

Züchtungsforschung für eine nachhaltige Landwirtschaft

J.E. SCHMID, W. WICKI, M. KELLER, M.M. MESSMER, B. FEIL und P. STAMP

1. Bedeutung der Nachhaltigkeit für den landwirtschaftlichen Pflanzenbau

Die Schweizerische Landwirtschaft hat einen besonderen Stellenwert in der Diskussion um Nachhaltigkeit. Zum einen hat sie die Aufgabe, die gesamte Bevölkerung mit Nahrungsmitteln zu versorgen, zum andern wird sie von vielen als die Ursache von unseren Umwelt- und Finanzproblemen schlechthin angesehen. Auf den ersten Blick scheint es aber auch ein Ding der Unmöglichkeit zu sein, Forderungen wie genügend Nahrungsmittel zu produzieren und dabei der Nachhaltigkeit zu entsprechen gleichzeitig zu erfüllen. Die Begriffe "Ökonomische Effizienz, Ökologische Produktion und Sozialverträglichkeit" bilden die Eckpfeiler in der Diskussion um die Nachhaltigkeit. Nur bei gleichzeitiger Berücksichtigung dieser drei Aspekte können Projekte oder Massnahmen als für unsere Nachwelt verträglich, d.h. nachhaltig bezeichnet werden (SCHULTE und KÄPPELI, 1997; MAESCHLI, 1998).

Auch für den Züchter stellt sich die Frage wie er sein Produkt, eine Sorte, unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit definieren muss (SCHMID et al., 1999). Die ökonomischen Faktoren beinhalten vor allem die kurz-, mittel- und langfristige Rentabilität und die wirtschaftliche Stabilität. Im Mittelpunkt der Diskussion um nachhaltige Landwirtschaft in der Schweiz steht jedoch der ökologische Aspekt. Dies bedeutet, dass ökologisch unverträglichen Entwicklungen entgegengetreten werden muss. Die damit einhergehenden Anpassungen haben aber der ökonomischen und sozialen Situation der betroffenen landwirtschaftlichen Bevölkerung Rechnung zu tragen. Mit Hilfe von jährlichen Beiträgen wird die Schweizerische Landwirtschaft unterstützt, um so diese ökologischen Zie-

le zu verwirklichen. Um in den Genuss von solchen Beiträgen zu kommen, muss aber ein ökologischer Leistungsnachweis erbracht werden. Dies sind unter anderen:

- ausgeglichene Düngerbilanz (Nährstoffbilanz; Bodenanalysen)
- angemessener Anteil an ökologischen Ausgleichsflächen
- geregelte Fruchtfolge (Maximaler Anteil der Hauptkulturen)
- geeigneter Bodenschutz (Bodenschutzindex, Erosionsschutz)
- Auswahl und gezielte Anwendung von Pflanzenbehandlungsmitteln

Der Biologische Landbau geht in seinen Anforderungen für eine nachhaltige Landwirtschaft noch weiter indem er auch den Einsatz von chemisch-synthetischen Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln verbietet und bei der Herstellung von Bio-Produkten nicht nur auf den Einsatz von gentechnisch veränderte Organismen verzichtet, sondern auch auf deren Folgeprodukte (v.a. Enzyme).

2. Züchtungsrelevante Aspekte einer nachhaltigen Landwirtschaft

Die Pflanzenzüchtung ist der Grundstein für eine wirtschaftliche und umweltschonende Wirtschaftsweise in der Landwirtschaft, denn die Wahl der Sorte gibt vor, wie beispielsweise Pflanzenschutz und Düngung gehandhabt werden müssen. Pflanzenzüchtung ist somit ein wichtiger Bestandteil des Integrierten Pflanzenbaus (KELLER, 1997; RAUSCHE, 1993) und damit der nachhaltigen Landwirtschaft.

Die ökonomischen, ökologischen, politischen und sozialen Rahmenbedingungen beeinflussen die Zuchtzielsetzung. Im heutigen Umfeld könnten folgende strategischen Schwerpunkte für eine mittelfristige Zielsetzung in der Pflanzenzüchtung und Züchtungsforschung gelten:

⊕ Züchtung von Pflanzen mit Eignung für eine umweltschonende Erzeugung von qualitativ hochwertigen, gesunden Produkten unter Beibehaltung eines hohen, stabilen Ertragsniveaus

- Züchterische Bearbeitung von Kultur- und Wildpflanzen zwecks Erschließung von Märkten mit neuen Produkten
- Entwicklung von Methoden zur Erhöhung der Geschwindigkeit und Flexibilität in der Realisierung neuer Zuchtziele
- Erhaltung, Charakterisierung und Schaffung genetischer Vielfalt.

Die Zielsetzungen der Pflanzenzüchtung sind eng verknüpft mit den allgemeinen Zielen der Landwirtschaft; dies wird für nachhaltige Landbausysteme in einer Gegenüberstellung deutlich (*Tabelle 1*).

Die Weizenzüchtungsprogramme der Schweiz. Landw. Forschungsanstalten Zürich-Reckenholz (FAL) und Changins (RAC), welche sich schon seit Jahrzehnten auf die Kombination von Krankheitsresistenz mit hoher Qualität bei gutem Ertragsniveau konzentrierten, berücksichtigen damit schon einen Grossteil der Zuchtziele für eine nachhaltige Landwirtschaft. In der *Tabelle 1* sind auch Zuchtziele genannt, welche durch die aktuelle Züchtung noch wenig bearbeitet wurden. Die zusätzlichen Ziele müssen effizient realisiert werden, damit sie die Programme für die Hauptzuchtziele nicht negativ beeinflussen. Einige Beispiele aus der Züchtungsforschung sollen das Potential und die konkreten Möglichkeiten zur effizienten Unterstützung der Züchtung darlegen.

