

Entwicklung trockenintoleranter Maissorten

Stabil hohe Erträge durch intensive Forschung

Wassermangel als ertragslimitierender Faktor in der Maisproduktion nimmt auch in unseren Breiten in den letzten Jahren an Bedeutung zu. Der steigende Bedarf an Silomais wird z. T. durch eine Ausdehnung des Anbaus auf Grenzstandorte gedeckt, die bereits heute nicht in jedem Jahr eine optimale Wasserversorgung sicherstellen. Durch den zunehmenden Klimawandel werden gerade diese Standorte noch mehr unter Wassermangel leiden. Um auch unter diesen veränderten Bedingungen stabile Erträge auf einem möglichst breiten Spektrum an Standorten erzielen zu können, müssen Sorten entwickelt werden, die die jeweils verfügbaren Niederschlagsmengen effektiver nutzen bzw. toleranter gegenüber Trockenstress sind und stabil hohe Erträge gewährleisten.

Peter Westermeier und Sebastian Gresset, Freising

Die Maisanbauflächen in Deutschland haben in den letzten 10 Jahren einen stetigen Zuwachs erfahren. Diese Flächenausweitung erfolgt z. T. auch durch den zunehmenden Anbau von Mais auf Grenzstandorten, auf denen bereits heute wegen suboptimaler Wasserversorgung nicht in allen Fällen das genetisch

angelegte Ertragspotenzial optimal ausgeschöpft werden kann. Gerade diese Standorte zeigen bei Sommertrockenheit die größten Ertragseinbußen, die in Zukunft durch den prognostizierten Klimawandel sowohl an Häufigkeit als auch in ihrer Intensität zunehmen dürften. Der prognostizierte Klimawandel

wird in Deutschland weniger die Summe der Jahresniederschläge beeinflussen, jedoch wird es zu jahreszeitlichen Verschiebungen in der Niederschlagsverteilung kommen. Vor allem während der Vegetationsperiode werden vermehrt auftretende Trockenphasen prognostiziert mit entsprechenden Auswirkungen



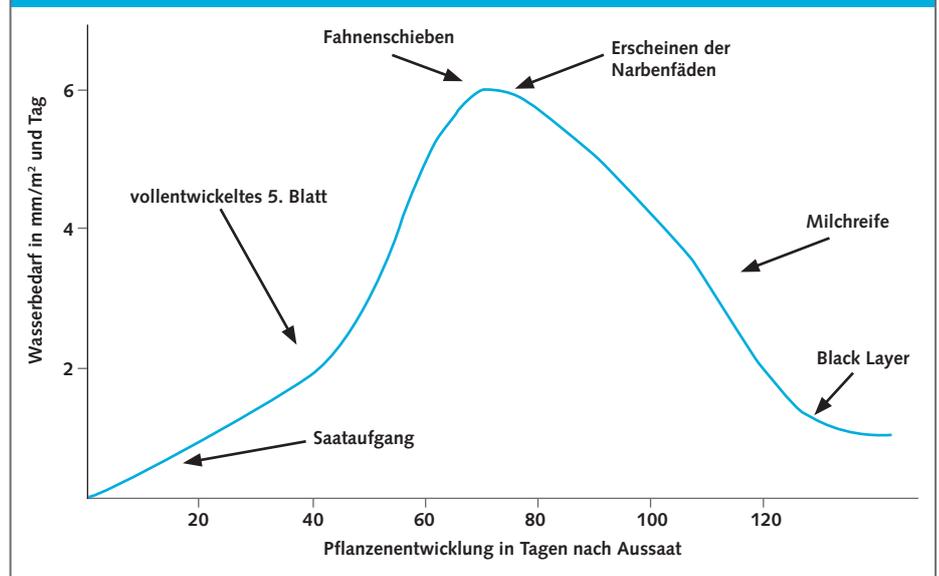
Prüfung von Maislinien unter definierten Trockenstressbedingungen in einem rain-out shelter am Lehrstuhl für Pflanzenzüchtung der Technischen Universität München

