

Wie geht es weiter mit der Weizenzüchtung?

Peter Stamp¹, Dario Fossati², Fabio Mascher² und Andreas Hund¹

¹ETH Zurich, Institut für Agrarwissenschaften, 8092 Zürich, Schweiz.

²Agroscope, Institut für Pflanzenbauwissenschaften IPB, 1260 Nyon, Schweiz

Auskünfte: Peter Stamp, E-Mail: peter.stamp@usys.ethz.ch



Abb. 1 | Die Züchterinnen und Züchter von Agroscope achten auf eine hohe Krankheitsresistenz ihrer Sorten.

Einleitung

Vor hundert Jahren schrieb der ETH Professor A. Nowacki, in dreissigjähriger Arbeit die Getreideerträge im deutschen Kaiserreich von 1,1 auf 1,6 t/ha gesteigert zu haben, sei sein Leistungsausweis. Bereits damals war der mit Dampfschiffen aus Nordamerika importierte Brotweizen konkurrenzlos billig geworden. Die Europäer - die Schweiz ausgenommen - hatten begonnen, englischen und amerikanischen Massenweizen in ihre Sorten einzukreuzen, ihr höherer Ertrag wurde allerdings mit einer geringeren Backqualität erkaufte (Porsche und Taylor 2001). Nach dem Ersten Weltkrieg dachte man um und beachtete für eine minimale Selbstversorgung neben dem Ertrag auch die Backqualität. Heute stehen

europaweit Sorten zur Verfügung, die in gesunden Beständen Erträge von mehr als 10 t/ha bringen. Bei richtiger Bestandesführung, das heisst vor allem bei genügend verfügbarem Stickstoff vor und nach der Blüte, liefern sie für den europäischen Markt backfähige Ware, auch wenn die Schweizer Qualitätsstandards nicht unbedingt erreicht werden. Die ausnehmend hohe Backqualität der Schweizer Sorten im Einklang mit einer hohen Bestandesgesundheit galt über Jahrzehnte als selbstverständlich (Abb. 1). Diese Sorteneigenschaften wurden jedoch von der Abnahmegarantie des Bundes getragen. Mit dem Umdenken auf nationale und internationale Vermarktbarkeit staatlich gezüchteter Sorten gilt es, die Vorteile der eigenen Sorten mit deutlich gesteigerter Ertragsfähigkeit zu kombinieren (Fossati und Brabant 2003).

Saatgutwechsel ist der Motor der privaten Züchtung

Das Fundament unserer Esskultur bildet der Brotweizen, daher muss dessen Anbau ebenso weitergehen wie die Züchtung. Dieses Muss erklärt sich allein schon durch das Auftreten immer neuer Schaderreger beziehungsweise neuer Pathotypen, die sich bei einer auf allen Kontinenten angebauten Kulturpflanze schnell global ausbreiten. Allein dies erfordert die permanente Selektion auf Resistenz. Sorten, die 2030 unbedingt notwendig sind, müssen bereits dieses Jahr geplant und im nächsten Jahr durch erste Kreuzungen begonnen werden (Stamp 2011). Diesen Fortschritt - hoher Ertrag und hohe Qualität, verbunden mit einer ausgezeichneten Ertragssicherheit durch robustes Überdauern und Wachstum bei Frost und Hitze, Dürre und Nässe - erwarten die Landwirtinnen und Landwirte. Aber bezahlen sie auch genügend dafür? Nein! Ohne regelmässigen Saatgutwechsel geht den Züchtungsfirmen der herkömmlichen Liniensorten das Geld aus. Zwar sind in der EU bei Nachbau Lizenzgebühren seit Jahren festgelegt, aber diese sind bei Nachbau auf viel zu tiefem Niveau angesetzt. Das erklärt bereits, warum es weltweit viele Züchterinnen und Züchter für Mais gibt: der stete Saatgutwechsel beim Hybridanbau ermöglicht Züchtungsfir-

men eine langfristige Investitionsplanung. Beim Weizen liegt der Nachbau beispielsweise in Deutschland, Frankreich oder Italien um die 50 % (Curtis und Nilson 2012), völlig unzureichend für eine weiterhin starke Züchtung von Selbstbefruchtensorten wie Weizen und Gerste. In der Schweiz nimmt der Nachbau erfreulicherweise immer noch weniger als 10 % der Weizenflächen ein (pers. Mitteilung Willi Wicki, DSP).

