



LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Klimaänderung in Bayern Antworten des Pflanzenbaus

LfL – Jahrestagung
9. Kulturlandschaftstag



Schriftenreihe

ISSN 1611-4159

6
2011

Impressum

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: www.LfL.bayern.de

Redaktion: Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz
Lange Point 12, 85354 Freising
E-Mail: Agraroeekologie@LfL.bayern.de
Telefon: 08161/71-3640

1. Auflage: Oktober 2011

Druck: Medienhaus Kastner, 85283 Wolnzach

Schutzgebühr: 15,00 Euro

© LfL



LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

**Klimaänderung in Bayern
Antworten des Pflanzenbaus**

**LfL - Jahrestagung
9. Kulturlandschaftstag
am 19.10.2011
in Freising-Weißenstephan**

Tagungsband

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Auswirkungen der Klimaänderung auf Naturalerträge.....	7
Thomas Felbermeir	
Klimatoleranz bei Gerste – ein biotechnologischer Ansatz zur Ertragssicherung	17
Günther Schweizer, Manuela Diethelm, Brigitte Halaweh, Gabi Reichenberger und Markus Herz	
Blattfleckenkomplex an der Gerste – Ursachen und Gegenmaßnahmen	37
Michael Hess, Marika Nyman, Hans Hausladen, Stephan Weigand	
Herausforderungen der Klimaänderung an die Unkrautkontrolle	47
Klaus Gehring	
Mit Tropfbewässerung Ertrag und Qualität im Kartoffelbau sichern	57
Martin R. Müller, Hans Kirchmeier, Markus Demmel, Marc Marx, Robert Brandhuber, Adolf Kellermann	
Innovationen im Ackerbau – Permanente Fahrwege und Streifenbearbeitung.....	69
Robert Brandhuber, Markus Demmel, Marc Marx, Hans Kirchmeier, Martin R. Müller	

Auswirkungen der Klimaänderung auf Naturalerträge

Thomas Felbermeir

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für Ländliche Strukturentwicklung, Betriebswirtschaft und Agrarinformatik

Zusammenfassung

Klima und Boden stellen neben weiteren Faktoren wesentliche Einflussgrößen auf den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturpflanzen dar. Eine Veränderung des Witterungsgeschehens im Zuge des Klimawandels wirkt sich auf Wachstumsbedingungen und somit letztendlich auf die Ertragsleistung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen aus.

Zur Beurteilung der zu erwartenden Klimaänderung können die Ergebnisse von Klimamodellen genutzt werden. Trotz der damit verbundenen Unsicherheiten liefern sie ein differenziertes Bild darüber, wie sich einzelne für das Pflanzenwachstum wichtige Klimaparameter zukünftig entwickeln werden.

Für die Abschätzung von Auswirkungen der Klimaänderung auf Naturalerträge ist es notwendig, einen Blick auf die physiologischen Reaktionsmuster von Pflanzen auf ausgewählte Klimaparameter zu werfen. Im Fokus der Untersuchung stehen die Parameter Strahlung, Temperatur, Niederschlag und Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre. Dabei zeigt sich, dass insbesondere der aus dem zunehmenden Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre resultierende CO₂-Düngungseffekt ausschlaggebend für die Höhe zukünftiger Erträge sein könnte. Um jedoch von den Auswirkungen eines höheren Kohlendioxidgehaltes profitieren zu können, müssen auch die anderen Parameter, insbesondere das Wasser, in ausreichendem Maße für das Pflanzenwachstum zur Verfügung stehen.

Bei der Bewertung von Ergebnissen zu Auswirkungen des Klimawandels sind die damit verbundenen Unsicherheiten zu berücksichtigen. Letztendlich stellen die Ergebnisse eine Orientierung dar, in welche Richtung sich die Naturalerträge landwirtschaftlicher Kulturpflanzen unter den Bedingungen des Klimawandels in Bayern entwickeln könnten.

1 Einleitung

Zahlreiche Faktoren beeinflussen den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturpflanzen im Ackerbau. Dabei besteht das Ziel des Pflanzenbaus darin, die Umweltbedingungen eines Standortes so zu gestalten, dass die landwirtschaftlichen Kulturpflanzen ihr genetisch fixiertes umweltunabhängiges Ertragspotential bestmöglich in Ertrag umsetzen können. Die Auswahl geeigneter Sorten im Rahmen der Fruchtfolge bildet folglich die Grundlage zur Erreichung dieser Zielstellung. Sowohl biotische Faktoren wie Krankheiten und Schädlinge als auch abiotische Faktoren wie Klima und Boden wirken auf das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen ein. An den Standort angepasste Kulturmaßnahmen wie Düngung und Pflanzenschutz gewährleisten schließlich Höhe und Stabilität der Erträge (vgl. Abb. 1).

Der Prozess der Ertragsbildung durchläuft während des Wachstums eines Pflanzenbestandes mehrere Entwicklungsphasen. Neben inneren Wachstumsfaktoren (Phytohormone) steuern auch äußere Wachstumsfaktoren (Licht, Luft, Wasser, Wärme, Nährstoffe) das Wachstum sowie die Entwicklung einer Pflanze und schlagen sich auf diese Weise in deren Ertragsleistung nieder. [1]

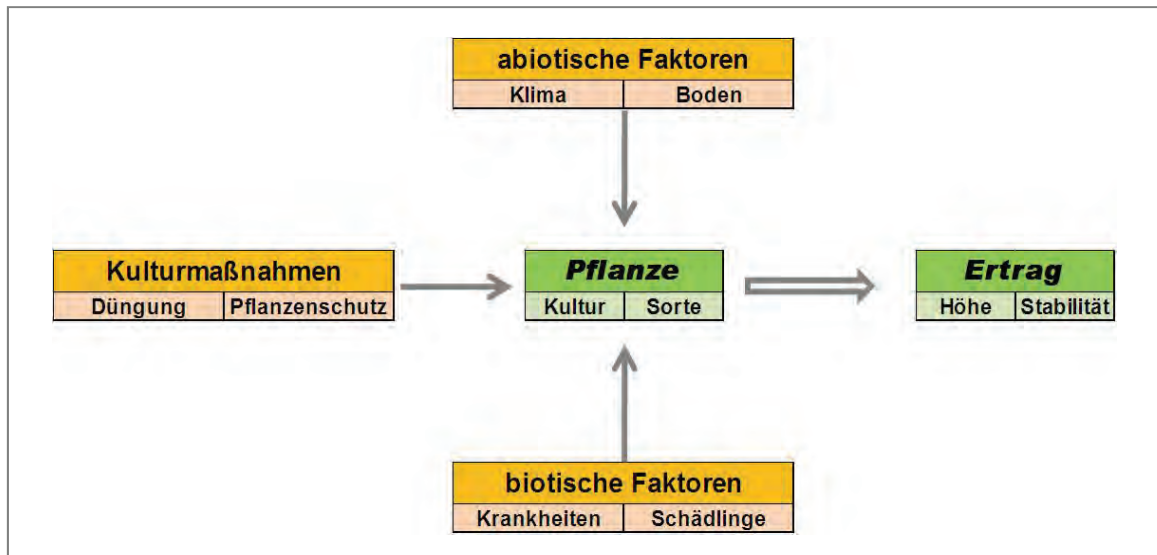


Abb. 1: Einflussfaktoren auf den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturpflanzen

Neben dem Ertragspotential der Kulturpflanze spielt die natürliche Fruchtbarkeit des Anbauortes eine entscheidende Rolle für die Ertragsleistung eines Pflanzenbestandes. In erster Linie prägen Klima und Boden sowie die Wechselbeziehungen zwischen diesen beiden Faktoren die natürlichen Verhältnisse an einem Standort. Aufgrund der Ortsgebundenheit der pflanzlichen Produktion stellen Klima und Boden daher die wichtigsten natürlichen Einflussfaktoren bei der Bewirtschaftung eines Standortes dar. Eine Veränderung des Witterungsgeschehens im Zuge des prognostizierten Klimawandels wirkt sich somit auf die Wachstumsbedingungen und letztendlich auf die Erträge landwirtschaftlicher Ackerkulturen aus. [2]

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die zu Grunde liegenden Wirkungszusammenhänge zwischen ausgewählten Klimaparametern und der Ertragsleistung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen aufgezeigt, um auf diese Weise die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Höhe von Naturalerträgen abzuschätzen. Zunächst werden die Vorgehensweise sowie ausgewählte Ergebnisse zur Prognose zukünftiger Klimaparameter erläutert, da sie den Ausgangspunkt für Klimafolgenabschätzungen bilden. Danach wird die Bedeutung ausgewählter Klimaparameter für die Ertragsbildung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen beschrieben. Unter Berücksichtigung ausgewählter Forschungsergebnisse erfolgt somit eine tendenzielle Abschätzung der zu erwartenden Auswirkungen der Klimaänderung auf Naturalerträge.

2 Prognose und zukünftige Entwicklung ausgewählter Klimaparameter

Ändern sich im Zuge des Klimawandels einzelne Klimaparameter in ihrer bisherigen Ausprägung, sind hiervon auch essentielle Wachstumsfaktoren landwirtschaftlicher Kulturpflanzen wie Licht, Luft, Wärme und Wasser betroffen. Diese Faktoren wirken auf das Wachstums-, Entwicklungs- und Reproduktionsvermögen der Pflanzen und haben somit Einfluss auf die Höhe und Stabilität der Erträge einerseits sowie die Qualität des Erntegutes andererseits. [2]

Durch den Klimawandel ändern sich sowohl physikalische als auch chemische Klimaparameter. Die für die Ertragsleistung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen wichtigsten Einflussfaktoren sind dabei die Parameter Temperatur, Niederschlag und Strahlung sowie der Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre. Prognosen zur zukünftigen Ausprägung dieser Parameter beruhen auf den Ergebnissen von „Klimaszenarien“, die anhand sogenannter „Klimamodelle“ errechnet werden. [3]

Modelle zur Prognose zukünftiger Klimaparameter

„Klimamodelle“ bestehen aus einer Vielzahl komplexer mathematischer Gleichungssysteme, die versuchen, das Klimasystem der Erde auf der Grundlage physikalischer Gesetzmäßigkeiten zu beschreiben. Regionale „Klimaszenarien“ stellen die Ergebnisse eines Klimamodells auf kleinräumiger Ebene dar.

Die Erstellung solcher regionaler Klimaszenarien geschieht in drei Schritten: den Ausgangspunkt bilden sogenannte „Emissionsszenarien“, die in ein „globales Klimamodell“ eingespeist werden. Die Ergebnisse der globalen Klimamodelle dienen wiederum „regionalen Klimamodellen“ als Voraussetzung zur Berechnung kleinräumiger Veränderungen des Klimas.

Die „Emissionsszenarien“ stellen verschiedene Szenarien dar, die das Verhalten des Menschen in der Zukunft umschreiben. Je nach gewähltem Emissionsszenario (A1B / A1T / A1FI / A2 / B1 / B2) ergeben sich unterschiedliche Konsequenzen für die Höhe an Treibhausgasemissionen wie zum Beispiel Kohlendioxid. „Globale Klimamodelle“ übersetzen das gewählte Emissionsszenario in entsprechende Klimaparameter, indem sie die wichtigsten Bereiche des globalen Klimasystems in vereinfachter Form abbilden. Da die Ergebnisse globaler Klimamodelle in ihrer räumlichen Auflösung jedoch zu grobmaschig für die Untersuchung regionaler Klimafolgen sind, wurden „regionale Klimamodelle“ entwickelt. Anhand verschiedener Regionalisierungsverfahren übertragen sie die Ergebnisse der globalen Modelle auf den kleinräumigen Maßstab regionaler Klimaszenarien.

Bei der Bewertung regionaler Klimaszenarien gilt es, verschiedene Unsicherheitsfaktoren zu beachten. Zum einen sind die einzelnen Schritte bei der Erstellung der regionalen Klimaszenarien mit Unsicherheiten behaftet (Unsicherheit der zukünftigen Treibhausgasemissionen, Ungenauigkeiten in den globalen und regionalen Klimamodellen, Sampling-Unsicherheit). Zum anderen können die einzelnen Parameter der Klimaszenarien nur mit unterschiedlicher Sicherheit bestimmt werden: Temperaturen können zuverlässiger simuliert werden als Niederschläge, Mittelwerte können wiederum mit größerer Sicherheit prognostiziert werden als Extremwerte. Aussagen zur zukünftigen Klimaentwicklung und darauf aufbauende Klimafolgenabschätzungen sind somit stets vor diesem Hintergrund zu interpretieren. [4]

Gleichzeitig dienen Klimamodelle aber auch der Eingrenzung der genannten Unsicherheiten. Zudem stellen Klimamodelle das einzige Hilfsmittel dar, das komplexe Wirkungsgefüge des Klimasystems in seiner Gesamtheit zu beschreiben. Die damit verbundenen Möglichkeiten machen Klimamodelle unter gegenwärtigem Kenntnisstand zur besten Grundlage bei der Abschätzung von Klimafolgen. [5]

Entwicklung ausgewählter Klimaparameter bis 2050

Regionale Szenarien zur zukünftigen Klimaentwicklung wurden für Bayern im Rahmen des Kooperationsvorhabens „KLIWA“ (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) erarbeitet. An diesem Projekt sind die Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie der Deutsche Wetterdienst als Kooperationspartner beteiligt. Ziel des Projektes ist es, Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt abzuschätzen, um entsprechende Vorsorgekonzepte zu entwickeln. Das Untersuchungsgebiet des KLIWA-Projektes erstreckt sich über die Fläche der beteiligten Bundesländer. Zur Erstellung der Klimaprojektionen kamen sowohl verschiedene globale Klimamodelle als auch mehrere Regionalisierungsverfahren zum Einsatz. [6]

In Tab. 1 sind Ergebnisse des KLIWA-Projektes hinsichtlich der für den Pflanzenbau wichtigsten Klimaparameter Temperatur und Niederschlag aufgeführt. Im Einzelnen zeigt die Abbildung die über das Untersuchungsgebiet gemittelten Temperatur- und Niederschlagsveränderungen verschiedener Projektionen für den Zeitraum 2021-2050 gegenüber der Referenzperiode 1971-2000. Die Tabelle zeigt für die beiden Parameter Temperaturänderung und Niederschlagsänderung deren Ausprägung in Abhängigkeit der verwendeten Emissionsszenarien A1B, A2 und B1. Als globales Klimamodell kam das Modell ECHAM 5 (European Centre Hamburg Model 5) zum Einsatz. Dabei wurden die beiden Parameter anhand des statistischen Regionalmodells WETTREG sowie des dynamischen Regionalmodells REMO ermittelt.

Tab. 1: Temperatur- und Niederschlagsänderung in den KLIWA-Regionen im Zeitraum 2021-2050 gegenüber 1971-2000; Quelle: [7] (Darstellung geändert)

Klimamodell	Temperaturänderung [°C]			Niederschlagsänderung [%]		
	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
WETTREG-2006						
Jahr	0,8	0,8	0,7	-2,0	-1,3	0,9
hydrologisches Sommerhalbjahr	0,7	0,8	0,5	-7,7	-6,3	-3,5
hydrologisches Winterhalbjahr	0,9	1,0	0,9	5,2	4,8	6,3
REMO-2006						
Jahr	1,0	0,8	0,5	5,9	3,2	9,1
hydrologisches Sommerhalbjahr	1,0	0,8	0,4	2,4	3,7	8,0
hydrologisches Winterhalbjahr	1,0	0,9	0,7	11,0	2,8	12,4

Die Ausprägungen der in der Tabelle aufgeführten Parameter sind dargestellt als Durchschnittswert für das gesamte Jahr sowie als Durchschnittswert für das hydrologische Sommer- bzw. Winterhalbjahr. Dabei gilt es zu beachten, dass das hydrologische Sommerhalbjahr von Mai bis Oktober dauert, das Winterhalbjahr demzufolge von November bis April. Obwohl die Tabelle lediglich Ergebnisse zu den beiden Parametern Temperatur und Niederschlag enthält, zeigen sich schon hier die zuvor geschilderten Unsicherheiten

und Einflüsse der eingesetzten Modelle und zu berechnenden Parameter. Beispielsweise zeigt sich bei der Temperaturänderung über alle Szenarien hinweg eine Zunahme der ermittelten Werte. Dagegen ergeben sich bei der Niederschlagsänderung der REMO-Szenarien ausschließlich Zunahmen der Niederschläge, während sich bei den WETTREG-Szenarien in Abhängigkeit vom gewählten Emissionsszenario entgegengesetzte Aussagen ableiten lassen.

Eine Darstellung weiterer, über Temperatur und Niederschlag hinausgehender Parameter zur künftigen Entwicklung des Klimas in Bayern kann den Fachveröffentlichungen des KLIWA-Projektes entnommen werden [7].

3 Auswirkungen ausgewählter Klimaparameter auf die Ertragsleistung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen

Trotz der mit der Prognose von Klimaänderungen verbundenen Unsicherheiten lassen sich die Auswirkungen einzelner Klimaparameter auf die Ertragsleistung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen zumindest in ihrer Wirkungsrichtung abschätzen. Hierfür ist es notwendig, einen Blick auf die physiologischen Reaktionsmuster von Pflanzen auf die ausgewählten Parameter zu werfen.

Im Fokus der Betrachtung steht die Photosynthese als zentraler Prozess der Biomassebildung. Pflanzen wandeln dabei die Energie des Sonnenlichtes in organische Verbindungen um, die anschließend für Stoffwechselfvorgänge zur Verfügung stehen. Den größten Teil der Stoffwechselaktivitäten einer Pflanze beanspruchen Wachstums- und Entwicklungsvorgänge. Diese wiederum sind entscheidend für die Ertragsbildung. [1]

Zum einen haben Klimaparameter einen direkten Einfluss auf die Photosyntheseleistung einer Pflanze. Zum anderen tragen sie aber auch wesentlich zur Steuerung der Wachstums- und Entwicklungsphasen der Pflanze bei. Unter diesem Blickwinkel wird im Folgenden die Bedeutung der Parameter Strahlung, Temperatur, Niederschlag und Kohlendioxid für die Ertragsbildung untersucht. Bei der Beurteilung, wie sich eine Veränderung dieser Parameter im Zuge des Klimawandels auf Naturerträge auswirkt, spielt jedoch nicht nur die isolierte Betrachtung der Parameter eine Rolle sondern auch deren kombinierte Wirkung. Schließlich werden auch die Auswirkungen von Extremereignissen auf die Ertragsleistung kurz dargestellt.

Bei der Beurteilung der Bedeutung der genannten Parameter für die Ertragsbildung gilt es, zwei grundsätzliche Typen von Kulturpflanzen zu unterscheiden: C₃-Pflanzen (u. a. Getreide, Hackfrüchte, Gräser) einerseits und C₄-Pflanzen (u. a. Mais, Hirse, Zuckerrohr) andererseits. Die beiden Typen unterscheiden sich bei der Photosynthese in ihren Stoffwechselwegen. C₄-Pflanzen reichern im Rahmen der Photosynthese Kohlendioxid in bestimmten Zellen an. Im Vergleich zu C₃-Pflanzen, die diesen Prozess nicht durchführen, sind sie auf diese Weise unabhängiger vom Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre. Allerdings benötigen sie für diesen Prozess zusätzliche Strahlungsenergie, so dass sich C₄-Pflanzen unter natürlichen Bedingungen bevorzugt in den wärmeren Gebieten der Erde ansiedeln. [2]

Die folgende Beschreibung der Wirkungsweise ausgewählter Klimaparameter beruht im Wesentlichen auf den Ausführungen von Eitzinger et al. [8]

Strahlung

Die Energie des Sonnenlichtes erreicht die Pflanzen in Form elektromagnetischer Strahlung. Diese Energie benötigen die Pflanzen im Rahmen der Photosynthese zum Aufbau organischer Verbindungen aus Kohlendioxid und Wasser (Assimilation). Mit steigender Sonneneinstrahlung nimmt somit auch die Photosyntheseleistung zu. Ab einer gewissen Lichtintensität kann die Photosyntheseleistung jedoch nicht mehr weiter gesteigert werden (Lichtsättigung). C₄-Pflanzen erreichen bei Lichtsättigung eine höhere Photosyntheseleistung als C₃-Pflanzen.

Darüber hinaus steuert die Lichtintensität entscheidende Wachstums- und Entwicklungsprozesse wie beispielsweise die Keimung (Licht-/ Dunkelkeimer) oder den Eintritt der generativen Entwicklungsphase. [1]

Temperatur

Sowohl die Photosynthese als auch die Atmung stellen von der Temperatur abhängige Prozesse dar. Sie sind gekennzeichnet durch Minimum-, Optimum- und Maximumtemperaturen, die jedoch für die Photosynthese in niedrigeren Temperaturbereichen liegen als für die Atmung. Hieraus ergibt sich ein Temperaturbereich, bei der die Nettoassimilation, also die Differenz zwischen Photosynthese und Atmung, ihr Maximum erreicht. Für C₄-Pflanzen liegen die Optimumtemperaturen für die Photosynthese und somit auch für die Nettoassimilation in einem höheren Bereich als für C₃-Pflanzen.

Des Weiteren unterliegen wichtige Wachstums- und Entwicklungsschritte dem Einfluss der Temperatur. So bestimmt der Temperaturverlauf innerhalb eines Jahres Anfang und Ende der Vegetationsperiode und somit den Zeitraum, der für Wachstum potentiell zur Verfügung steht. Daneben sind für den Beginn des Keimungsprozesses je nach Kulturart bestimmte Mindesttemperaturen erforderlich. Die Dauer der einzelnen Entwicklungsstadien (Phänologie) wird u. a. von Temperatursummen gesteuert. Höhere Temperaturen bewirken dabei eine Verkürzung einzelner Entwicklungsphasen. Schließlich müssen manche Arten bestimmte Kältesummen erfüllen (Vernalisation), um in die generative Phase eintreten zu können.

Niederschlag

Höhe und Verteilung der Niederschläge prägen den Wasserhaushalt einer Pflanze. In diesem Zusammenhang kommt auch die enge Verknüpfung zwischen Klima und Boden zum Tragen, da die Aufnahme des Wassers über die Wurzeln aus dem im Boden gespeicherten pflanzenverfügbaren Wasser erfolgt.

Da das Wasser in der Pflanze zahlreiche essentielle Funktionen wie zum Beispiel Transport und Wärmeregulierung übernimmt, sind ausreichende Niederschläge Voraussetzung für die Ertragsbildung. Im Rahmen der Photosynthese wandeln Pflanzen Kohlendioxid und Wasser in Kohlenhydrate um.

Kohlendioxid

Auch die chemische Zusammensetzung der Luft spielt für die Ertragsbildung der Pflanzen eine Rolle. Neben Wasser stellt Kohlendioxid den wesentlichen Baustein zur Bildung organischer Verbindungen im Prozess der Photosynthese dar. Unter den gegenwärtigen Kohlendioxidkonzentrationen der Atmosphäre erreichen C₄-Pflanzen eine höhere Photosyntheseleistung als C₃-Pflanzen.

Durch eine Erhöhung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre würde sich die Kohlenstoffversorgung der Pflanzen entscheidend verbessern. Dieser „CO₂-Düngungseffekt“ würde insbesondere C₃-Pflanzen zu Gute kommen. Seit Beginn der industriellen Revolution hat der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre von ca. 280 ppm (parts per million) auf mittlerweile ca. 380 ppm zugenommen. In Abhängigkeit des zukünftigen Verhaltens des Menschen werden für Mitte dieses Jahrhunderts Konzentrationen von ca. 550 ppm erwartet.

Kombinationswirkungen

Hinsichtlich der prognostizierten Veränderungen des Klimas scheinen C₄-Pflanzen in erster Linie von höheren Temperaturen und höheren Lichtintensitäten zu profitieren, da sie eine Zunahme dieser Parameter besser in Ertrag umsetzen als C₃-Pflanzen. Jedoch können Hitzestress und fehlende Niederschläge, insbesondere in empfindlichen Entwicklungsstadien wie der Blüte, sowohl bei C₄ als auch bei C₃-Pflanzen zu deutlichen Ertragsverlusten führen. Dagegen nützen erhöhte Kohlendioxidgehalte in der Atmosphäre vor allem den C₃-Pflanzen.

Da die untersuchten Parameter in ihrer Wirkung auf die Pflanzen jedoch nicht isoliert voneinander auftreten, müssen auch Kombinationseffekte zwischen den Parametern in Betracht gezogen werden. Insbesondere die Auswirkungen des CO₂-Düngungseffektes auf Temperatur und Wasserhaushalt sind dabei von Interesse. Durch die Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre verbessert sich die Kohlenstoffversorgung der Pflanzen. Somit können die Pflanzen ihren Gasaustausch mit der Atmosphäre reduzieren, da sie die für die Photosynthese benötigten Mengen an Kohlenstoff aufgrund des höheren Angebotes in der Atmosphäre effizienter aufnehmen können. Damit verringert sich gleichzeitig auch der Austausch von Wasserdampf zwischen Blattinnerem und Umgebungsluft. Hieraus ergeben sich eine geringere Verdunstung (Transpiration) bzw. eine höhere Wassernutzungseffizienz der Pflanzen. Insbesondere bei Wassermangel ist dieser weitere positive Effekt der erhöhten Kohlendioxidkonzentration von Bedeutung. Andererseits geht mit einer geringeren Transpiration auch die Kühlungsfunktion dieses Vorganges zurück. In der Folge können steigende Blatttemperaturen und die damit verbundene Zunahme von Atmungsverlusten einen Teil der positiven Wirkung des CO₂-Düngungseffektes wieder zunichtemachen.

Um diese Zusammenhänge unter realen Bedingungen in ihrer Größenordnung abschätzen zu können, werden am Johann Heinrich von Thünen-Institut in Braunschweig Feldversuche durchgeführt. Im Zentrum dieser Versuche stehen dabei die Wirkungen einer erhöhten Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre auf Pflanzen, Agrarökosysteme und die biologische Vielfalt. Diese sogenannten „FACE-Versuche“ (*Free Air Carbon Dioxide Enrichment*) berücksichtigen eine Vielzahl von Wechselwirkungen zwischen einer erhöhten

Kohlendioxidkonzentration und anderen Wachstumsfaktoren. Bisherige Ergebnisse der Versuche zeigen höhere Erträge bei allen untersuchten C₃-Pflanzen (Gerste, Weizen, Zuckerrübe) in einer Größenordnung von + 7 % bis + 15 %. Beim Mais lassen sich Ertragssteigerungen nur bei Trockenheit feststellen. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Pflanzenbestände weniger Wasser verbrauchen, gleichzeitig jedoch auch wärmer werden. [9]

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung von Auswirkungen der Klimaänderung auf Naturalerträge besteht in der Durchführung von Studien auf der Grundlage von Simulationsrechnungen. Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse ausgewählter Klimamodelle als Grundlage für Modelle genutzt, die das System Atmosphäre – Pflanze – Boden abbilden (Pflanzenwachstumsmodelle). In Abhängigkeit der eingespeisten Klimadaten errechnen diese Pflanzenwachstumsmodelle die Naturalerträge ausgewählter landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Diese von den Modellen simulierten Erträge sind jedoch stets vor dem Hintergrund der den Berechnungen zugrunde liegenden Klima- und Pflanzenwachstumsmodelle zu betrachten. Beispielsweise ergeben sich im Vergleich des Zeitraums 1970 - 1980 mit dem Zeitraum 2031 - 2050 bei Winterweizen an ausgewählten Standorten in Süddeutschland Ertragszunahmen von + 22 % bei Berücksichtigung des CO₂-Düngungseffektes bis hin zu Ertragsrückgängen von - 12 % ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung. [8]

Extremwirkungen

Im Zuge des Klimawandels wird häufig auch die Zunahme von Extremereignissen herausgestellt. Solche Ereignisse haben für betroffene landwirtschaftliche Betriebe kurzfristig eine größere Bedeutung als die stetige Veränderung von Mittelwerten. Denn die mit den Extremereignissen häufig verbundenen Ertragsrückgänge schlagen sich auch in der ökonomischen Bilanz der Betriebe nieder. Gleichzeitig gilt es zu bedenken, dass die Auswirkungen des Klimawandels im Allgemeinen sowie speziell die Folgen von Extremereignissen kleinräumig sehr verschieden sein können. Die Vorhersage von Extremereignissen im Rahmen der Klimafolgenabschätzung gestaltet sich jedoch als schwierig. Oftmals wird der Hitzesommer des Jahres 2003 als Vorausschau auf die künftig zu erwartenden Klimabedingungen herangezogen. [3]

In Bayern führte die ausgeprägte Trockenheit des Jahres 2003 in Verbindung mit einer großen Anzahl an heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) und Sommertagen ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) [10] zu einem deutlichen Rückgang der Naturalerträge. Dabei erstreckten sich die Ertragsrückgänge von - 11 % bei Silomais über - 20 % bei Kartoffeln bis hin zu - 27 % bei Raps. [3]

Das Beispiel des Jahres 2003 zeigt, dass vor dem Hintergrund des Klimawandels nicht nur die Veränderung von mittleren Klimawerten, sondern auch die erhöhte Klimavariabilität und insbesondere eine mögliche Zunahme von Klimaextremen bei den betroffenen Betrieben eine große Sensibilität für Auswirkungen des Klimawandels hervorrufen. [3]

4 Diskussion und Ausblick

Bereits die Darstellung weniger Klimaparameter als Einflussfaktoren auf die Höhe des Naturalertrages verdeutlicht die vielschichtigen Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Naturalerträgen. Darüber hinaus beeinflusst der Klimawandel ebenso die Stabilität der Erträge, also die Ertragssicherheit über die Jahre hinweg, als auch die Qualität des Erntegutes. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass sich wegen des Klimawandels auch die zur Ertragserzielung notwendigen Maßnahmen ändern werden. Im Rahmen des technischen Fortschritts kann hierbei zum Beispiel die Züchtung durch die Entwicklung trockenheitstoleranter Sorten einen wichtigen Beitrag leisten.

Für die Abschätzung der zu erwartenden Klimaänderung stellen die Ergebnisse regionaler Klimaszenarien die beste Datengrundlage dar. Trotz der damit verbundenen Unsicherheiten ermöglichen sie eine konkrete Vorstellung darüber, wie sich einzelne Klimaparameter in Zukunft entwickeln werden.

Unter Berücksichtigung der Auswirkungen der ausgewählten Klimaparameter auf die Ertragsleistung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen erweist sich die Bedeutung des Kohlendioxidgehaltes der Atmosphäre als entscheidender Faktor für die zukünftige Richtung der Naturalerträge. Insbesondere C₃-Pflanzen profitieren von zunehmenden Kohlendioxidkonzentrationen. C₄-Pflanzen ziehen dagegen vorwiegend einen Nutzen aus höheren Temperaturen. Mangelsituationen bei einzelnen Faktoren können das Wachstum und die Ertragsbildung jedoch begrenzen. Vor allem Extremereignisse führen diesen Sachverhalt anschaulich vor Augen.