Mit Hilfe der *in vitro* – Selektion wurde eine Methode zur Selektion auf Resistenz gegen *Septoria nodorum* bei Weizen etabliert (WICKI et al., 1999a, 1999b). Zygotische Embryonen sowie auch ganze Körner wurden auf Nährmedien mit Rohextrakt von *Septoria nodorum* zur Keimung gebracht. Die Selektivität des Rohextraktes wurde an resisten-

Autoren: Dr. Jürg E. SCHMID, M. KELLER, B. FEIL, Prof. Dr. Peter STAMP, Institut für Pflanzenwissenschaften, ETH, Eschikon 33, CH-8315 LINDAU, W. WICKI, Delley Samen und Pflanzen AG, DSP, M.M. MESSMER, Eidg. Forschungsanstalt Zürich-Reckenholz, FAL



Tabelle 1: Gegenüberstellung von Besonderheiten nachhaltiger Landbausysteme und der hieraus erwachsenen Konsequenzen für die Pflanzenzüchtung.

Besonderheiten nachhaltiger Landbausysteme	Konsequenz für die Pflanzenzüchtung
- Verminderter Einsatz von chemischen Hilfsstoffen wie Pestiziden und Wachstumsregulatoren	- Züchtung auf genetische Resistenz und Toleranz - Steigerung der Konkurrenzfähigkeit von Kulturarten gegenüber Ackerbegleitflora - Züchtung auf Standfestigkeit - Züchtung auf geringeren Bedarf von Nährstoffen, insbesondere Stickstoff und Phosphor
- Minimalbodenbearbeitung und erhöhte Bodenbedeckung	- Steigerung der Konkurrenzfähigkeit von Kulturarten gegenüber Ackerbegleitflora - Züchtung auf erhöhte Konkurrenzkraft des Keimlings in Bezug auf Nährstoffe, Wasser und Licht - Zucht von Kulturen mit maximalem Bodenbedeckungsgrad bei gleichzeitig hohem Ertrag
- Optimierte Fruchtfolgen	- Zucht von Sorten und Kulturarten, die an vielfältige Fruchtfolgen angepasst sind - Zucht von Sorten und Kulturarten mit verschiedenen Reifezeitpunkten - Züchterische Bearbeitung neuer Kulturarten (Nebenkulturarten)
- Genaue Kenntnisse über Standortverhältnisse und deren optimale Nutzung	- Erfassen von standortspezifischen Schadorganismen - Bereitstellen von Sorten, welche an spezifische Standorte angepasst sind - Genaue Sortenbeschreibungen
- Gesteigertes Verlangen nach multifunktionalen Kulturpflanzen	- Nebenprodukteigenschaften in Zuchtziele integrieren
- Förderung von Mischkulturen, Sortenmischungen und Agroforestry-Systemen	- Zucht auf Verträglichkeit unter Mischungspartnern - Abstimmen von Abreife und Qualität der verschiedenen Mischungspartner
- Förderung von perennierenden Kulturpflanzen	- Zucht auf Mehrjährigkeit

ten und anfälligen Sorten getestet und die aus dialleler Kreuzung entstandenen Populationen untersucht. Die Übereinstimmung der Resistenz gegen *Septoria nodorum* auf der Ähre zwischen Labor- und Feldreaktion ist relativ gut für die homozygoten Eltern, die F₁ sowie Generationen ab der F₄ (Abbildung 1). Die *in vitro*-Selektion in den F₂- und F₃-Generationen weist zu geringe Korrelationen mit den Felddaten auf, als dass sich ein praktischer Einsatz für diese Zuchtstufe rechtfertigen liesse. Aufgrund der vorliegenden Resultate wurde ein einfacher Test für die Anwendung in der Züchtung entwickelt. Die Körner von potentiellen Kreuzungspartnern, F₁- oder F₄, werden auf Fliesspapier, das den Rohextrakt von *Septoria nodorum* enthält, zur Keimung gebracht. Bei einer hohen Anzahl von Keimlingen, welche trotz des toxischen Mediums gewachsen sind, kann eine positive Selektion von resistenten Linien bzw. Populationen getroffen werden. Mit einer geschickten Strategie kann der Züchter diese Kenntnisse frühzeitig einbringen und mit den Resultaten aus der Feldselektion kombinieren.

Ein weiteres Beispiel aus der Züchtungsforschung für nachhaltige Landwirtschaft ist die Standfestigkeit. Für nachhaltige Landbausysteme hat der, mit der Standfestigkeit am besten korrelierte

Parameter "Pflanzenlänge" eine limitierte Bedeutung, indem Pflanzen mittlerer Länge mit guter Standfestigkeit den extrem kurzstrohigen Sorten vorgezogen werden. In einem Forschungsprojekt

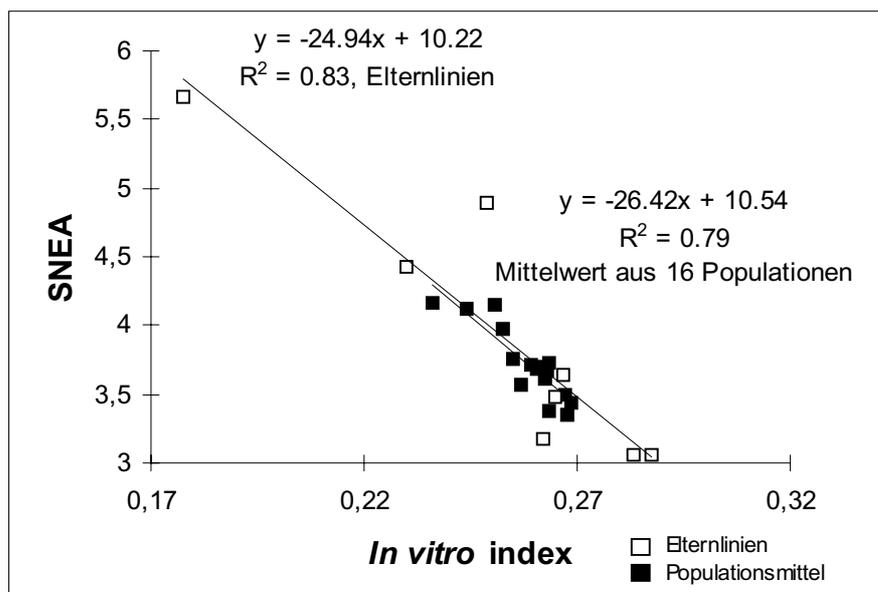


Abbildung 1: Regression der Beziehung zwischen der Resistenz gegen *Septoria nodorum* auf der Ähre (SNEA) im Feld und der Anfälligkeit von Körnern gegen Metaboliten des Pathogens *in vitro* (*in vitro* index). Dargestellt sind die Werte der Elternlinien und die Mittelwerte der 16 F₄-Populationen.