Stand der Züchtung gut, Zukunft muss gesichert werden

Im letzten Jahrhundert stiegen die in der Landwirtschaft erreichten Erträge rasch an (Hategekimana *et al.* 2012). Verglich man jedoch die oberirdische Gesamtmasse alter und neuer Sorten bei optimaler Nährstoffversorgung und ohne Lagerungsschäden, war der Züchtungsfortschritt gering. Meist begründete sich der Anstieg des Kornertrages allein auf der Steigerung des Ernteindex, d.h. der Anteil des Kornes an der Sprossbiomasse stieg von ca. 35 % auf über 50 % (Peltonen-Sainio *et al.* 2008). Mit kurzen Halmen nahm die Standfestigkeit zu und physiologisch optimale Stickstoffmengen konnten zu den entscheidenden Wachstumsphasen gedüngt werden. Übersichtsartikel belegen nun aber, dass in Europa seit 20 Jahren kaum noch Steigerungen der Weizenerträge zu verzeichnen sind. Dies liegt zum einen daran, dass der bereits vor ca. drei Jahrzehnten erreichte Ernteindex von über 50 % als Motor des Ertragsfortschrittes ausfällt. Hinzu kommen in politische Verordnungen gefasste Wünsche der Gesellschaft nach einer Ökologisierung der Landwirtschaft und mutmasslich auch der Klimawandel (Brisson *et al.* 2010). Die mit der Ökologisierung einhergehende Verringerung von Steuerungsmöglichkeiten bei Wachstum und Bestandesgesundheit durch Düngung und Pflanzenschutzmittel macht es schwierig, den Zuchtfortschritt genau zu erfassen. In der Schweiz kommt noch hinzu, dass sehr stark auf Proteingehalt selektiert wird, was die Möglichkeiten einer gleichzeitigen Ertragsmaximierung begrenzt. Allerdings muss der Maximalertrag – erreicht, wenn die beste Sorte bei intensiver Bestandesführung angebaut wird – mit dem Feldertrag verglichen werden, der ökonomisch von guten Landwirtinnen und Landwirten erreicht wird. Dieser liegt in fortschrittlichen Ländern wie Grossbritannien bei etwa 80 % des Maximalertrages; auf der Basis des Maximalertrags beträgt der Zuchtfortschritt pro Jahr 1 %, für eine globale Ernährungssicherheit im Jahre 2050 müsste er aber bei 2,5 % liegen (Fischer und Edmeades 2010)

Zuchtziele bleiben Ertrag und Qualität, neue Zugpferde für die Selektion müssen noch etabliert werden. Seit Beginn des Brotweizenanbaus sind Steigerungen von Ertrag und Qualität die Hauptziele der Züchtung. >