Zur letztendlichen Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf Naturalerträge stellen Simulationsrechnungen auf der Grundlage von Klima- und Pflanzenwachstumsmodellen ein geeignetes Instrument dar, da sie die wesentlichen Verflechtungen zwischen Klimawandel und Pflanzenwachstum erfassen. Entsprechende Untersuchungen für ausgewählte Standorte in Bayern können dazu beitragen, die Ergebnisse bisheriger Studien auf eine breitere Vergleichsbasis zu stellen. Aufgrund der zentralen Bedeutung des Naturalertrages für die Anbauwürdigkeit und Konkurrenzkraft eines Produktionsverfahrens kann die Simulation von Naturalerträgen unter Bedingungen des Klimawandels auch den Ausgangspunkt für eine ökonomische Betrachtung bilden.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Diepenbrock, W.; Ellmer, F.; Léon, J. (2005): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. 1. Auflage. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- [2] Chmielewski, F. M. (2007): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. In: Endlicher, W.; Gerstengarbe F. W. (Hrsg.) (2007): Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. 75-85.
- [3] Schaller, M.; Weigel, H. J. (2007): Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 316.
- [4] Walkenhorst, O.; Stock, M. (2009): Regionale Klimaszenarien für Deutschland – Eine Leseanleitung. E-Paper der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Nr. 6. <http://shop.arl-net.de/regionale-klimaszenarien-fur-deutschland-eine-lesanleitung.html> (10.08.2011).
- [5] Paeth, H. (2007): Klimamodellsimulationen. In: Endlicher, W., Gerstengarbe, F. W. (Hrsg.) (2007): Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. 44-55.
- [6] Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.) (2010): Was ist KLIWA? www.kliwa.de/index.php?pos=start/kurz/ (12.08.2011).
- [7] Komischke, H.; Weber, H. (2009): Kurzbericht Regionale Klimaszenarien und Wasserhaushaltsmodellierung – Ergebnisse der regionenspezifischen Auswertungen von Klimaprojektionen im Vorhaben KLIWA. www.kliwa.de/download/Kurzbericht_RegKS_WHM_2009.pdf (12.08.2011).
- [8] Eitzinger, J.; Kersebaum, K. C.; Formayer, H. (2009): Landwirtschaft im Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. 1. Auflage. Verlag Agrimedia, Clenze.
- [9] Johann Heinrich von Thünen-Institut (Hrsg.) (2009): Das Braunschweiger FACE-Projekt. www.vti.bund.de/fileadmin/dam_uploads/vTI/Bilder/Startseite/Highlights_2010/FACE/pdf-Dateien/FACE-Flyer-dt-final.pdf (16.09.2011).
- [10] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.) (2011): AgrarMeteorologie Statistik (landesweit) – Jahreswetter 2003: Bayern. www.wetter-by.de/ (16.09.2011).

Klimatoleranz bei Gerste – ein biotechnologischer Ansatz zur Ertragssicherung

Günther Schweizer, Manuela Diethelm, Brigitte Halaweh,
Gabi Reichenberger und Markus Herz

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung

Zusammenfassung

Ertragssicherung heißt die Strategie zur Begegnung des Klimawandels – damit ist die richtige Sortenwahl das wichtigste Kriterium dem Risikofaktor „Klimastress“ begegnen zu können. Zwar gibt es bei allen Fruchtarten trockenolerante Typen, deren Qualität und Höchstserträge sind aber nicht auf dem Stand aktueller Kultursorten. Da Sorten aus Israel, Spanien und Italien nicht in unsere Anbaugebiete passen, ist eine aktive Basis-Züchtung gefordert um stresstolerante Gerstensorten aufzubauen, die im Durchschnitt der Jahre mit sicherem Ertrag und guter Qualität die größten Erfolge erzielen.

Neue Techniken der Genomanalyse unterstützen dieses Unterfangen essentiell. Sie können, einer Momentaufnahme oder einem Blitzlicht gleich, alle aktiven Gene eines Gewebes gleichzeitig analysieren um sie dann mit einer zweiten Aufnahme vergleichen zu können. Wird das Transkriptom (Gesamtheit aller Gene) einer unter Trockenstress belasteten Pflanze mit dem Transkriptom einer gut bewässerten Kontrollpflanze verglichen, so können all die Gene erfasst werden, die unter dem Faktor „Trockenstress“ eine wichtige Rolle spielen. Herkunft, Funktion und genetische Diversität dieser Gene lassen sich nach weiteren Analysen nutzen, um sie schließlich gezielt in markergestützten Züchtungsprogrammen einsetzen zu können.

Im vorgestellten Projekt konnten 36.000 Genfragmente mit über 12.000 SNP-Markerpositionen erfasst werden. Bei der vertieften Analyse auf Trockenstress zeigten 2.800 Genfragmente sortenspezifische Reaktionsmuster auf Trockenstress. Die vielversprechendsten Genmuster werden derzeit näher analysiert.

1 Einleitung

Das Weltklima hat sich in den vergangenen 30 Jahren deutlich und in immer schnelleren Schritten erwärmt. Die Temperaturzunahme wurde schon 2006 auf 0,2°C pro Dekade beziffert (PNAS Bd.103, S.14288, 2006). Es werden ernstzunehmende Klimasimulationen beschrieben, die aufzeigen, dass sich die Schwankungen durchschnittlicher Sommertemperaturen deutlich ändern werden. Dem Jahr 2003 mit Extremereignissen von Hitzewelle und Trockenheit wurde das Potential einer signifikanten Langzeitänderung im kontinentalen Kohlenstoffgleichgewicht Europas zugeschrieben. „Der Klimawandel stellt global die wohl größte umweltpolitische Herausforderung des 21. Jahrhunderts dar. Dimension und Komplexität des Problems erfordern abgestimmtes Handeln. Durch eine Kombination von

Vermeidungs- und Anpassungsstrategien und ihre konsequente Umsetzung muss baldmöglichst versucht werden, negative Folgewirkungen für die menschliche Gesellschaft global und regional weitgehend einzugrenzen. Das Spektrum der Auswirkungen reicht von der menschlichen Gesundheit über die Nahrungsmittelproduktion, die Ökosysteme ...“ (aus: Klimaanpassung Bayern 2020, S. 7, Studie der Univ. Bayreuth, 2008)

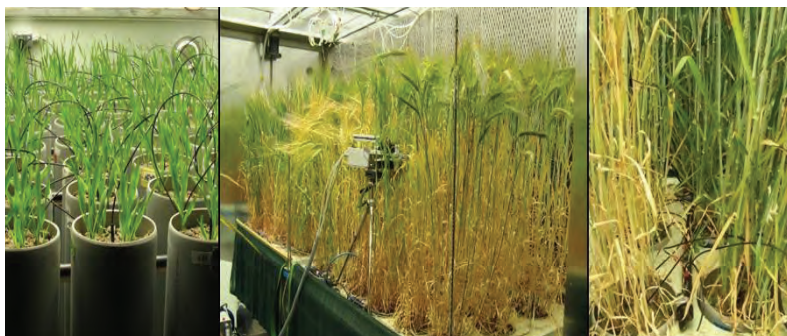


Abb. 1: Einblick in den Klimakammerversuch zum Thema: „Trockentoleranz bei Gerste“ am HelmholtzZentrum München.

In Bayern haben wir es mit einer Zunahme von Extremereignissen zu tun, d. h. mit stark schwankender Wasserverfügbarkeit und drastischen Temperatursprüngen. Die Wetterereignisse sind hierbei regional sehr verschieden und wirken sich äußerst negativ auf die Produktion landwirtschaftlicher Lebensmittel und Rohstoffe und somit auch direkt auf Landwirte und verarbeitende Industrie aus. Ertragssicherheit bei vermarktungsfähiger guter Qualität steht ganz oben auf der Wunschliste der Landwirte.

Die Züchtung auf stresstolerante Pflanzen stellt die Züchtungsforschung wegen deren großer Komplexität vor eine große Aufgabe. Konnten wir bislang sehr gut auf die Wirkung einzelner Gene wie auf Resistenz oder auf spezielle Qualitätsparameter selektieren, so ist die Reaktionsbreite der Pflanze gegenüber abiotischem Stress von einer Vielfalt an Genen und Stoffwechselwegen geprägt (Abb. 2), sie entziehen sich damit einer einfachen Selektion im Züchtungsprogramm. Vorbeugende Reaktionen der Landwirtschaft zur Anpassung an die sich veränderten Umwelt-Situationen sind u. a. in der Verschiebung der Aussaattermine und in einer pflanzenbaulichen Verbesserung der Wassernutzungs- und Nährstoffeffizienz zu sehen. Sommergetreide muss nun toleranter gegen Spätfröste sein, Wintergetreide hingegen sollte ein geringeres Vernalisationsbedürfnis für zu warme Winter besitzen. Auswahl und Angebot geeigneter und klimatoleranter Sorten sind als wichtigstes Kriterium zur Begegnung der Ertragssicherheit zu sehen. Doch wie sollen diese komplexen Regelmechanismen (Abb. 2), welche sich im Laufe der Evolution entwickelt haben und an denen gleichzeitig viele hunderte von Genen beteiligt sind, in einfachen Züchtungsprogrammen bearbeitet werden können?

War vor Jahren die Situation der Züchtungsforschung mit Markerprogrammen auf mehr als 10 Gene gleichzeitig selektieren zu können noch ziemlich aussichtslos, so gibt es heute die Möglichkeit der „gesamt-genomischen Selektion“. Diese neuen Technologien generieren in kürzester Zeit umfangreiche, genetische Informationen mit denen hochkomplexe molekulare Schaltstrukturen z. B. für Trockentoleranz den genetischen loci im Genom zugewiesen werden können. Diese Technologien sind zwar noch sehr komplex und teuer, aber durchaus umsetzbar - und umso wichtiger, je essentieller die Zuchtziele sind. Es ist

kein Geheimnis, dass alle wichtigen Zuchtziele pleiotrop und damit von vielen Genen, Genregulationen und Stoffwechselwegen abhängig sind. Es lohnt sich deshalb die Pflanze zu verstehen und ihre Wege zur Produktion von Ertrag und ihre Strategien zur Überwindung von Stress in den Züchtungsprogrammen von morgen umzusetzen.

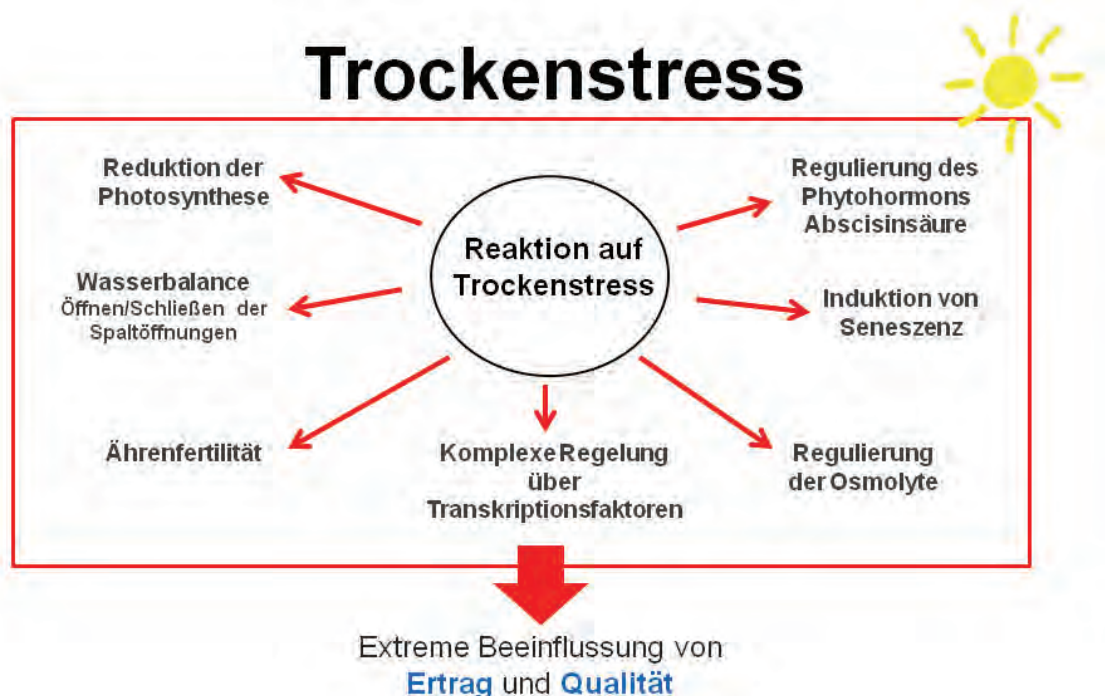


Abb. 2: Überblick über die vielfältige Wirkung von Trockenstress auf die Pflanze. Die Grafik skizziert eine Auswahl des Reaktionsspektrums der Pflanze, welches sich im Laufe der Evolution gebildet hat.

Hinter den „neuen Hochdurchsatz-Techniken“ der Genomanalyse verbergen sich zum einen die Sequenzierungsmöglichkeiten ganzer Pflanzengenome oder die komplette Transkriptomanalyse ausgewählter Linien in wenigen Tagen, jeweils verbunden mit der Kombination einer schlagkräftigen Bioinformatik, die dann Tage und Monate mit der Verrechnung dieser enormen Datenmengen beschäftigt ist. Die Nutzung dieser Möglichkeiten versetzt uns aber in die Lage, ganze Genome hinsichtlich deren besseren oder schlechteren Gen-/Allelausstattung überprüfen zu können. Im vorliegenden Fall wird die „Gesamtenomische Transkriptomanalyse“ genutzt. Ihre Durchführung ist wie die Aneinanderreihung von Blitzlichtaufnahmen ins Genom der Pflanze zu sehen. Für den kurzen Moment sind alle aktiven Gene sicht- und zählbar. Hochkomplexe Fragestellungen gerade bezüglich Klimatoleranz bei Pflanzen werden dadurch möglich [1][2].

Welche Gene bzw. Allele der Pflanze sind nun für Klimatoleranz verantwortlich und welche dieser Allele sind die „richtigen“ für die Landwirtschaft, sodass trotz Klimastress sichere Erträge und verwertbare Qualitäten geerntet werden können?

Das Phänomen „Klimastress“ ist nicht neu, Pflanzen haben sich in der Evolution an das sich ändernde Klima angepasst und hierzu vielfältige, genetisch bedingte Reaktionswege angelegt – Plan B heißt hier: verzögertes Wachstum, kleinere Blätter, angepasste Blattstellung, mehr Stomata, Zuckerverlagerung, frühere Seneszenz, Produktion generativer Anlagen (sprich Notreife und kleine Körner). Pflanzen können sich bis zu einem jeweiligen

Limit vor hohen Temperaturen und Trockenheit schützen, bei extremer Hitze versagen jedoch ihre Strategien. Wenn die Blätter braun werden, ist in der Pflanze bereits eine Kaskade vielfältiger biochemischer Prozesse in diversen Stoffwechselwegen abgelaufen. Die Kombination von Hitze, Trockenheit, starker UV-Strahlung und hoher Lichtintensität ist für die Pflanze nicht mehr kompensierbar – absterben, Frühreife und drastische Ertrags-einbußen sind die Folge.

Die Reaktionswege der Pflanze auf Trockenstress sind vielfältig, meist tritt Trockenstress in Kombination mit hohen Temperaturen auf. Ist Wasser der limitierende Faktor dann werden die Stomata der Blätter zum Schutz vor weiterer Austrocknung und zur Stabilisierung des Blattwasserpotentials geschlossen. Die Regulation erfolgt über Schließzellen die ihrerseits über osmotisch wirksame K^+ , Cl^- und Malat²⁻ Lösungen reguliert werden. Da Stomata keine Information über die Wasserverfügbarkeit des Bodens haben, dienen Transkriptionsfaktoren und Botenstoffe wie RCAR1 und weitere als Alarmanlage um das übergeordnete pflanzliche Stresshormon Abscisinsäure (ABA) durchzustellen. ABA wird in der Wurzel gebildet und über das Xylem in die Blätter transportiert. Für die Synthese von ABA sind zwar mehrere Enzyme verantwortlich (Abb. 11) aber insbesondere NCED3 ist am Beispiel *A. thaliana* streng über Trockenstress reguliert [3]. Weitere Zuspielder Aktivierung sind CYP707 Gene, welche selbst durch Dehydrierung der Gewebe induziert werden [4]. Die Trockentoleranz wird über Kaskaden von Genen und Regulationsfaktoren gesteuert [17]. Viele dieser verantwortlichen Gene tragen in ihrem Promotorbereich, also im DNA-Regulationsbereich der vor dem Gen liegt, Rezeptorstellen (cis-acting elements) für diverse Transkriptionsfaktoren gleichzeitig. Diese Rezeptorstellen zeichnen sich durch kurze DNA-Motive (DRE: GCCGAC & ACCGAC, ABRE: ACGTGTC), die für das Andocken und damit für den Rezeptor spezifisch sind, aus [2] [5]. Für Trockentoleranz bekannte Motive sind ABRE (ABA responsive elements) für AREB und DRE (Dehydration responsive element) für die DREB-Faktoren (drought element binding). Über vielseitige Wechselwirkungen von Transkriptionsfaktoren und Phytohormonpegel kommt es unter Trockenstress auch zur Hemmung der Synthese von Gibberellin (GA). CBF-Faktoren (C-repeat binding factor) aktivieren hierbei die GA2-Oxidase, dadurch wird die Gibberellin-Konzentration in der Zelle reduziert und DELLA-Proteine angereichert [6][18], mit der Folge von kleinwüchsigen und kleinblättrigen Pflanzen mit deutlichem Minderertrag. Die hier aufgezählten Beispiele können nur ein kleines Fenster im Umfeld Pflanze-Trockentoleranz anzeigen, sind aber ein Hinweis dafür, wie viel Wissen vorliegt und für die Züchtung umgesetzt werden muss.

Der vorliegende Forschungsansatz möchte sich diesen Fragestellungen annehmen und mit seinem mehrstufigen Aufbau und vielfältigen Kooperationen (HelmholtzZentrum, TUM, MaxPlanck-Institut Golm, LfL), aber auch mit Hilfe der neuen „Hochdurchsatz-Genomanalyse-Techniken“ die wichtigsten Regelmechanismen und biochemischen Prozesse sowie deren genetische Reaktionsbreite auf Trockenstress unter Beibehaltung von Ertragssicherheit aufzeigen. Als Ausgangsmaterial dient die Gerste, die in Bayern einen sehr hohen Stellenwert bezüglich ihrer Malzqualität hat, und gleichzeitig als Modellpflanze in der Grundlagenforschung eingesetzt wird. Für die praktische Umsetzung sollen praxisrelevante Selektionsmarker für „Smart Breeding“-Ansätze (MAS) in der Züchtung [7], aber auch für die Analyse genetischer Ressourcen eingesetzt werden.

2 Projektbeschreibung und Versuchsaufbau

Der sich vollziehende Klimawandel mit seinen schwer einschätzbaren Folgen für die Landwirtschaft stellt die Züchtungsforschung vor eine große Herausforderung. Die GröÙte dürfte das komplexe Zusammenspiel vieler unwägbarer Umweltfaktoren und im Gegenzug die genauso komplexe Antwort der Pflanze als Reaktion auf extreme Klimaveränderungen sein. Komplex im Sinne der Pflanze bedeutet, dass das Wechselspiel einer Vielzahl von Genen verschiedenster Stoffwechselwege den Reaktionskorridor bzw. die Spannbreite ihrer Toleranz steuert [8] [9] – werden diese überschritten, kommt es zu Seneszenz, Qualitätsverlust, Ertragsminderung bis hin zum Totalausfall.

Der Versuchsaufbau ist in drei Schwerpunkte unterteilt:

Phänomics: In Kooperation mit mehreren AGen des HelmholtzZentrums-München und der TUM konnten im Sonnensimulator-Versuch „V105“ in Neuherberg ausgewählte Gersten über den gesamten Vegetationsverlauf von der Keimung bis zur Abreife unter umweltrealistischem Klima geprüft werden. Der Sonnensimulator besteht aus 4 identischen Klimakammern und konnte das Licht- und Klimaspektrum im Tages- und Jahresverlauf umweltrealistisch nachbilden. Während zwei Kammern den natürlichen Klimaverlauf simulierten, wurden zwei weitere Klimakammern mit zusätzlichem UV-Strahlungsstress gefahren. Die Bewässerung für den Trockenstress in jeder der 4 Kammern war Blockweise mit 6 Prüfgliedern steuerbar. In jeder der 4 Klimakammern konnte die „Trockenstressvariante“ über einen Zeitraum von 12 Tagen „nach der Blüte“ jeweils im Vergleich zu „normal bewässert“ geprüft werden (Abb. 3). Somit konnte Probematerial in zwei unabhängigen Wiederholungen pro Experiment generiert werden.

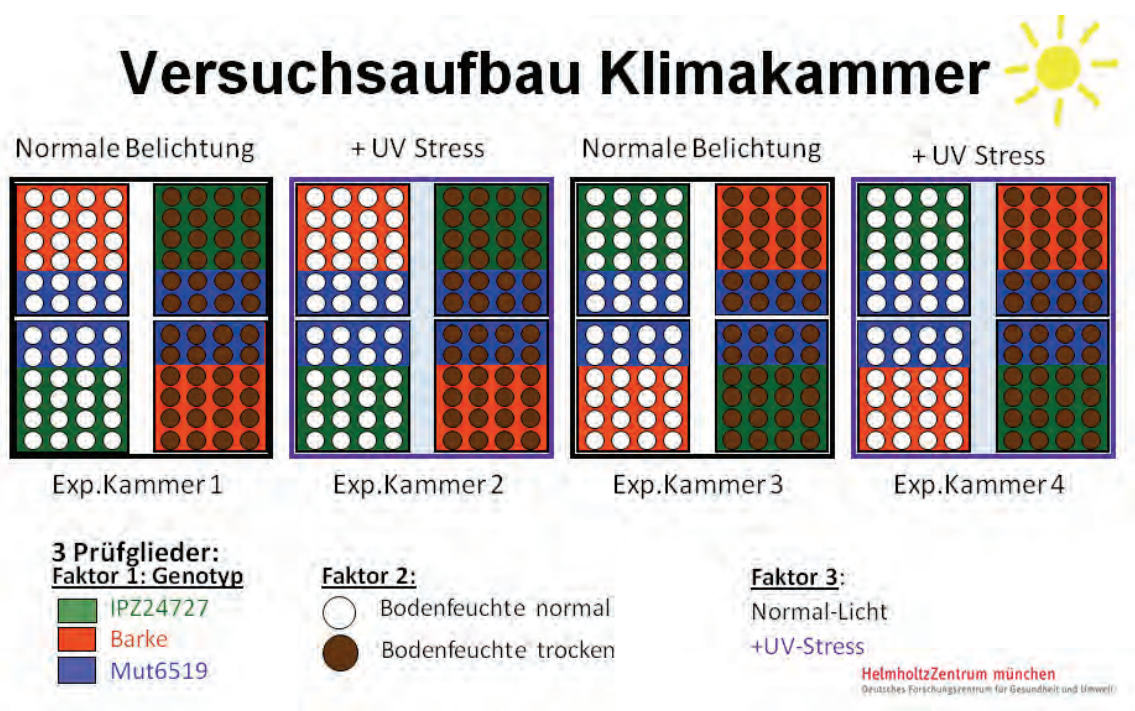


Abb. 3: Die Belegung der 4 baugleichen Klimakammern ist der Zeichnung zu entnehmen. Während immer die linke Hälfte der Kammern als Kontrollbehandlung diente, wurde die rechte Hälfte der Kammer zum Zeitpunkt nach der Blüte jeweils einem 12-tägigen Trockenstress mit anschließender Wiederbewässerung unterzogen.

Pflanzenmaterial: Geprüft wurden die Sommergersten: Barke, LfL24727 und Mut6519. Barke: 2z Sommerbraugerste (Sz. Breun) und Referenzsorte deutscher Genom-Projekte, Genom- und Chromosomenkarten sind verfügbar, anfällig gegenüber nichtparasitärer Blattverbräunung [10].

LfL24727: 2z Sommerbraugerste, LfL-Zuchtstamm mit verfügbaren Genomdaten, hat nachgewiesene Resistenz/Toleranz gegenüber abiotischem Stress und Ramularia.

Mut6519: 2z Sommerbraugerste, sehr früh, argentinischer Zuchtstamm mit nachgewiesener Resistenz/Toleranz gegenüber Salz- und Trockenstress. Für alle 3 Genotypen liegen an der LfL entsprechende Kartierungspopulationen (DH-Populationen) vor.

Genomics: In den letzten Jahren ist es der Genomanalyse/IPZ1b gelungen die Expressionsanalyse als festen Bestandteil der Markerentwicklung zu etablieren (GABI-, DFG- und Ministeriumsprojekte). Der Vorteil der Expressionsanalyse zeigt sich in der speziellen und alleinigen Analyse der „aktiven“ Gene in der Pflanze. Die Gesamtheit aller Gene einer Pflanze wird auch als Transkriptom bezeichnet und macht 5 - 10 % des Genoms aus. Bei der Transkriptomanalyse wird anstelle von DNA entsprechend mit mRNA als Ausgangssubstrat für die molekularen Analysen gearbeitet. Das Transkriptom der Pflanzen wird durch Einflüsse von außen beeinflusst: Der Befall von Weizen durch den pilzlichen Schaderreger „Fusarium“ induziert deren Verteidigungsgene, die Vermälzung der Gerste in der Mälzerei hingegen induziert die Gene im Gerstenkorn für die Malzgewinnung. Die Pflanze reagiert somit auf die Induktion von außen mit einem speziellen Genexpressionsmuster (im Beispiel auf „Fusarium-Befall“ oder auf die „Temperatur und Feuchtigkeit“ in der Kleinvermälzung). Der Vergleich der exprimierten, aktiven Gene am Beispiel „Fusarium befallener Weizen“ mit einem „nicht induzierten Weizen“ zeigt dann all die Gene auf, welche von der untersuchten Pflanze speziell zur Reaktion auf „Fusariumbefall“ und somit zu ihrer Verteidigung benötigt wird [11]. Die relevanten Gene und damit potentiellen Resistenzgene, man spricht auch von Kandidatengenen, können über Sequenzierung und Haplotypenbestimmung identifiziert und als Marker umgesetzt in Züchtungsprogrammen (MAS) eingesetzt werden. Da nur etwa 5 - 10 % des Erbmaterials bzw. des Genomanteils der Pflanze auch tatsächlich Genen entspricht, bedeutet dies eine enorme Effizienzsteigerung der Genomanalyse.

Die Abfrage des Status Quo eines Transkriptoms erfolgt i. d. R. zunächst über einen DNA-Chip. Unter Anwendung des „Barley 44k DNA-Array“ der Fa. Agilent können parallel ca. 40.000 „bekannte“ Genfragmente der Gerste auf deren Expression abgefragt werden. Für die Erforschung „neuer“ Gene und Transkriptionsfaktoren gibt es die Möglichkeit der „Gesamtranskriptom“-Sequenzanalyse. Diese neuen Sequenziertechnologien sind in der Lage alle Gene, die zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem Gewebe der beprobten Pflanze aktiv sind, zu fassen und dieses „Expressionsprofil“ der Pflanze quantitativ auszuwerten. Zu diesen NGS-Techniken (New Generation Sequencing) gehören die „454“-Sequenzierung der Fa. Roche und die „Solexa“-Sequenzierung der Fa. Illumina, sie erfassen in einem einzigen Durchgang 400.000 Gensequenzen bzw. 10 Mio. Reads pro Pflanzenprobe und spiegeln damit quantitativ das entsprechende „Expressionsprofil“ wieder. Die vergleichenden Transkriptomanalysen im vorliegenden Projekt sahen wie folgt aus: Die ausgewählten Versuchsgersten Barke, LfL-24727 und Mut6519 wurden, wie in Abbildung 3 dargestellt, sowohl einem „normalen“ Vegetationsverlauf als auch einem realistischen „Trockenstress nach der Blüte“ über 12 Tage sowie in 2 Kammern zusätzlich einem „UV-Strahlungsstress“ ausgesetzt. Zu 10 definierten Zeitpunkten (Abb. 4) wurde von allen Gerstengenotypen mRNA isoliert und für ausgewählte Zeitpunkte cDNA-

Banken angelegt. Diese cDNA-Banken enthalten damit alle Gene der Pflanze x, welche zum Zeitpunkt y in der „Normal“- oder Stress-Variante benötigt werden. Sie bilden das Ausgangssubstrat für die durchgeführten Transkriptomanalysen.

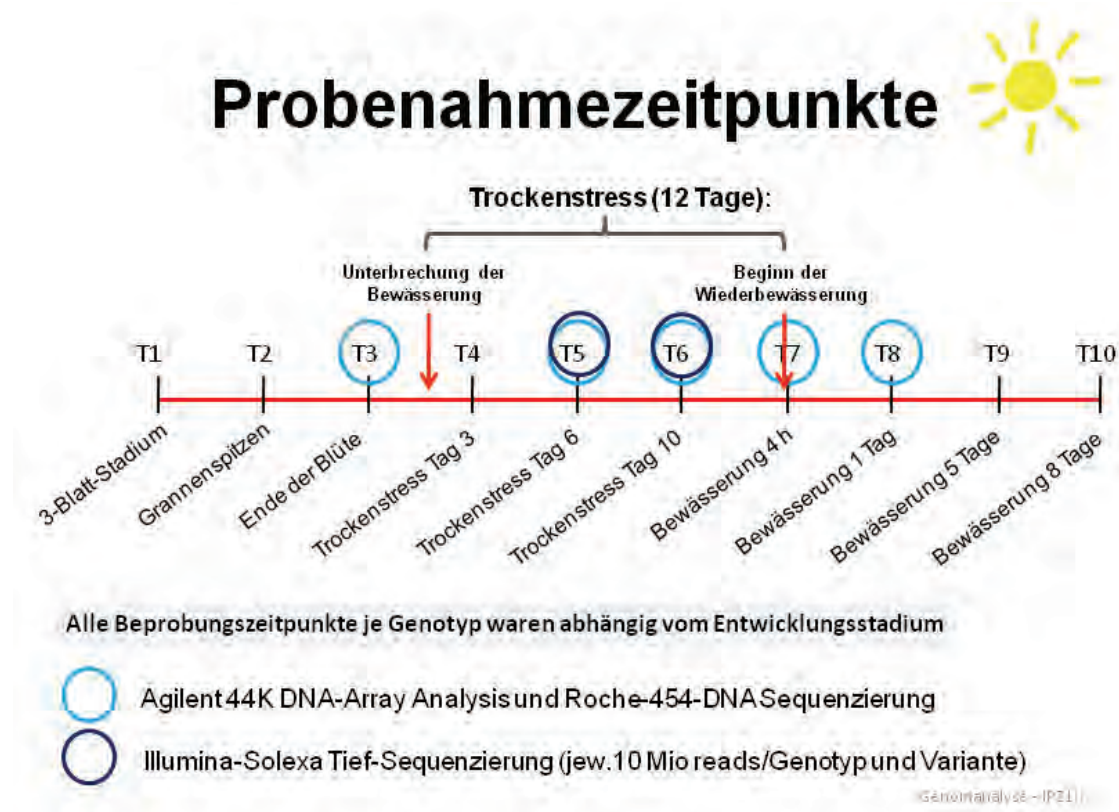


Abb. 4: Darstellung der Probenahmezeitpunkte für die 3 Gerstengenotypen Barke, LfL24727 und Mut6519. Die Zeitpunkte der durchgeführten Expressionsanalysen sind blau markiert.

