A. (2003). Engineering rice plants with trehalose-producing genes improves tolerance to drought, salt and low temperature. *ISB News Report*, February 2003.
- XU, D. ET AL. (1996). Expression of a late embryogenesis abundant protein gene, HVA1, from barley confers tolerance to water deficit and salt stress in transgenic rice. *Plant Physiology* **110**.
- YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; KASUGA, M.; LIU, Q.; NAKASHIMA, K.; SAKUMA, Y.; ABE, H.; SHINWARI, Z. K.; SEKI, M.; SHINOZAKI, K. (2002). Biological mechanisms of drought stress response. *JIRCAS Working Report 2002*.
- ZHANG, H.-X. & BLUMWALD, E. (2001). Transgenic salt-tolerant tomato plants accumulate salt in foliage but not in fruit. *Nature Biotechnology* **19**.

Hinweis: Wenn Sie Interesse an Informationen zu speziellen Themen im Bereich der Gentechnik haben, die wir im Rahmen einer zukünftigen Spezialausgabe der Gentechnik-Nachrichten bearbeiten können, dann schicken Sie Ihre Anfrage an folgende Adresse:

via e-mail: j.teufel@oeko.de

via Post: Dr. Jennifer Teufel; Öko-Institut e.V.; Postfach 6226; 79038 Freiburg

Diese Spezialausgabe der Gentechnik-Nachrichten wurde erstellt von: Martin Eimer