Zusammenfassung

In der Schweiz hat die staatliche Züchtung von krankheitsresistentem Qualitätsweizen eine lange Tradition, der Spielraum für deutliche Steigerungen des Ertragspotenzials ist jedoch noch nicht ausgereizt. Anders sieht es in der EU aus, wo die Züchtung fast ausschliesslich privat organisiert ist: dort wurde vor 100 Jahren zunächst der Ertrag einseitig gesteigert, bevor man sich später auf Qualität rückbesann. Auch bei Massenweizensorten stockt der Ertragsfortschritt mit gerade einmal 1 % pro Jahr, für die globale Ernährungssicherheit müssten es jedoch 2,5 % sein. Um dies zu erreichen, müsste man sehr viel mehr investieren. Aber dem steht der schwache Rückfluss von Lizenzeinnahmen entgegen. In manchen Ländern hat der Nachbauweizen einen Anteil von 50 % erreicht. Imposante Ertrags sprünge sind in dieser Situation nicht zu erwarten, zumal der Ernteindex – der Anteil der Korn- an der Gesamtsprossmasse – heute mit über 50 % vermutlich am Optimum angekommen ist und seine Rolle als Motor des Fortschritts eingebüsst hat. Aber der Einsatz molekularer Werkzeuge präzisiert und beschleunigt die Züchtung – Methoden, die man auch oft unter dem Begriff «smart-breeding» zusammenfasst. Hier stehen wir beim hexaploiden Weizen erst am Anfang. Eine Verdoppelung der Fotosyntheseeffizienz ist angedacht, erfordert aber eine Neukonstruktion der drei Milliarden Jahre alten Fotosynthese, und lässt sich nicht in den nächsten Jahrzehnten verwirklichen. Somit wird der intelligente Einsatz ALLER Hilfsmittel nötig sein, um auf den Klimawandel mit begleitenden Maßnahmen zu reagieren, damit sich neue Sorten an das rasante Wechselspielen von Nässe und Trockenheit sowie Kälte und Hitze anpassen können. Gleiches gilt für die Anpassung an immer neue Schädlinge und Krankheiten in einer globalisierten Welt.