Bioinformatics: Die sehr aufwändige Bioinformatik wird in Zusammenarbeit mit dem Max Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie in Golm/Potsdam in Zusammenarbeit mit Prof. Björn Usedal, Dr. B. Kersten und Dr. Marc Lohse durchgeführt. Die bereinigten Listen der Sequenzinformationen aller Pflanzen, Zeitpunkte, Behandlungen und Wiederholungen zeigen die Gene samt Expressionsprofilen (Expressionslevel jeden einzelnen Gens) zum jeweiligen Entwicklungsstadium der untersuchten Pflanzen an. Zunächst wurden aus den einzelnen Sequenzfragmenten Gene mit einem möglichst langen Leseraster (contigs) gebildet. Sequenzvergleiche mit internationalen Datenbanken (TIGR, NCBI, GABI...) ermöglichen die Identifikation und Zuordnung dieser Gene. Der Vergleich der verfügbaren Sequenzinformation eines Gens zwischen den Sorten führt zu Allelvarianten und selektierbaren Polymorphismen. Auf jeder dieser Ebenen können Genvariante und Häufigkeit bestimmt und ein entsprechendes Expressionsprofil abgeleitet werden. Damit ist für jeden Probenahmezeitpunkt überprüfbar, ob und wann das entsprechende Gen in welcher Kopienzahl bei welcher Pflanze abgelesen wird – eine wertvolle Ressource.

Folgende „vergleichende Expressionsprofile“ sind in Arbeit:

Trockenstress ⇔ Normalbewässerung (Normallicht)
Trockenstress ⇔ Normalbewässerung (UV-Stress)
Barke ⇔ LfL ⇔ Mut6519
Zeitpunkte T3, T4, T5, T6, T7, T8
Rainout Shelter 2011, 2012

Alle auffälligen und speziell induzierten oder herunter regulierten Gene werden erfasst und ihre jeweilige Aktivität quantitativ bestimmt. Die Funktion und Vernetzung mit anderen Stoffwechselwegen wird u. a. über Datenbank- und Literaturrecherchen, MapMan-Analysen [12] (siehe Abb. 5 - 7) u. w. Programmen dargestellt und identifiziert. Über Sequenzanalysen und Resequenzierungen bei ausgewählten Sorten (z. B. 70 Sorten des Rainout Shelter-Versuches der LfL) werden Haplotypenmuster bestimmt und PCR-Reaktionen für eine MAS sowie Aussagen zur genetischen Diversität dieser Allele abgeleitet.

Im Projekt konnten bislang 36.000 Genfragmente mit über 12.000 SNP-Markerpositionen erfasst werden. Bei der vertieften Analyse auf Trockenstress zeigten 2.800 Genfragmente sortenspezifische Reaktionsmuster auf Trockenstress und bilden damit die Basis für die Identifikation der gesuchten Kandidatengene. Die vielversprechendsten Genmuster werden derzeit näher analysiert. Zudem ist zu jedem Zeitpunkt im Verlauf des Projektes die Möglichkeit gegeben, auf aktuelle Ergebnisse aus Forschung und Diskussion bezüglich klimarelevanter Gene oder Enzyme eingehen zu können.

Abkürzungen/Glossar:

ABA: Phytohormon Abscisinsäure

ABRE: ABA-Responsive Element

AREB: ABA-Responsive Element Binding

Array Technik: Bereits bekannte Gene werden in Form von kurzen Genfragmenten auf einen Filter/DNA-Chip gespottet. Auf diesen werden fluoreszenz-markierter RNA-Proben (cDNA) gegeben, welche an die Genfragmente spezifisch anhybridisieren können. Die Auswertung der Intensität der Fluoreszenz je Genfragment gibt Auskunft über den Expressionslevel des Gens.

CBF: C-repeat Binding Factor

cDNA (copy DNA): In DNA umgeschriebene Boten- oder mRNA.

DRE: Dehydration Responsive Element

DREB: Drought Responsive Element Binding

DH (Doppel-Haploide): Aus Antheren oder Mikrosporen erzeugte reinerbige Gerstenlinien.

EST (Expressed Sequence Tag): Ein über RNA hergestellter Selektionsmarker.

Expressionsprofil: Erfassung aller Gene, die zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Pflanze aktiviert sind. Abbildung des „status quo“ der Pflanze.

Haplotypen: Beschreibung der vorliegenden/vorkommenden Allelformen eines Gens; i.d.R. auf der Basis von SNPs.

MAS: Marker Assisted Selection.

NCED: 9-cis-Epoxycarotenoid Dioxygenase; ein Enzym der ABA-Biosynthese

nt: Abkürzung für Nukleotide = DNA Bausteine

Oligonukleotide: Nukleotidsequenz bestehend aus ca. 10 bis 100 Nukleotid-Einheiten

P5CS: Pyrrolin-5-Carboxylat Synthase; ein Enzym der Prolinbiosynthese

SA: Salicyl-Acid, Salicylsäure

SNP (Single Nucleotid Polymorphism): Einzelner Basenaustausch im Vergleich von Gensequenzen eines Gens oder DNA-Fragments.

Transkriptom: Gesamtheit aller Gene einer Pflanze; besteht aus allen exprimierten Genen.

3 Zwischenergebnisse

Klimakammerversuch: Zusammen mit den Kooperationspartnern des HelmholtzZentrums München konnten im Klimaversuch „V105“ alle 4 Kammern mit den 3 ausgewählten Gerstengenotypen Barke, LfL27727 und Mut6519 jeweils stadienspezifisch für die Expressionsanalysen beprobt werden. Während des Versuchsverlaufes wurden phänotypische Daten erhoben und Klimakammerdaten aufgezeichnet.

DNA-Array: Eingesetzt wurde der „Barley 44k DNA-Array“ der Fa. Agilent. Jeder der eingesetzten DNA Chips enthält 4 x 40.000 Positionen mit jeweils genspezifischen DNA-Sequenzen. Diese ca. 40.000 Gene sind in Form von genspezifischen 60nt-Oligos (60 Nukleotid lange Oligonukleotide) auf dem Chip abgebildet. Sie sind aus Datenbankeinträgen (TIGR, NCBI usw.) abgeleitet und sollen das Gerstengenom grob repräsentieren. Es ist jedoch kein DNA-Chip der exklusiv stressassoziierte Gene enthält. Die Versuchsdurchführung erfolgte in Zusammenarbeit mit Fr. Dr. C. Wagner vom IMGGM im Gründerzentrum München. Je häufiger ein Gen exprimiert und abgelesen wird, desto häufiger kann es an die 60nt lange, komplementäre Oligosequenz andocken (hybridisieren). Die jeweils zu untersuchende RNA-Probe pro Pflanze und Zeitpunkt wird hierzu in fluoreszenzmarkierte Sonden umgeschrieben und auf den DNA-Chip gegeben. Je häufiger das nachzuweisende Gen exprimiert wird, desto stärker wird die entsprechende Oligostelle auf dem DNA-Chip angefärbt. Die Expressionsdaten der regulierten Gene konnten in das MapMan-Tool des Max Planck-Instituts/Golm [12] eingelesen und pro Zeitpunkt und Genotyp (hier am Beispiel Barke, Abb. 5 - 7) aufgezeigt werden.

Barke, T5 (Trocken – Bewässert)

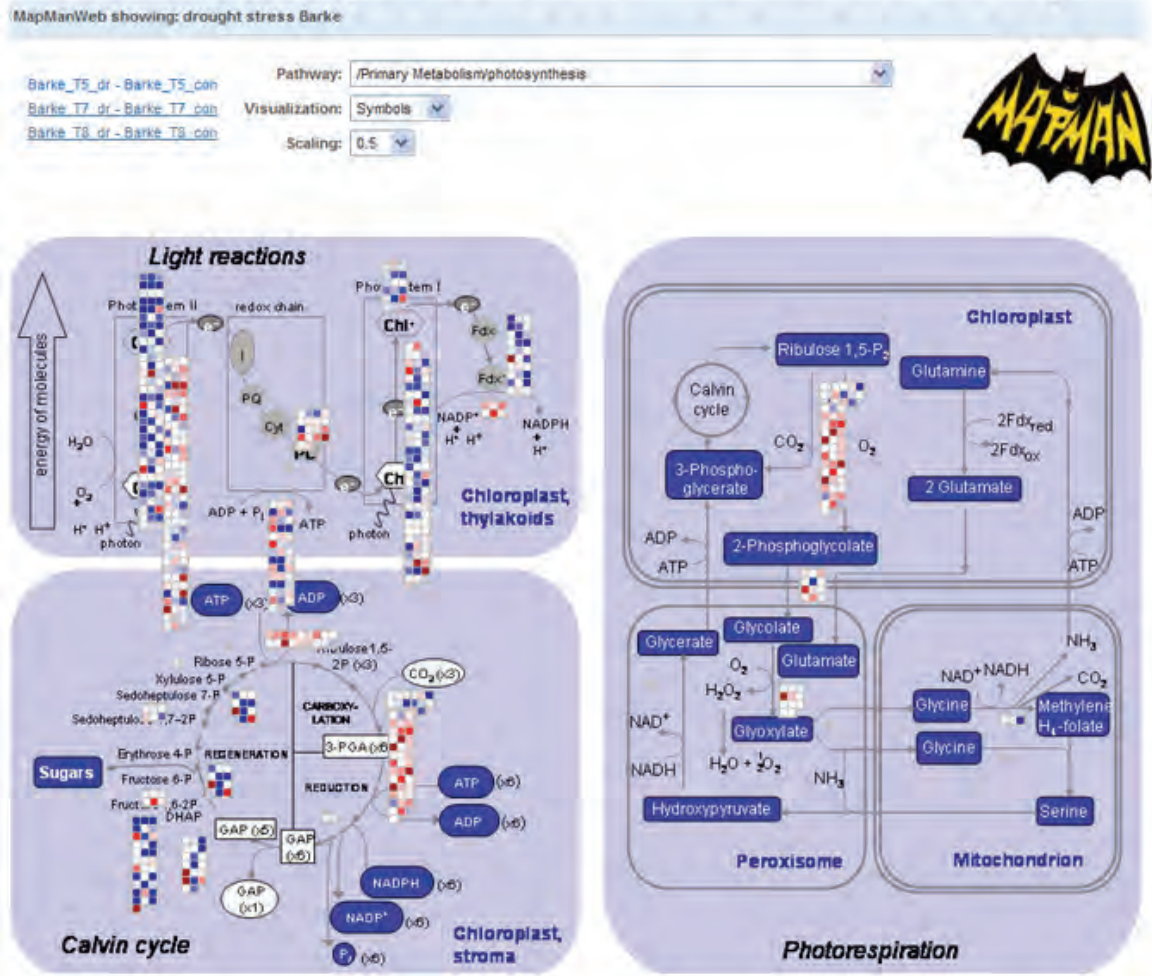


Abb. 5: MapMan Analyse [12] der Sorte „Barke“ zum Zeitpunkt T5 (Screenshot aus dem PC), Erklärungen siehe Text

Barke, T7 (Trocken – Bewässert)

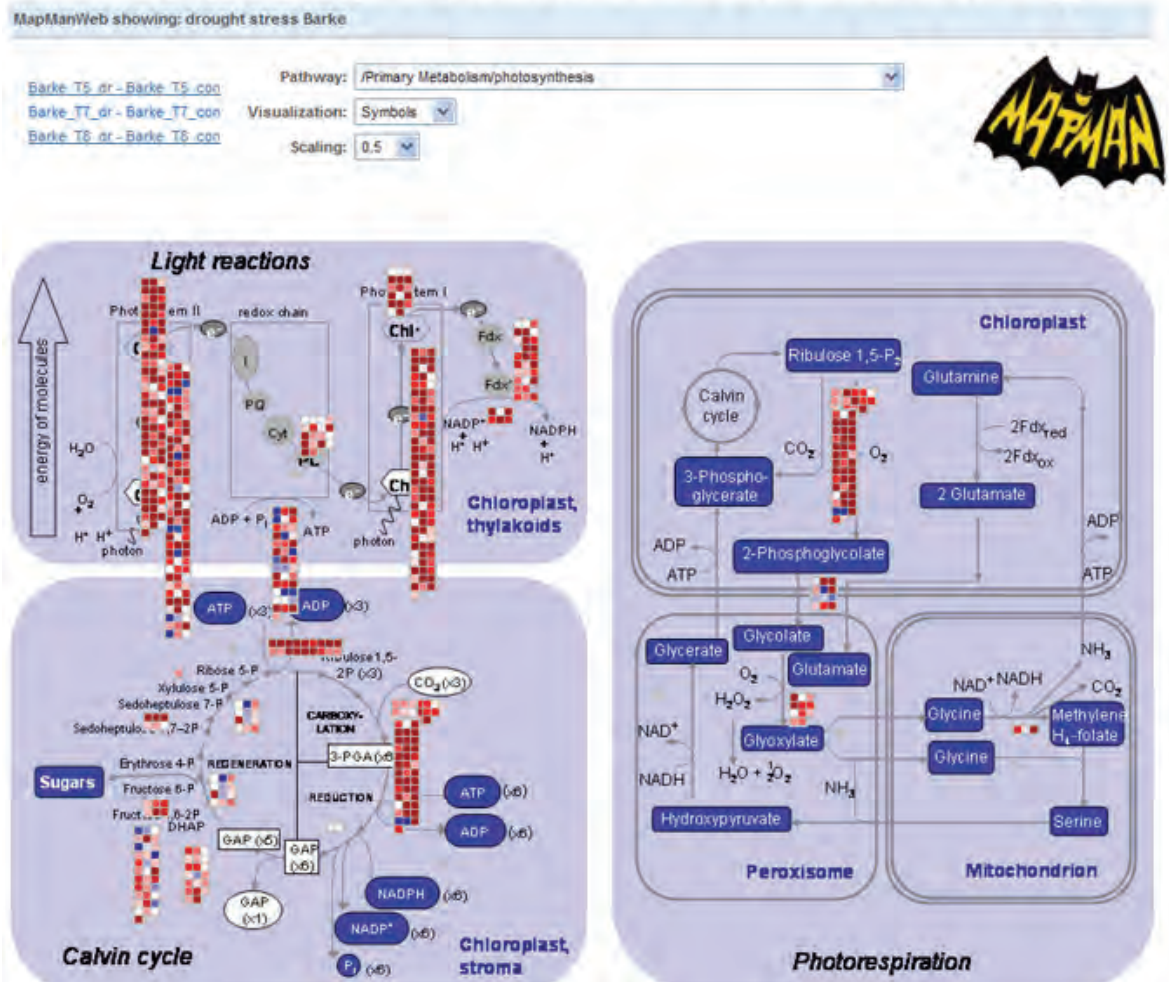


Abb. 6: MapMan Analyse der Sorte „Barke“ zum Zeitpunkt T7.

Barke, T8 (Trocken – Bewässert)

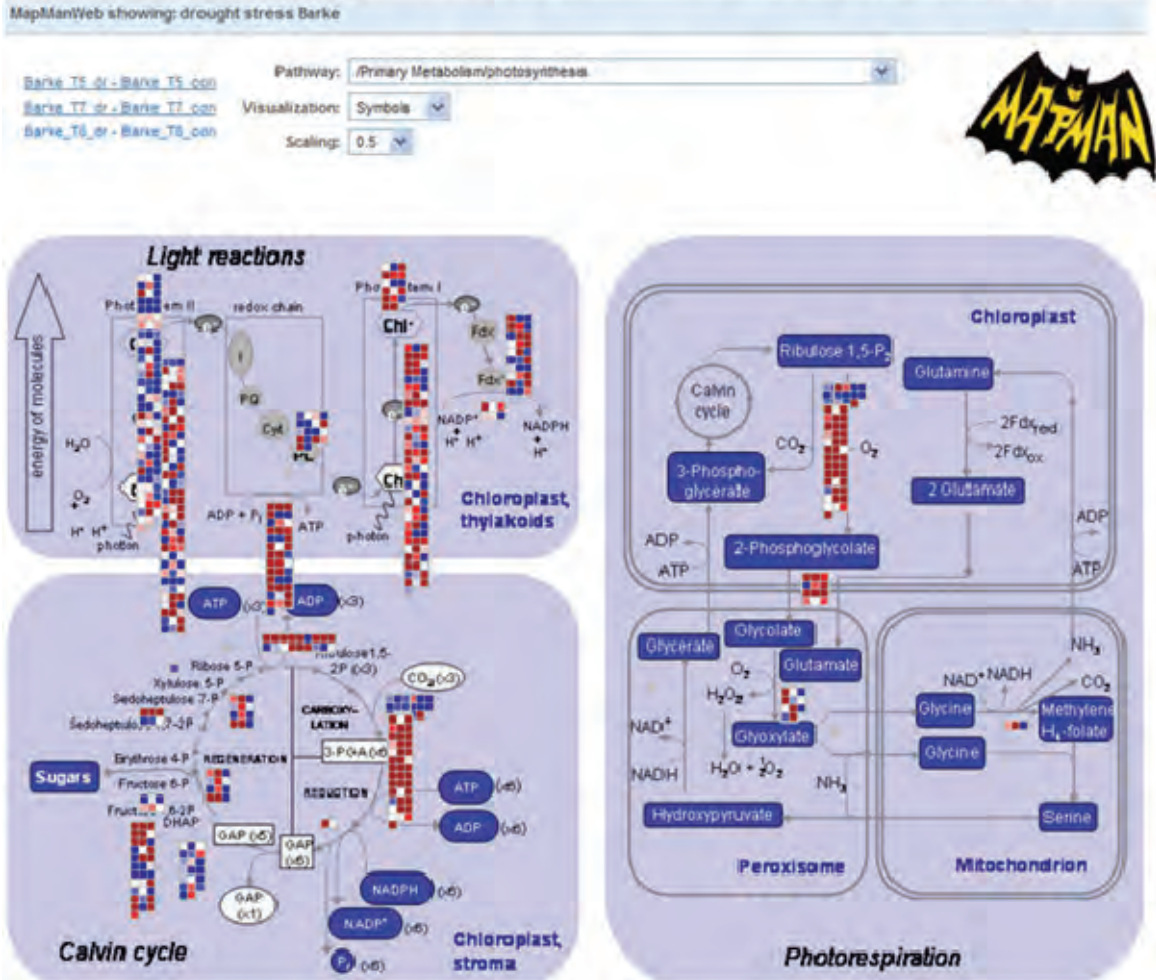


Abb. 7: MapMan Analyse der Sorte „Barke“ zum Zeitpunkt T8.

MapMan-Analyse Tool [12]: Das Programm wurde für *A. thaliana* entwickelt und ermöglicht erstmalig die sichtbare Darstellung des Expressionslevels aller wichtigen Gene eines Stoffwechselweges. Jedes Kästchen/Gen ist animiert und mit vertieften Information und Sequenzen zum Gen verknüpft. Die ausgewerteten Expressionsdaten des LfL-Versuches bei Gerste wurden in dieses Programm eingelesen. Jedes Kästchen repräsentiert ein „Kandidatengen“ eines Stoffwechselweges (die Position ist in allen Abbildungen fix). Die Farbe symbolisiert die Stärke der Genexpression dieses Kandidatengens bezüglich Trockenstresses. Je dunkelblauer das Kästchen eingefärbt ist, desto stärker ist das Gen exprimiert. Grau bis weiß zeigt, dass dieses Gen kaum/keinen Unterschied in seiner Genregulation zeigt und die Intensität der Rotfärbung zeigt, wie stark das Gen unter Trockenstress im Vergleich zur bewässerten Kontrolle herunter reguliert wird.

Zusammenfassend lässt die MapMan-Analyse deutlich erkennen, wie zum Zeitpunkt T5 (6 Tage „ohne Bewässerung“) bereits viele Gene herunter reguliert werden, nach 12 Tagen Trockenheit (T7) ist das komplette Ausschalten (rot markierten Gene) ganzer Stoffwechselwege bei der Sorte „Barke“ zu beobachten. Doch bereits am ersten Tag nach der Wiederbewässerung (T8) werden Photosynthese und Energiestoffwechsel erkennbar hochgefahren und die Syntheseleistungen aufgenommen. Die Zeitpunkte sind in Abb. 4 zusammengestellt.

Während die MapMan-Darstellung einen sehr guten Eindruck darüber vermittelt, bei welchem Genotyp zu welchem Zeitpunkt welche Stoffwechselwege auffällig reguliert sind, kann über die VENN-Diagramm Darstellung (Abb. 8) ein Überblick über die Anzahl der betroffenen, differentiell regulierten Kandidatengene wiedergegeben werden. Blau gekennzeichnet sind die hochregulierten- rot gekennzeichnet die herunter regulierten Gene, welche zum Zeitpunkt T7 im Vergleich der jeweiligen Sorte von „Trockenstress“ und „Bewässert“ deutlich auffällig reguliert waren. Diese können als aussichtsreiche Kandidatengene bezeichnet werden.

Signifikant unterschiedlich regulierte Gene unter Trockenstress

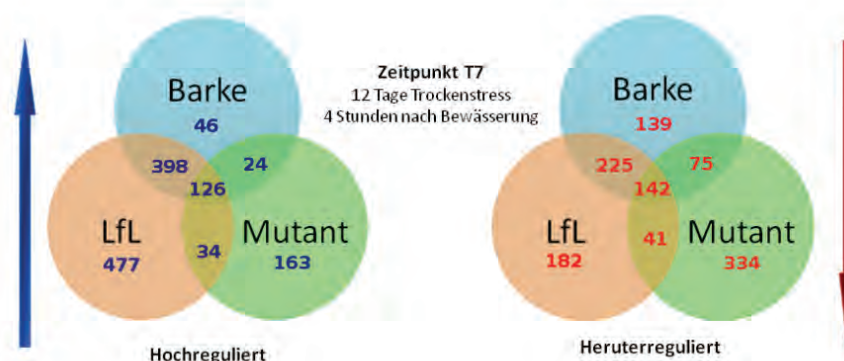


Abb. 8: Anzahl der bezüglich Trockenstress signifikant hoch- bzw. herunter regulierten Gene. Je nach Schnittmenge können diese Kandidatengene einem oder allen 3 Genotypen zugeordnet werden.

Kandidatengene:

Aufbauend auf den bislang erreichten Ergebnissen und unter Einbeziehung der in der Literatur als „stressreguliert“ beschriebenen Gene, konnte eine Vielzahl (über 600) an deutlich differentiell regulierten „Kandidatengenen“ für weitere Analysen herausgearbeitet und weiteren Untersuchungen unterzogen werden. Besonderer Wert soll hierbei auf die „sinnvolle“ Verknüpfung der einzelnen Kandidatengene in logisch zusammenhängenden und gemeinsam regulierten, z. B. von gleichen Expressions-/Transkriptionsfaktoren abhängigen Genen und Stoffwechselwegen gelegt werden [9][16][17].

Das jeweilige Kandidatengene wird hierfür im ausgewählten Gesten-Genpool resequenziert und bezüglich seiner vorhandenen Allele untersucht. Sequenzunterschiede werden mit internationalen Genbankeinträgen abgeglichen (BLAST-Analyse) und das Haplotyp-Muster (siehe Beispiel in Abb. 9) für eine Genpool-Dokumentation niedergelegt und für eine allelspezifische Marker-Entwicklung eingesetzt. Dieser Arbeitsschritt bringt zwei wichtige Vorteile: Über die Sequenzvariationen und die hieraus entwickelten SNP-Marker kann zum einen eine Genkartierung im Gerstengenom erfolgen und, sollte sich dieser Marker als züchtungsrelevant erweisen, kann er als allelspezifischer SNP-Marker in eine schnelle und zielgerichtete MAS umgesetzt werden (Marker und Genotyp liegen vor).

Haplotyp des Gerstengens: NADP-malic enzyme (TA34549_4513)

	140	160	180
1_HVB-1B_B_HVB-1B_F	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
1_HVB-1B_L_HVB-1B_F	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
1_HVB-1B_M_HVB-1B_F	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
HVB1BF_Hiberna_D05.ab1	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
HVB1BF_Grace_F07.ab1	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
HVB1BF_Primadonna_D07.ab1	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
HVB1BF_Stephanie_F08.ab1	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
HVB1BF_CNE145_H08.ab1	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
HVB1BF_Sunshine_B07.ab1	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
HVB1BF_Vertikale_H06.ab1	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
HVB1BF_EstereI_F06.ab1	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
HVB1BF_NFCTriple_H07.ab1	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
HVB1BF_Morex_B06.ab1	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG
HVB1BF_Ludmilla_D06.ab1	GACCGGGCTG	ATAGGATCAG	CTGGTGTGGG

Abb. 9: Haplotyp des trockenstress-induzierten Gens „NADP-malic enzyme“. Die Resequenzierung dieses Gens bei 14 ausgewählten Gerstensorten zeigt das Vorkommen von 2 Allelgruppen an. SNP1(G/T) konnte bei 130bp, SNP2 (T/C) bei 175bp nachgewiesen werden.

Ein solches Kandidatengene ist das „NADP-malic enzyme“, es katalysiert die oxidative Decarboxylierung von L-Malat und produziert Pyruvat, CO₂ und NADPH. „NADP-malic enzyme“ konnte u. a. im Blatt nachgewiesen werden und reagiert auf Trocken- und Kältestress. Dem vorgestellten Enzym wird wegen seiner Genregulation über ABA und SA eine wichtige Rolle zur Vermeidung von Trockenstress in der Pflanze zugeschrieben. Die herausgearbeiteten SNPs (SNP1: T/C, SNP2: G/T) können für die Kartierung des Gens aber auch als Selektionsmarker für weitere Analysen eingesetzt werden. In noch ausstehenden Assoziationsstudien muss aber noch gezeigt werden, welches dieser Allele einen Selektionsvorteil der Pflanze im Sinne des Züchters unter Trockenstressbedingungen mitbringt.

Ein weiteres Schlüsselenzym für die Reaktion auf Trockenstress bei Pflanzen stellt NCED für die Synthese von Abscisinsäure (ABA) dar. Abscisinsäure ist ein essentielles Phytohormon und regelt in vielfältigen Stufen die Pflanzenentwicklung. Eine Vielzahl stress-induzierbarer Kandidatengene besitzen deshalb in ihrem Promotorbereich (s. u.) Erkennungs-Sequenzen die durch ABA bzw. durch ABA regulierte Transkriptionsfaktoren (u. a. AREB) induziert werden. Vielfältige Untersuchungen belegen diese zentrale Rolle der ABA-gesteuerten Reaktion auf abiotischen Stress (Abb. 10).

Abscisinsäure/ABA und Trockenstress



Abb. 10: Übersicht der ABA-Wirkung zur Anpassung der Pflanze an Wassermangel. Die Abbildung ist stark vereinfacht, da ein vielfaches an Enzymen, Transkriptionsfaktoren und Transportproteinen an der Regulation und Feinsteuerung beteiligt sind

Abscisinsäure ist damit das übergeordnete abiotische Stresshormon - seiner Produktion wird deshalb eine ganz besondere Rolle in der Genregulation zugewiesen. Die Verfügbarkeit von ABA wird auf zwei Wegen sichergestellt: ABA kann enzymatisch im Gewebe neu hergestellt oder aber in einer glycosilierten inaktiven Form gespeichert und durch Abspaltung des Zuckerrestes durch die β -Glucosidase BG1 [13] sehr schnell verfügbar gemacht werden. BG1 wiederum wird sehr schnell und effektiv durch Wasserentzug aktiviert.

In der Neu-Synthese von ABA spielt das Enzym NCED (9-cis-Epoxy-carotenoid Dioxygenase) eine zentrale Schlüsselrolle: wann und wo wie viel ABA produziert wird (Abb. 11, verändert aus Nambara [14]). Der Expressionslevel des Gens für die NCED über DNA-Array oder qRT-PCR Analysen zeigt im Verlauf der 3 Zeitpunkte bei „LFL24727“ einen deutlich früheren und stärkeren Expressionslevel an als bei der Sorte „Barke“ (Abb. 12). Der NCED-Level geht dann kontinuierlich zurück, um wieder auf den Normallevel abzusinken, der für ein normales Entwicklungswachstum notwendig ist und einer guten Ertragsbildung nicht im Wege steht. Barke reagiert hier Zeitversetzt. Zum

Zeitpunkt T8, dem ersten Tag der Wiederbewässerung, wird wieder ein niedriger, stressfreier NCED-Pegel erreicht. Auch diese Interpretation muss in folgenden Assoziationsversuchen abgeklärt und verifiziert werden.

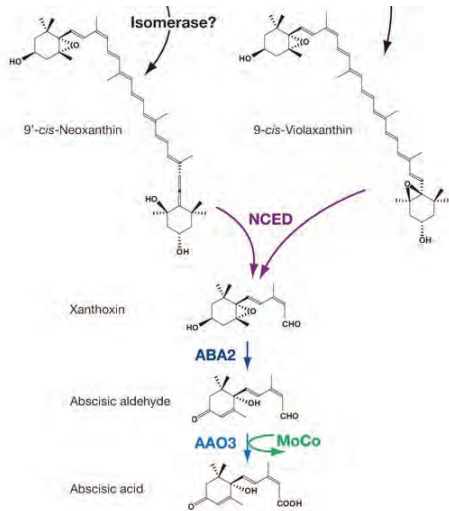


Abb. 11: NCED ist ein Schlüsselenzym der ABA-Biosynthese (verändert aus Nambara and Marion-Poll, *Annu Rev Plant Biol* 2005 56: 165-185 [12])

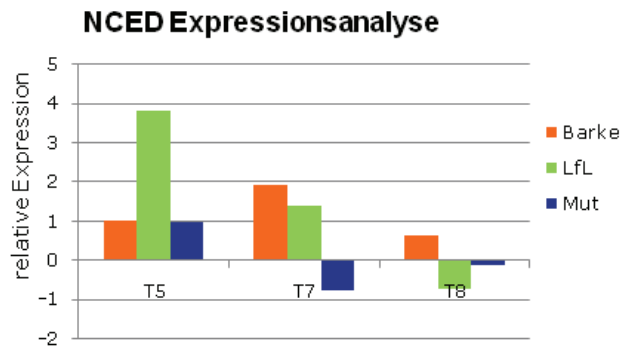


Abb. 12: Relative Genexpression von NCED, einem Schlüsselenzym der ABA-Biosynthese zu den Zeitpunkten T5, T7 und T8. Gezeigt ist die Genexpressionsveränderung im Vergleich zur bewässerten Kontrolle.

Prolin gilt als Biomarker für Trockenstress in der Pflanze und kann im Blattgewebe nachgewiesen werden. Untersuchungen im Bereich der Prolin-Biosynthese ergeben im Vergleich zur NCED ein ähnliches Bild (Abb. 13). Bei LfL24727 und Mut6519 wird deutlich schneller als bei Barke über die eingeleitete Genexpression der P5C-Synthase in Richtung Prolin-Produktion in der Pflanze reagiert. Nach Wiederbewässerung wird die Produktion von Prolin und damit der P5C-Synthase umgehend eingestellt.