Fotos: Autoren

auf die Maisbestände. Rückblickend auf das Jahr 2012 kann man feststellen, dass zwar Mitteleuropa von einer flächendeckenden Dürre verschont blieb, es aber in vielen bedeutenden Maisanbaugebieten in Südeuropa und in Nordamerika z. T. erhebliche trockenheitsbedingte Ernteinbußen gab. Die Trockenheit in Nordamerika führte dazu, dass die Hälfte aller US-Bundesstaaten zu Notstandsgebieten erklärt wurden. Die durch Ernteauffälle verursachten Versicherungsschäden summieren sich dort auf circa 40 Mrd. US-\$.
Solche Ereignisse können jederzeit auch in Mitteleuropa, wie zuletzt im Jahr 2003, auftreten. Deshalb werden verstärkt Anstrengungen in der Züchtungsforschung unternommen, trockenolerante Sorten zu entwickeln. Da in Mitteleuropa Trockenheit nicht regelmäßig und flächendeckend auftritt, sollen die trockenoleranten Sorten unter suboptimalen Bedingungen einen möglichst hohen Ertrag liefern. Gleichzeitig darf aber die Trockenoleranz nicht zu Mindererträgen unter optimalen Bedingungen führen, wie es oftmals bei Sorten der Fall ist, die ausschließlich für Trockengebiete entwickelt wurden. Daher können Ergebnisse der Trockenoleranzforschung an tropischem und subtropischem Zuchtmaterial nicht in vollem Maße für die Entwicklung trockenoleranter Sorten für Mitteleuropa genutzt werden, sondern es müssen z. T. andere Selektionsmerkmale herangezogen werden.

Die Entwicklung von trockenoleranten Sorten, die auch unter suboptimaler Wasserverfügbarkeit stabile Erträge realisieren, stellt noch immer eine besondere Herausforderung für die Züchter dar. Das Merkmal Trockenoleranz besitzt nur eine geringe Erbllichkeit, außerdem treten Trockenstresssituationen unregelmäßig auf, was die Möglichkeit der Selektion trockenstresstoleranter Genotypen auf vereinzelte Jahre beschränkt. Die Gründe für die geringe Erbllichkeit der Trockenstresstoleranz sind eine hochkomplexe Vererbung, die Variabilität im zeitlichen Auftreten der Wasserknappheit und die unterschiedliche Intensität und Länge des Stresses (Blum 1988, Ceccarelli und Grando 1996). Zudem tritt Trockenstress im Feld selten isoliert auf, sodass die Reaktion der Pflanzen oft eine Kombination aus Wassermangel, Hitzestress und Nährstoffmangel darstellt. Eine Sorte, die unter einer bestimmten Trockenstressbedingung einen besonders hohen Ertrag generiert, kann möglicherweise in einer anders zu-

Abb. 1: Schematische Darstellung des Wasserbedarfs von Mais in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium



sammengesetzten Stresskombination diesen Ertragsvorteil nicht zeigen.

Ertragsbedingende Faktoren unter Trockenstress

Ein möglicher Ansatz, um diese Problematik zu lösen, ist die Fokussierung auf klar definierte Trockenstressszenarien sowie die Nutzung von sekundären Selektionsmerkmalen, die unter Trockenstressbedingungen exakt zu erfassen sind, gleichzeitig aber im engen Zusammenhang mit dem Zielmerkmal Ertrag stehen. Ein weitverbreitetes Konzept ist, den Ertrag unter Trockenstress als Funktion der von der Pflanze genutzten Wassermenge (WG), der Wassernutzungseffizienz (WNE) und des Harvestindex (HI), also das Verhältnis von generativen, erntbaren Pflanzenteilen zur gesamten oberirdischen Biomasse, zu betrachten (Pasioura 1996).

$$\text{Ertrag} = \text{WG} \times \text{WNE} \times \text{HI}$$

Eine Verbesserung der Wassernutzungseffizienz, definiert als das Verhältnis zwischen der gesamten erzeugten Biomasse und dem dabei transpirierten Wasser, wird häufig als Merkmal der Wahl postuliert. Forschungsergebnisse an Kulturarten wie Weizen und Reis zeigen jedoch in den meisten Fällen einen negativen Zusammenhang zwischen WNE und Ertrag (Sinclair und Muchow 2001, Condon et al. 2002, Blum 2005). Daher stehen Merkmale, die die gesamte von der Pflanze genutzte Wassermenge (WG) oder den Harvestindex (HI) beeinflussen, im Hauptfokus der Selektion.

Für diese Ertragskomponenten wurden bereits sekundäre Merkmale identifiziert, die eine effektivere Selektion trockenoleranter Genotypen ermöglichen (Bänziger et al. 2000).