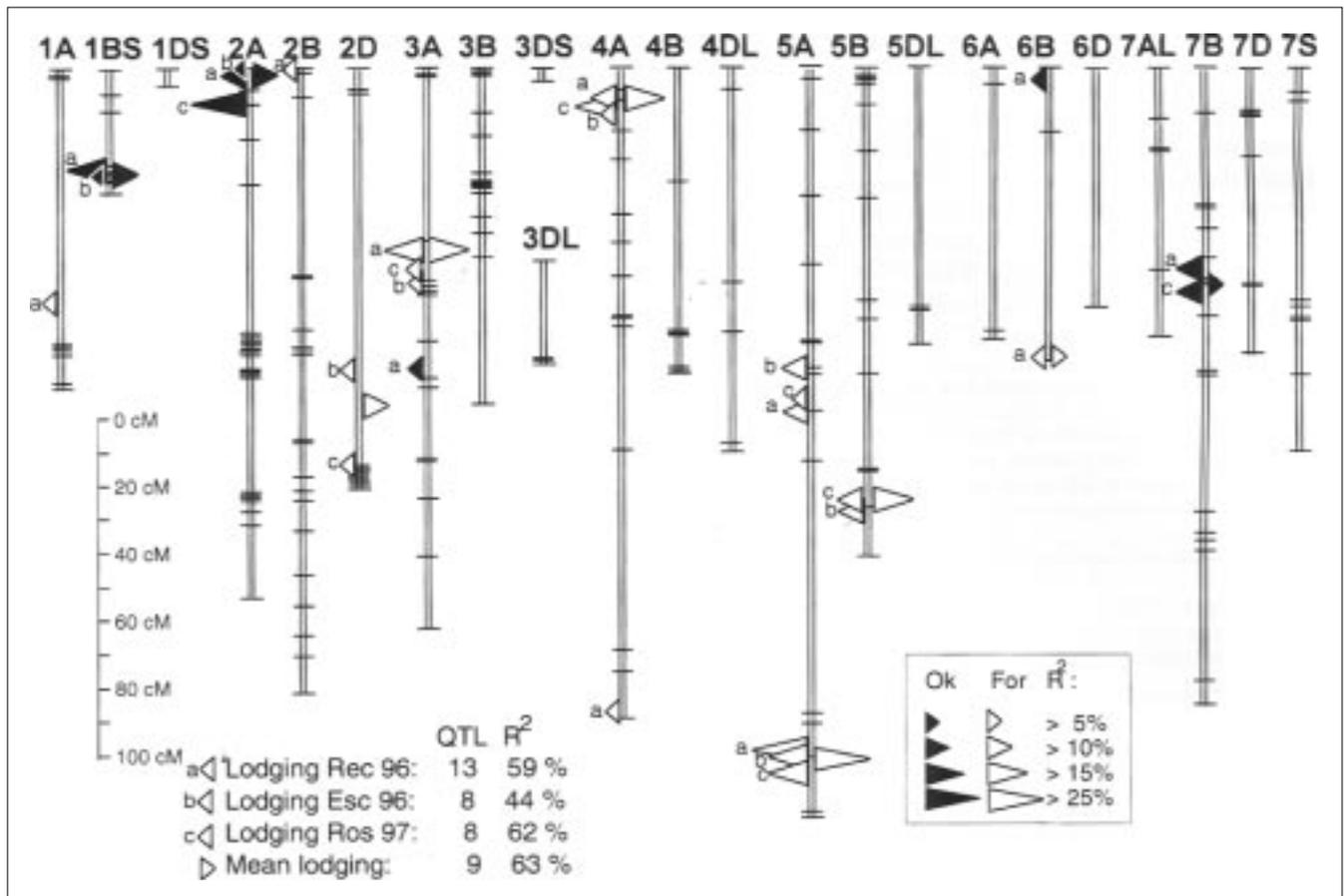


Abbildung 2: Positionen signifikanter QTLs (LOD>3.0) für Standfestigkeit auf der genetischen Karte von 204 RILs (aus Kreuzung Forno x Oberkulmer). QTLs für Standfestigkeit aus einem Standort (a,b,c) berechnet sind durch linksgerichtete, jene über alle Umwelten resultierend sind mit rechtsgerichteten Dreiecken symbolisiert. Ok = Dinkelelter Oberkulmer, For = Weizenelter Forno.

wurde die standfeste Weizensorte Forno mit der lageranfälligen Dinkelsorte Oberkulmer verkreuzt und aus der F₅-Generation 226 RILs (RIL = Rekombinierte Inzuchtlinie) zufällig ausgewählt. In drei Feldversuchsserien wurde die Standfestigkeit der RILs und der Kreuzungseltern erhoben. RFLP- und Mikrosatelliten – Marker wurden verwendet, um die Genkarte für die QTL-Analyse zu erstellen (MESSMER et al., 1999, KELLER et al., 1999). Es wurden 9 QTL gefunden, welche 63 % der Streuung der Standfestigkeit (Abbildung 2) erklärten.

Von Interesse für die Züchtung auf Nachhaltigkeit ist die Tatsache, dass QTLs gefunden wurden, welche nicht mit der Pflanzenlänge gekoppelt waren und somit Möglichkeiten zur markergestützten Selektion auf standfeste Pflanzen mittlerer Länge ermöglicht würden. Die Aussagekraft dieser von der Pflanzenlänge unabhängigen QTL war jedoch gering, weshalb eine direkte Umsetzung für die Züchter nicht gegeben ist. Der

Einsatz von QTL kann für die Züchtung allgemein und insbesondere für die Ziele der nachhaltigen Landwirtschaft eine wertvolle Unterstützung sein. Für die praktische Anwendung in der Züchtung spielen jedoch Faktoren wie Kosten, Anwendungsstrategie im Zuchtprogramm, Aussagekraft für andere Genotypen und Umwelten, etc., eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Die Züchtung auf Nährstoffeffizienz, insbesondere auf einen geringeren Bedarf an Stickstoff und Phosphor ist ein wichtiges Zuchtziel für die Erzeugung von Sorten für nachhaltige Landbausysteme.