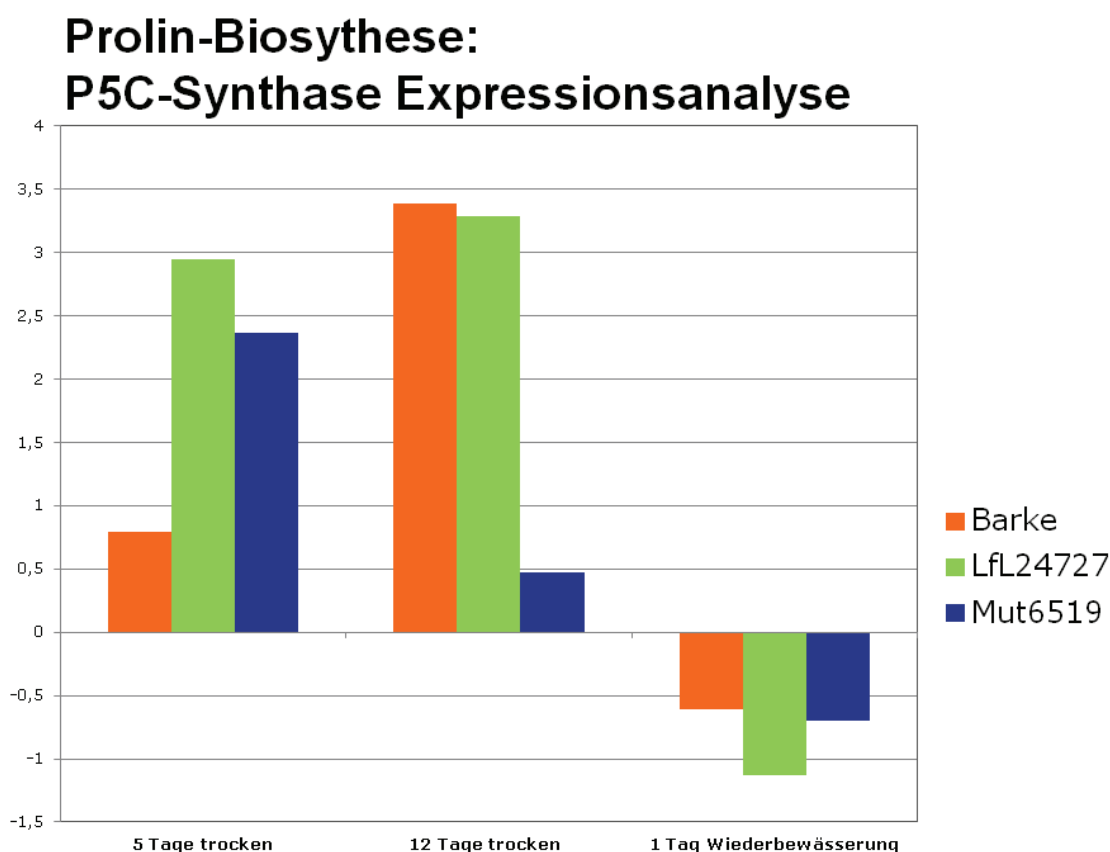


Abb. 13: Relative Genexpression der P5C-Synthase, einem Enzym des Prolinstoffwechsels aus Glutamat.

Für die NCE-Dioxygenase als auch für die P5C-Synthase konnten für weitere DNA-Analysen Selektionsmarker entwickelt werden

Schnell wird klar, dass mit solchen Einzelbeispielen noch nichts gewonnen ist, und ich möchte damit auf das gestellte Thema zurückkommen:

Klimastress löst in der Pflanze und damit auch bei Gerste eine Umprogrammierung des Zell-Stoffwechsels aus. Die Wachstumsprozesse werden zurückgefahren, Mineral- und Speicherstoffe verlagert, Zellwände geschützt. Die Informationen hierzu werden in der Pflanze über vielfältige Rezeptoren des osmotischen Systems, über die komplexe Systemsteuerung des Stresshormones ABA, über Transkriptionsfaktoren und Signalmoleküle, welche an Bindungsstellen vor hunderten von Genen andocken können, umgesetzt.

Damit ist eine hochkomplexe Regelmaschinerie aufgezeigt, die sehr empfindlich auf alle Sorten von Stress reagieren kann. Unsere Expressionsdaten zeigen uns an, welche Schlüsselgene der relevanten Stoffwechselwege auffällig reguliert sind, diese Arbeit ist im Gange. In einem weiteren Schritt werden diese Gene und Genorte mit Hilfe von Assoziationsstudien [u. a. 15] dahingehend überprüft, dass eine Aussage darüber getroffen werden kann, welches Allel bei den überprüften Sorten z. B. im Rainout Shelter (Abb. 14) und weiteren Umwelten eine positive Wirkung zeigt.



Abb. 14: Rainout-Shelter der LfL. Ein ausgewähltes Gerstensortiment von hoher genetischer Diversität wird unter „Feldbedingungen“ auf ihre Reaktion auf Trockenstress geprüft

Viele der durch spezifische Transkriptionsfaktoren gemeinsam regulierte Gene [17] sollten hierbei ähnliche Ergebnisse liefern. Entscheidend für die Praxis ist, dass die Pflanze auf den Klimastress nicht überreagiert und sich nicht in Richtung „Seneszenz“ abbaut, sondern die Syntheseleistung anhält und nach vorübergehender Entbehrung die Produktion zügig wieder hochfährt.

Ein einzelnes Gen und wenige Selektionsmarker bringen die Pflanzenzüchtung nicht weiter. Die neuen Hochdurchsatz-Technologien haben nun das Potential dazu, viele Genorte und damit die gesuchten Allele anzusprechen und über eine gesamtgenomische Analyse selektieren zu können. Welche Gene und Allele hierbei eine tragende Rolle spielen werden, wird sich im Laufe des Projektes zeigen – auch Ergebnisse und Erfahrung aus der internationalen Literatur werden in das Projekt mit eingearbeitet.

Finanzierung: Das Forschungsprojekt wird durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) und die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) finanziert. Die Projekte sind Bestandteil des Arbeitsschwerpunktes „Klimaänderung“ der LfL.

4 Literaturverzeichnis

- [1] Degenkolbe, T., Do, P.T., Zuther, E., Repsilber, D., Walther, D., Hinch, D.K. and Köhl, K.I. (2009): Expression profiling of rice cultivars differing in their tolerance to long-term drought stress. *Plant Mol Biol* 69:133-153
- [2] Wang, D., Pan, Y., Zhao, X., Zhu, L., Fu, B. and Li, Z. (2011): Genome-wide temporal-spatial gene expression profiling of drought responsive genes in rice. *BMC Genomics* 12:149
- [3] Endo, A., Sawada, Y., Takahashi, H., Okamoto, M., Ikegami, K., Koiwai, H., Seo, M., Toyomasu, T., Mitsunashi, W., Shinozaki, K., Nakazono, M., Kamiya, Y., Koshihara, T. and Nambara, E. (2008): Drought induction in Arabidopsis 9-cis-epoxy-carotenoid dioxygenase occurs in vascular parenchyma cells. *Plant Physiol* 147: 1984-1993
- [4] Okamoto, M., Tanaka, Y., Abrams, S.R., Kamiya, Y., Seki, M. and Nambara, E. (2008): High humidity induces ABA 8-hydroxylase in stomata and vasculature to regulate local and systemic ABA response in Arabidopsis. *Plant Physiol* 149: 825-834
- [5] Geisler, M., Kleczkowski, L.A. and Karpinski, S. (2006): A universal algorithm for genome-wide in silico identification of biologically significant gene promoter putative cis-regulatory-elements, identification of new elements for reactive oxygen species and sucrose signaling in Arabidopsis. *Plant J* 45:384-398
- [6] Achard, P., Gong, F., Cheminant, S., Alioua, M., Hedden, P. and Genschick, P. (2008): The cold inducible CBF1 factor – dependent signaling pathway modulates the accumulation of growth-repressing DELLA proteins via its effects on gibberellins metabolism. *Plant Cell* 20:2117-2129
- [7] Schweizer, G. (2008): High-Tech – Smart Breeding. Neue Züchtungsverfahren mit Biotechnologie. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt, Nr. 17 (25. 4. 2008), S. 44 – 47
- [8] Yang, S., Vanderbeld, B., Wan, J. and Huang, Y. (2010): Narrowing down the targets: Towards the successful genetic engineering of drought-tolerant crops. *Molecular Plant* 3:469-490
- [9] Pinheiro, C. and Chaves, M.M. (2011): Review: Photosynthesis and drought: Can we make metabolic connections from available data? *Journal of Experimental Botany* 62_3:869-882
- [10] Behn, A., Hartl, L., Schweizer, G. and Baumer, M. (2005): Molecular mapping of QTLs for non-parasitic leaf spot resistance and comparison of half-sib DH populations in spring barley. *Euphytica* 141, 291-299
- [11] Diethelm, M., Rhiel, M., Wagner, C., Mikolajewski, S., Groth, J., Hartl, L., Friedt, W. and Schweizer, G. (2011): Gene expression analysis of four WIR1-like genes in floret tissues of European winter wheat after challenge with *G. zeae*. *Euphytica* DOI: 10.1007/s10681-011-0498-7 (online first)

- [12] Usadel, B., Nagel, A., Thimm, O., Redestig, H., Blaesing, O.E., Palacios-Rojas, N., Selbig, J., Hannemann, J., Piques, M.C., Steinhauser, D., Scheible, W.R., Gibon, Y., Morcuende, R., Weicht, D., Meyer, S. and Stitt, M. (2005): Extension of the visualization Tool MapMan to allow statistical analysis of arrays, displaying of corresponding genes and comparison with known responses. *Plant Physiol* 138: 1195-1204
- [13] Lee, K.H., Piao, H.L., Kim, H.Y., Choi, S.M., Jiang, F., Hartung, W., Hwang, I., Kwak, J.M. and Lee, I.J. (2006): Activation of glucosidase via stress-induced polymerization rapidly increases active pools of abscisic acid. *Cell* 126: 1109-1120
- [14] Nambara, E. and Marion-Poll, A. (2005): Abscisic acid biosynthesis and catabolism. *Annu Rev Plant Biol.* 56: 165-185
- [15] Comadran, J., Russel, J.R., van Eeuwijk, F.A., Ceccarelli, S., Grando, S., Baum, M., Stanca, A.M., Peccioni, N., Mastrangelo, A.M., Akar, T., Al Yassin, A., Benbelkacem, A., Choumane, W., Ouabbou, H., Dahan, R., Bort, J., Araus, J.L., Pswarayi, A., Romagosa, I., Hackett, C.A. and Thomas, WTB. (2008): Mapping adaptation of barley to droughted environments. *Euphytica* 161: 35-45
- [16] Vaahtera, L. and Brosche, M. (2011): Review: More than the sum of its parts – How to achieve a specific transcriptional response to abiotic stress. *Plant science* 180: 421-430
- [17] Morran, S., Eini, O., Pyvovarenko, B.P., Singh, R., Ismagul, A., Eliby, S., Shirley, N., Landridge, P. and Lopato, S. (2011): Improvement of stress tolerance of wheat and barley by modulation of expression of DREB/CBF factors. *Plant Biotech Journal* 9: 230-249

Blattfleckenkomplex an der Gerste – Ursachen und Gegenmaßnahmen

Michael Hess¹⁾, Marika Nyman¹⁾, Hans Hausladen¹⁾, Stephan Weigand²⁾

¹⁾ Technische Universität München, Phytopathologie

²⁾ Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz

Zusammenfassung

Die Kontrolle von Krankheiten ist ein wichtiger Erfolgsfaktor in der landwirtschaftlichen Produktion. Deren Auftreten ist maßgeblich von der Witterung abhängig. So konnte in den letzten Jahren auch im Gerstenanbau eine Verschiebung in der Bedeutung der Hauptschaderegger festgestellt werden. Zudem tritt seit einigen Jahren der Blattfleckenkomplex als wichtige neue Schadursache auf. Die intensiven, epidemiologischen Untersuchungen der letzten Jahre im Rahmen eines vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geförderten Projektes konnten besonders die weite Verbreitung des Schadpilzes *Ramularia collo-cygni* als biotische Ursache des Blattfleckenkomplexes der Gerste und seine hohe Latenz zeigen. Das Monitoring und die Untersuchung von Archivproben bestätigen, dass *Ramularia collo-cygni* kein neuer, regional begrenzt auftretender Schaderegger ist. Beeinflusst durch Wechselwirkungen mit der Umwelt und pflanzenphysiologischen Faktoren wie Seneszenz, ist *Ramularia collo-cygni* in den letzten Jahren im bayerischen Gerstenanbau zu einer entscheidenden Schadursache mit hoher ökonomischer Bedeutung geworden. Die Ergebnisse aus dem laufenden Projekt konnten erfolgreich in einer Anpassung der bisherigen Bekämpfungsstrategien umgesetzt werden. Die verbesserten Strategien führten zu qualitativen und quantitativen Ertragssteigerungen.

1 Einleitung

Zuverlässige Prognosen und die sichere Abschätzung von Risiken sind eine Grundvoraussetzung für die nachhaltige Entwicklung und Anpassung der landwirtschaftlichen Produktion unter den Rahmenbedingungen einer Klimaänderung. In den letzten Jahren konnte allgemein eine Stagnation im Ertragsniveau vieler Hauptkulturarten festgestellt werden. Eine wichtige Ursache ist das Auftreten neuer Krankheitserreger, welche das Risiko erheblicher Ertragseinbußen erhöhen und durch die bestehenden, gut etablierten Bekämpfungssysteme nur unzureichend kontrolliert werden. Da die Epidemiologie und das regionale Auftreten von Krankheitserregern stark von Witterungsparametern abhängen, sind regionale Unterschiede im Krankheitsauftreten in engem Zusammenhang mit der Klimaänderung zu sehen. So zeigt die Auswertung der bayernweit erhobenen Schwellenüberschreitungen im Rahmen des „Gerstenmodell Bayern“, dass es in den letzten 10 Jahren zu einer deutlichen Verschiebung im Spektrum der bekämpfungsrelevanten Krankheiten gekommen ist (Abb. 1).

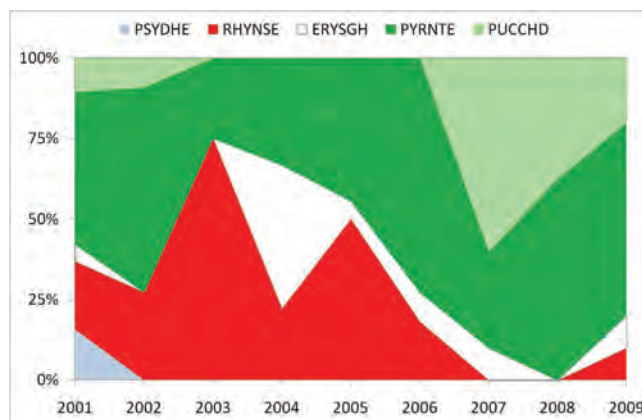


Abb. 1: Behandlungsindikationen im Rahmen des Gerstenmodells Bayern 2001 – 2009

Neben den klassischen Schaderregern tritt seit einigen Jahren der „Blattfleckenkomplex“ an Sommer- und Wintergerste in bayerischen Anbaugebieten auf. Charakteristisch für diesen Komplex ist, dass das epidemische Auftreten erst ab dem Entwicklungsstadium „Fahnenblatt voll entwickelt“ (BBCH 39) erkennbar ist. Nach ersten unspezifischen, kleinen Aufhellungen treten innerhalb weniger Tage an diesen Stellen dunkle Nekrosen auf. Ausgehend von ersten Punktnekrosen auf den oberen, exponierten Blättern folgt innerhalb von zwei bis drei Wochen ein Absterben der oberen Blätter (Fahnenblatt und F-1) und eine verfrühte Abreife (Hess et al. 2007). Die Symptome zeigen sich besonders stark nach einem Witterungsumschwung von Niedrig- zu Hochstrahlungsphasen. In der Praxis war schnell der Begriff vom „Sonnenbrand der Gerste“ geprägt. Dieses Phänomen tritt inzwischen jährlich auf und wird von der Landwirtschaft als eine der Hauptursachen für unbefriedigende Erträge und Qualitäten im Gerstenanbau wahrgenommen. Die Blattflecken lassen sich nicht auf die klassisch in der Gerste auftretenden Krankheitserreger wie *Rhynchosporium* (*Rhynchosporium secalis*), Netzflecken (*Pyrenophora teres*), Mehltau (*Blumeria graminis*) oder Zwergrost (*Puccinia hordei*) zurückführen. Die zentrale biotische Ursache des Blattfleckenkomplexes stellt der Schaderreger *Ramularia collo-cygni* dar. Da dieser Pilz in der Lage ist photodynamische Toxine (Rubelline) zu produzieren, die ihre zerstörerische Aktivität erst durch Sonnenlicht entfalten, wird hierin ein möglicher Virulenzfaktor des Erregers gesehen (Heiser et al. 2004).

Ziel des Forschungsvorhabens war die primäre Ursache des Auftretens dieser neuartigen Blattflecken an der Gerste zu untersuchen. Auf dieser Basis wurden gezielte Gegenmaßnahmen erarbeitet, um deren Auftreten zu verhindern bzw. zu reduzieren.

Darüber hinaus führten die exakte Erregerdiagnose und Erregerquantifizierung zu neuen Erkenntnissen bei der Epidemiologie von *Ramularia collo-cygni*. Diese epidemiologischen Studien sind ein zentraler Baustein bei der Integration des Blattfleckenkomplexes in das „Gerstenmodell Bayern“. Die mehrjährigen, epidemiologischen Untersuchungen liefern auch Hinweise, inwieweit klimatische Veränderungen zu einem veränderten Auftreten von Schaderregern beitragen und das starke Auftreten später Krankheiten wie dem Blattfleckenkomplex erklärt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Ertragsbedeutung der Blattflecken in der Winter- und Sommergerste in Bayern bewertet. Bei der Untersuchung der Ertragsbedeutung wurden insbesondere auch die Auswirkungen auf die Qualität bezüglich der in Bayern ökonomisch wichtigen Vermarktung als Braugerste eingeschlossen (Hess et al. 2011a).

Desweiteren wurde der Einfluss von verschiedenen pflanzenbaulichen Parametern, wie z. B. Sorten oder Pflanzenschutz auf Auftreten und Ausprägung des Blattfleckenkomplexes untersucht.

2 Bayernweites Monitoring

Grundlage der Untersuchungen war das in Zusammenarbeit mit den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten bayernweit durchgeführte Monitoring und die gezielten Fungizidversuche zur integrierten Bekämpfung von Schaderregern. Bayern bietet aufgrund des häufigen Auftretens des Blattfleckenkomplexes, aber auch wegen der klimatisch und produktionstechnisch sehr unterschiedlichen Regionen dafür ideale Voraussetzungen.

Um eine möglichst vergleichbare Datenerhebung durch die verschiedenen Versuchsansteller zu gewährleisten, wurden vor allem zu Projektbeginn Diagnoseschulungen durchgeführt. Gerade die Diagnostik bereitet Schwierigkeiten aufgrund der in frühen Stadien sehr unspezifischen Symptomatik und der zahlreicher Verwechslungsmöglichkeiten (Abb. 2). Eine sichere Ansprache ist oft erst bei massivem Befall zu späten Stadien über die charakteristischen Sporenträger möglich. Dieser Zeitraum liegt allerdings jenseits möglicher, gezielter Bekämpfungsmaßnahmen. In den frühen Stadien treten jedoch gleichzeitig sowohl der in Bayern häufig auftretende Spot-Typ bei Netzflecken auf als auch verschiedene physiologische Ursachen für unspezifische Nekrosen. Stress oder Abwehrnekrosen verursachen ähnliche Schadbilder.

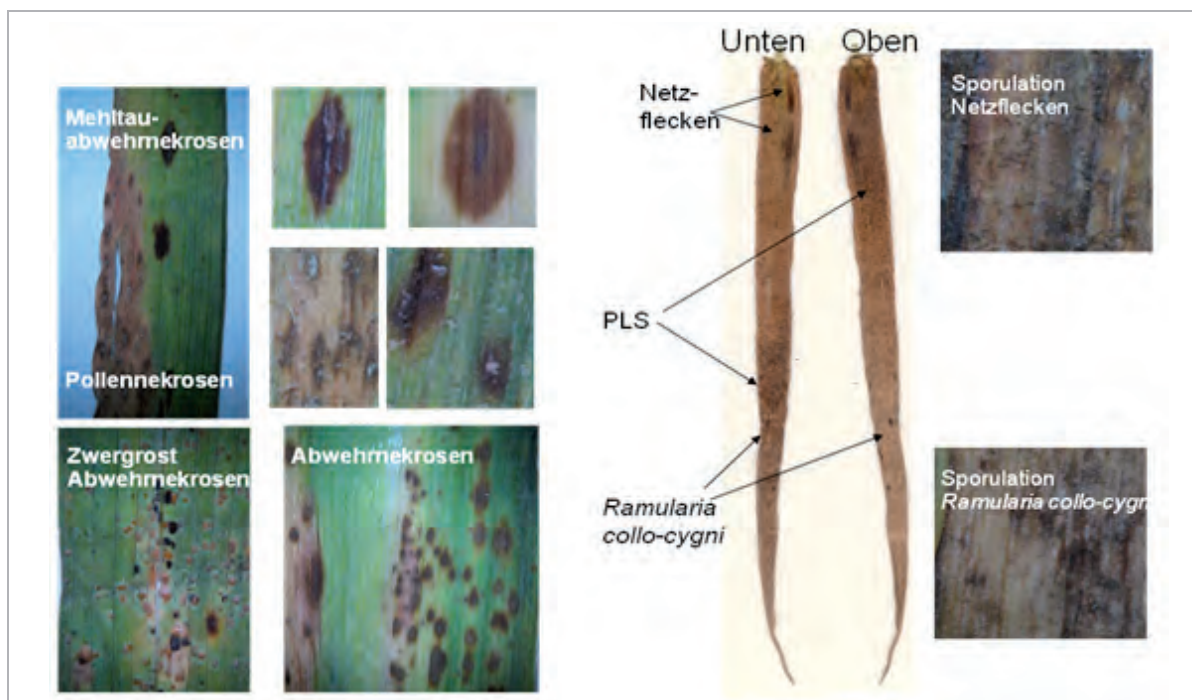


Abb. 2: Blattfleckensymptome und Differenzierungsmöglichkeiten auf der Gerste

Parallel zu der Diagnose im Feld wurden in regelmäßigen Abständen Proben aus den unbehandelten Kontrollparzellen zur Laboruntersuchung nach Weihenstephan geschickt. Hier konnte der Erreger durch aufwendige mikroskopische Untersuchungen und hoch sensitiven, molekularen Nachweise über PCR-Verfahren bestimmt werden. Um aber auch un-

ter Feldbedingungen *Ramularia collo-cygni* als Schadursache möglichst frühzeitig identifizieren zu können wurde ein, auf einer spezifischen Antikörper Reaktion basierender, Schnelltest zur Unterstützung der Feldbonitur angeboten. Der Test war durch die Fa. SyngentaAgro unterstützt in Zusammenarbeit mit der Fa. Loewe Biochemica am Lehrstuhl für Phytopathologie der Technischen Universität München entwickelt worden.

In den Untersuchungsjahren zeigte sich, bei regional unterschiedlichem Witterungsverlauf, an den meisten Standorten ein breites und starkes Auftreten von Krankheitserregern. Trotz der regionalen Unterschiede wurde an allen Standorten ein ähnliches, sehr charakteristisches Auftreten des Blattfleckenkomplexes festgestellt. *Ramularia collo-cygni* als pilzliche Ursache des Blattfleckenkomplexes konnte oftmals schon im Herbst und Frühjahr auf seneszenten Blättern nachgewiesen werden. Die Epidemie trat aber erst spät zum Zeitpunkt der Abreife hin auf. Ein Nachweis des Erregers war im Labor über PCR oder im Feld über den Schnelltest immer schon vor der Epidemie möglich. Vor allem die PCR-Untersuchungen konnten über die weite regionale Verbreitung in Bayern hinaus die hohe Latenz des Erregers vom Saatgut bis zur Epidemie zur Abreife hin zeigen.

3 Neue Erkenntnisse zur Epidemiologie

Diese Beobachtungen werfen die Frage auf nach dem Zeitpunkt der Infektion und der relativen Bedeutung verschiedener Einflussfaktoren auf den Verlauf der Epidemie. Die Ergebnisse der letzten Jahre zeigten den starken Einfluss der Pflanzenentwicklung (Seneszenz) auf den Befallsverlauf. Dies bestätigt sich auch bei dem Vergleich des *Ramularia*-Befalls mit dem Zeitpunkt des Ährenschiebens in einem Sortiment von Sommergersten-Varietäten (Abb. 3). Allgemein zeigt sich bei Sorten mit frühem Ährenschieben eine stärkere Befallsausprägung. Die Schwankungen besonders im mittleren Befallsbereich weisen aber auch auf eine genetische Variabilität hin. Dies bedeutet, dass es auch im frühreifen Sortiment Sorten gibt, die tendenziell eine höhere Toleranz zeigen.

Bei Auftreten des Blattfleckenkomplexes, speziell der Symptomatik, besteht eine Abhängigkeit von der Witterung, doch war es bisher nicht möglich die spezifischen Parameter zu identifizieren, die eine sichere Prognose zulassen. Beschattung, also die Veränderung der Strahlungsintensität, ist einer der Versuchsansätze, welche einen großen Effekt auf das Auftreten zeigen, doch wird dabei über die Lichteinstrahlung hinaus eine Vielzahl weiterer Parameter verändert. Die Erfassung mit Sensoren im Bestand konnte zeigen, dass hierbei besonders der Verlauf der Blattnässe stark verändert wird, was zu neuen Ansätzen in der Untersuchung der Erregerbiologie führt.

Aufgrund der im Feld nachgewiesenen hohen Latenz von *Ramularia collo-cygni* haben die molekularbiologischen Untersuchungen der Erregerbiologie als einen Schwerpunkt die Besiedelung bzw. endophytische Ausbreitung des Erregers, um den Lebenszyklus besser zu verstehen. Der Nachweis des Erregers auf dem Saatgut ermöglichte dabei über die Untersuchung von Archivproben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft Hinweise auf das Auftreten deutlich über den Projektzeitraum hinaus. Die Untersuchung dieser Saatgutproben ergab, dass der Erreger schon lange vor dem massiven Auftreten der letzten Jahre präsent war. Bereits ab den ersten Proben aus dem Jahr 1958 war eine Kontamination des Saatgutes mit dem Erreger nachweisbar. Ähnliche Studien von Proben aus dem bekannten, englischen Archiv aus Rothamsted waren zu vergleichbaren Ergebnissen gekommen.

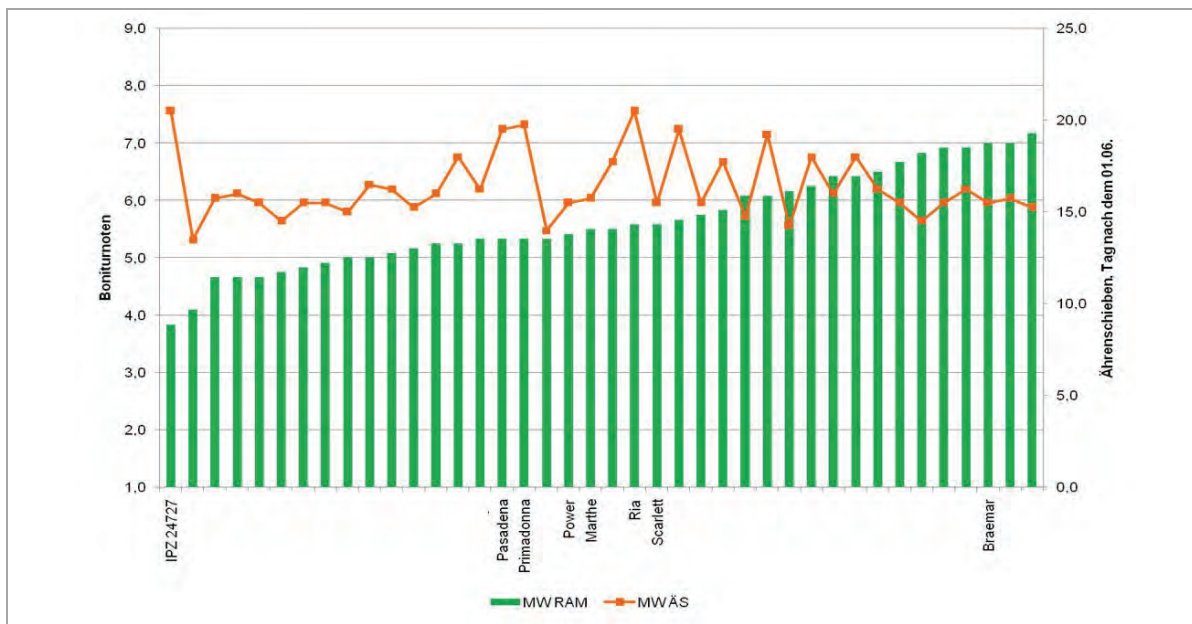


Abb. 3: *Ramularia*-Befall und Zeitpunkt des Ährenschiebens in einem Sortiment von 40 Sommergersten-Varietäten. Quelle: IPZ 2b, Projekt „Gesunde Gerste“, Mittel aus 8 Versuchen 2009/2010

Die Ergebnisse haben zu einer neuen Vorstellung der möglichen Epidemiologie von *Ramularia collo-cygni* geführt (Abb. 4), Walters et al 2008). Es ist sowohl eine Ausbreitung über das Saatgut, als auch über windverbreitete Sporen möglich. Dazwischen liegt eine lange Latenzphase, in der der Nachweis des Erregers im Feld schwierig ist.

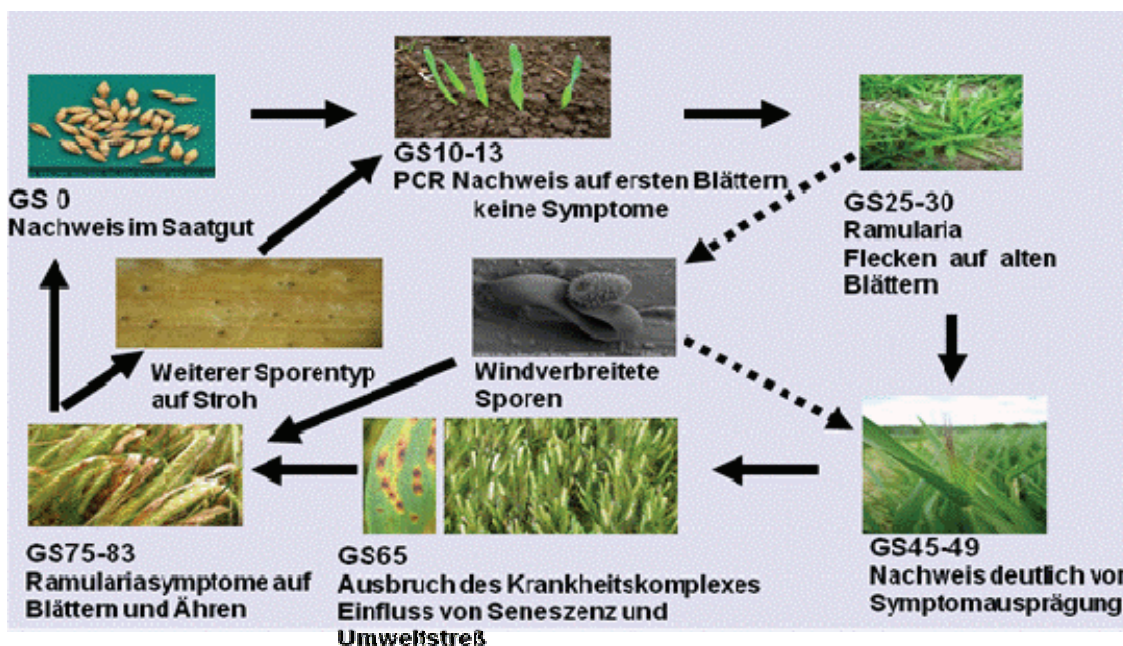


Abb. 4: Lebenszyklus von *Ramularia collo-cygni*. (Quelle SAC, verändert nach WALTERS et al 2008)

4 Ertragsbedeutung und verbessertes „Gerstenmodell Bayern“

Auf dieser epidemiologischen Grundlage kann ein einfaches Schadschwellenkonzept nicht greifen, vielmehr muss ein an die jeweilige Situation angepasstes Risikomanagement die hohe Schadrelevanz des Blattfleckenkomplexes berücksichtigen. Die Ergebnisse der Fungizidversuche in Zusammenarbeit mit den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten zeigten eine große Bandbreite, sowohl hinsichtlich des Auftretens von Krankheiten als auch in den Ertragsergebnissen. Eine Abschätzung des Einflusses von *Ramularia collo-cygni* lässt daher vor allem der Vergleich von Fungizidvarianten zu, die sich erfahrungsgemäß deutlich in ihrer Wirkung gegenüber den durch den Pilz verursachten Krankheitskomplex unterscheiden. Dabei zeigte sich, dass die Ertragsbedeutung des Blattfleckenkomplexes unabhängig vom allgemeinen Pathogenaufreten war und die gezielte Kontrolle zu einer deutlich höheren Ertragsabsicherung führte. Die Mehrerträge der besten Fungizidvarianten schwankten in Abhängigkeit von den witterungs- und standortspezifischen Abreifebedingungen allerdings erheblich zwischen geringen Effekten bis teilweise über 30 dt/ha.