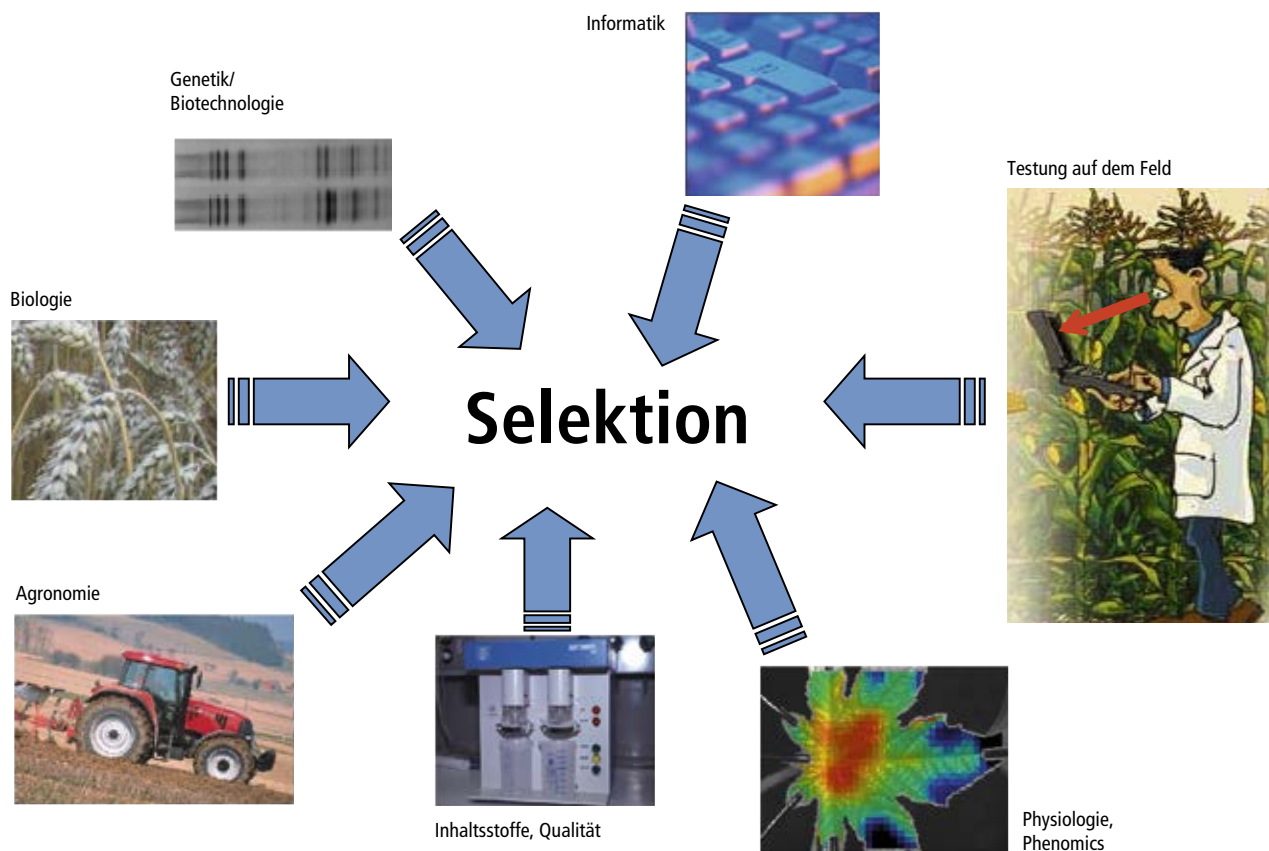


Abb. 2 | Moderne Züchtung ist die Vernetzung von komplexem Fachwissen.

Heute verstehen wir die biochemischen Grundlagen für die Backqualität sehr gut. Es ist vor allem die Zusammensetzung des Glutens, der Speichereiweisse im Mehlkörper. Gluten besteht aus vielen kleinen Eiweisstypen, den Gliadinen, sowie den ebenfalls zahlreich vertretenen grossen Eiweisstypen, den Gluteninen. In einem sehr komplexen Zusammenspiel bestimmen vorwiegend die Glutenbestandteile die Backqualität. Zwar sind für deren wichtigste Vertreter die genetischen Grundlagen schon bekannt, aber noch wird dieses Wissen nicht gezielt genug eingesetzt, um routinemässig im Labor eine Vorprüfung des Zuchtmaterials auf künftige Backeigenschaften zu machen (Gobaa 2007). Leider wissen wir inzwischen auch, dass die Ernährungsqualität des Weizeneiweisses nicht beliebig gesteigert werden kann, da für die «Verklebung» der Eiweisse schwefelhaltige Aminosäuren wesentlich sind; diese sind also technisch für das Backen wichtig, aber diätetisch weitgehend bedeutungslos. Zugleich erklären diese Aminosäuren auch, warum es für hohe Brotweizenerträge bei über 12 % Eiweiss eben auch genügend Schwefel im Boden braucht. Die Umverteilung von Stroh zu Korn war für 100 Jahre das Leitmerkmal für den ansteigenden Kornertrag, gleichzeitig auch für die steigende Kornzahl pro Hektar.

Noch kennen wir kein vergleichbares starkes Leitmerkmal auf physiologischer oder molekularer Ebene, mit dem sich die Erträge weiterhin rasch steigern lassen können. Die Grünflächendauer nach Blüte ist zusammen mit dem Ernteindex sicher sehr wichtig für gutes Kornwachstum und -ertrag. Da die Grünflächendauer jederzeit durch Krankheiten, Schädlinge, Hitze und Dürre gefährdet ist, erklärt sich die Wichtigkeit von biotischen und abiotischen Toleranzen. So erreicht Wildweizen zwar sehr hohe Fotosyntheseraten, aber die Blätter sterben bald nach der Blüte ab. Unsere standfesten Weizensorten sorgen bei guter Stickstoffversorgung für eine sehr lange Grünflächendauer, doch die Grenzen dieser Selektionsmöglichkeit wird am Beispiel Mais deutlich, wo «Bleib-Grün»-Typen im Extremfall bei grünen Blättern erntereife Körner haben. Fazit daraus: es sind keine grossen Sprünge in der Weizenzüchtung für die kommenden Jahrzehnte in Sicht. Ein Lichtschimmer im reinen Wortsinne sind weltweite Beobachtungen bei Weizen und Mais, dass erstmals eine verbesserte Fotosyntheseleistung in Hochleistungssorten zum Zuchtfortschritt beiträgt (Fischer und Edmeades 2010).