Stickstoff (N)

Mit Ausnahme der Leguminosen können unsere Kulturpflanzen nur dann hohe Erträge bilden, wenn viel N gedüngt wird. Die Proteinkonzentration ist bei vielen Kulturen eine wichtige Determinante der ernährungsphysiologischen, in einigen Fällen aber auch der technologi-

schen Qualität des Ernteguts. Selbst unter optimalen Bedingungen wird nur ca. 50 - 70 % des in mineralischen Düngemitteln enthaltenden N von den Pflanzen ausgenutzt. Der Rest wird immobilisiert oder entweicht aus dem Agroökosystem. N-Verluste sind aus verschiedenen Gründen umweltrelevant:

- Die Herstellung von N-Düngern ist energieaufwendig.
- Die Auswaschung von Nitrat kann das Grundwasser kontaminieren.
- Ammoniakemissionen fördern die Eutrophierung und Versauerung von Waldböden und Gewässern.
- Das durch Denitrifikation gebildete Lachgas (N₂O) trägt zum Treibhauseffekt bei und spielt eine wichtige Rolle bei der Ozonzerstörung in der Stratosphäre (FLAIG und MOHR, 1996).

Der intensive Einsatz von N-Düngern ist somit aus Sicht der nachhaltigen Landwirtschaft nicht unproblematisch. Die Pflanzenzüchtung könnte signifikante

Beiträge zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft liefern, indem der N-Bedarf der Kulturpflanzen gesenkt oder mehr N biologisch fixiert wird.

Senkung des N-Bedarfs der Kulturpflanzen: Am Beispiel des Getreides soll gezeigt werden, wie dieses Ziel realisiert werden könnte. Folgende Möglichkeiten bieten sich an:

- Effizientere Nutzung der N-Vorräte des Bodens durch Züchtung auf höheres N-Aufnahmevermögen.
- Bessere Umsetzung von aufgenommenem N in Kornertrag.
- Verbesserung der Proteinqualität.

Züchtung auf höheres N-Aufnahmevermögen:

Diese Punkte sind zu berücksichtigen, wenn auf hohes N-Aneignungsvermögen und hohe Proteinerträge gezüchtet werden soll:

- Die Züchtung von Hochproteinsorten ist unabhängig von der verwendeten - Methode konventionell oder gentechnisch - zum Scheitern verurteilt, wenn kein N im System Boden-Pflanze mehr vorhanden ist, welcher für die Produktion von Kornprotein verwendet werden könnte (FEIL, 1997).
- Trotz der Vielzahl von Arbeiten zur Aufnahme, Verarbeitung und Verteilung von N in Pflanzen ist bislang unklar, welche Faktoren die N-Aufnahme limitieren (FEIL, 1997). Somit fehlen die absolut notwendigen Voraussetzungen für die Anwendung gentechnischer Methoden, denn die Gentechnik kann nur dann erfolgreich eingesetzt werden, wenn die limitierenden Parameter, z.B. ein biochemischer Prozess oder eine zelluläre Struktur, und deren genetischer Hintergrund bekannt sind.
- Das System der Nitrat- bzw. Ammoniumassimilation dürfte als polygenetisches Funktionssystem bereits derart optimiert sein, dass jeder grobe Eingriff sich als Störung auswirkt. Unter diesen Umständen könnten der Gentechnik Grenzen gesetzt sein (FLAIG und MOHR, 1996).
- Der Anbau von Hochproteinsorten kann die Entstehung von negativen N-Bilanzen begünstigen, welche auf lange Sicht die N-Mineralisierungskapazität

und somit die Fruchtbarkeit des Bodens reduzieren (FEIL, 1997).

Verbesserte Umsetzung von aufgenommenem N in Kornertrag:

Moderne Getreidesorten produzieren sehr viel höhere Erträge als ihre Vorgänger, nehmen jedoch in der Regel nur wenig mehr N auf, d.h. der aufgenommene N wird besser in Kornertrag umgesetzt. Dieser Trend wird aller Voraussicht nach auch weiterhin anhalten. Allerdings tendieren genetische Ertragssteigerungen ohne substantielle Verbesserung der N-Aufnahme dazu, die Proteinkonzentration in den Körnern zu senken (FEIL, 1997). Es ist durchaus möglich, dass zukünftige Sorten gleich hohe Erträge wie die aktuellen Sorten bei geringerer Anbauintensität erzielen können. Folglich wird die Umweltbelastung pro Einheit Getreideertrag sinken. Nur führt die Erzeugung von mittleren bis hohen Erträgen bei reduzierter N-Düngung zu niedrigen Proteinkonzentrationen, weil der Proteinertrag aufgrund des geringen N-Angebots klein ist und das Kornprotein durch die hohen Erträge zudem stark verdünnt wird (FEIL, 1996).

Verbesserung der Proteinqualität:

Der gleiche Ernährungseffekt lässt sich mit einer geringeren Proteinkonzentration und folglich mit einer geringeren N-Düngung erreichen, wenn die Zusammensetzung der Aminosäuren exakt dem Bedarf der Konsumenten entspricht (FLAIG und MOHR, 1996). Bei fast allen Getreidearten ist Lysin die am meisten limitierende Aminosäure für monogastrische Tiere und den Menschen. Bei der Beurteilung der Perspektiven der Züchtung auf Lysin sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Bei Gerste und Mais existiert Hochlysin-Material. Dagegen scheint bei Weizen die genetische Variabilität der Lysin-konzentration im Protein definitiv gering zu sein, obwohl sehr viele Akzessionen geprüft wurden. Die ernährungsphysiologische Qualität von Weizen könnte optimiert werden, indem Lysin kodierende DNA-Fragmente von anderen Arten Mais auf Weizen übertragen werden.
- Wie Untersuchungen an Hochlysin-Mais und -Gerste zeigen, können

Hochlysin Gene den Ertrag und andere agronomische Eigenschaften negativ beeinflussen.