Eine bessere Abschätzung der Ertragsrelevanz kann über Varianten getroffen werden, die sich gezielt in ihrer Wirkung unterscheiden. Dabei wird die unbehandelte Kontrolle mit einer Basisbehandlung verglichen, die über eine breite Pathogenwirkung verfügt, jedoch gegenüber dem Blattfleckenkomplex eine deutliche Lücke zeigt. Dieser Behandlung wird in einer dritten Variante ein Wirkstoff mit spezifischer *Ramularia*-Wirkung zugesetzt. Im Mittel der seit 2004 an der Technischen Universität München am Standort Weihenstephan durchgeführten Versuche konnten bei der Wintergerste durchschnittlich mehr als 5 dt/ha und bei der Sommergerste durchschnittlich mehr als 3 dt/ha allein auf die spezifische Kontrolle dieses Schaderregers bezogen werden (Abb. 5, Hess et al. 2011c).

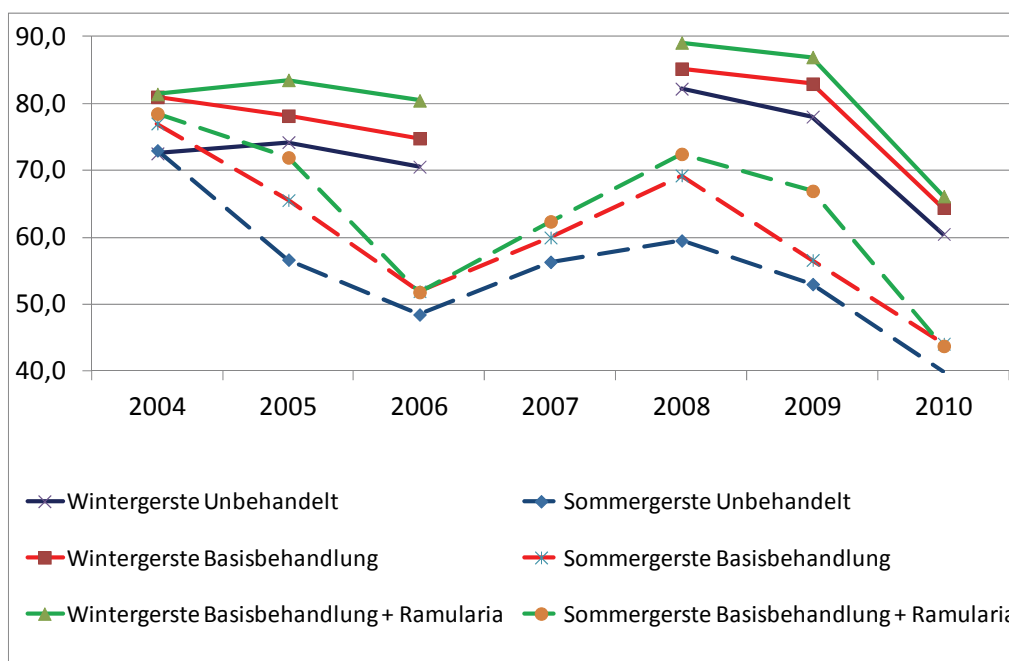


Abb. 5: Ertragswirkung von gezielten Fungizidbehandlungen mit und ohne spezifischer *Ramularia*-Wirkung

Auch die Ergebnisse eines im Jahr 2010 erstmals durchgeführten Vergleichs des bisherigen Gerstenmodells mit einer auf den Ergebnissen langjähriger Fungizidversuche basierenden, verbesserten Modellvariante, welche den Blattfleckenkomplex gezielt miterfasst, waren an den 7 Wintergerstenstandorten überwiegend positiv (Hess et al. 2011b). Trotz der geringfügig höheren Behandlungsintensität gab es auch bei den kostenbereinigten Erträgen im Durchschnitt keine Nachteile (Abb. 6). Im Mittel von 4 Sommergerstenversuchen lag das verbesserte Gerstenmodell sowohl im Ertrag als auch in der Ökonomie sogar an der Spitze aller Behandlungen.

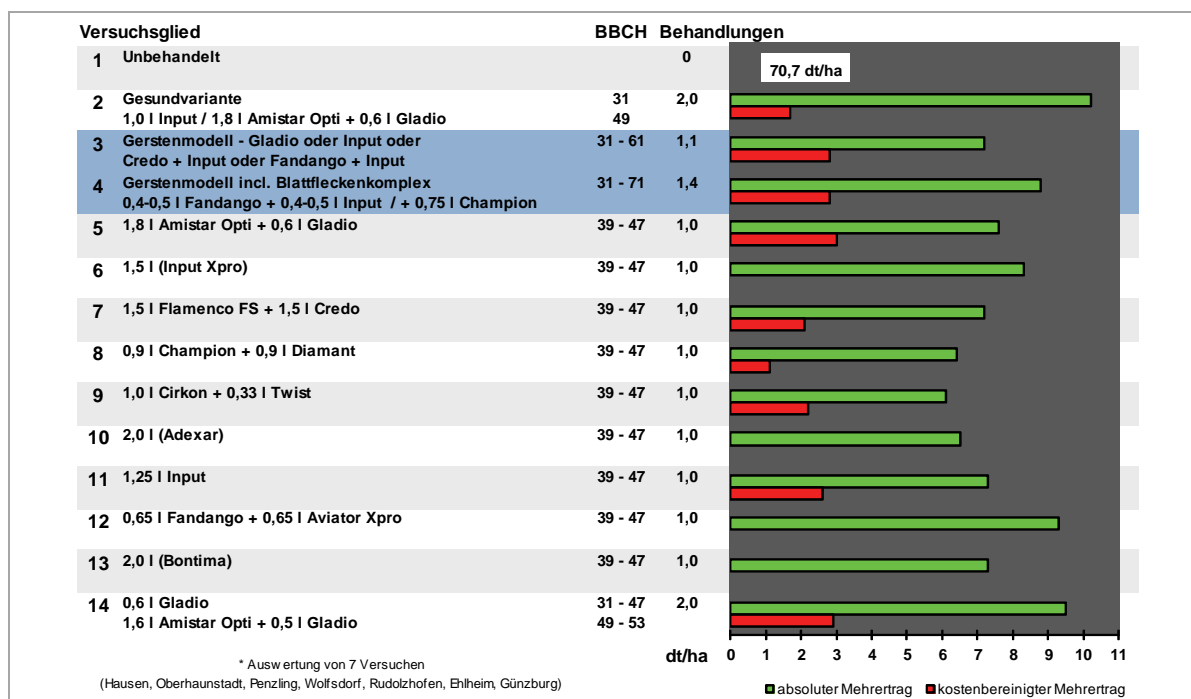


Abb. 6: Wirtschaftlichkeit des Fungizideinsatzes in der Wintergerste 2010 in Bayern*

Über die positiven, quantitativen Ertragseffekte hinaus konnte die Auswertung der Vermälzungsergebnisse der Sommergerste auch einen positiven qualitativen Effekt einer gezielten Bekämpfung des Blattfleckenkomplexes zeigen. Für die Prüfung des Einflusses gezielter Pflanzenschutzmaßnahmen auf Qualitätsparameter, die für die Vermälzung von Bedeutung sind, waren dies die ersten Untersuchungen dieser Art. Deren Weiterführung soll die zugrundeliegenden Zusammenhänge klären und damit einen wertvollen Beitrag für die regionale Erzeugung hochwertiger Rohstoffe liefern (Hess et al. 2011a).

5 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchung konnten besonders die weite Verbreitung von *Ramularia collo-cygni* und seine hohe Latenz zeigen. Das Monitoring und die Untersuchung der Archivproben bestätigen, dass *Ramularia collo-cygni* kein neuer, regional begrenzt auftretender Schaderreger ist. Seine besondere Bedeutung gewinnt er als biotische Ursache des Blattfleckenkomplexes, der durch Wechselwirkungen mit verschiedenen Umweltfaktoren und pflanzenphysiologischen Faktoren wie der Seneszenz in den letzten Jahren im bayerischen Gerstenanbau zu einer entscheidenden Schadursache mit hoher quantitativer und qualitativer Schadrelevanz geworden ist.

Die Ergebnisse aus dem laufenden Projekt konnten erfolgreich in einer Anpassung und Verbesserung der bisherigen Bekämpfungsstrategien umgesetzt werden. Dabei zeigte sich, dass speziell bei der Fungizidwahl durch die neue Wirkstoffgruppe der Carboxamide eine weitergehende Optimierung möglich ist.

Für die Nachhaltigkeit der Maßnahmen und eine weitere Verbesserung der Kontrolle wird besonders ein tieferes Verständnis der Erregerbiologie notwendig sein.

Während es zum Übergang von infiziertem Saatgut in den Keimling und zur Ertragsbedeutung der späten Epidemie aus den vorliegenden Untersuchungen gesicherte Ergebnisse gibt, ist die Bedeutung der symptom-freien Periode zwischen Keimling und Ährenschieben beim Verständnis des Entwicklungszyklus noch Gegenstand verschiedener Hypothesen (Abb. 7). Ergebnisse deuten sowohl auf eine Bedeutung des Sporenflugs, als auch auf eine Phase des endophytischen Wachstums hin. Die Etablierung eines quantitativen PCR Nachweises und eines GFP (Grün Fluoreszierendes Protein) transformierten Isolates von *Ramularia collo-cygni* bieten hier entscheidende, neue Untersuchungsansätze.

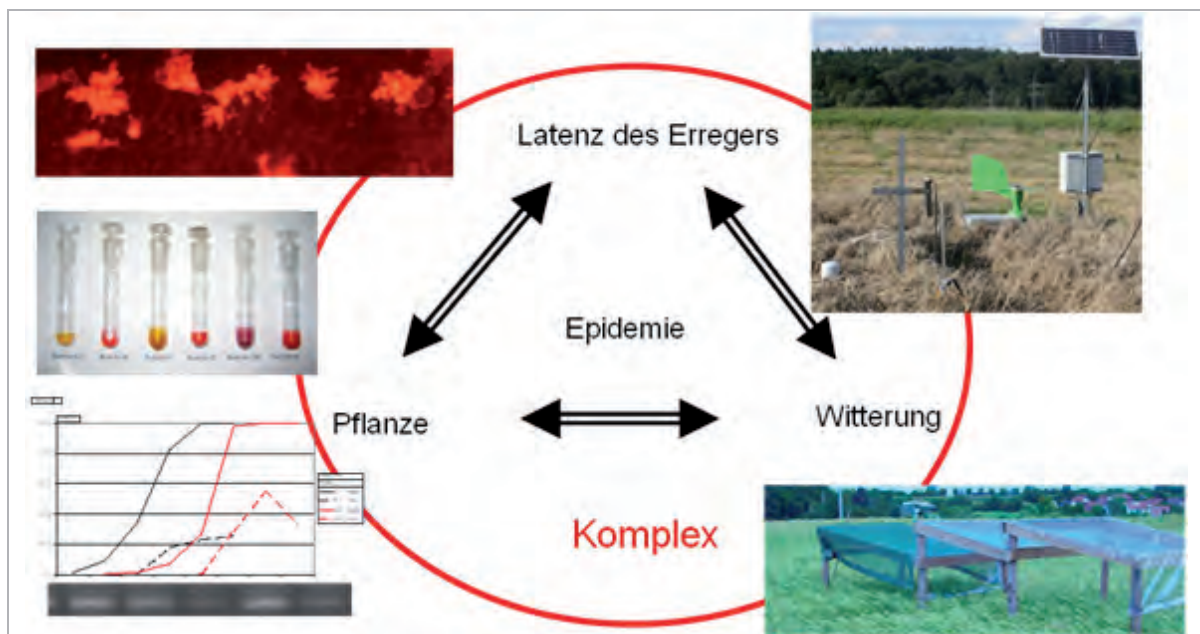


Abb. 7: Schema zu den Wechselwirkungen zwischen Pflanze, Erreger und Witterung bei der Epidemie des Blattfleckenkomplexes

Gerade beim Übergang von Latenz zur Epidemie auf Erregerseite und vom Wachstum zur Seneszenz auf Seite der Pflanze spielen abiotische Stressfaktoren, speziell der Witterung, eine entscheidende Rolle. Dies wird aber schwierig über makroklimatische Parameter zu erfassen sein. Die Ergebnisse der Beschattungsexperimente weisen vor allem auf bestandesklimatische Parameter, wie der Blattnässe, als entscheidende Einflussfaktoren hin.

Wichtiger Gegenstand der zukünftigen Untersuchungen wird der Einfluss von Anbaufaktoren wie Sorte, Pflanzenschutz, Witterung auf die Erregerpopulation sein. Dabei spielen die Übertragungswege (Wind, Saatgut) eine zentrale Rolle bei dem Transfer und der Verbreitung von Mutationen, Virulenzgenen und anderer wichtiger Fitnessfaktoren des Erregers. Hier dürfte die Erklärung für die steigende aktuelle Bedeutung und die Nachhaltigkeit der zukünftigen Kontrolle unter den sich wandelnden Umweltfaktoren liegen.

6 Literaturverzeichnis

HEISER, I., HESS, M., SCHMIDTKE, K.-U., VOGLER, U., MIETHBAUER, S., LIEBERMANN, B. 2004: Fatty acid peroxidation by rubellin B, C and D, phytotoxins produced by *Ramularia collo-cygni*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 64. 135-143.

HESS, M., GASTL, M., WEIGAND, S., HENKELMANN, G., RYCHLIK, M. (2011a): Influence of crop health and fungal contamination of spring barley on mycotoxin content and malting quality. 33rd European Brewery Convention Congress, Glasgow 22 – 26 May, 52.

HESS, M., HABEKER, R., KICK, K., MATTHIAS, M., HAUSLADEN, H. (2007): Optimierte Strategien zur Krankheitsbekämpfung in der Gerste unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse zur Epidemiologie des Blattfleckenkomplexes. *Gesunde Pflanzen* 59, 47-54.

HESS, M., HAUSLADEN, H., WEIGAND, S. (2011b): Einfluss des Blattfleckenkomplexes der Gerste auf Ertrags- und Qualitätsparameter unter Berücksichtigung des Integrierten Pflanzenschutzes. *Getreidemagazin* 2-2011, 30-32.

HESS, M., NYMAN, M., HAUSLADEN, H., WEIGAND, S. (2011c): Studying the biology of *Ramularia collo-cygni* for the development of an Integrated Pest Management System to match new challenges from a changing climate. 4th International Workshop on Barley Leaf Blights. Dundee, Scotland June 27-29.

WALTERS, D. R., HAVIS, N. D. and OXLEY, S. J. P., (2008): *Ramularia collo-cygni*: the biology of an emerging pathogen. *FEMS Microbiology Letters* 279. 1-7.

Herausforderungen der Klimaänderung an die Unkrautkontrolle

Klaus Gehring

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für Pflanzenschutz

Zusammenfassung

Die Landwirtschaft zählt zu den klimasensibelsten Wirtschaftsbereichen. Neben den notwendigen Anpassungen beim Anbauverfahren und der Anbautechnik wird der prognostizierte Klimawandel auch erhebliche Veränderungen im phytosanitären Bereich verursachen. Im Gegensatz zum erwarteten Rückgang beim Auftreten von pilzlichen Krankheitserregern wird sich die Produktionspraxis auf einen zunehmenden Befall tierischer Schadereger und deutliche Veränderungen der Unkrautflora einstellen müssen.

Artspezifische Modifikationen der Unkrautflora werden sowohl direkt durch sich dynamisch entwickelnde Klimafaktoren, wie Temperatur, atmosphärische CO₂-Konzentration und Niederschlag, als auch indirekt durch neue Anbauverfahren (z. B. neue Winterkulturen) und veränderte Anbautechniken (z. B. reduzierte Bodenbearbeitung) vorangetrieben. Bereits mittelfristig (5 – 10 Jahre) ist mit einer signifikanten Ausbreitung und höheren Besatzdichten bei Ungräsern, Wurzelunkräutern und perennierenden Ungräsern zu rechnen. Aufgrund der Verschiebung von artspezifischen Klimahüllen werden in Bayern neue, wärmeliebende und trockenstresstolerante Unkrautarten bzw. auch Neophyten zunehmend auftreten. Bisher relativ unbedeutende „Nebenunkräuter“ werden sich zu schwer bekämpfbaren Leitunkräutern entwickeln. Klimaveränderungen und zunehmende Witterungsextreme werden die chemische und nicht-chemische Unkrautkontrolle vor neue Herausforderungen stellen. Auch die Dynamik der Entwicklung von Herbizidresistenz wird beschleunigt werden. Der Klimawandel wird die landwirtschaftliche Produktionspraxis, die Fachberatung und die Agrarforschung vor neue Herausforderungen stellen, um die nachhaltige Produktion von hochwertigen Lebensmitteln zu sichern.

1 Einleitung

Die Landwirtschaft ist naturgemäß ein extrem klimasensibler Wirtschaftsbereich, der sich kurz- wie auch langfristig an den regionalspezifischen Klimabedingungen und den Witterungsverlauf anpassen muss. Anbauzonen für Kulturpflanzen und regionalspezifisch adaptierte Anbauverfahren sind Beispiele für die generelle Klimaabhängigkeit. Kurzfristige Klimaänderungen werden vorwiegend als ungünstige Witterungsbedingungen, wie etwa Dürre- oder Frostschäden, wahrgenommen. Globale Klimamodelle prognostizieren vor allem für die erweiterte äquatoriale Zone erhebliche negative Auswirkungen für die Land-

wirtschaft. Die aufgrund der relativ unproblematischeren Klimaveränderungen in gemäßigten Breitengraden wie Westeuropa extrapolierten Ertragszuwächse bei landwirtschaftlichen Kulturen werden inzwischen allerdings auch als allzu optimistische interpretiert (BRAUCH, 2002). In regionalen Klimamodellen wird für Bayern bis zum kommenden Jahrhundertwechsel eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur von + 1,5 bis + 2,2 °C erwartet, die sich besonders im Allgäu als Erwärmung auswirken wird. Nach der prognostizierten Veränderung der Niederschlagssummen ist für den Großteil der Landesfläche mit einer Abnahme um bis zu 10 % zu rechnen. Lediglich in Unterfranken wird dagegen eine Erhöhung der Niederschläge um bis zu 10 % kalkuliert. Unabhängig von der relativen Unschärfe derart kleinräumiger Klimamodelle muss sich die Landwirtschaft in Bayern auf stärkere Amplituden im Witterungsverlauf einstellen. Die Anbauverfahren im Ackerbau müssen insbesondere an mildere Winter und längere sowie intensivere Trockenperioden im Sommer adaptiert werden (ZIMMERMANN, 2007).

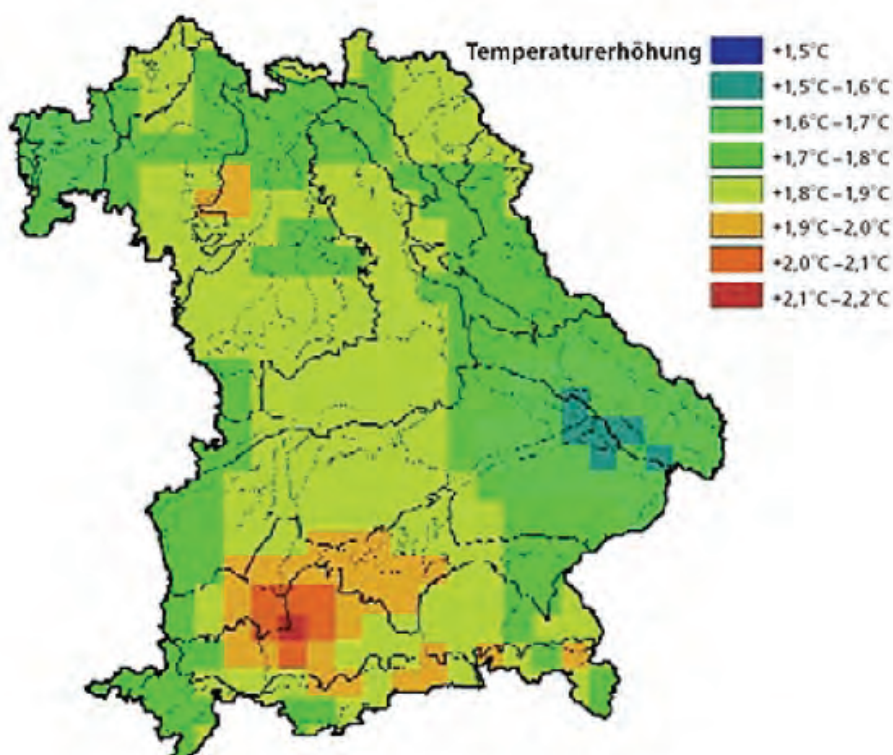


Abb. 1: Langfristige Erhöhung der Jahresmitteltemperatur (2071-2100 gegenüber 1961-1990) in Bayern nach dem Klimamodell WETTREG. Quelle: LWF

Die Strategien im Pflanzenschutz werden sich durch den Klimawandel stark verändern. Das Artenspektrum der Schaderreger verschiebt sich bereits nachweisbar. Tendenziell wird die Bedeutung von Pilzkrankungen, mit Ausnahme von z. B. Getreiderosten, eher abnehmen. Die Kontrolle von tierischen Schädlingen, nichtparasitären Krankheiten und vor allem auch von Unkräutern und Ungräsern wird die Produktionspraxis vor neue Herausforderungen stellen (MEHRTENS, 2011).

2 Anpassungspotenzial der Unkrautflora

Die erwarteten Verschiebungen in der Unkrautflora können nicht singulär im Zusammenhang mit dem Klimawandel betrachtet werden. Alleine die Tatsache, dass bestimmte Pflanzenarten als Unkräuter bezeichnet werden, hängt unmittelbar mit ihrer Anpassung an eine landwirtschaftliche Flächennutzung zusammen. Veränderungen der Fruchtfolge und der Anbautechnik, z. B. der Bodenbearbeitung, induzieren unweigerlich Anpassungsprozesse der standortspezifischen Unkrautflora. Im Gegensatz zu der begrenzten Anzahl unserer Kulturpflanzen zeichnet sich die Unkrautflora durch eine hohe intra- und interspezifische Variabilität aus. In einer standortspezifischen Acker-Unkrautflora treten i. d. R. ca. 10 Leitunkrautarten mit höheren Besatzdichten und teilweise genauso viele Nebenunkrautarten mit geringen Besatzdichten auf. Da sich Unkräuter i. d. R. als R-Strategen verhalten, besteht daher eine dynamische Anpassungsfähigkeit an sowohl ackerbauliche als auch an klimabedingte Veränderungen. Selbst auf der Artebene zeichnen sich Unkräuter als „Wildpflanzen“ durch eine breite ökologische Amplitude und einen hohen phänotypischen und genotypischen Variation aus. Auf erhöhte Temperaturen und ungleichmäßigere Niederschlagsverteilung, als wesentliche Faktoren des Klimawandels, können z. B. viele Unkrautarten kurzfristig mit einer beschleunigten Entwicklung reagieren, ohne ihre Vermehrungsrate wesentlich zu beeinträchtigen.



Abb. 2: Unkräuter werden die Gewinner des Klimawandels werden

3 Klimabedingte Wechselwirkungen

Obwohl, wie vorstehend beschrieben, eine Veränderung der Unkrautflora auf einen multifaktoriellen Prozess zurückzuführen ist, können wesentliche Faktoren des Klimawandels hinsichtlich einer Interaktion mit einzelnen Unkrautarten oder Unkrautgruppen interpretiert werden.

3.1 Interaktion Klima – Unkraut

Durch die Veränderung direkter Klimaparameter wie etwa Temperatur, Niederschläge, CO₂-Konzentration, Strahlung und stärkeren Amplituden des Witterungsverlaufs sind bestimmte Unkräuter in der Anpassungsfähigkeit an die Dynamik des Klimawandels gegenüber anderen Unkrautarten bevorteilt und setzen sich somit verstärkt in der Zusammensetzung der Unkrautflora durch. Generell können Unkräuter dem Klimawandel nur durch Migration bzw. Arealverschiebung oder physio-morphologische (genetische) Veränderung begegnen. Ein Großteil unserer Leitunkräuter stammt allerdings aus warmen und trockenkontinentalen Regionen, so dass sie bereits mit einem besseren Adaptionsvermögen gegenüber den prognostizierten Klimaveränderungen ausgestattet sind (PETERS & GEROWITT, 2010).

Mit ansteigenden Temperaturen werden wärmeliebende Unkräuter gegenüber eher gemäßigt-kühl adaptierten Arten in der Entwicklungsfähigkeit begünstigt. Aufgrund des hohen physiologischen Optimums von 30 – 40 °C sind C₄-Pflanzen gegenüber C₃-Pflanzen (opt. 15 – 25 °C) bei erhöhten Temperaturen im Vorteil. Bei bedeutenden archäophytischen C₄-Unkräutern wie Fingerhirsen (*Digitaria spp.*), Borstenhirsen (*Setaria spp.*), Hühnerhirse (*Echinochloa crus-gali*) und Amarant-Arten (*Amaranthus spp.*) wird bereits eine starke Ausbreitung beobachtet, die neben ackerbaulichen Aspekten, auch auf Klimaveränderungen bezogen wird (BRANDES, 1995).

Auf Grünlandstandorten könnten C₄-Pflanzen aus der Familie der Sauergräser (*Cyperaceae*) eine verstärkte Ausbreitung aufgrund erhöhter Temperatur entwickeln. Auch wärmeliebende C₃-Unkräuter wie Gänsefuß-Arten (*Chenopodium spp.*), Franzosenkraut-Arten (*Galinsoga spp.*) und Bingelkraut (*Mercurialis annua*) werden gegenüber anderen Ackerunkräutern mit zunehmender Erwärmung begünstigt. In der Folge von erhöhten Temperaturen treten mildere Winter auf. Hierdurch wird die Entwicklung von typischen „Herbst-Unkräutern“ wie z. B. Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*), Windhalm (*Apera spica-vendi*) und Ehrenpreis-Arten (*Veronica spp.*) gefördert.

Eine erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentration, als wesentlicher Faktor des Klimawandels, könnte sich als noch vorteilhafter für Unkräuter erweisen, obwohl hierdurch wahrscheinlich auch das Wachstum und der Ertrag von C₃-Kulturpflanzen erhöht werden. Da die Anzahl der Unkräuter die der Kulturpflanzen pro Flächeneinheit deutlich übertrifft und Unkräuter als R-Strategen den Vorteil von erhöhten Wachstumsressourcen maximal nutzen, könnten die Vorteile einer erhöhten CO₂-Konzentration von Unkräutern relativ besser genutzt werden als von Kulturpflanzen. Als weiterer Aspekt einer höheren CO₂-Konzentration der Atmosphäre wurde bei Wurzelunkräutern eine relative Wachstumssteigerung der Überdauerungsorgane (Veränderung im Wurzel/Trieb-Verhältnis) nachgewiesen, was die Verbreitung und das Überleben dieser Problemunkräuter erhöht (PRITCHGARD und AUTHOR, 2005).

Länger andauernde und häufigere Trockenperioden werden ebenfalls für mehrjährige Wurzelunkräuter oder Unkrautarten mit Überdauerungsorganen einen relativen Entwicklungsvorteil darstellen. Für bereits als Problemunkräuter eingestufte Arten wie z. B. Schachtelhalm-Gewächse (*Equisetum spp.*), Ampfer-Arten (*Rumex spp.*), Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense*), Winde (*Convolvulus spp.*), Quecke (*Agropyron repens*) oder Landwasser-Knöterich (*Polygonum amphibium*) kann eine weitere Ausbreitung erwartet werden.



Abb. 3: Wurzelunkräuter wie der Stumpfbliättrige Ampfer (*R. obtusifolius*) sind gegenüber Trockenstress weitgehend tolerant

Für weitere Klimafaktoren wie etwa der Strahlungsintensität oder der Ozonkonzentration liegen bisher keine spezifischen Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses auf die Unkrautflora vor.

3.2 Interaktion Kultur – Unkraut

Die durch die Klimaveränderung notwendigen Anpassungen in der Fruchtfolge oder der Anbautechnik haben einen indirekten, aber starken Einfluss auf die Unkrautflora. Vordergründig positive Aspekte des Klimawandels wie etwa die verbesserte Entwicklung und Ertragsfähigkeit von Winterungen oder der Anbau von bisherigen Sommerungen als Winterformen (z. B. Wintererbsen, Winterrüben, Winter-Hartweizen, Winter-Hafer) werden unweigerlich die Entwicklung von typischen „Herbst-Unkräutern“ wie z. B. Ackerfuchschwanz, Windhalm, Ehrenpreis-Arten, Kletten-Labkraut (*Galium aparine*) oder Trespen-Arten (*Bromus spp.*) begünstigt.

Trotz der temperaturspezifischen Vorteile als C₄-Pflanze ist in Mais eine Verschiebung der Konkurrenzsituation zu Gunsten von CO₂-effizienteren C₃-Unkräutern wie z. B. Gänsefuß-Arten, Knöterich-Arten (*Polygonum spp.*), Schwarzen Nachtschatten (*Solanum nigrum*) oder besonders trockenstress-toleranten Arten wie z. B. Quecke, Ampfer, Schachtelhalm oder Winden-Arten zu erwarten.