In die gleiche Richtung weisen Berechnungen von Biochemikern, denen zufolge die Pflanzenleistung theore-

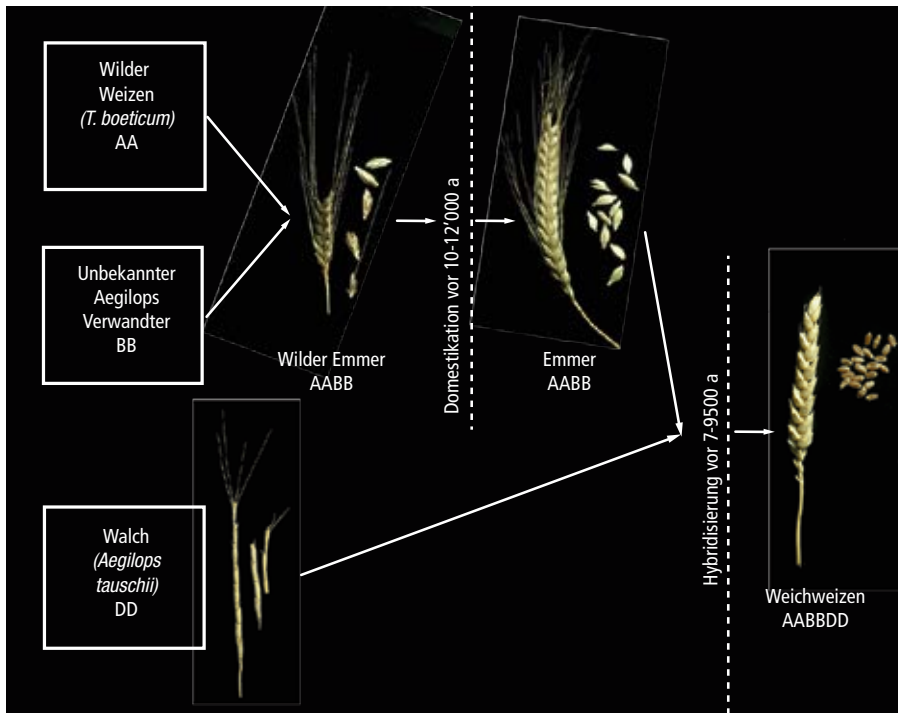


Abb. 3 | Abstammung des Brotweizens. (Quelle: www.sortengarten.ethz.ch)

tisch verdoppelt werden kann, in dem Enzymaktivitäten und andere Prozesse mit grundlegenden Eingriffen an die steigenden Konzentrationen von CO₂ in der Atmosphäre angepasst werden (Zhu *et al.* 2010). Dies ist Zukunftsmusik und eine Aufgabe für die vor uns liegenden Jahrzehnte. Momentan muss erforscht werden, wie sich vor allem die Fotosyntheseausbeute während der Blüte verbessern lässt, um die Anzahl Körner pro Fläche weiter steigern zu können. Aktuell fehlen sofort umsetzbare Selektionsmerkmale für die Züchtung. Dies ist eine der grossen Herausforderungen für die moderne Molekularbiologie.

Zuchtfortschritt geht auch heute weiter

Der Fokus für die nächsten Jahre richtet sich auf die Gesamtvitalität der Pflanze, einschliesslich einer verbesserten Toleranz gegenüber Krankheiten und Klimaschwankungen. Auch dem Erfolg dieser Zuchtziele sind natürlich Grenzen gesetzt, da Toleranzen der Pflanze oft «Kosten verursachen», durch zusätzliche StoffwechsellLeistungen oder Wechselwirkungen mit Wachstumsvorgängen. Dies wurde bereits am Beispiel der Sorte Arina richtungsweisend gezeigt (Ortelli *et al.* 1996). Andererseits können wir zunehmend die neuen Selektionswerkzeuge der molekularen Genetik einsetzen. Sie stehen seit langem im Zentrum des öffentlichen Interesses. Aber die moderne Züchtung ist ein sehr komplexes Unterfangen, das nur dann zur neuen Sorte führt, wenn die Züchterin / der Züchter alle Abläufe beherrscht (Abb. 2). Seit