- Die Produktion von Lysin ist im Vergleich zu vielen anderen Aminosäuren energetisch relativ aufwendig.
- Die Proteinverwertung kann auch durch die Kombination von Nahrungsmitteln mit unterschiedlicher, sich optimal ergänzender Aminosäurezusammensetzung verbessert werden. Ausserdem kann die Diet mit reinem Lysin angereichert werden.

Die Möglichkeiten zur Senkung der N-Düngung durch die Optimierung der Aminosäurezusammensetzung des Getreideproteins werden von uns daher als eher gering eingeschätzt. Vollkommen anders stellt sich die Situation bei der Backqualität von Weizen dar. Die Backqualität von Weizenmehl wird massgeblich von der Quantität und Qualität des Kleberproteins beeinflusst. Da die Klebermenge in der Regel mit zunehmendem N-Angebot steigt, wird relativ viel N zu Backweizen gedüngt. Schon in der Vergangenheit wurde erfolgreich auf Backleistung selektiert. Durch die gentechnische Manipulation der Menge und Qualität der hochmolekularen Gluteninfraktion lassen sich jedoch möglicherweise Quantensprünge bei der Verbesserung der Backleistung erreichen (SHEWRY et al., 1997). Da Sorten mit exzellenter Backqualität selbst bei einer geringen Proteinkonzentration ein Mehl mit guten Backeigenschaften erzeugen, kann bei ihnen der Umfang der N-Düngung drastisch reduziert werden.

Biologische N-Fixierung:

Grundsätzlich kann Luft-N durch Symbiosen zwischen Blütenpflanzen und N-bindenden Mikroorganismen, Assoziationen zwischen Blütenpflanzen und N-Mikroorganismen, diazotrophe Endophyten und freilebende N-bindende Mikroorganismen fixiert werden. Am effizientesten ist die symbiontische N-Fixierung, zu der von den Ackerkulturen nur die Leguminosen befähigt sind. Die heutige Forschung befasst sich aus diesem Grunde intensiv mit der Frage, ob sich N-fixierende Bakterien zu einer Symbiose mit Nicht-Leguminosen vereinigen lassen. Der Anbau von Nichtleguminosen, welche durch Symbiose Luft-N zu

binden vermögen, hätte weitgehende Konsequenzen für die pflanzliche Produktion:

- Es ist es nicht mehr notwendig, mineralische N-Dünger direkt zur Kultur zu düngen.
- Zur biologischen N-Fixierung befähigte Nicht-Leguminosen werden wahrscheinlich hohe N-Konzentrationen im Gewebe, also auch im Erntegut, aufweisen, was bei einigen Arten (Braugerste, Brotroggen, Kartoffeln, Zuckerrüben) zu massiven Beeinträchtigungen der Produktqualität führen könnte.
- Möglicherweise müssen aus den gleichen Gründen anbautechnische Massnahmen gegen Nitratauswaschung nach der Ernte getroffen werden.
- Da die biologische N-Fixierung viel (Photosynthese-) Energie erfordert (RAVEN, 1985), ist zu befürchten, dass N-fixierende Nicht-Leguminosen aus bioenergetischen Gründen nur relativ geringe Erträge produzieren.

Die Entwicklung von N-fixierenden nichtlegumen Kulturpflanzen bietet also ausserordentlich interessante Perspektiven auch im Hinblick auf die Gestaltung einer nachhaltigeren Landwirtschaft. Jedoch werden sich die Umweltwirkungen und Qualitätseigenschaften dieser neuartigen Kulturpflanzen wahrscheinlich gravierend von denen der Wildtypen unterscheiden. Im Grunde handelt es sich um vollkommen neue Kulturen, deren Anbau eine noch zu entwickelnde Produktionstechnik erfordert.

Phosphor (P)

Das Konzept der nachhaltigen Landwirtschaft verlangt aus verschiedenen Gründen einen möglichst effizienten Einsatz von Phosphordüngern:

- die P-Vorräte und P-Reserven sind begrenzt
- für die Herstellung von P-Düngern muss Energie aufgewendet werden
- P-Verluste aus der Landwirtschaft fördern die Eutrophierung von Gewässern

Es gibt mehrere Ansätze, durch Pflanzenzüchtung den Bedarf an P und die Umweltbelastung durch P zu senken:

- Verbesserung der P-Aufnahmeeffizienz der Pflanzen

- Verringerung des P-Exports durch die Abfuhr des Ernteguts (Lipsett und Dann, 1983)
- Verringerung des Anteils von Phytat-P bzw. Züchtung auf hohe Phytaseaktivität in Futtermitteln

Verbesserung der P-Aufnahmeeffizienz:

Angesichts der vielfältigen Möglichkeiten zur effizienteren Erschliessung der P-Vorräte des Bodens (Optimierung der Symbiose mit Mycorrhizen, der chemischen Merkmale der Rhizosphäre und der Wurzelmorphologie) und der bereits nachgewiesenen genetischen Variation kann davon ausgegangen werden, dass erfolgreich auf eine höhere P-Aufnahme selektiert werden kann. Bei der Beurteilung der Möglichkeiten zur Verbesserung des P-Aneignungsvermögens sind mehrere Aspekte zu beachten:

- Bisher sind offenbar keine Assoziationen von Cruciferen und Chenopodiaceen mit Mycorrhizen bekannt geworden. Dieser mutmassliche Nachteil kann möglicherweise durch Gentechnik beseitigt werden.
- Es wurde vorgeschlagen, hohe Ausscheidung von Zitronensäure kodierende Gene aus Bodenbakterien zu isolieren und in Nutzpflanzen zu integrieren (STEVENS, 1997). Ferner könnten durch gentechnische Methoden die Befähigung zur Ausbildung von Proteoidwurzeln von der Weissen Lupine auf andere Arten übertragen werden.
- Unabhängig von der Art und Weise, wie das P-Aneignungsvermögen verbessert wird, sind bioenergetische Aspekte zu berücksichtigen. Der Aufbau und die Unterhaltung eines umfangreichen Wurzelsystems nehmen die Assimilat- und Nährstoffressourcen der Pflanzen in Anspruch und können daher die Ertragsleistung beeinträchtigen. Bei Pflanzen, deren Wurzeln mit Mycorrhizen infiziert sind, werden weitaus grössere Mengen an Photosyntheseprodukten in die Wurzeln alloziert und dann dort veratmet als bei Pflanzen, deren Wurzeln mycorrhizafrei sind. Die Exsudation von organischen Säuren zur P-Mobilisierung verursacht ebenfalls erhebliche energetische Kosten (MARSCHNER, 1995).