Abb. 4: C₃-Wurzelunkräuter wie die Ackerwinde (*C. arvensis*) werden die klimabedingten Entwicklungsverbesserungen bei Mais überkompensieren

Zunehmend häufigere Witterungsextreme, wie insbesondere intensive Trockenperioden im Frühjahr und Sommer, werden die Jugendentwicklung von Sommerungen behindern und zu Bestandeslücken bei Winterungen führen. In der Folge werden sich stresstolerante Unkräuter relativ intensiver entwickeln und eine höhere Konkurrenz gegenüber den Kulturen leisten bzw. eine stärkere Spätverunkrautung mit einer Verminderung der Ertragsleistung und der Erntequalität verursachen. Auch im Grünland werden häufigere Trocken- bzw. Dürreperioden eine zunehmende Schädigung der Grasnarbe auslösen. Auftretende Narbenlücken werden expansive Samenunkräuter wie z. B. die Gemeine Rispe (*Poa trivialis*) und fakultative Unkräuter wie z. B. den Löwenzahn (*Teraxacum officinale*) fördern. Trockenschäden der Grünlandnarbe werden die Ausbreitung von Unkrautarten wie z. B. den Stumpflättrigen Ampfer (*R. obtusifolius*) erheblich begünstigen.

3.3 Interaktion Herbizideinsatz – Unkraut

Die bereits beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels werden grundsätzlich zum Bedarf für eine erhöhte Herbizideinsatzintensität mit entsprechend negativen Konsequenzen für die Produktionsrentabilität und der Umweltverträglichkeit im konventionellen Ackerbau führen (ZWERTGER et al., 2011). Aber auch der eigentliche Herbizideinsatz wird durch die erwarteten Klimaveränderungen direkt beeinflusst. Trockenperioden werden die Effizienz von Bodenherbiziden ebenso behindern wie die Wirksamkeit von blattaktiven Herbiziden aufgrund verminderter Blattaufnahme und reduzierter Stoffwechselaktivität der Zielpflanzen. Während erhöhte Temperaturen den Einsatz von entsprechend anspruchsvollen Herbiziden (z. B. Wuchsstoffen) begünstigen, werden dagegen erhöhte

Verdunstungsverluste und verminderte Wirkstoffaufnahme durch verstärkte Wachsschichten der Epidermis der Unkrautpflanzen, z. B. bei Sulfonylharnstoff-Herbiziden, deutlich behindern. Klimabedingte technische Minderwirkung bei Herbiziden wird die Resistenzdynamik bei wichtigen Leitungsgräsern wie Ackerfuchsschwanz und Windhalm zusätzlich beschleunigen.

Eine nachgewiesene, spezifische Interaktion ist der Effizienzverlust von Glyphosat-Herbiziden bei einem erhöhten atmosphärischen CO_2 -Gehalt gegenüber Unkräutern wie Gänsefuß-Arten oder der Gemeinen Quecke. Die durch die erhöhte CO_2 -Konzentration induzierte Glyphosat-Toleranz bei C_3 -Unkrautarten wird auf eine verminderte Aufnahme aufgrund einer relativ niedrigen Transpirationsrate und einem verstärkten Stomata-Schluss zurück geführt (ZISKA et al., 1999).



Abb. 5: Die chemische Bekämpfung von Problemunkräutern wie der Gemeinen Quecke (*A. repens*) wird durch die Erhöhung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration beeinträchtigt

4 Neue Unkräuter durch den Klimawandel

Insbesondere durch die zu erwartende Temperaturerhöhung wird die Einwanderung von Neophyten aus wärmeren Regionen begünstigt oder bereits sporadisch vorhandene „neue Unkräuter“ können eine expansive bzw. invasive Ausbreitungsdynamik entwickeln (MEINLSCHMIDT, 2004). Zu den im Zusammenhang mit dem Klimawandel als problematisch eingestuften Neophyten (NORDMEYER & SÖCHTING, 2011) gehören Arten wie die Ambrosia (*Ambrosia artemisiifolia*), die Saampappel (*Abutilon theophrasti*), der Weiße Stechapfel (*Datura stramonium*), die Wilde Mohrenhirse (*Sorghum halepense*), Spitzkletten (*Xanthium spp.*), Haarstiel- oder Gabelblütige Hirse (*Panicum spp.*), Erdmandelgras (*Cyperus esculentus*), oder das Hundszahngras (*Cynodon dactylon*).



Abb. 6: Invasive Neophyten wie die Ambrosia (*A. artemisiifolia*) entwickeln sich zu neuen Problemunkräutern (GEHRING et al., 2010)

Häufige milde Winter können das Durchwachsen von Kulturpflanzen in der Folgefrucht begünstigen. Hierdurch wird die Häufigkeit der Intensität von z. B. Durchwuchskartoffeln, Unkrautrüben, Ausfallraps oder auch Ausfallmais begünstigt.

Der Klimawandel kann weiterhin zum Auftreten neuer Problemunkräuter führen. Das heißt, bisher unauffällige Unkrautarten leisten aufgrund spezifisch günstigerer Klimabedingungen eine expansive Entwicklungsdynamik und treten in relativ kurzer Zeit als schwer bekämpfbare Unkräuter auf (PETERS & GEROWITT, 2010). Aktuelle Beispiele für so genannte „Upstarters“ oder „Sleeping Weeds“ sind Storchschnabel-Arten (*Geranium spp.*), Kreuzkräuter (*Senecio spp.*), die Gemeine Ochsenzunge (*Anclusa officinalsi*) oder der Acker-Krummhals (*Anclusa arvensis*). Ein Potenzial zu neuen Problemunkräutern in Folge des Klimawandels haben z. B. bisher unauffällige Arten wie die Wolfsmilchgewächse (*Euphorbia spp.*).

5 Diskussion

Der prognostizierte Klimawandel wird zu deutlichen Veränderungen in der Unkrautflora führen. Eine erhöhte Konkurrenzleistung einzelner Unkrautarten, gesteigerte Intensität standortspezifischer Unkrautgesellschaften, verstärkte Einwanderung und Ausbreitung von Neophyten und das Auftreten neuer Problemunkräuter werden weitreichende Anpassungen der Unkrautkontrollverfahren im Pflanzenbau erforderlich machen. Neben einer Optimierung der Herbizidtechnik wird auf die verstärkte Integration ackerbaulicher bzw. kulturtechnischer Anpassungskonzepte nicht verzichtet werden können. Eine intensivere und problematischere Unkrautflora wird in Zukunft eine höhere Managementleistung bei Landwirten und Beratern erfordern, um die Produktivität in der Pflanzenproduktion nicht zu gefährden und die Umweltverträglichkeit der Anbauverfahren nicht zu belasten. Die Forschung im Bereich der Agrarwissenschaft wird neue Grundlagen für an den Klimawandel adaptierte Unkrautkontrollverfahren entwickeln müssen (GEROWITT & STRUCK, 2008). Nur durch die Kooperation von Produktionspraxis, Fachberatung und Forschung wird die Gefährdung des standortspezifischen Ertragspotenzials durch eine infolge des Klimawandels veränderte Unkrautflora kompensiert und die nachhaltige Produktion hochwertiger Nahrungsmittel gesichert werden können.

6 Literaturverzeichnis

- [1] BRANDES, D. (1995): Breiten sich die C₄-Pflanzen in Mitteleuropa aus? Schriftenreihe für Vegetationskunde, 27, 365-372.
- [2] BRAUCH, H. G. (2002): Klimawandel, Umweltstress und Konflikt. AFES-Press, online.
- [3] BUNCE, I. A.; ZISKA, L. H. (2000): Crop ecosystem responses to climatic change. In: Climate Change and Global Crop Productivity. K. R. REDDY and H. F. HODGES. CABI Publishing, Wallingford, 333-352.
- [4] BUSCHMANN, H. (2004): Hanftod, Tabakwürger - bald auch eine Bedrohung für den Raps? Gesunde Pflanze, 56, 39-47.
- [5] CHMIELESKI, F.-M. (2007): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. In: Endlicher, W. & F.-W. Gerstengarbe: Der Klimawandel - Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Potsdam - Institut für Klimafolgenforschung e.V., Berlin, 75-85.
- [6] D. R. BUXTON et al. Crop Science Society of America, Madison, 273-280.
- [7] DUKES, I. S. (2011): Responses of invasive species to a changing climate and atmosphere. In: Fifty Years of Invasion Ecology - The Legacy of Charles Elton. RICHARDSON, D. M., Blackwell, 345-357.
- [8] FOLAK, S. (2009): Neophyten als Unkräuter - eine Herausforderung für die Landwirtschaft? 2. Österreichische Neobiota-Tagung.
- [9] GEHRING, K.; THYSSEN, S. und FESTNER, T. (2010): Verbreitung der *Ambrosia artemisiifolia* L. (*Beifußblättrige Ambrosie*) in Bayern und Möglichkeiten der direkten chemischen Bekämpfung. 57. Deutsche Pflanzenschutztagung, Julius-Kühn-Archiv, 428, 233.

- [10] GEROWITT, B.; STRUCK, C. (2008): Klimawandel und phytomedizinische Risiken. In: Klimawandel und Ökolandbau – Situation, Anpassungsstrategien und Forschungsbedarf. KTBL-Schrift, 472, 176-185.
- [11] KRITICOS, D.; FILMER, M. (2007): Weeds will thrive on climate change. *Farming Ahead*, 182, 38-40.
- [12] MEINLSCHMIDT, E. (2004): Gebietsfremde potentiell invasive Ackerunkräuter in Sachsen. *Gesunde Pflanze*, 56, 86-92.
- [13] MERTENS, I. (2011): Klimawandel - Herausforderung für die Landwirtschaft. *Proplanta*, online.
- [14] NORDMEYER, H.; SÖCHTING, H.-P. (2011): Invasion von Einwanderern. *DLZ Agrar-magazin*, 6, 142-144.
- [15] PATTERSON, D. T. (1993): Implications of global climate change for impact of weeds, insects and plant diseases. In: *International Crop Science*, D. R. BUXTON et al., Crop Science Society of America, Madison, 273-280.
- [16] PETERS, K.; GEROWITT, B. (2010): Weeds under future climate - how does climate change influence weed flora? Tagungsband der 57. Deutschen Pflanzenschutztagung, Julius-Kühn-Archiv, 428, 331-332.
- [17] PETERS, K.; GEROWITT, B. (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf Unkrautarten im Raps. *Raps*, 29, 8-10.
- [18] ZIMMERMANN, L. (2007): Regionale Klima-Szenarien - kein „Spiel ohne Grenzen“! *LWF aktuell*, 60, 11-13.
- [19] ZISKA, L. H. (2001): Changes in competitive ability between a C₄ crop and a C₃ weed with elevated carbon dioxide. *Weed Science*, 49, 622-627.
- [20] ZISKA, L. H.; FAULKNER, S.; LYDON, I. (2004): Changes in Biomass and root-shoot ratio of field-grown Canada thistle (*Cirsium arvense*), a noxious invasive weed, with elevated CO₂-implications for control with glyphosate. *Weed Science*, 5, 584-588.
- [21] ZISKA, L. H.; TEASDALE, I. R.; BUNCE, I. A. (1999): Future atmospheric carbon dioxide may increase tolerance to glyphosate. *Weed Science*, 47, 608-615.
- [22] ZISKA, L. H.; TEASDALE I. R. (2000): Sustained growth and increased tolerance to glyphosate observed in a C₃ perennial weed, quackgrass (*Elytrigia repens*), grown at elevated carbon dioxide. *Australian Journal of Plant Physiology*, 27, 159-166.
- [23] ZISKA, L. H. (2011): Climate Change Impacts on Weeds. USDA-ARS online.
- [24] ZWERGER, P.; NORDMEYER, H.; SÖCHTING, H.-P. (2011): Einfluss des Klimawandels auf die Verunkrautung und die Unkrautbekämpfung. 26. wissenschaftliche Fachtagung der landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Berlin.

Mit Tropfbewässerung Ertrag und Qualität im Kartoffelbau sichern

Martin R. Müller¹, Hans Kirchmeier¹, Markus Demmel¹, Marc Marx²,
Robert Brandhuber², Adolf Kellermann³

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

¹ Institut für Landtechnik und Tierhaltung,

² Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz,

³ Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung

Zusammenfassung

Durch den Einsatz von Tropfbewässerung lassen sich die Kartoffelerträge und -qualitäten mit hoher Zuverlässigkeit sichern. Die Technik ist so einzusetzen, dass es gelingt, den Dammkern ab dem Auflaufen der Bestände anhaltend feucht und kühl zu halten. Auf Sandböden funktioniert das nur, wenn die Schläuche in die Dammkrone verlegt werden. Auf schwereren Böden und feuchter Frühjahrswitterung lassen sich mit Tropfschläuchen zwischen jedem zweiten Damm ähnlich gute Effekte erzielen. Die Terminierung und Dosierung der Wassergaben muss im Einzelfall auf die Pufferkapazität des Bodens abgestimmt sein. Diese hängt vorrangig von der Bodenart und der Schlauchposition (Dammkrone oder Zwischendamm) ab. Anderenfalls steigt die Gefahr der Sickerwasserbildung. Die Technik zur Verlegung und Bergung der Tropfschläuche muss an die Legeverfahren und die Schlauchposition angepasst und die Technik zur Bergung (Lösen, Herausnehmen und Aufwickeln) noch weiter entwickelt werden.

1 Einleitung

Bei der pflanzlichen Erzeugung spielt Wasser eine grundlegende Rolle. Im Freiland hängt die Verfügbarkeit für die Kulturbestände von den klimatischen Standortbedingungen, den Speichereigenschaften der Böden und dem Aneignungsvermögen der Pflanzen ab.

Durch den Klimawandel werden häufigere Trockenperioden im Sommer und mehr Regen in frostarmen Wintern erwartet. Während der Vegetationsperiode sollen Starkregenereignisse auf Kosten einer gleichmäßigen Niederschlagsverteilung zunehmen. Es wird mit stärkerer Sonneneinstrahlung und steigenden Temperaturen gerechnet (Kartschall et al. 2007). Das erhöht die Verdunstung und damit den Wasserverbrauch auf bewachsenen Böden.

Ackerbausysteme müssen an die sich ändernden Bedingungen angepasst werden. Bewässerungsmaßnahmen werden zunehmend erforderlich. Diese sollten bei knappem Angebot an Wasser effizient und wassersparend erfolgen.

2 Funktionsweise der Technik

Tropfbewässerung unterscheidet sich von der landwirtschaftlich weit verbreiteten Trommelberegnung mit Einzelkreisregner in wesentlichen Punkten: Das Verfahren ist besonders wassereffizient, Energie sparend und kulturverträglich. Der Arbeitsaufwand während der Bewässerungsperiode ist gering. Diesen Vorteilen stehen allerdings hohe Investitionskosten und hoher Aufwand beim Verlegen und Bergen der Schläuche gegenüber, wobei dieser Aufwand zum Teil während bereits bestehender Arbeitsspitzen (Kartoffelernte u. a.) anfällt (KTBL 2009).

Das Wasser wird mit max. 2,5 bar Eingangsdruck in die Tropfschläuche gepumpt. Dafür ist ein (im Vergleich zu Beregnungsverfahren mit deutlich höherem Arbeitsdruck) relativ geringer Energieaufwand erforderlich. Entlang der Schläuche fällt der Druck auf bis zu 0,4 bar ab. Die Tropfer sind in regelmäßigen Abständen von 30 bis 80 cm an die Innenwände der Schläuche geschweißt. Das gewährleistet gleichmäßig verteilte Wassergaben bis 750 Meter Schlauchlänge.

Tropfbewässerung durchfeuchtet nur einen Teil des durchwurzeltens Bodens (Abb. 1). Je leichter und sandiger das Substrat, desto schmaler sind die Durchfeuchtungszonen unter den Tropfern. Werden zu hohe Einzelgaben verabreicht, erfolgt Sickerwasserbildung. Mit steigendem Ton- und Schluffanteil verbessert sich zusehends die waagrechte Wasserverteilung, und man kommt mit weniger Tropfstellen je Flächeneinheit zurecht. Das mindert die Verfahrenskosten.

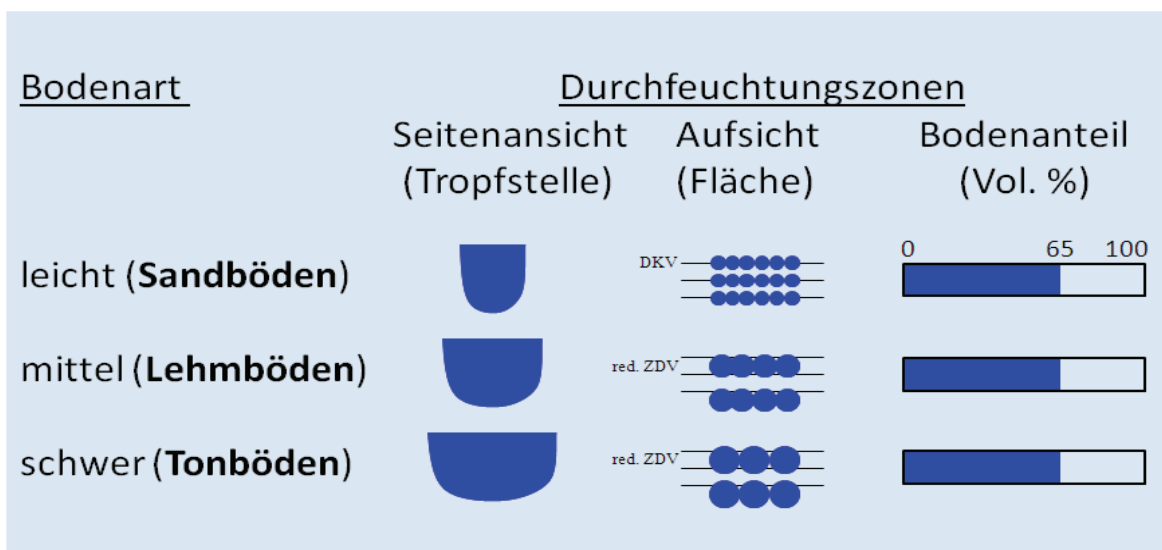



Abb. 1: Grundprinzip der Tropfbewässerung

Beim Dammkronenverfahren (DKV) wird der Hauptwurzelbereich unmittelbar durchfeuchtet und gekühlt (Abb. 2). Das ist der wesentliche Vorteil dieser Schlauchposition. Bei den Zwischendammverfahren (ZDV) besteht eine Distanz zwischen den Durchfeuchtungszonen unter den Zwischendämmen und dem Dammkern. Außerdem liegen die Schläuche deutlich tiefer. Entsprechend kleiner ist auch der durchwurzelt Bodenraum unter den Tropfern, der Wassergaben pflanzenverfügbar zwischenspeichern kann. Das reduzierte ZDV hat nur die Hälfte an Tropfstellen pro Flächeneinheit. Dadurch verringert sich

die Bodenpufferkapazität nochmals deutlich. Vorteilhaft ist, dass dabei nur die Hälfte an Tropfschläuchen anfällt. Die Kosten und der Arbeitsaufwand sind bei dieser Verfahrensweise wesentlich vermindern.



Schlauchposition:	<u>Dammkrone</u>	<u>Zwischendamm</u>	<u>Zwischendamm (reduziert)</u>
Tropfschlauch / ha:	14 km = 27 Rollen = 750 kg (bei 0,6 mm Wandstärke)		50%
Arbeitsbelastung:	hoch	etwas geringer	geringer
Durchfeuchtung:	Hauptwurzelbereich	Distanz zu Hauptwurzelbereich weniger Bodensubstanz unter Tropfer	
Tropfstellen / qm (40 cm Tropferabstand):	3,3	3,3	1,7

Abb. 2: Verfahren der Tropfbewässerung

3 Material und Methoden

Getestet wurde in bedeutenden Kartoffelanbauregionen Bayerns. Im Jahr 2010 fanden Versuche in den Landkreisen Roth (RH), Regensburg (R) und Freising (FS) statt. In RH kam auf Sandboden die Sorte Laura zum Einsatz (N/P/K-Düngung: 140/100/300 kg/ha in Form von Entec 26, Diammonphosphat & Kalimagnesia zum Zeitpunkt des Legens). In R (Tonboden) wurde die Sorte Gala gelegt und in FS (Lehmboden) die Sorte Agria (in R und FS war die Düngung ähnlich der in RH). 2011 wurde anstelle von Freising in Ambach (ND) auf lehmigem Sand geprüft. In RH gab es einen Sortenwechsel und es kam "Krone" zum Einsatz. Das Düngungsniveau war 2011 im Vergleich zum Vorjahr erhöht (N/P/K-Düngung: 180/120/380 kg/ha).

Die Fragestellungen waren verfahrenstechnischer und pflanzenbaulicher Art. Diese beinhalteten die situationsbezogene Prüfung der Schlauchposition (Dammkrone, Zwischendamm, zwischen jedem zweiten Damm), den sinnvollen Bodenfeuchtegrenzwert, ab dem bewässert wird (60 - 80 % der nutzbaren Feldkapazität nFK), und die darauf abgestimmte Höhe der Einzelwassergaben. Zudem wurde der Nutzen von Fertigation (Flüssigdüngung über Tropfschläuche) untersucht. In diesen speziellen Varianten wurde die N/P/K-Düngung zum Zeitpunkt des Kartoffellegens vermindert, und die noch fehlenden Mengen nachträglich in bis zu 15 Einzelgaben mit mindestens einwöchigem Abstand verabreicht.

Bewässert wurde mit Hilfe eines Modells. Es basiert auf der täglichen Bilanzierung des Bodenwassers: Verdunstung und Versickerung werden vom vorhandenen Bodenwasser abgezogen, Niederschlag und Wassergaben hinzu addiert. Die Verdunstung wird mit der

Gras-Referenz-Methode abgeschätzt (Allen et al. 1998), wobei die Anpassung der Referenzverdunstung durch kulturart- und stadienspezifische k_c -Faktoren (Paschold et al. 2011) und weitere Faktoren erfolgt. Die weiteren Faktoren sind variabel und wurden im Rahmen des Projektes ermittelt. Sie berücksichtigen die variable Feuchte des Bodens und der Bodenoberfläche.

Zur fortlaufenden Dokumentation und Kontrolle der Vorgehensweise wurde die Bodensaugspannung, die Rückschlüsse auf den Bodenwassergehalt zulässt, in ausgewählten Varianten mit Tensiometern gemessen.

Alle Varianten wurden vierfach wiederholt. Die Versuche waren randomisiert. Die Parzellen waren jeweils drei Meter breit und 10 Meter lang. Beprobt und beerntet wurden immer die mittleren beiden Parzellendämme. Zum Schutz war die Kopfeinheit der Bewässerungstechnik in einem Container montiert. Die einzelnen Regelsteuerventile wurden mit einem Bewässerungscomputer angesteuert (Abb. 3). Der Computer wiederum war über Modem und SIM-Karte aus der Ferne programmierbar. Auf diese Weise musste man beim täglichen Bewässern nicht vor Ort sein.



Abb. 3: Exaktversuchsanlage am Standort R (Thalmassing)2010

4 Ergebnisse

4.1 Versuchsjahr 2010

Nachdem es im April kaum geregnet hat, war der Mai kalt und nass. Im Juni ließen die Niederschläge nach und es wurde allmählich wärmer. Eine Woche nach Beginn der Trockenperiode (zweite Junihälfte) meldete das Bewässerungsmodell an den Standorten R und RH beginnenden Trockenstress: Die Bestände ohne Bewässerung reagierten darauf mit dem allmählichen Abbau oberirdischer Biomasse. Erste Trockenstresssymptome waren ab Anfang Juli zu beobachten. Sie nahmen in den darauf folgenden Tagen stetig zu. Am Standort FS wurde diese Schönwetterperiode durch mehrere Gewitterschauer unterbrochen, weshalb es hier zu keinen Versorgungslücken bezüglich Wasser, und folglich auch zu keinen signifikanten Ertragseffekten durch Bewässerung kam.

Gestartet wurde mit der Bewässerung in R und RH jeweils etwa eine Woche nach Beginn der Trockenphase, und zwar zunächst mit 4 mm/Tag. Vorübergehend wurden die Gaben auf 5 mm/Tag erhöht, und mit Einsetzen leichter Niederschläge Mitte Juli wieder auf 4 mm/Tag reduziert. Dadurch konnten die Bodenwassergehalte rechnerisch über den Feuchtegrenzwerten von 65% der nutzbaren Feldkapazität (nFK) in RH (Sandboden) bzw. 80% nFK (R: Tonboden) gehalten werden. Diese Vorgehensweise erfolgte sowohl im DKV, als auch bei Tropfschlauchpositionen zwischen jedem Damm (ZDV) und zwischen jedem zweiten Damm.

Ab dem 23. Juli war es wieder nass und kühl. Am Standort RH wurde in den unbewässerten Kontrollen in hohem Maße neue oberirdische Biomasse gebildet, die trotz des späten Zeitraums kaum Qualitätsminderungen des Erntegutes (Kindelbildung u. a.) zur Folge hatte. Vielmehr wurde ohne Bewässerung in diesem Zeitraum bis Mitte September Proberodungen zu Folge ca. 50% des Gesamt-Ernteertrages gebildet.

In RH betrug der Ertrag ohne Bewässerung 471 dt/ha (Tab. 1). Durch Bewässerung (zeitiger Start ab 15 cm Wuchshöhe) im DKV wurde ein Mehrertrag von 219 dt/ha ermittelt (= + 46 %). Nach Bewässerung im ZDV war der Effekt ähnlich hoch (+ 44 %). Das Verfahren mit nur einem Tropfschlauch zwischen jedem zweiten Damm erzielte + 26 % Ertragssteigerung. Fertigation bewirkte gegenüber konventioneller Düngung keine zusätzlichen Ertragseffekte. Wegen feuchter Maiwitterung musste bis zur Blüte kaum bewässert werden. Deshalb wurden bei spätem Bewässerungsstart ähnlich hohe Ertragszuwächse erzielt.

Tab. 2: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort RH 2010

Schlauchposition	Intensität der Bewässerung	Ertrag dt/ha	Ertragseffekt dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		471		
Dammkrone	(1) ab 15 cm, nFK < 65%: 4-5 mm/d	690	219	46
	(2) ab Blüte, nFK < 65%: 4-5 mm/d	675	204	43
	(3) wie (1) + 50 % Fertigation (15x)	609	138	29
Zwischendamm	(1) ab 15 cm, nFK < 65%: 4-5 mm/d	678	207	44
	(2) ab Blüte, nFK < 65%: 4-5 mm/d	636	165	35
	(3) wie (1) + 50 % Fertigation (15x)	615	144	31
Zwischendamm (reduziert)	(1) ab 15 cm, nFK < 65%: 4-5 mm/d	595	124	26
	(2) ab Blüte, nFK < 65%: 4-5 mm/d	616	145	31
	(3) wie (1) + 50 % Fertigation (15x)	597	126	27
DKV	nach Modell Deutscher Wetterdienst	675	204	43

GD 5% (Scheffe) = 157 dt/ha

An beiden Standorten fand während der Trockenphase verstärkte Wurzelbildung in den durch Bewässerung durchfeuchteten Bodenbereichen unter den Tropfstellen statt, je nach Schlauchposition im Dammkern (DKV), bzw. in den Bereichen der Durchfeuchtungszonen unter den Zwischendämmen (ZDV).

Abb. 4 zeigt exemplarisch den Bodensaugspannungsverlauf in der Variante „ZDV zwischen jedem zweiten Damm“ in RH. Gemessen wurde im Damm, im Zwischendamm mit Tropfschlauch direkt unter einem Tropfer und im Zwischendamm ohne Tropfschlauch. Die Saugspannungswerte werden in hPa angegeben. Je niedriger die Saugspannung, umso feuchter ist der Boden. Unterhalb eines Wertes von etwa 60 hPa ist mit Sickerwasser zu rechnen. Da Bodenwassergehalt- und Saugspannung zueinander in Beziehung stehen, sind diese Größen in Abhängigkeit der jeweiligen Bodenart ineinander umrechenbar. So entspricht ein Grenzwert von 65 % nFK im Sandboden in RH einer Saugspannung von etwa 500 bis 550 hPa. Die höchsten Werte wurden im am stärksten durchwurzelteten Damm gemessen. Hier unterlag die Bodenfeuchte gleichzeitig den höchsten Schwankungen im Zeitverlauf. Das spiegelt die hohe Verdunstung durch den Pflanzenbestand im Vergleich zu den Zwischendämmen. Im Damm wurde der Feuchtegrenzwert von 500 hPa bei dem bewässert werden sollte zwar zeitweise überschritten, dafür lagen die Werte in den Zwischendämmen aber weit unter diesem Grenzwert. Weitere Zusatzwassergabe hätte zu Verlusten durch Sickerwasser geführt. Die Zwischendämme zeichneten sich durch einen stabilen Verlauf der Saugspannung von etwa 50 bis 100 hPa aus. Überraschend ist, dass sogar im Zwischendamm ohne Tropfschlauch im Bewässerungszeitraum 100 hPa gemessen wurden. Das Zusatzwasser war demnach ausreichend, um auch diesen Bereich feucht zu halten.

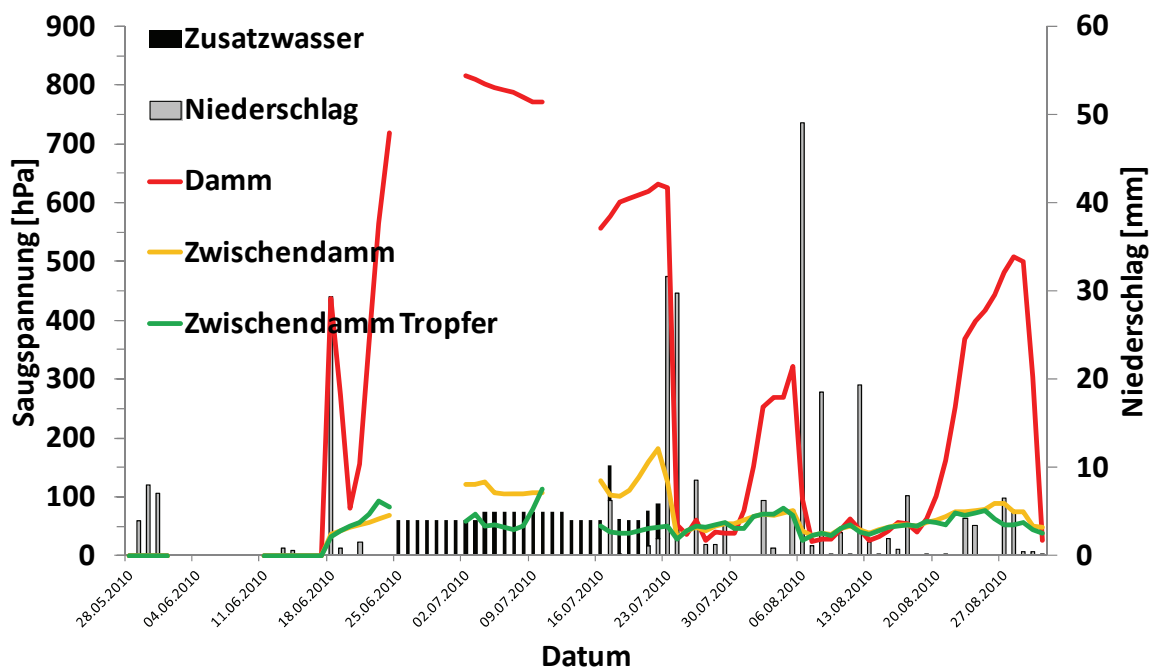


Abb. 4: Bodensaugspannungsverläufe im Damm und Zwischendamm sowie Niederschläge und Zusatzwasser beim reduzierten Zwischendammverfahren am Standort RH

Standort R verzeichnete einen Knollenertrag, unbewässert, von knapp 520 dt/ha (Tab. 2). Nach Bewässerung im DKV stieg der Ertrag um ca. 170 dt/ha (= + 32 %). Bei zeitigem Bewässerungsstart mit hohem Boden-Feuchtegrenzwert von 80 % nFK und geringen Einzeltagesgaben von 4 - 5 mm waren die Ertragseffekte nach ZDV und red. ZDV mit jeweils + 26 % Mehrertrag gegenüber „unbewässert“ nur wenig geringer als bei der Anwendung des deutlich arbeitsaufwändigeren DKV. Ein später Bewässerungsstart (Boden-Feuchtegrenzwert von 60 % nFK, höhere Einzelgaben von 8 mm - nach Bedarf) erreichte im DKV ebenfalls die Ertragsspitze. Bei dieser Vorgehensweise kam es allerdings bei den beiden ZDV zu einem etwas stärkeren Ertragsabfall. Die Düngung über die Tropfschläuche ergab auch an diesem Standort keine positiven Effekte.