mehr als zwei Jahrzehnten läuft bereits eine intensive Diskussion über die Nutzungspotentiale der Erkenntnisse auf molekularer Ebene, beständig angefeuert durch Fortschritte in der Kenntnis von Aufbau und Funktion einzelner Gene und ihrem sehr komplexen Zusammenspiel bei der Ausbildung von Eigenschaften der Pflanze (Stamp und Visser 2012). Oft fokussiert sich das Interesse leider nur auf die Gentechnologie und deren Potential, durch Einfügung einzelner Gene/Allele Schwächen einer sonst sehr guten Sorte zu beheben. Die molekulare Genetik ist begrifflich der Gentechnologie übergeordnet, sie umfasst die Entschlüsselung der Gesamtheit aller Gene einer Pflanze – dem Genom – deren Zusammenspiel und deren Diagnostik. Ermöglicht die Gentechnik die Ergänzung oder Reparatur der genetischen Ausstattung, so erlauben von der Kenntnis wichtiger Gene abgeleitete Marker die Selektion am Gen, international mit MAS (*marker assisted selection*) abgekürzt. Ein neuer Ansatz ist, die genomweite Anordnung vieler Marker zu berücksichtigen, um den Wert einer zu selektierenden Pflanze oder Linie zu bestimmen. Diese «genomische Selektion» steckt bei Weizen allerdings noch in den Kinderschuhen. Oft wird die intelligente Integration aller molekularbiologischen und konventionellen Techniken, die es erlaubt, schneller und präziser zu züchten, als «Smart-Breeding» bezeichnet (Lusser *et al.* 2012). Theoretisch könnte man bei der Auswahl der Kreuzungseltern oder vor der Anerkennung ausgezeichneter Test- ▶

linien mit «Smart-Breeding» untersuchen, ob alle gewünschten Gene für Backqualität, Krankheitsresistenzen etc. vorhanden sind. Dies klingt gut, ist bei Weizen aber gar nicht so schnell umzusetzen. So hat Reis ein sehr kleines Genom, Brotweizen dagegen vereinigt gleich die kompletten Genome von drei verschiedenen wenn auch verwandten Wildweizenarten in sich, fünffach grösser als beim Menschen (Abb. 3). Daher ist die Gesamtschlüsselung des Weizengenoms erst 2009 an der Modelllinie Chinese Spring gelungen, auf dieser Wissensbasis entwickelte Sorten werden nicht vor 2030 erwartet (Brenchley *et al.* 2012). Allerdings ist die Generkennung in den letzten Jahren zwanzigfach billiger und sehr viel schneller geworden. So können bereits heute viele bekannte Eigenschaften mit Hilfe der DNA-Chip-Technologie oder durch Sequenzierung diagnostiziert und selektiert werden.

Die genetischen Ressourcen der Genbanken stellen immer noch ein riesiges unerschlossenes Potential für die Entdeckung unbekannter Gene dar, das mit der DNA-Chip-Technologie erschlossen werden kann. Noch liegen dort Hunderttausende alter Weizenlandsorten aus aller Welt im Dornröschenschlaf. Wir wissen beispielsweise, dass viele Krankheitsresistenzgene dort zu finden sind, deren Erschliessungsmöglichkeit eine richtungweisende Studie an der Universität Zürich aufzeigte (Bhullar *et al.* 2010). Die Züchterinnen und Züchter werden sich erst dann dafür interessieren, wenn er das neue Gen oder das neue Allel mit Hilfe von Markern schnell und präzise in eine Zuchtsorte hinein platzieren kann, mit Hilfe der Rückkreuzung oder eventuell durch den Einsatz der Gentechnologie.