Reduktion des P-Exports durch Abfuhr des Ernteguts:

Die Selektion auf geringere P-Entzüge ohne Ertragseinbussen scheint grundsätzlich möglich zu sein, denn Mais-, Triticale- und Weizensorten mit ähnlichen Kornerträgen können sich beträchtlich in der Korn-P-Konzentration und damit im P-Entzug unterscheiden (FEIL et al., 1993; FEIL und FOSSATI, 1995; SCHULTHESS et al., 1997).

Das Phytatproblem:

Bei zahlreichen Kulturarten, u.a. bei Getreide und Hülsenfrüchten, ist Phytat die Hauptspeicherform für P. Weil Phytat-P von Nicht-Wiederkäuern nur schlecht ausgenutzt wird, scheiden diese große Mengen an Phytat-P aus. In Regionen mit hohem Tierbesatz, aber auch in der Nähe von menschlichen Siedlungen kann aus Phytat stammender P über Erosion oder Abwässer in Flüsse und Seen gelangen und diese eutrophieren. Hohe Phytatkonzentrationen sind auch aus ernährungsphysiologischer Sicht ungünstig. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die mit Phytat assoziierten Probleme zu reduzieren:

- Selektion auf niedrigere Phytatkonzentration. Durch Mutationszüchtung konnte Mais mit um 65% reduzierten Phytatgehalten bei gleichzeitig unveränderten Gehalten an Gesamt-P erzeugt werden. Allerdings traten zum Teil Ertragseinbussen auf, deren Ursache noch weiter analysiert werden muss (ERTL et al., 1998).
- Hinzufügung von mikrobieller Phytase zur Diät von Nutztieren.
- Einsatz von gentechnisch veränderten, phytasereichen Komponenten bei der Zusammenstellung der Diät von Nutztieren. Es ist bereits gelungen, hohe Phytaseaktivität kodierende DNA von *Aspergillum niger* auf Kulturpflanzen zu übertragen (PEN et al., 1993; DENBOW et al., 1998).

Wurzelforschung

Für die Züchtung auf Nährstoffeffizienz, auf Konkurrenzfähigkeit von Kulturarten gegenüber der Ackerbegleitflora, auf Stresstoleranz und auf weitere Eigenschaften, spielt die Wurzel eine nicht zu unterschätzende Rolle. Die Untersuchungen im Wurzelraum sind für die

praktische Züchtung nicht durchführbar, weshalb die Züchtungsforschung sich mit der Methodik der Wurzelersfassung auseinandersetzen muss (RICHNER et al., 2000). Die Wurzelersfassung unter Feldbedingungen ist sehr aufwendig und muss oft destruktiv durchgeführt werden. Mit Hilfe der computergestützten Bildanalytik können aufgearbeitete Wurzelproben ausgewertet werden. Die erfassten Wurzelparameter werden aufgrund ihrer Korrelation mit der Zielgröße, z.B. mit der Nährstoffeffizienz, ausgewählt (LIEDGENS et al., 1999). Da viele Wurzelersfassungsmethoden destruktiv sind, wird mit speziellen Containeranlagen gearbeitet. Transparente Röhren werden in diese Container eingelassen und ermöglichen die Aufnahme von Bildern durch das Einführen einer Kamera in die Röhre. Die Verteilung der Röhren auf die ganze Containertiefe ermöglicht die Erfassung des Wurzelwachstums bis in tiefere Bodenschichten. Die so erfassten Wurzelparameter können für die Erarbeitung von QTL verwendet werden, welche dem Züchter die markergestützte Selektion von Wurzeleigenschaften ermöglicht. Bis es zur praktischen Anwendung in der Pflanzenzüchtung kommt, bedarf es jedoch noch intensiver Wurzelforschung und vertiefter Erkenntnisse für eine effiziente "Wurzelzüchtung".

Als Beispiel für die Züchtungsforschung auf erhöhte Konkurrenzkraft des Keimlings in Bezug auf Nährstoffe, Wasser, Licht und auf Stresstoleranz für feuchte, kühle Standorte der voralpinen Hügellzone, kann die Dinkelforschung genannt werden. Eine zweitägige Überflutung, vier Tage nach der Saat, zeigte die Stresstoleranzreaktion der Dinkelsorte Oberkulmer im Vergleich zur Weizensorte Forno, welche empfindlich auf diesen Stress reagierte (Abbildung 3). Forno stagnierte im Wurzelwachstum währenddem die Dinkelsorte Oberkulmer nach dem Überflutungsstress das Wurzelwachstum fortsetzte.

Die grosse Keimkraft, die hohe Wachstumsgeschwindigkeit von Spross und Wurzel und der geringere Sauerstoffbedarf sind genotypspezifische Eigenschaften, welche u.a. für die Adaptation von Dinkel an marginale Standorte verantwortlich sind. Die genetische Basis für diese Toleranzreaktionen des Dinkels ist

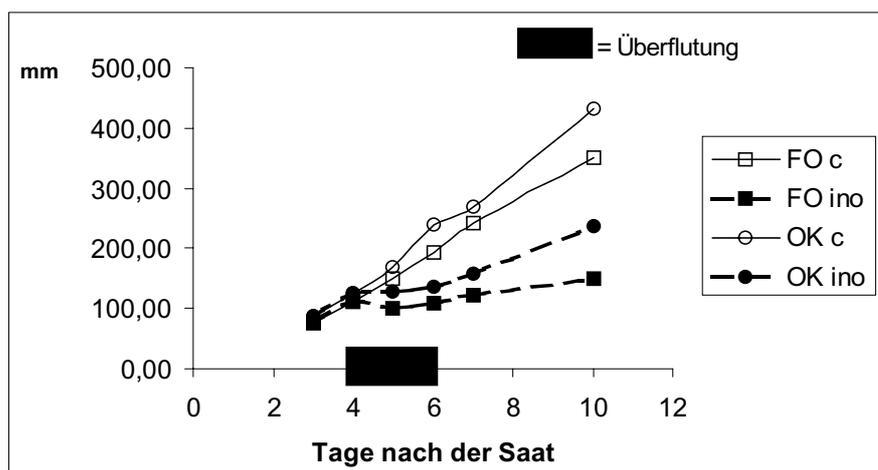


Abbildung 3: Einfluss einer zweitägigen Überflutung auf die Wurzellänge (mm) der Weizensorte Forno (FO) und der Dinkelsorte Oberkulmer (ino = überflutet, c = Kontrolle).