Tab. 3: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort R 2010

Schlauchposition	Intensität der Bewässerung	Ertrag dt/ha	Ertragseffekt dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		517		
Dammkrone	(1) ab 15 cm, nFK < 60%: 8 mm/d	686	169	33
	(2) ab 15 cm, nFK < 80%: 4-5 mm/d	684	167	32
	(3) wie (2) + 20 % Fertigation (4x)	637	120	23
	(4) wie (2) + 50 % Fertigation (15x)	623	106	21
Zwischendamm	(1) ab 15 cm, nFK < 60%: 8 mm/d	628	111	21
	(2) ab 15 cm, nFK < 80%: 4-5 mm/d	653	136	26
	(3) wie (2) + 20 % Fertigation (4x)	664	147	28
	(4) wie (2) + 50 % Fertigation (15x)	601	84	16
Zwischendamm (reduziert)	(1) ab 15 cm, nFK < 60%: 8 mm/d	637	120	23
	(2) ab 15 cm, nFK < 80%: 4-5 mm/d	654	137	26
	(3) wie (2) + 20 % Fertigation (4x)	591	74	14
	(4) wie (2) + 50 % Fertigation (15x)	592	75	15
DKV	nach Modell Deutscher Wetterdienst	599	82	16

GD 5% (Scheffe) = 137 dt/ha

Im Versuch (Sandboden in RH) hatten Kartoffeln, die mit Tropfschläuchen zwischen den Dämmen bewässert wurden, massiven Tiefenschorf. Im Gegensatz dazu wurde beim DKV gegenüber der unbewässerten Kontrolle "nur" eine Befallsverdopplung festgestellt (gegenüber 7,5-facher Befallsstärke nach ZDV. Am Standort R ergab Tropfbewässerung oberflächliche Schorfeffekte mit gleicher Tendenz, allerdings auf deutlich geringerem, kaum qualitätsminderndem Niveau.

4.2 Versuchsjahr 2011

2011 herrschte eine ausgeprägte mehrwöchige Frühjahrstrockenheit vor. Wesentliche Niederschläge setzten an den Standorten R und RH ab Ende Mai ein, in ND erst ab Mitte Juni. Von da an regnete es an allen drei Standorten immer wieder ausgiebig.

Aufgrabungen, Beobachtungen und Proberodungen haben gezeigt, dass sehr frühe Bewässerungsmaßnahmen (Abb. 5), beginnend kurze Zeit nach dem Auflaufen der Bestände noch in der ersten Maihälfte, für die Entwicklung der Kartoffelbestände an allen drei Standorten am förderlichsten waren. Bei dieser Vorgehensweise war beabsichtigt, den Dammkern, also den Hauptwurzel- bzw. Knollenbildungsbereich während der gesamten Wachstumsperiode feucht und kühl zu halten.

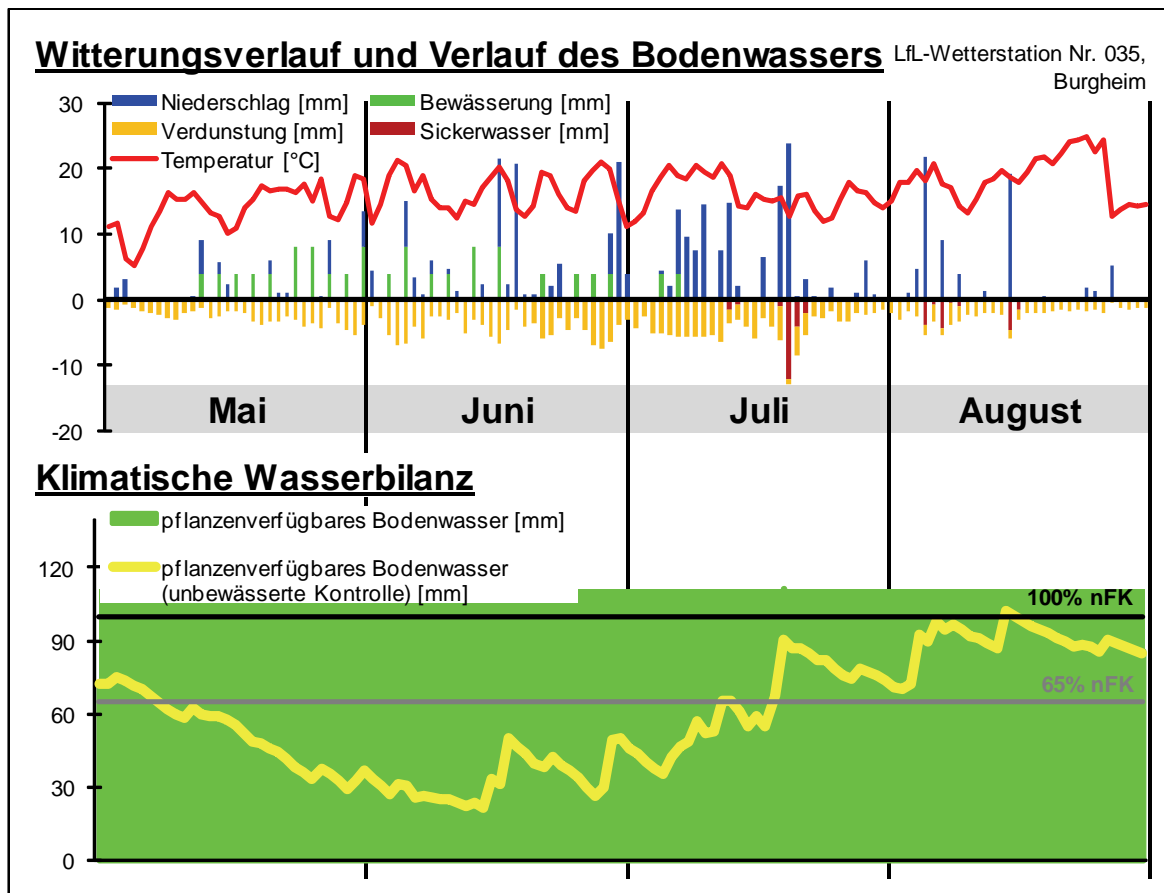


Abb. 5: Bewässerungsvariante mitzeitigem Start (12. Mai) am Standort ND (Ambach), 2011: falls $nFK-15mm > \text{Bodenfeuchte} > 65\% nFK$: 4 mm/2d, falls $\text{Bodenfeuchte} < 65\% nFK$: 8mm/2d

Vor allem Bestände mit frühem Bewässerungsbeginn im Dammkronenverfahren verzeichneten ein rasches Jugendwachstum bezüglich der Ausprägung des Wurzelsystems und des Krautwachstums. Der Knollenansatz wurde im Mittel der drei Standorte gegenüber den unbewässerten Kontrollvarianten in etwa verdoppelt.

Im Gegensatz dazu waren die Wassergaben bei Schlauchpositionen zwischen den Dämmen deutlich weniger effektiv. Die Gaben wurden nur zu einem geringen Teil und nur zum Rand hin in die Dämme gesaugt. Wasserdepots unter den Zwischendämmen waren im Mai aufgrund des bei Wassermangel stark gehemmten Wurzelwachstums für die Pflanzen nur unzureichend verfügbar.

Zeitiger Bewässerungsstart im DKV bewirkte von Beginn an eine gleichmäßige Durchwurzelung der Dämme und symmetrische Knollennester. Ohne Bewässerung bzw. nach spätem Start beschränkte sich das Wurzelwachstum zunächst weitgehend auf die Eindringtiefe von Niederschlägen bis 10 cm Bodentiefe.

Ein später Bewässerungsstart Ende Mai führte zu einem verminderten Jugendwachstum. Ein positiver Einfluss auf den Knollenansatz konnte in diesem Fall bei Proberodungen (DKV) kaum, und bei ZDV gar nicht festgestellt werden.

Exakte Ertragsermittlungen und eine Analyse des Erntegutes stehen zum Zeitpunkt der Niederschrift noch aus.

5 Diskussion

Tropfbewässerung ist das wasser- und energiesparendste Bewässerungsverfahren, aber teuer in der Anschaffung und aufwändig in der Handhabung. Deshalb ist für einen erfolgreichen Einsatz entscheidend, diese Technik möglichst effizient zu nutzen. Mit dieser Zielsetzung werden an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft seit dem Jahr 2008 Tropfbewässerungsversuche zu Speisekartoffeln durchgeführt.

Die Höhe der Einzelgaben sollte auf die jeweilige Boden- und Verfahrensart abgestimmt werden. Beim Dammkronenverfahren ist der durchwurzelte Teil des Bodens, der durch Tropfbewässerung durchfeuchtet wird, besonders groß. Deshalb bietet diese Schlauchposition bei der Terminierung und Dosierung der Einzelwassergaben den größten Spielraum. 2010 und 2011 wurden bei dieser Verfahrensweise auf Sand-, Lehm- und Tonboden sowohl bei hohem Bodenfeuchtegrenzwert und geringen Einzelgaben (4 - 5 mm/Tag), als auch bei geringerem Grenzwert und höheren Einzelgaben (8 mm/Tag) gleichermaßen die größten Bewässerungseffekte (Ertrag und äußere Qualität 2010, Knollenansatz 2011) erzielt.

Zwischendammverfahren waren vor allem auf Sandboden und bei trockenem Ausgangsboden zu Beginn der Bewässerungsperiode deutlich weniger effizient. Offensichtlich waren die Böden dann wegen der tieferen Schlauchposition nicht in der Lage, das verabreichte Zusatzwasser in hohem Maße pflanzenverfügbar zwischen zu speichern. Es kam zu Versickerung. Zudem leiten trockene und sandige Böden Wasser deutlich schlechter als feuchte bzw. tonige (Scheffer/Schachtschabel, 2002). In trockenem Boden und in Sandboden wurden die Gaben offensichtlich nur zu einem geringen Anteil in die Dämme gesaugt. Hierdurch dürfte die Verfügbarkeit für die Bestände zusätzlich beschränkt worden sein. Grundsätzlich konnten die Zusatzwassergaben nach dem Verlegen der Schläuche in die Zwischendämme bei frühem Bewässerungsstart (hoher Bodenfeuchtegrenzwert) am besten aufgenommen werden. Es bestand dann ein zeitiges Signal für die Kartoffelpflanzen an welchen Stellen das Wasserangebot besteht. Die Pflanzen reagierten darauf zeitig mit gezieltem Wurzelwachstum in diese Durchfeuchtungszonen unter die Zwischendämme.

Bei der Anwendung der Zwischendammverfahren auf Sandboden traten 2010 erhebliche Qualitätsminderungen durch Kartoffelschorf auf. Die Symptome werden von der Bakterienart *Streptomyces scabies* verursacht. Die Bakterien sind bodenbürtig und infizieren direkt die jungen Knollen über Atmungsöffnungen. Junges, wachsendes Knollengewebe ist gegenüber Infektionen deutlich anfälliger als ausgewachsenes. Außerdem haben die Bakterien hohe Ansprüche an die Verfügbarkeit von Sauerstoff. Deshalb ist der Krankheitsdruck auf leichten, sandigen, gut durchlüfteten Böden deutlich größer als auf schweren (Radtke und Rieckmann, 1990). Der starke Befallsanstieg gegenüber Erntegut aus unbewässerten Beständen lässt sich dadurch erklären, dass durch die Bewässerung im ZDV einerseits eine gute Wasserversorgung der Kartoffelpflanzen sichergestellt wurde. Dies hat das Knollenwachstum stark gefördert, aber genau dadurch bedingt eben auch die Anfälligkeit des Knollengewebes entsprechend erhöht. Andererseits wurde durch die Bewässerung im ZDV kein Sauerstoff aus dem sandigen Dammkern verdrängt, sodass beste Entwicklungs- und Infektionsbedingungen für *Streptomyces scabies* bestanden. Im Gegensatz dazu war der Befallsanstieg bei Anwendung des DKV deutlich geringer. Das war offensichtlich darauf zurückzuführen, dass Bewässerung die Anfälligkeit des Knollengewebes ebenso wie bei den ZDV zwar indirekt erhöht hat, aber die täglichen Wassergaben in den Dammkern den Sauerstoff regelmäßig und mit hoher Wirksamkeit aus dem für Knollen und Bakterien wachstumsrelevanten Bereich verdrängte. Dadurch hielten sich der resultierende Krankheitsdruck und der qualitative Schaden am Erntegut in Grenzen. Die Ergebnisse bedeuten wahrscheinlich ein Ausschlusskriterium der ZDV auf leichten, mit Schorf verseuchten Böden.

Für hohe Erträge und Qualitäten ist es erforderlich, während der Hauptwachstumsphase ein gleichmäßiges und stressfreies Knollenwachstum zu gewährleisten. Das gilt ab dem Auflaufen der Kartoffeln. Hierzu ist der Dammkern durch Tropfbewässerung dauerhaft feucht und kühl zu halten. Mit Vorgehensweisen, die für Überkopfberegnung empfohlen werden (Bewässerungsstart sobald die nutzbare Feldkapazität vom Stadium abhängig auf 35 - 55 % sinkt, Fricke 2009), lässt sich dieses Ziel allerdings nicht erreichen. Der Dammkern würde vollständig austrocknen.

Die Inbetriebnahme von Tropfbewässerungstechnik verursacht nach erfolgter Installation kaum Aufwand. Deshalb empfehlen sich bei abtrocknenden Bodenverhältnissen ein sehr zeitiger Bewässerungsstart (ab 80 % der nFK) und eine Aufteilung der Gaben zu vielen Terminen in täglichen oder zweitägigen Abständen.

Derzeit steht kaum Gerätetechnik zum Verlegen und vor allem für das Bergen der Tropfschläuche zum Saisonende zur Verfügung. Anwender von Tropfbewässerung arbeiten zumeist mit Eigenkonstruktionen, die auf das jeweilige Pflanzverfahren und die individuelle Betriebssituation abgestimmt sind. Der Einsatz der derzeit verfügbaren Hebe- und Wickelgeräte (Bergung) bereitet oft noch große Probleme. Mit gängiger Wickeltechnik werden die Schläuche vom Feldrand aus aufgewickelt, wobei sie direkt durch den Wickelvorgang aus der Fläche gezogen werden. Bei dieser Vorgehensweise steigt die Gefahr, dass es beim Aufspulen auf die Trommel zu Beschädigungen am Schlauch und der Plastiktrommel kommt, mit zunehmender Schlaglänge überproportional stark an. Außerdem gewährleistet das Verfahren in der jetzigen Art und Weise kein gleichmäßiges Aufwickeln der Schläuche. Erste Ansätze zur Prüfung und Optimierung der Verlegetechnik wurden im Projekt durchgeführt, die Verbesserung der Verfahrenstechnik zur Bergung von Tropfschläuchen steht für die ins Auge gefasste Projektverlängerung an.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Kartschall, K., Mäder, C., Tambke, J. (2007): Klimaänderungen, deren Auswirkungen und was für den Klimaschutz zu tun ist. Umweltbundesamt.
- [2] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998: Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- [3] KTBL Feldbewässerung, 2009: Betriebs- und arbeitswirtschaftliche Kalkulationen. Vertrieb KTBL, Darmstadt
- [4] Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Schwertmann, U., Horn, R., Kögel-Knabler, I., Stahr, K., Auerswald, K., Beyer, L., Hartmann, A., Litz, N., Scheinost, A., Stanjek, H., Welp, G., Wilke, B.-M. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg und Berlin.
- [5] Radke, W., Riekmann, W. (1990): Krankheiten und Schädlinge der Kartoffel. Verlag Th. Mann, Gelsenkirchen-Buer.
- [6] Fricke, E. (2009): Die Durstlöcher gezielt einsetzen. Top Agrar 2, 54-57
- [7] Paschold, P.-J., Frühauf, C., Schaller, J., Kleber, J., Mayer, N. (2011): Geisenheimer Bewässerungssteuerung und FAO-Grasverdunstung. DGG-Proceedings, Vol.1, No. 5, 1-5.

Innovation im Ackerbau – Permanente Fahrwege und Streifenbearbeitung

Robert Brandhuber¹, Markus Demmel², Marc Marx¹, Hans Kirchmeier¹, Martin R. Müller¹

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

¹Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz,

²Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Zusammenfassung

Auf drei landwirtschaftlichen Betrieben in Bayern werden Regelspurverfahren (sog. Controlled Traffic Farming) und Streifenbodenbearbeitung (Strip Tillage) im Rahmen von Feldversuchen untersucht, insbesondere die technische Durchführbarkeit, die Vorzüglichkeit von Verfahrensvarianten und die Wirkung auf den Bodenwasserhaushalt. Im Regelspurverfahren werden in Deutschland übliche und im Straßenverkehr zugelassene Landmaschinen eingesetzt. Damit ist auf den Betrieben ein Anteil nicht mehr überfahrener Fläche von 58 bis 67 % erreichbar. Im zweiten Versuchsjahr konnte bereits eine verbesserte Wasserverfügbarkeit im nicht mehr befahrenen Boden festgestellt werden. Die Erträge der Jahre 2010 und 2011 zeigten im befahrenen und unbefahrenen Bereich noch keine eindeutig gerichtete Reaktion. Mit Streifenbodenbearbeitung konnten vergleichbare Erträge gegenüber den betriebsüblichen Mulchverfahren erzielt werden. Erfolgreich getestet wurde das Einbringen von Gülle in die Streifen vor Mais. Mit dem Verzicht auf flächendeckende Ausbringung und Einarbeitung wird in erosionsgefährdeten Lagen ein hohes Maß an Erosionsschutz erreicht. Lange Trockenperioden in der Hauptvegetationszeit sind bisher nicht aufgetreten. Die erwarteten Vorzüge der beiden Verfahren in ausgeprägten klimatischen Stresssituationen werden sich erst dann erweisen können.

1 Einleitung

Technologien zur sicheren Ortung und Steuerung von Fahrzeugen und Maschinen bieten vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten im Ackerbau („precision farming“). Mit hoch präzisen satellitengestützten Ortungssystemen können Fahrwege von Landmaschinen und Lockerungsstränge von Bodenbearbeitungswerkzeugen exakt dokumentiert und jederzeit wieder lokalisiert und angesteuert werden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit zwei Verfahren, die mit diesen Technologien anwendbar werden: (1) das Regelspurverfahren, international als CTF (Controlled Traffic Farming gegenüber Random Traffic Farming) bekannt und (2) die Streifenbearbeitung (Strip Tillage oder Strip Till).

Das Regelspurverfahren ist nichts anderes als ein Beet-System. Fahrspuren und Wuchsfläche werden getrennt und zwar für alle Arbeitsgänge auf dem Feld. Spurweiten und Arbeitsbreiten der Landmaschinen müssen aufeinander abgestimmt sein. Jeder Arbeitsgang erfolgt mit automatischer Spurführung. Im strengen Regelspurverfahren werden speziell angepasste Fahrzeuge und Geräte mit großer Spurweite und schmalen Reifen eingesetzt, die Fahrspur ist frei von Bewuchs und bleibt unter einem Flächenanteil von etwa 15 %.

Werden Landmaschinen mit üblichen Spurweiten und Reifendimensionen verwendet, steigt der Spurflächenanteil auf über 30 %, die Fahrspurtrassen werden bewirtschaftet. In jedem Fall wird auf die Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug verzichtet, dessen Arbeitsbreite ist zu gering.

Bei der Streifenbearbeitung werden Kulturen mit größeren Reihenabständen in zuvor (Herbst oder zeitiges Frühjahr) gelockerte Streifen gesät, auch die mineralische und organische Düngung kann in diese Streifen eingebracht werden. Die Streifenbearbeitung entspricht der Grundbodenbearbeitung, zwischen den Streifen muss der Boden nicht mehr (tief) gelockert werden.

Für beide Verfahren ist die sichere Wiederfindung der linearen Elemente Fahrspur bzw. Lockerungsstrang essenziell. Die Attraktivität der beiden Verfahren beruht nicht allein auf der technischen Machbarkeit. Sie versprechen Vorteile bei Ertragssicherheit, Boden- und Klimaschutz. Auch sind Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch und bei der Bodenbearbeitung zu erwarten (keine Bodenverdichtungen bei CTF, intensive Lockerung nur mehr in der Saatreihe bei Strip Till). Mit verbesserter Bodenstruktur können die Lachgasemissionen sinken.

CTF hat sich in Australien in den letzten Jahren zu einem praxisüblichen Verfahren entwickelt. Unter semiariden Bedingungen besticht dort das Vermögen der nicht mehr mit schweren Maschinen überfahrenen Böden Niederschlagswasser aufzunehmen, zu speichern und den Kulturpflanzen in Trockenperioden zur Verfügung zu stellen. Im gelockerten Streifen des Strip Till Verfahrens sollen dem Keimling optimale Bedingungen für die Jugendentwicklung angeboten werden: Rechtzeitige Abtrocknung und Erwärmung, hohe Nährstoffverfügbarkeit, intakte Bodenstruktur. Gleichzeitig kommen die Bodenschutzeffekte konservierender Bodenbearbeitung zur Geltung, insbesondere ein sehr hohes Maß an Erosionsschutz. Strip Till ist ein in den USA bereits etabliertes Verfahren, das in Deutschland derzeit großes Interesse bei Landwirten, Landmaschinenherstellern und Forschungseinrichtungen findet.

In Bayern herrschen andere klimatische Verhältnisse als in Australien, die Agrarstruktur unterscheidet sich wesentlich von der in den USA. Die Verwundbarkeit des Systems Boden-Pflanze ist aber auch in Bayern auf vielen Standorten mit Blick auf Bodenerosion, Bodenverdichtung und Hitzeperioden in der Vegetationszeit hoch. Die Anbaufläche von Kulturarten mit hohem Erosionsrisiko nimmt zu. Der Klimawandel lässt vermehrt Witterungsextreme erwarten. Es besteht deshalb Bedarf, innovative Bewirtschaftungsmethoden zu testen bzw. zu adaptieren. In einem vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geförderten laufenden Forschungsprojekt prüft die LfL, ob CTF und Strip Till unter bayerischen Anbaubedingungen funktionieren, welche technischen und pflanzenbaulichen Probleme auftreten können, wie diese mit Verfahrens Anpassungen zu lösen sind und ob die erwarteten Effekte bei Wassereffizienz und im Ressourcenschutz eintreten. Das Forschungsprojekt der LfL startete mit dem Erntejahr 2009 und endet zunächst Ende 2011. Eine Weiterführung ist in der Planungsphase.

In den von der LfL angelegten Feldversuchen werden die beiden Verfahren CTF und Strip Till teilweise kombiniert, um Synergieeffekte zu nutzen. Grundsätzlich handelt es sich aber um zwei eigenständige Verfahren mit durchaus unterschiedlichem spezifischen Anwendungsfokus.

2 Stand des Wissens

2.1 Permanente Fahrwege (CTF)

Erste Versuche mit konsequenten Regelfahrspurverfahren wurden in den 1970er und 1980er Jahren im **Feldgemüsebau in den Niederlanden** mit Breitspurträgerfahrzeugen, sog. „Gantries“ durchgeführt. Die erwarteten Verbesserungen bei Bodenstruktur und Kraftstoffverbrauch traten ein (Lamers et al. 1986), wegen zahlreicher technischer Probleme konnte das Verfahren aber nicht in der Praxis etabliert werden.

In jüngster Zeit widmet sich die Forschung wieder zunehmend diesem Thema (Tullberg 2010, 2008, Reeder 2002). Leistungsfähige Traktoren, Bestellsysteme mit sechs, neun und zwölf Metern Arbeitsbreite und Erntemaschinen mit identischen Schnittbreiten eröffnen zusammen mit GPS basierten Lenksystemen die Möglichkeit, Regelfahrspurverfahren erfolgreich zu realisieren.

Im extensiven Getreideanbau in den **Trockengebieten Australiens** mit verdichtungsempfindlichen Böden hat sich CTF mit einer Anbaufläche von mehreren Mio. Hektar von ersten Anfängen 1990 bis heute zu einem Standardverfahren etabliert (Tullberg et al. 2007, Department of Agriculture 2004). Wissenschaftliche Untersuchungen belegen eine erhöhte Wasserinfiltration, ein voll funktionsfähiges Bodengefüge, eine verminderte Erosionsanfälligkeit, verbesserte Feldaufgänge, eine intensivere Durchwurzelung und dadurch stabilere und höhere Erträge (Kingwell & Fuchsbichler 2011, Tullberg et al. 2007, Li et al. 2004 a,b). Bowman (2008) verweist auf die hohe Wirtschaftlichkeit von CTF unter australischen Bedingungen.

Positive Effekte hinsichtlich Wassereffizienz, Erosionsschutz und Ertragsbildung wurden auch in den trockenen Lössgebieten Nord-Chinas dokumentiert (Qingjie et al. 2009).

Derzeit untersuchen Forschungsgruppen in Großbritannien, der Schweiz, der Slowakei, der Tschechischen Republik, den Niederlanden, Deutschland und Dänemark (dort mit Schwerpunkt Ackergras) wie sich Regelfahrspurverfahren unter **west- und mitteleuropäischen Verhältnissen** (Boden, Klima, Fruchtfolgen, Erträge, Mechanisierung) umsetzen lassen und ob ähnliche Effekte wie in Trockengebieten erzielt werden können. Die europäischen Aktivitäten sind in der ISTRO Working Group „Controlled Traffic Farming“ vernetzt und auf deren Homepage dokumentiert (www.controlledtrafficfarming.com). Zu Teilaspekten liegen Veröffentlichungen vor (Roberts 2011, Holpp et al. 2011, Bochtis et al. 2010, Kroulik et al. 2010, Bommes 2009, Holpp & Anken 2008), umfassende wissenschaftliche Arbeiten auf Basis abgeschlossener Feldversuche sind im europäischen Raum noch nicht veröffentlicht worden.

2.2 Streifenbearbeitung (Strip Till)

Bereits in den Jahren 1984 - 1987 wies Estler (1989) in Untersuchungen in Bayern nach, dass eine streifenweise Bodenbearbeitung entlang der Maisreihe das Problem der langsamen Bodenerwärmung bei der Mulchsaat ohne Saatbettbereitung lösen kann. Wegen des oft feuchten Bodens, der geringen Flächenleistung und der schlechten Bodenanpassung konnte sich die damals praktizierte Frässaat jedoch nicht durchsetzen.

Seit Anfang des neuen Jahrtausends gewinnt insbesondere in den Mais- und Sojaanbaubereichen der USA die Streifenbearbeitung – Strip Till – zunehmend an Bedeutung. Neben Mais und Soja wird das Verfahren auch zu Zuckerrüben und im Baumwollanbau eingesetzt. Zur schnellen Verbreitung hat vor allem die Verfügbarkeit automatischer Lenksysteme für Traktoren beigetragen. Sie sind Voraussetzung dafür, dass die Saatgutablage sicher in den vorgelockerten Bereichen erfolgt. Dazu ist eine absolute Genauigkeit von mindestens +/- 5 cm notwendig, da die bearbeiteten Streifen nur 20 - 25 cm breit sind. Diese Genauigkeit kann mit Lenksystemen mit Realtime Kinematik Differential GPS (RTK-DGPS) erreicht werden. Die in den USA überwiegend eingesetzten Geräte zur Streifenlockerung sind im Kapitel 3 Methodik beschrieben, da diese Technik auch auf den Feldversuchen der LfL eingesetzt wird.

Die Beweggründe der nordamerikanischen Farmer, Strip Till anzuwenden, waren – neben der technischen Machbarkeit – stagnierende Erträge bei der verbreitet praktizierten Direktsaat (No Till). Vorzüge von No Till, nämlich hervorragender Erosionsschutz und Konservierung der Bodenfeuchte, werden auch mit Strip Till erreicht (Licht & Al-Kaisi 2005). Gegenüber Direktsaat punktet Strip Till jedoch mit schnellerer Bodenerwärmung und höherer biologischer Aktivität in den Lockerungssträngen, besserer Keimung und summa summarum höheren Erträgen (Overstreet & Hoyt 2008, Morrison 2002). Nash (2010) untersuchte die N₂O-Emissionen bei verschiedenen Bodenbearbeitungsvarianten, tendenziell waren die Lachgasemissionen in der Vegetationsperiode bei Strip Till („deep banded N treatments“) im Vergleich zu No Till („surface broadcast N treatments“) niedriger. In einer anderen aktuellen Studie (Omonode et al. 2011) wurden bereits bei No Till Varianten geringere kumulative N₂O-Emissionen festgestellt als bei Grundbodenbearbeitung mit Pflug oder Grubber, eine Strip Till Variante war in diesen Untersuchungen nicht vorhanden.

Auch in **Deutschland** ist die Streifenbearbeitung in den letzten Jahren auf großes Interesse bei Forschung, Landtechnikfirmen, Beratern und Landwirten gestoßen. Es liegen zahlreiche, überwiegend in der landwirtschaftlichen Fachpresse veröffentlichte Berichte über Ergebnisse und Erfahrungen mit Streifenbearbeitung vor. Die ersten Untersuchungen wurden ab 2007 auf dem Ihinger Hof (Universität Hohenheim) mit Zuckerrüben durchgeführt (Hermann 2008) und ab 2009 auf Mais ausgedehnt (Hermann et al. 2010). Hermann konnte bestätigen, dass sich der Boden im gelockerten Streifen schneller erwärmt als bei der Mulchsaat ohne Saatbettbereitung, wobei der bereinigte Zuckerertrag im Mittel der drei Versuchsjahre 12 % höher war als bei der Mulchsaat (ohne Saatbettbereitung).

Schneider et al. (2009) stellen das große Potential der Streifenbearbeitung beim Erosionsschutz in mitteldeutschen Lösslandschaften heraus, während Kowalewsky (2009) in Niedersachsen eine positive Ertragsreaktion bei einer streifenweisen Einarbeitung der Gülle vor der Saat feststellte.

Im Fokus stehen in Deutschland die klassischen Reihenkulturen Mais und Zuckerrüben, aber auch Raps in weiter Reihe. Besonderes Interesse findet die Verknüpfung der Streifenbodenbearbeitung mit Reihen- bzw. Unterfußdüngung.