Zu diesen sekundären Merkmalen zählt bei Mais u. a. die Synchronität von männlicher und weiblicher Blüte, das anthesis-silking-Intervall (ASI). Das ASI misst die Zeit in Tagen zwischen dem Beginn des Pollenfluges und dem Erscheinen der Narbenfäden. Ein geringeres ASI bedeutet eine größere Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Befruchtung, einen besseren Kornansatz und schließlich einen höheren Kornertrag. Durch züchterische Selektion wurde das ASI sukzessive reduziert, dennoch ist dieses Merkmal unter Bedingungen mit Wassermangel ab einer Woche vor der Blüte von besonderer Relevanz (Bolanos und Edmeades 1996, Ribaut et al. 2004). Während der Blüte ist der Wasserbedarf der Maispflanzen am größten (Abb. 1), gleichzeitig sind die Pflanzen in diesem Stadium am anfälligsten für Trockenstress. Die Narbenfäden weisen den größten Wassergehalt aller Maispflanzenteile auf, eine zu geringe Wasserverfügbarkeit in diesem Stadium führt zu einem reduzierten Streckungswachstum und somit zu einem verzögerten Austreten der Narbenfäden aus den Lieschblättern. Der Zeitpunkt des Pollenschüttens bleibt dabei aber nahezu konstant. In der Folge stehen zum Zeitpunkt des Erscheinens der Narbenfäden nicht mehr ausreichend Pollen zur Verfügung, um eine vollständige Befruchtung der Kornanlagen zu gewährleisten. Das

bekannte Bild halb gefüllter Maiskolben (Abb. 2) und Mindererträge von bis zu 50 Prozent sind die Folge.

Ein weiteres vielversprechendes Selektionskriterium ist das in der Literatur als „Stay-Green“-Effekt bezeichnete Merkmal (Ribaut et al. 2004). Dieses beschreibt die Fähigkeit mancher Genotypen, nach der Blüte die Seneszenz der Blätter während einer Trockenstressperiode hinauszuzögern (Rosenow und Clark 1981). Dadurch vergrößert sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Pflanze bei wieder einsetzendem Niederschlag die Photosynthese wieder aufnehmen kann und zusätzliche Assimilate ins Korn einlagert. Eine beschleunigte Blattseneszenz unter Trockenstress beruht größtenteils auf einer vorzeitigen Verlagerung des in den Blättern gespeicherten Stickstoffs in die Körner (Thomas et al. 2002). Die diesem Phänomen zugrunde liegenden pflanzenphysiologischen Mechanismen sind noch wenig untersucht, doch scheint ein Zusammenhang zwischen einer verzögerten Seneszenz unter Trockenstress mancher Genotypen und einer effektiveren N-Aufnahme aus dem Boden zu bestehen (Rajcan und Tollenaar 1999).

Das sichtbarste Zeichen von akutem Wassermangel bei der Maispflanze ist das Blattrollen (Abb. 3). Bisher ist noch nicht abschließend geklärt, inwieweit dies ein aktiver Schutzmechanismus der Maispflanze oder eine passive Folge des