teilweise bekannt und wird zur Zeit weiter erforscht. Aufgrund dieser Resultate könnten solche Toleranzeigenschaften durch gezielte Weizen x Dinkel - Kreuzungen von Dinkel auf Weizen übertragen werden. Selbstverständlich muss aufgrund des Konzepts der Nachhaltigkeit überprüft werden, ob ein Anbau von Dinkel oder Weizen für diese Grenzlagen in Frage kommt.

3. Prioritätensetzung in Pflanzenzuchtprogrammen im Hinblick auf die Produktion von Pflanzensorten mit Eignung für deren Verwendung in nachhaltigen Landwirtschaftssystemen

In der Schweizerischen Getreidezüchtung (Eidgenössische Forschungsanstalten FAL, RAC) ist bereits seit Jahrzehnten zielgerichtet in Richtung nachhaltige Landwirtschaft gearbeitet worden, wobei die Entwicklung von Sorten mit guten Resistenzeigenschaften und hervorragender Qualität im Mittelpunkt stand. Gerade die Kombination dieser beiden Eigenschaften konnte nur mit grossem Aufwand durch eine sehr zielgerichtete Züchtungsarbeit realisiert werden. Dennoch sind für nachhaltige Landwirtschaft weitere zentrale Eigenschaftskomplexe in die Züchtungsanstrengungen zu integrieren, deren Kombination mit einer hohen Ertragsleistung zwar die Marktchancen solcher Sorten wesentlich erhöhen würde, jedoch mit einem zu-

sätzlichen, erheblichen Arbeitsaufwand verbunden wäre:

- Nährstoffaneignungsvermögen /Nährstoffeffizienz
- Konkurrenzkraft gegenüber Ackerbegleitflora
- Optimaler Habitus (Bodenbedeckung, Bewurzelung, ev. Mehrjährigkeit)
- Anpassung an pedoklimatische Bedingungen (optimale Anpassung an Anbaustandorte)
- Züchtung nicht nur auf Haupt- sondern auch auf Nebenprodukte (z.B. Körner und Fasergewinnung aus dem Halm)

Die Züchtung wird eine Optimierung von Nutzpflanzen für die nachhaltige Landwirtschaft durch bewusste Förderung der Pflanze als multifunktionales System realisieren können. Unter Pflanze als multifunktionalem System kann u.a folgendes verstanden werden:

- Träger verschiedener Ernteprodukte (z.B. Körner, Knollen, Stroh, Blätter, Wurzeln)
- Pflanze als Teil des Ökosystems (z.B. Lieferant organischer Substanz, Bodenbedecker, Bodenentseuchung, Wasserhaushalt und Struktur des Bodens, Erosionsschutz, Interaktionen mit Rhizosphäre).

Der Stellenwert der Multifunktionalität der Pflanzen als Rohstofflieferant für verschiedenste Produkte (z.B. Nahrungsmittel, Futtermittel, Energie, Fasern) muss im Hinblick auf die Nachhaltigkeit wie auch hinsichtlich des züchterischen Aufwandes gesehen werden. Es wird sich

die Frage stellen, ob mehrere Eigenschaften auf einer Pflanze vereint oder verschiedene Nutzpflanzenarten mit nur einer Haupteigenschaft innerhalb einer Fruchtfolge eingegliedert werden sollten. Zur Diskussion stehen beispielsweise die Züchtung von perennierenden Sorten mit mehreren Eigenschaften und der Einsatz von Mischkulturen (Sorten- und Linienmischungen, Agrarforstwirtschaft, etc.).

4. Schlussfolgerungen

Die Züchtung von Kulturpflanzenarten ist, unabhängig von ihrem späteren Einsatz in Anbausystemen (konventionell, IP, biologisch oder gentechnisch) und Produktverwendung (Mensch, Tier, Industrie), auf die Ziele der nachhaltigen Landwirtschaft auszurichten. Diese Ziele basieren auf den Eckpfeilern Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft. Die Kriterien für die Erreichung der ökologischen Ziele in der schweizerischen Landwirtschaft (u.a. Ökologischer Leistungsnachweis, technische Regeln) konzentrieren sich vor allem auf Anbau, Bodennutzung, Bodenschutz, Pflanzenschutz und Anteil an ökologischen Ausgleichsflächen. Für die Züchtung von transgenen und nichttransgenen Pflanzensorten gilt das Ziel einer kostengünstigen Produktion von qualitativ hochwertigen, gesunden Nahrungsmitteln und technologisch einwandfreien Rohstoffen. Gefährdungen jeglicher Art sollen ausgeschlossen werden. Die Prüfung der geforderten Qualität in der Produktion und der Verwertung hat den heutigen Erkenntnissen und Möglichkeiten zu entsprechen. Dadurch soll nicht nur das Gefährdungspotential von Sorten und deren Produkten, sondern auch deren Eignung für den nachhaltigen ökologischen Anbau geprüft werden. Diese Grundsatzforderung müsste alle Sorten umfassen, unabhängig davon wie sie gezüchtet worden sind (klassisch oder gentechnisch). Es ist jedoch festzuhalten, dass diese Massnahmen der Verbesserung von Sorten dienen sollen und nicht durch sachlich ungerechtfertigte, übertriebene Forderungen das Potential der Züchtung grundsätzlich geschwächt wird. Die Einschätzung der Eignung von Pflanzensorten (transgen oder nicht transgen) für die

nachhaltige Landwirtschaft soll flexibel und fallbezogen vorgenommen werden, damit veränderten Rahmenbedingungen (z.B. Preisgestaltung, Auftreten neuer Krankheiten und Schädlinge) Rechnung getragen werden kann. Fest steht, dass alle Massnahmen nur dann zum Ziel führen können, wenn entsprechende Sorten zur rechten Zeit überhaupt zur Verfügung stehen. Angesichts der wichtigen Aufgaben und globaler Probleme in der nachhaltigen Erzeugung von Nahrungsmitteln sollte der modernen Pflanzenzüchtung der entsprechende Stellenwert zugestanden werden.