Literatur

- Bhullar N.K., Mackay M. & Keller B., 2010. Genetic Diversity of the Pm3 Powdery Mildew Resistance Alleles in Wheat Gene Bank Accessions as Assessed by Molecular Markers Diversity 2: 768–786.
- Brenchley R., Spannagl M., Pfeifer M., Barker G.L.A., D'Amore R., Allen A.M., McKenzie N., Kramer M., Kerhornou A., Bolser D., Kay S., Waite D., Trick M., Bancroft I., Gu Y., Huo N., Luo M.-C., Sehgal S., Gill B., Kianian S., Anderson O., Kersey P., Dvorak J., McCombie W.R., Hall A., Mayer K.F.X., Edwards K.J., Bevan M.W. & Hall N., 2012. Analysis of the bread-wheat genome using whole-genome shotgun sequencing. *Nature* **491**, 705–710. DOI: 10.1038/nature11650.
- Brisson N., Gate P., Gouache D., Charmet G., Oury F.-X. & Huard F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research* **119**, 201–212. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.07.012.
- Curtis F. & Nilson M., 2012. Collection systems for royalties in wheat, an International study. *Bio-Science Law Review* **12**.
- Fischer R.A. & Edmeades G.O., 2010. Breeding and Cereal Yield Progress. *Crop Science* **50**, S85–S98. DOI: 10.2135/cropsci2009.10.0564.
- Fossati D. & Brabant C., 2003. Die Weizenzüchtung in der Schweiz. *Agrarforschung* **10** (11–12): 447–458.

Schlussfolgerungen

Seit mehr als hundert Jahren wird in der Schweiz Weizen gezüchtet, die Aufgabe Gesundheit, Backqualität und Ertrag auf hohem Niveau zu verbinden, bleibt unverändert bestehen. Doch gibt es mittlerweile europaweit ertragstarke Sorten mit akzeptabler Backqualität. Steigen grosse Firmen zudem in die Weizenzüchtung ein, werden wir wahrscheinlich eine Erhöhung der Präzision und Schnelligkeit erleben, wie dies bereits bei Mais der Fall ist. Dennoch hat auch das zwar kleine, aber auf langjährigem fokussiertem Einsatz basierte Züchtungsprogramm der Agroscope ein erstaunlich hohes Potenzial, diesen Herausforderungen zu begegnen. Seine große Stärke sind engagierte, in der Züchtung erfahrene und wissenschaftlich bestens ausgebildete Fachleute; sie haben in der Vergangenheit bewiesen, dass durch eine effiziente Zusammenarbeit mit der DSP auch die staatliche Züchtung Marktchancen nutzen kann. Zudem bietet die engräumig vernetzte Schweiz grosse Chancen, die Züchtungsforschung von ETH und kantonalen Universitäten mit Agroscope so abzustimmen, dass eine Win-Win-Situation entsteht. Mit anderen Worten, durch oft nur geringfügige Anpassung von Zielen und Durchführung der Forschung können Wissenschaft und Züchtung gewinnen. Dies bedeutet keine Abschottung, sondern zusätzliche Möglichkeiten, durch internationale Kontakte wichtige Veränderungen im internationalen Raum umzusetzen. Nur wer geben kann, bekommt auch etwas. ■

- Gobaa S., Bancel E., Kleijer G., Stamp P. & Branlard G., 2007. Effect of the 1BL.1RS translocation on the wheat endosperm, as revealed by proteomic analysis. *Proteomics* **7**, 4349–4357. DOI: 10.1002/psic.200700488.
- Hategekimana A., Schneider D., Fossati D. & Mascher F., 2012. Performance and nitrogen efficiency of Swiss Wheat varieties from the 20th century. *Agrarforschung Schweiz* **3** (01), 44–51.
- Lusser M., Parisi C., Plan D. & Rodriguez-Cerezo E., 2012. Deployment of new biotechnologies in plant breeding. *Nat. Biotechnol.* **30**, 231–239.
- Peltonen-Sainio P., Muurinen S., Rajala A. & Jauhiainen L., 2008. Variation in harvest index of modern spring barley, oat and wheat cultivars adapted to northern growing conditions. *Journal of Agricultural Science* **146**, 35–47. DOI: 10.1017/s0021859607007368.
- Porsche W. & Taylor M., 2001. German Wheat Pool, *In: The World Wheat Book: A History of Wheat Breeding* (Eds W. J. Bonjean & W. J. Angus), Lavoisier Publishing, Paris, Chapter 5, 167–191.
- Stamp P., 2011. How to increase yield and quality of wheat?, 61. Tagung der Vereinigung der Pflanzzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2010. pp. 5–7.
- Stamp P. & Visser R., 2012. The twenty-first century, the century of plant breeding. *Euphytica* **186**, 585–591. DOI: 10.1007/s10681-012-0743-8.
- Zhu X.G., Long S.P. & Ort D.R., 2010. Improving Photosynthetic Efficiency for Greater Yield. *Annual Review of Plant Biology* **61**, 235–261. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042809-112206.