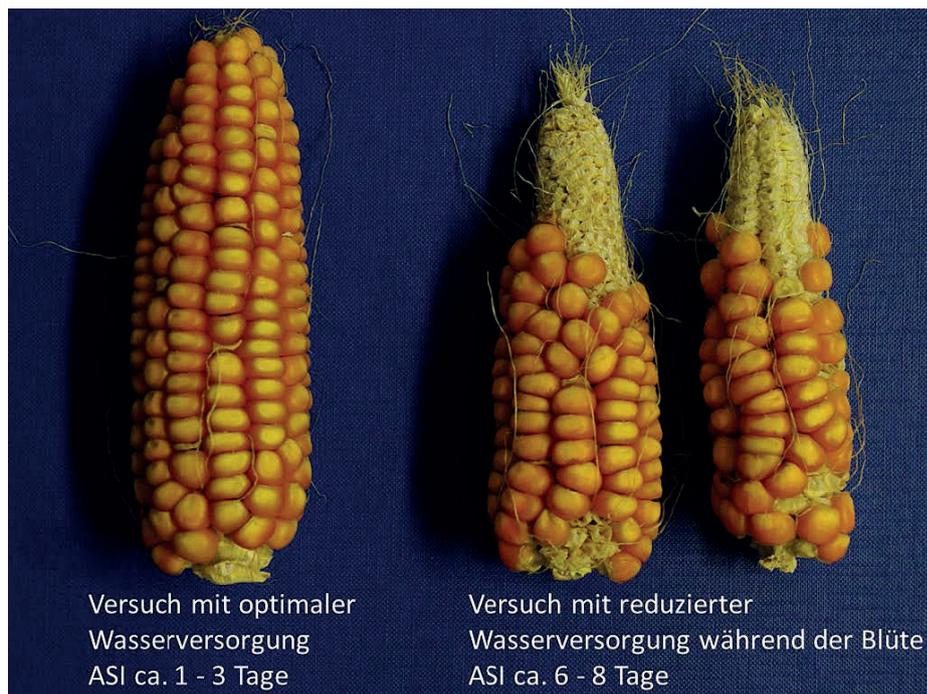


Abb. 2: Vergleich einer Maislinie unter optimaler Bewässerung und unter reduzierter Wasserversorgung

Wassermangels ist. Als aktiver Schutzmechanismus wird eine durch das Rollen der Blätter bedingte Verringerung der effektiven Verdunstungsfläche bei Wassermangel, wodurch die Chloroplasten (Ort der Photosynthese in der Zelle) vor Zerstörung durch ein Übermaß an Sonneneinstrahlung und Hitze geschützt werden, diskutiert. Zudem könnte das Rol-

len der Blätter ein Symptom reduzierten Zelldrucks (Turgor) sein. Genotypen, die sich durch ein geringes Blattrollen auszeichnen, zeigen jedoch ein verbessertes Regenerationspotenzial nach kurzen Trockenstressperioden (O'Toole und Cruz 1979, Blum 2004).

Die herausragende Bedeutung der Wurzelmorphologie für die Wasseraufnahme von Mais wurde bereits in der letzten Ausgabe der Zeitschrift *mais* eingehend beschrieben. Eine züchterische Optimierung des Wurzelsystems ist daher ein weiteres Zuchtziel, um stabil hohe Erträge zu gewährleisten. Die Charakterisierung der Wurzelmorphologie einer Vielzahl von Genotypen im Feld ist jedoch nur in den wenigsten Fällen praktikabel, wodurch eine Selektion auf erwünschte Wurzelcharakteristika stark eingeschränkt wird. Ein Ansatz, um diese Problematik zu lösen, ist die Identifikation und funktionelle Charakterisierung von Genomregionen in Mais (QTL, Quantitative Trait Loci), die eine optimierte Wurzelmorphologie bedingen (Tuberosa et al. 2002, Hund et al. 2004, Hochholdinger und Tuberosa 2009). Somit können direkt auf Genomebene jene Genotypen selektiert werden, die möglichst viele erwünschte QTL vereinen und somit eine an die Umweltbedingungen angepasste Wurzelmorphologie aufweisen.

Aktuelle Forschungsarbeiten des Lehrstuhls für Pflanzenzüchtung der Technischen Universität München in Kooperation mit der KWS Saat AG haben

zum Ziel, eine Auswahl von sekundären Merkmalen auf deren Relevanz im mitteleuropäischen Zuchtmaterial unter spezifischen Trockenstresssituationen, die mithilfe eines rain-out shelters (s. Foto S. 24) generiert werden, zu testen. Ein weiteres Ziel ist dabei die Identifikation von Genomregionen, die diese Merkmale beeinflussen und deren jeweiligen Effekt auf den Phänotyp zu bestimmen, um die Entwicklung zukünftiger trockenstresstoleranter Sorten zu beschleunigen.

Internationale Aktivitäten zur Züchtung trockenstresstoleranter Sorten

Nahezu alle bedeutenden Maiszüchter arbeiten derzeit weltweit an der Entwicklung trockenstoleranter Maissorten. Dabei werden von den Züchtern unterschiedliche Strategien verfolgt. Die Ansätze lassen sich danach unterteilen, ob klassische Züchtung oder gentechnische Ansätze angewendet werden.