5. Literatur

- DENBOW, D.M., E.A. GRABAU, G.H. LACY, E.T. KORNEGAY, D.R. RUSSELL and P.F. UMBECK, 1998: Soybeans transformed with a fungal phytase gene improve phosphorus availability for broilers. *Poultry Sci.* 77, 878-881.
- ERTL, D.S., K.A. YOUNG and V. RABOY, 1998: Plant genetic approaches to phosphorus management in agricultural production. *J. Environm. Quality* 27, 299-304.
- FEIL, B., 1996: Extensivierung der Stickstoffdüngung im Getreidebau. *Agrarforsch.* 3, 271-274.
- FEIL, B., 1997: The inverse yield-protein relationship in cereals: possibilities and limitations for genetically improving the grain protein yield. *Trends in Agron.* 1, 103-119.
- FEIL, B. and D. FOSSATI, 1995: Mineral composition of triticales grains as related to grain yield and grain protein. *Crop Sci.* 35, 1426-1431.
- FEIL, B., R. THIRAPORN and H.R. LAFITTE, 1993: Accumulation of nitrogen and phosphorus in the grain of tropical maize cultivars. *Maydica* 38, 291-30.
- FLAIG, H. and H. MOHR, 1996: Der überlastete Stickstoffkreislauf. Strategien einer Korrektur. Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg in Zusammenarbeit mit der deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle (Saale).
- KELLER, E.R. Ökologischer Landbau: Pflanzenzüchtung und Sortenwesen. In: Keller, E. R.; Hanus, H., and Heyland, K.-U., Hrsg. *Handbuch des Pflanzenbaus: 1. Grundlagen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion.* Stuttgart (Hohenheim): Ulmer; 1997; pp. 170-186. 860.
- KELLER, M., Ch. KARUTZ, J.E. SCHMID, P. STAMP, M. WINZELER, B. KELLER, and M.M. MESSMER, 1999: Quantitative trait loci for lodging resistance in a segregating wheat x spelt population. *Theoretical and Applied Genetics* 98:1171-1182 (1999)
- LIEDGENS, M., C. NOULAS, A. SOLDATI, W. RICHTNER und B. FEIL, 1999: Wurzelwachstum und Stickstoffaufnahmeeffizienz von Som-

merweizensorten. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 12,231-232.

- LIPSETT, J. and P.R. DANN, 1983: Wheat: Australia's hidden mineral export. *J. Austr. Inst. Agric. Sci.* 49, 81-89.
- MAESCHLI, C., 1998: Das Leitbild Nachhaltigkeit – Eine Einführung. Fachstudie, TA-Projekt Nachhaltige Landwirtschaft, BATS, 35 S.
- MESSMER, M.M., M. KELLER, S. ZANETTI and B. KELLER, 1999: Genetic linkage map of a wheat x spelt cross. *Theoretical and Applied Genetics* 98:1163-1170.
- PEN, J., T.C. VERWOERD, P.A. van PARIDON, R.F. BEUDEKER, P.J.M. van den ELZEN, K. GEERSE, J.D. van der KLIS, H.A.J. VERSTEEGH, A.J.J. van OUYEN and A. HOEKEMA, 1993: Phytase-containing transgenic seeds as a novel feed additive for improved phosphorus utilization. *Bio/Technology* 11, 811-814.
- RAUSCHE, B., 1993: Alternativen im Pflanzenschutz: biologische/biotechnische Verfahren und Resistenzzüchtung: Tagungsbericht; 1993 Nov 6; Bonn-Bad Godesberg. Bonn: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten; 140 S.
- RAVEN, J.A., 1985: Regulation of pH and generation of osmolarity in vascular plants: a cost benefit analysis in relation to efficiency of use of energy, nitrogen and water. *New Phytol.* 101, 25-77.
- RICHTNER, W., M. LIEDGENS, H. BÜRGI, A. SOLDATI and P. STAMP, 2000: Root image analysis and interpretation. In: A.L. Smit, C. Engels, G. Bengough, M. van Noordwijk, S. Pellerin, and S.C. van de Geijn (eds.). *Root Growth and Function: a Handbook of Methods.* Springer, Berlin (in press).
- SCHMID, J.E., O. KÄSER, B. FEIL und P. STAMP, 1999: Kriterien für die Pflanzenzüchtung unter besonderer Berücksichtigung des Potentials der modernen Biotechnologie. Fachstudie 5/6, TA-Projekt Nachhaltige Landwirtschaft, BATS. 53 S.
- SCHULTHESS, U., B. FEIL and S.C. JUTZI, 1997: Yield-independent variation in grain nitrogen and phosphorus concentration among Ethiopian wheats. *Agron. J.* 89, 497-506.
- SCHULTE, E. und O. KÄPELI (Hrsg.), 1997: Gentechnisch veränderte krankheits- und schädlingsresistente Nutzpflanzen. Eine Option für die Landwirtschaft? Band 1, BATS, Basel-Shewry, P.R., A.S. Tatham and P. Lazzari, 1997: Biotechnology and wheat quality. *J. Sci. Food Agric.* 73, 397-406.
- STEVENS, T., 1997: Raiding the phosphorus bank. *Rural Res.* 174, 13-16.
- WICKI, W., M. WINZELER, J.E. SCHMID, P. STAMP and M. MESSMER, 1999a: Inheritance of resistance to leaf glume blotch caused by *Septoria nodorum* Berk. in winter wheat. *Theoretical and Applied Genetics* 99:1265-1272.
- WICKI, W., M. MESSMER, M. WINZELER, P. STAMP and J.E. SCHMID, 1999b: *In vitro* screening for resistance against *Septoria nodorum* blotch in wheat. *Theoretical and Applied Genetics* 99:1273-1280.