Riassunto

In Svizzera il contributo di istituzioni pubbliche alla selezione di frumento può vantare una lunga tradizione nella produzione di varietà sane e di elevata qualità panificabile ed esiste tuttora un buon margine per migliorare il potenziale di rendimento. Diversa è la situazione nel resto d'Europa, dove la selezione è prevalentemente organizzata da enti privati. Un secolo fa la loro preoccupazione primaria era la resa, ed è solo qualche decennio più tardi che si assiste a un riorientamento verso la qualità. Oggi l'aumento di rendimento delle varietà più comuni languisce intorno all' 1 %, mentre sarebbe necessario un aumento del 2,5 % per nutrire la popolazione mondiale. Un tale progresso necessiterebbe di maggiori investimenti, che però mancano a causa delle basse riscossioni legate alle licenze. In certi Paesi il tasso di rinnovamento della semente è inferiore al 50 % e non ci si può dunque aspettare salti impressionanti nei rendimenti. Inoltre l'indice di resa, cioè la percentuale di grano nella massa aerea della pianta, si attesta intorno al 50 % e ha probabilmente raggiunto l'optimum biologico, perdendo il suo ruolo come stimolo di progresso. D'altra parte, la selezione diventa più precisa e celere grazie all'impiego di metodi molecolari, noti anche come «smart breeding». Per il grano tenero si è ancora agli inizi. Si mira, è vero, a un raddoppiamento dell'efficienza fotosintetica, ciò comporta tuttavia una ricostruzione dell'intero sistema fotosintetico vecchio di 3 miliardi d'anni che giungerà a completamento solo nel prossimo secolo. Di conseguenza, l'impiego intelligente di tutti i mezzi a disposizione è indispensabile per rispondere al cambiamento climatico con nuove varietà più adatte ai giochi d'alternanza tra periodi umidi e di siccità, e ondate di freddo e di calore. Lo stesso dicasi per l'adattamento alla diffusione di nuovi parassiti e malattie in un mondo sempre più globalizzato.

Summary

Unlike the situation in the European Union, where wheat breeding is almost exclusively in the hands of the private sector, public breeding of disease-resistant wheat with high baking quality has a long-standing tradition in Switzerland. Important increases in yield potential are still possible here. After World War I, wheat yield in other European countries increased rapidly due to a focus on mass production and a demand for high baking quality. The current annual breeding progress in mass-produced wheat remains at 1 %, and large investments would be necessary to raise this rate to the 2.5 % required for global food security. However, investment does not pay back when seed rotation is reduced to 50 % as it is the case in some countries. Therefore, significant yield leaps cannot be expected in the near future. As the harvest index—the driving trait of the Green Revolution—is close to its theoretical maximum above 50 % and thus no longer drives progress, smart-breeding may allow fast and precise breeding. Smart-breeding combines cheap and efficient molecular tools with new phenotyping techniques to produce novel varieties, such as hexaploid bread wheat. The theoretical possibility of doubling the photosynthetic efficiency is a silver line at the horizon, but it demands fundamental changes to an age-old breeding system. In the face of climate change and ongoing globalization, the reasonable use of new breeding tools will help us develop new productive wheat varieties that are tolerant to rapid changes from hot to cold or flooding to drought and are resistant to pests and diseases.

Key words: wheat breeding; breeding investments; smart-breeding; baking quality