Die Firma Monsanto entwickelte in Kooperation mit BASF einen gentechnischen Ansatz unter der Bezeichnung MON87460 (Markenname: Drought-Gard®). In das Maisgenom wurde ein Gen des Bakteriums *Bacillus subtilis* eingebaut, das für das Kälte-Schock-Protein B codiert (cspB). In Mais führt dieses Protein dazu, dass unter Wassermangel wichtige Zellfunktionen aufrechterhalten bleiben. Der im Rahmen von Feldversuchen ermittelte Mehrertrag gegenüber einer konventionellen Kontrolle bei „moderater Trockenheit“ wird von Monsanto mit 6 bis 10 Prozent angegeben. Die amerikanische Landwirtschaftsbehörde USDA gibt den erwarteten Mehrertrag mit 2,76 Prozent an, andere Organisationen mit circa 1 Prozent. Die Markteinführung in den USA ist für das Jahr 2013 geplant, die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) hat mittlerweile die Sicherheitsprüfung zur Zulassung als Lebens- und Futtermittel in der EU abgeschlossen, mit einer Genehmigung für den Anbau in der EU ist in absehbarer Zeit nicht zu rechnen (www.transgen.de). Limagrain arbeitet nach eigenen Angaben derzeit zusammen mit dem Biotechnologieunternehmen Biogemma an einem transgenen Ansatz, bei dem Gene, die in der Sorghum-Hirse für Trockentoleranz verantwortlich sind, in den Mais übertragen werden sollen.

Die Unternehmen Syngenta, Pioneer Hi-Bred und KWS haben jeweils trockenstresstolerante Maissorten im Angebot,



Abb. 3: Beispiele einer trockenstressanfälligen Linie mit deutlichem Blattrollen und einer trockenstresstoleranten Linie, welche unter den gleichen Wasserbedingungen keine Stresssymptome zeigt

die auf klassischer Züchtung beruhen. Agrisure Artesian™ (Syngenta) wurde durch Kombination mehrerer Trockentoleranzgene mithilfe markergestützter Selektion entwickelt. Die züchterisch bearbeiteten Merkmale umfassen dabei u. a. ein umfangreiches Wurzelsystem, ein stabiles Blattflächen- und Pflanzenwachstum unter Stress, Aufrechterhaltung der Zellfunktionen und eine verzögerte Seneszenz. Laut Syngenta sollen die mit dieser Technologie ausgestatteten Hybriden unter großer Trockenheit einen durchschnittlichen Mehrertrag von circa 17 Prozent gegenüber konventionellen Hybriden erzielen, ohne negative Effekte auf den Ertrag unter optimal versorgten Bedingungen. Eine Bestätigung dieser Ergebnisse im Rahmen von offiziellen Feldversuchen steht noch aus. Die Markteinführung erfolgte im Jahr 2011 in den USA. Die Entwicklung von Optimum® AquaMax® (Pioneer Hi-Bred) erfolgte durch den Aufbau eines speziellen Trockentoleranz-Zuchtprogramms mit einer intensiven Phänotypisierung in Verbindung mit Methoden der markergestützten Selektion. Die hier züchterisch bearbeiteten Merkmale umfassen u. a. ein fein verzweigtes Wurzelsystem, eine kräftige Entwicklung der Seide und eine verzögerte Seneszenz. Der Ertragsvorteil unter wasserlimitierten Bedingungen wird von Pioneer mit 8,9 Prozent angegeben, ebenfalls ohne Ertragsreduktion unter optimalen Bedingungen. Die Hybride P0725 (Optimum® AquaMax®), eine späte Silomaisorte (S320), wurde im Jahr 2012 auf den DLG-Feldtagen vorgestellt und ist ab 2013 in Europa erhältlich. Die KWS Saat AG hat ebenfalls konventi-

onell gezüchtete Sorten im aktuellen Programm, die Trockentoleranz aufweisen (u. a. Ricardinio und Colisee).

Am International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT) in Mexiko werden die Merkmale ASI, Stay Green und Blattrollen bereits seit circa 1970 erfolgreich in tropischem Material für die Selektion trockenstresstoleranter Maislinien eingesetzt. Durch eine indirekte Selektion auf diese Merkmale konnte unter Trockenstress Zuchtfortschritt generiert werden. Seit 2006 wurden basierend auf diesen Arbeiten insgesamt 105 neue Maissorten entwickelt, die im Rahmen des Projekts „Trockentoleranter Mais für Afrika“ in 13 Ländern Afrikas, die besonders von Trockenheit betroffen sind, verbreitet und zum Anbau gebracht werden. Der durchschnittliche Mehrertrag gegenüber den ursprünglich angebauten Sorten wird dort mit 20 bis 30 Prozent angegeben.

Eine Literaturliste kann bei den Autoren nachgefragt werden. <<

■ KONTAKT ■ ■ ■

Dr. Peter Westermeier und Sebastian Gresset

Technische Universität München
Lehrstuhl für Pflanzenzüchtung
85354 Freising

Telefon: 08161 714139
Telefax: 08161 714511
westermeier@tum.de
sebastian.gresset@tum.de