3 Methodik

3.1 Betriebe und Standorte

Mit drei landwirtschaftlichen Betrieben wurde eine Kooperation vereinbart, um auf deren Flächen Feldversuche anlegen zu können. Die Betriebe liegen (1) im Landkreis Eichstätt (Fränkische Alb zwischen Donau und Altmühl), (2) im Landkreis Neuburg-Schrobenhausen (Albanstieg in Donaunähe) und (3) im Landkreis Pfarrkirchen (Tertiärhügelland). Die Betriebe 1 und 2 sind viehlose Marktfruchtbetriebe mit Winterweizen, Raps, Zuckerrüben und z. T. Winterroggen. Betrieb 3 betreibt Bullen- und Hähnchenmast und baut Winterweizen, Raps und Mais an.

Die drei Betriebe brachten wesentliche Voraussetzungen für die Durchführung der Versuche mit: pfluglose Bodenbearbeitung, Erfahrungen mit GPS-Ortung und automatischen Lenksystemen sowie Interesse an einer Weiterentwicklung ihres Ackerbaumanagements in Richtung Streifenbearbeitung oder Regelspurverfahren. Aufbauend auf die bereits vorhandene Technik wurden alle relevanten Schlepper und die Erntemaschinen - soweit noch nicht geschehen - mit hochgenauen Lenksystemen (RTK DGPS) aus- bzw. aufgerüstet. Dabei kamen sowohl Lenksysteme zum Einsatz, die direkt in die Lenkhydraulik eingreifen als auch universelle Nachrüstlösungen (für ältere Fahrzeuge). Lediglich die selbstfahrenden Rübenroder (Betriebe 1 und 2) wurden weiterhin manuell gelenkt, da der Erntevorgang ohnehin an die vorhandenen, mit Lenksystem gesäten Rübenreihen gebunden ist.

Die klimatischen Bedingungen für die Betriebe 1 und 2 (Fränkische Alb) werden durch die LfL-Wetterstation Häringhof bei Eichstätt charakterisiert (ca. 8 km von Betrieb 1 beziehungsweise ca. 18 km von Betrieb 2 entfernt). In den Jahren 2009 und 2010 lagen die Jahresniederschlagssummen bei 804 mm bzw. 768 mm, die Jahresdurchschnittstemperaturen betragen 8,7° bzw. 7,5°C. Bei Betrieb 3 (Tertiärhügelland) fällt etwas mehr Niederschlag (2009: 890 mm; 2010: 804 mm) bei etwas höheren Temperaturen (8,9° bzw. 8,1°C), siehe LfL-Wetterstation Reith.

Die Böden der Versuchsflächen sind durchwegs tiefgründig und durch Lößlehm beeinflusst. Bodenart ist schluffiger bis schwach toniger Lehm (Lu, Lt2) bei Betrieb 1, mittel schluffiger Ton bis sandig toniger Lehm (Tu3, Lts) bei Betrieb 2 und mittel sandiger Lehm (Ls3) bei Betrieb 3.

3.2 Feldversuche

3.2.1 Permanente Fahrwege (CTF)

Um ein konsequentes Regelspursystem realisieren zu können, wurde für jeden Versuchsbetrieb ein Fahrspursystem mit den jeweilig verfügbaren Maschinen und Geräten entwickelt. Zu berücksichtigen waren dabei die Arbeitsbreiten der Schlüsselmaschinen (Bodenbearbeitung, Saat, Ernte), die Spurweiten aller Landmaschinen und die Breite der Reifen. Ergebnis sind unterschiedliche Befahrungssysteme mit folgenden Arbeitsbreiten: 5,4 m (Betrieb 1), 6,0 m (Betrieb 2) und 4,5 m (Betrieb 3). Alle Arbeitsgänge (Bodenbearbeitung, Aussaat, Ernte) wurden mit diesen Arbeitsbreiten durchgeführt. Die Düngung und der Pflanzenschutz erfolgten ebenfalls passend zur vorgegebenen Arbeitsbreite. Daraus resultierte dann der (theoretisch) realisierbare Anteil an nicht mehr überrolltem Boden bei den Mähdruschfrüchten: 67 % bei Betrieb 1, 58 % bei Betrieb 2 und 66 % bei Betrieb 3.

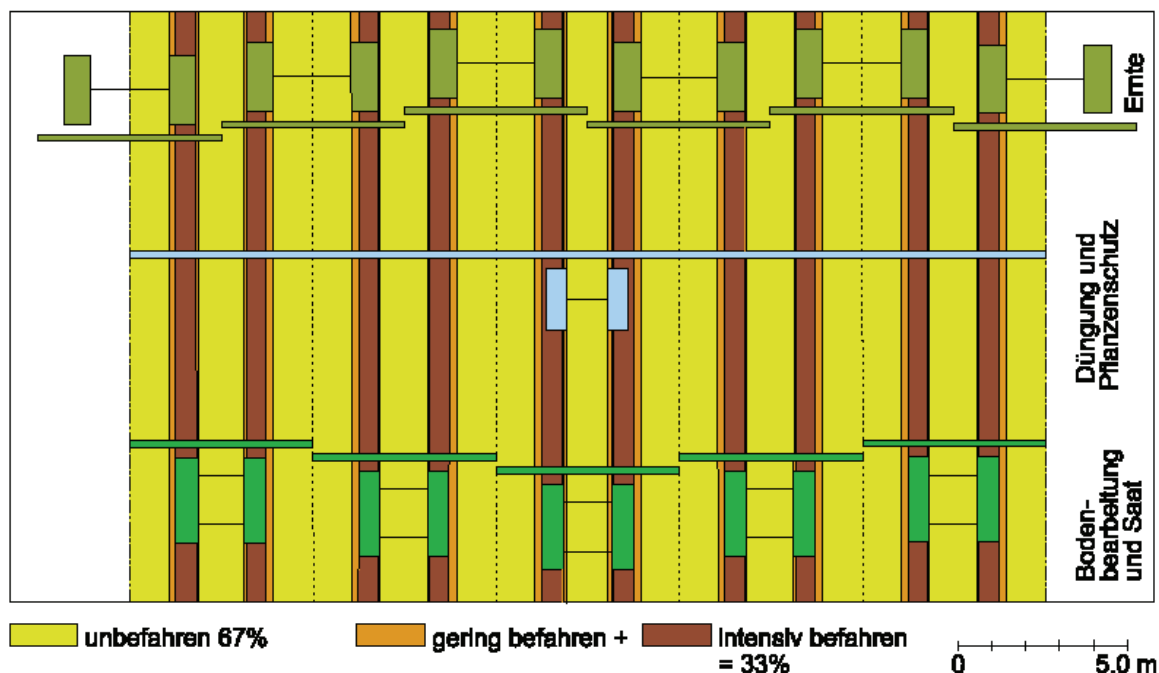


Abb. 1: Schematische Fahrspuren (Mähdruschfruchtfolge Betrieb 1)

Abb. 1 zeigt exemplarisch den Plan für den Betrieb 1 mit 67 % nicht mehr überrollter Fläche in der Mähdruschfruchtfolge. Bei den Flächen mit Zuckerrübenanbau sinkt der unbefahrene Anteil deutlich, weil die Arbeitsbreite des Roders nur 2,7 m (6 Reihen) beträgt und so zu den vorhandenen Fahrspuren zusätzliche Spuren erzeugt werden.

Die Abbildung zeigt, dass Schlepper und Erntemaschine (Mähdrescher) nicht in derselben Spur fahren (können), sondern um eine halbe Spur versetzt. Dies liegt daran, dass Erntemaschinen in Deutschland deutlich größere Außenbreiten und damit auch Spurweiten aufweisen dürfen als Schlepper (3,5 m gegenüber 2,5 m). Durch den halben Versatz laufen die Reifen des Schleppers jeweils in den Spuren zweier benachbarter Mähdrescherspuren. Dieser Ansatz stößt bei Arbeitsbreiten ab ca. 6 m an seine Grenzen, weil die benachbarten Spuren vom Mähdrescher dann für die klassischen Spurweiten der Schlepper zu weit auseinander liegen. In den eigenen CTF-Feldversuchen wird also das klassische, in Australien realisierte CTF-System mit dort speziell angepassten Fahrzeugen (größere Spurweite, schmale Reifen) modifiziert, weil hier nur von der Zulassungsbehörde genehmigte, am Markt verfügbare Landtechnik eingesetzt wird. Spuranteile im Bereich von 15 % wie in Australien sind so nicht erreichbar. Die Frage, wie Erträge und Bodenfunktionen in den überrollten Trassen reagieren, muss also intensiv untersucht werden.

3.2.2 Streifenbearbeitung (Strip Till)

In den Strip Till Versuchen kommen zur Streifenlockerung zwei unterschiedliche Werkzeugkombinationen aus den USA zum Einsatz. Zu Projektbeginn war diese Technik in Europa nicht verfügbar. Die Werkzeugkombinationen bestehen aus vorauslaufenden Schneidscheiben zum Trennen des organischen Materials und einem Paar Räumsternen, die wie ein Schneepflug alles Pflanzenmaterial aus dem ca. 20 cm breiten Bearbeitungsbe- reich entfernen. Die eigentliche Lockerung erfolgt bis in eine Tiefe von 15 - 20 cm in Variante 1 mittels eines Meißelschars, wobei ein Paar Hohl-scheiben verhindert, dass die auf-

geworfene Erde aus dem Lockerungsbereich herausgeworfen wird. In Variante 2 werden V-förmig angestellte und gewellte Scheibenseche zur Lockerung eingesetzt. Den Abschluss bildet jeweils eine Art Krümelwalze, welche die aufgeworfene Erde etwas zerkleinern und rückverfestigen soll. Die Werkzeugkombinationen sind Parallelogramm geführt und weisen Gewichte zwischen 150 und 300 kg pro Reihe auf. Sie werden an in Deutschland eigens gefertigte 3 – 6 m breite Geräterahmen montiert.

Auf den Marktfruchtbetrieben 1 und 2 wurden mit den beiden unterschiedlichen Lockerungsaggregaten (Scheiben und Zinken) Streifen in 45 bzw. 50 cm Abstand für die Rübensaat angelegt. Die Lockerung erfolgte im Herbst direkt in die Getreidestoppeln der Vorfrucht oder nach einem Grubberstrich zur Stoppelbearbeitung mit Zwischenfruchtaussaat. Ohne weitere Vorarbeit erfolgte die Rübensaat mit Scheibensägeräten in die Lockerungsstreifen. Um die erzeugten Lockerungsstreifen exakt zu treffen, wurden die Spuren beim Lockern aufgezeichnet, an den Säscherlepper mit Speicherkarte übertragen und wieder exakt abgefahren.

Auf Betrieb 3 wurde die Streifenbearbeitung im Frühjahr mit der Ausbringung von 20 - 25 m³/ha Gülle etwa 14 Tage vor der Maissaat kombiniert. Dazu wurde an den Heckkraftheber des Güllefasses ein 4,5 m breiter Geräterahmen mit 6 Werkzeugeinheiten gekoppelt. Auch hier wurden die beiden unterschiedlichen Werkzeugeinheiten verglichen. Die Streifenlockerung erfolgte wie bei Rüben entweder direkt in die Getreide- bzw. Rapsstoppeln oder nach einem Grubberstrich im Herbst. Die Streifenbearbeitung im Herbst, die sich bei den Rüben bewährt hat, kommt wegen der gleichzeitigen Ausbringung von Gülle nicht in Betracht.

3.3 Boden und Pflanze

3.3.1 Bodenwasserhaushalt

Wesentliche Versuchsfrage ist die Prüfung, ob und wie weit im CTF-System der Bodenwasserhaushalt verändert wird. Etwaige Änderungen würden auf Veränderungen der Bodenstruktur zurückgehen. Als Untersuchungsschwerpunkt werden deshalb während der Vegetationsperiode kontinuierlich Saugspannungen im Boden gemessen. Ergänzend dazu werden in 2011 Messungen des Eindringwiderstands und der Lagerungsdichte (Trockenrohddichte) vorgenommen.

Die Saugspannung ist ein Maß dafür, wie fest Wasser an die Bodenporen gebunden ist. Enge Poren binden das Wasser stärker als weite Poren. Je fester das Wasser im Boden gebunden wird, umso mehr Energie muss die Pflanze aufbringen, um es aus dem Boden zu bekommen. Je feuchter der Boden ist, desto weniger stark ist das Wasser gebunden und umso niedriger ist die Saugspannung.

Die Saugspannungen im Boden werden an den drei Standorten mit Equitensiometern bestimmt. Die Sensoren sind mit porösen Keramikkörpern mit bekannter Wassergehalt/Wasserspannungsbeziehung ausgestattet. Je nach Bodenfeuchte stellt sich in den Equitensiometern ein bestimmter Wassergehalt ein, der aufgrund dieser bekannten Beziehung in den entsprechenden Saugspannungswert umgerechnet wird (Internet 1). Alle Equitensiometer sind mit Quarzmehl eingeschlämmt, um den Kontakt vom Boden zum Sensor zu gewährleisten.

Am Betrieb 1 sind im Abstand von ca. 90 m jeweils zwei Messstellen errichtet. Dort wird jeweils in den beiden benachbarten Teilschlägen mit verschiedenen Feldfrüchten gemessen. An jeder Messstelle sind die Sensoren im befahrenen und unbefahrenen Bereich in 15 cm, 37,5 cm und 60 cm Tiefe vergraben. Der horizontale Abstand der Sensoren untereinander beträgt 50 cm. An der ersten Messstelle am Betrieb 1 sind in 15 cm Tiefe drei Equitensiometer installiert, um ein Bild über die kleinräumliche Variabilität der Werte zu bekommen. Die Platzierung der Equitensiometer erfolgte am Betrieb 3 wie an Betrieb 1, jedoch wurden drei Messstellen im Abstand von ca. 25 m errichtet. Auch an Betrieb 2 wurden drei Messstellen aufgebaut mit einem Abstand von ca. 60 m. Hier ist die Sensoranzahl halbiert, weil auf dem Versuchsfeld nur eine Feldfrucht angebaut wird.

Die Saugspannungsdaten werden von Datenloggern aufgezeichnet und können über Modem fernabgefragt werden. Zusätzlich zur Saugspannung werden in der Vegetationsperiode vor Ort die Niederschläge erfasst und mit den Daten der jeweils nächstgelegenen Wetterstation abgeglichen.

An den Versuchsstandorten sind aus allen Messtiefen auch Bodenproben entnommen worden, um die Textur und die pF-Kurven (Wassergehalt bei bestimmten Wasserspannungen) zu bestimmen.

3.3.2 Erträge und ertragsbildende Parameter

Zur Überprüfung der zu erwartenden Unterschiede hinsichtlich der Erträge im befahrenen und unbefahrenen Bereich des CTF-Systems wurden jeweils 10 Ernteproben beim Getreide aus dem Fahrspurbereich (nicht aus Spurschächten bzw. Fahrgassen) und dem spurfreien Bereich genommen und stationär gedroschen. Beim Raps ist eine derartige Probenahme wegen der starken Verzweigung der Pflanzen nicht durchführbar. Als Indiz für die Ertragserwartung wurden deshalb zu Beginn der Blüte Wurzelmasse und Hauptwurzellänge durch Ausgraben, Vermessen und Verwiegen ermittelt.

Im Teilbereich Strip Tillage werden bei Zuckerrüben und Körnermais die jeweiligen Varianten mit der betriebsüblichen (mulchenden) Bestellung verglichen. Bei den Rüben wurden dazu mittels Handernte 10 m² in vierfacher Wiederholung beerntet. Die beerntete Fläche umfasste jeweils ca. 25 % befahrene und 75 % unbefahrene Fläche. Ermittelt wurden sowohl der Rohertrag als auch die üblichen Parameter wie bereinigter Zuckertrag oder rel. Zuckergehalt. Beim Körnermais wurde ebenfalls eine Handbeerntung (Kolben) mit je 1,5 m² durchgeführt. Hier wurde zwischen dem befahrenen und unbefahrenen Bereich unterschieden und es wurden getrennt jeweils 10 Wiederholungen beerntet. Anders als bei Rüben wird vor Mais im Frühjahr Gülle ausgebracht; dabei können Bodenverdichtungen entstehen, die in den betroffenen Maisreihen Unterschiede im Feldaufgang und in der Ertragshöhe erwarten lassen.

4 Bisherige Ergebnisse

Die Untersuchungen aus dem 3-jährigen Projekt waren bei Redaktionsschluss nicht abgeschlossen, einige Daten auch noch nicht ausgewertet. Folgend werden exemplarisch Ergebnisse aus dem Projekt präsentiert, ohne den Anspruch auf eine umfassende Berücksichtigung oder Bewertung der in verschiedenen Kategorien erhobenen Daten erheben zu wollen.

4.1 Technik

Die im Feldversuch eingesetzten automatischen Lenksysteme haben im Versuchszeitraum zuverlässig und hinreichend präzise funktioniert.

Das **Controlled Traffic Farming** Verfahren kann die erwarteten positiven Effekte nur dann entfalten, wenn der Befahrungsplan strikt eingehalten wird. Damit sind Einschränkungen im sonst üblichen Betriebsablauf verbunden. Ein Wechsel in den Arbeitsbreiten bei einzelnen Arbeitsgängen ist kaum möglich. Ein Austausch von einzelnen Maschinen oder die Durchführung von Arbeitsgängen von unterschiedlichen Lohnunternehmern muss gut geplant werden. Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung ist also der ausgesprochene Wille des Betriebsleiters, auf möglicherweise bisher übliche Flexibilität bei der Arbeitserledigung zu verzichten.

Die im **Strip Till** Versuch eingesetzten Lockerungsgeräte zweier Hersteller aus den USA erfüllten ihren Zweck sehr gut. Der Herbst Einsatz auf trockenem Boden scheint vor allem auf tonigeren Standorten der Frühjahrslockerung überlegen zu sein. Zur Vorzüglichkeit bestimmter Arbeitswerkzeuge unter bestimmten Voraussetzungen (Witterung, Boden, zu säende Kultur) kann derzeit noch keine Empfehlung gegeben werden. Bei der Lockerung im Frühjahr unmittelbar bzw. ca. 2 Wochen vor der Saat ist es besonders wichtig, dass der Boden gut krümelnd ist. Der Einsatz von Einzelkornsäegeräten auf sehr klutigen Streifen oder auf unvollständig geschlossenen Schlitzen, die von den Lockerungszinken her stammen, kann problematisch sein und hat zum Teil zu niedrigeren Feldaufgängen geführt.

4.2 Pflanzenbau

4.2.1 Getreideertrag im CTF System

Beim Getreideertrag gab es in den beiden Versuchsjahren unterschiedliche bzw. keine eindeutigen Ergebnisse. Während im aktuellen Erntejahr keine Unterschiede zwischen dem befahrenen und dem unbefahrenen Bereich hinsichtlich der Ertragshöhe nachzuweisen waren stellte sich im Erntejahr 2010 zumindest auf Betrieb 1 (Abb. 2) im unbefahrenen Bereich ein deutlich höherer Ertrag ein.

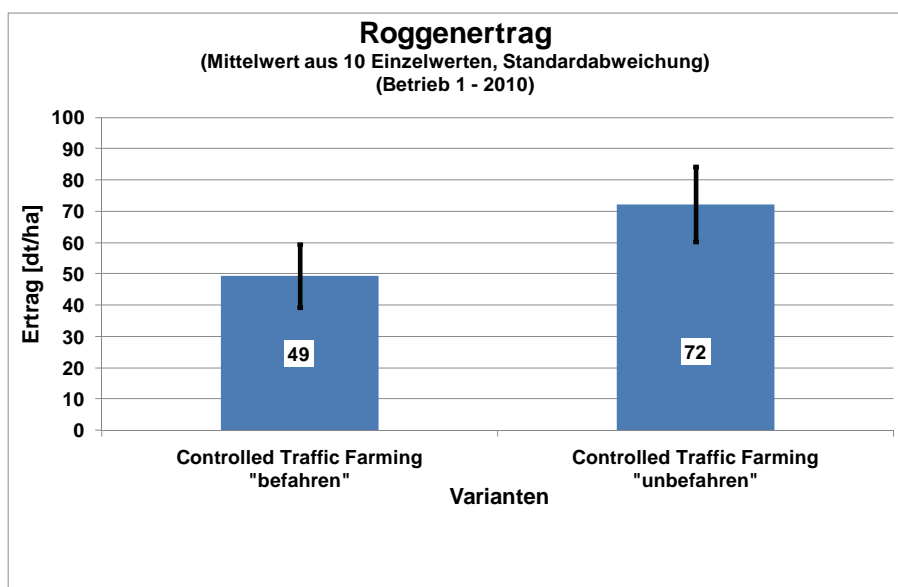


Abb. 2: Roggenertrag CTF – befahrener gegenüber unbefahrener Bereich (Betrieb 1)

Auf dem Versuchsfeld von Betrieb 2 (Abb. 3) lag der Ertrag 2010 in der Fahrtrasse tendenziell über dem Ergebnis im unbefahrenen Bereich. Die Gründe für die geringe und in ihrer Richtung nicht erwartete Differenzierung zwischen befahren und unbefahren sind nicht vollständig nachvollziehbar. Belastbare Ergebnisse müssen auf mehrjährigen Ertragsmessungen basieren.

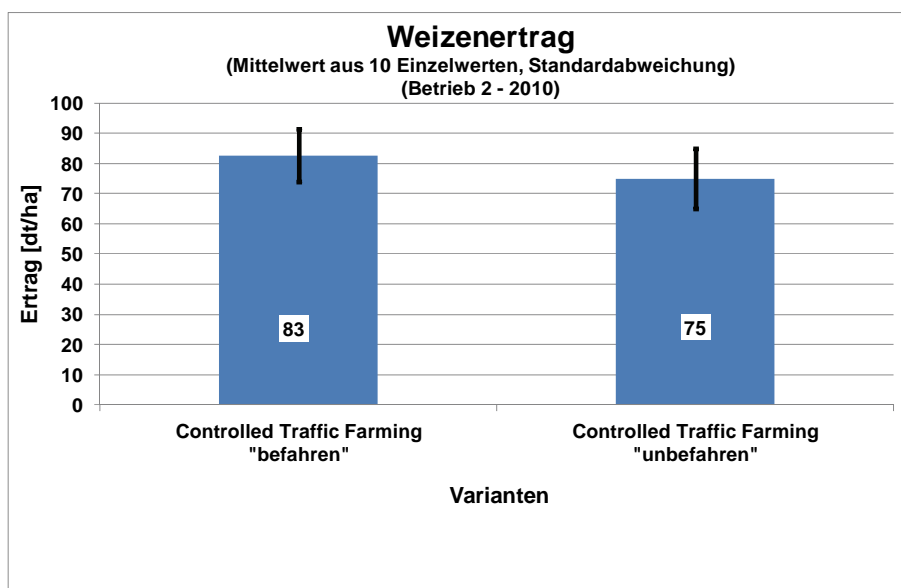


Abb. 3: Weizenertrag CTF – befahrener gegenüber unbefahrener Bereich (Betrieb 2)

4.2.2 Erträge Streifenlockerung bei Zuckerrüben und Mais

Abb. 4 zeigt die Rübenenertragsparameter der unterschiedlichen Lockerungsvarianten im Vergleich zur betriebsüblichen Mulchsaat bei Betrieb 1 im Jahr 2010. Hier und auch bei Betrieb 2 lag der Ertrag der meisten Strip Till Varianten etwa auf dem Niveau der Kontrollvariante. Lediglich die Parzellen mit Lockerung direkt in die Stoppeln der Getreidevorfrucht (also ohne jegliche flächige Bodenbearbeitung) erzielten zumeist niedrigere Erträge. Unzureichende Strohverteilung, der Verzicht auf Stoppelbearbeitung und verschärfte Schneckenproblematik verursachten einen lückigen Feldaufgang der Rüben.

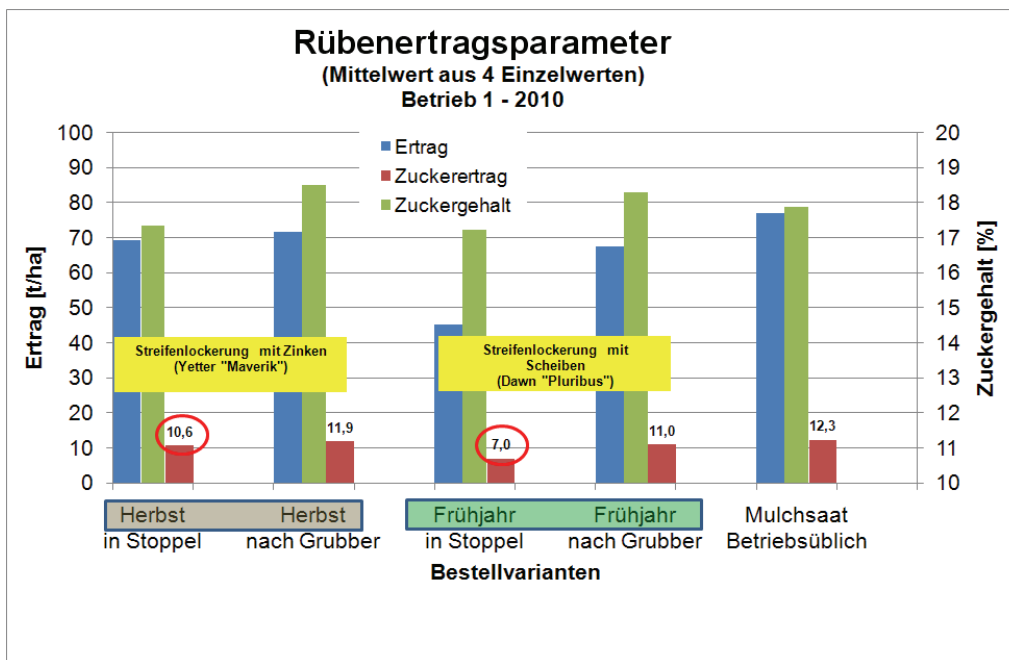


Abb. 4: Rübenertragsparameter Strip Till Varianten (Betrieb 1)

Bei **Mais** (Betrieb 3) konnte weder zwischen den Strip Till Varianten noch im Vergleich mit dem betriebsüblichen Verfahren Ertragsunterschiede festgestellt werden (Abb. 5). Die Sensitivität der Rüben bei einem Verzicht auf die Stoppelbearbeitung war also bei Mais nicht vorhanden. Lediglich der Ertrag in den Spuren (14 m³ Güllefass!) war, zumindest in 3 der 4 Varianten, etwas niedriger als in den Bereichen ohne Spur.

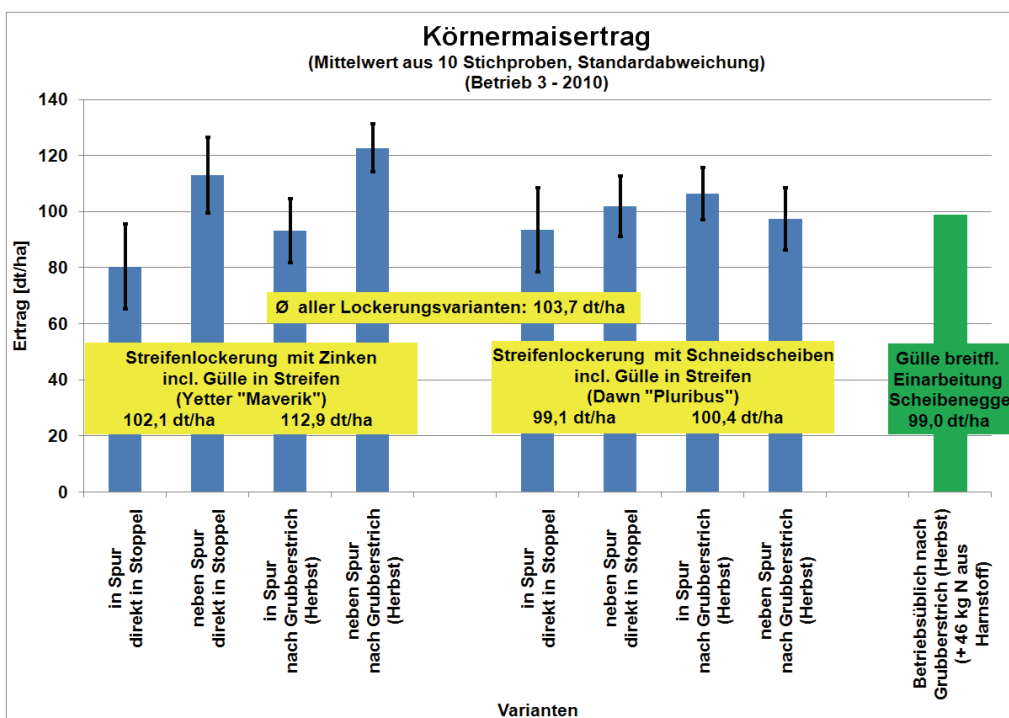


Abb. 5: Körnermaiserträge der unterschiedlichen Strip Till Varianten im Vergleich zur betriebsüblichen Bestellung (Betrieb 3)

4.3 Boden

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen exemplarisch den Niederschlag und die Saugspannungsverläufe von Mai bis August 2011 an einem Messpunkt in zwei verschiedenen Tiefen unter Zuckerrüben am Betrieb 1. Erwartungsgemäß folgt die Saugspannung dem Niederschlag und der damit verbundenen Feuchte im Boden. Die Werte fallen nach Niederschlägen stark ab, was beispielsweise Ende Mai und Ende Juni besonders augenfällig ist, und steigen in niederschlagsfreien Perioden an.

In 15 cm Tiefe unterscheiden sich befahrener und unbefahrener Bereich kaum, ab Mitte Juni ist der unbefahrene Bereich tendenziell etwas trockener als der befahrene. Die Schwankungen ab diesem Zeitpunkt lassen sich durch starke Verdunstung in dem durchwurzelten Bereich erklären. In 60 cm Tiefe ist der Saugspannungsverlauf ausgeglichener, da Verdunstung und Durchwurzelung dort stark eingeschränkt sind. Dadurch ist es in dieser Tiefe insgesamt feuchter als in 15 cm, was durch die durchgängig niedrigere Saugspannung zum Ausdruck kommt. Allerdings ist in größerer Tiefe der befahrene Bereich trockener und weist höhere Saugspannungen auf als der unbefahrene.

Allgemein spiegelt gerade die Abbildung aus 60 cm die Tendenz an den anderen Messpunkten und den anderen Standorten, wo auch in 15 cm Tiefe der unbefahrene Bereich niedrigere Saugspannungen aufweist als der befahrene. Dies entspricht auch den Erwartungen, nach denen sich die Wassersleitfähigkeit im unbefahrenen Oberboden erhöht und somit mehr Wasser in den Unterbodenspeicher einsickern kann. Die an anderen Standorten gemessenen Unterschiede sind aber nicht immer so deutlich. Längerfristige Aufzeichnungen sind nötig, um die Wirkungen von CTF auf den Boden zu belegen. Überraschend ist, dass sich die Fahr-Effekte über den kurzen Beobachtungszeitraum schon abzeichnen, und dass vor allem in 60 cm Tiefe ein Trend durch die unterschiedliche Befahrung erkennbar ist.

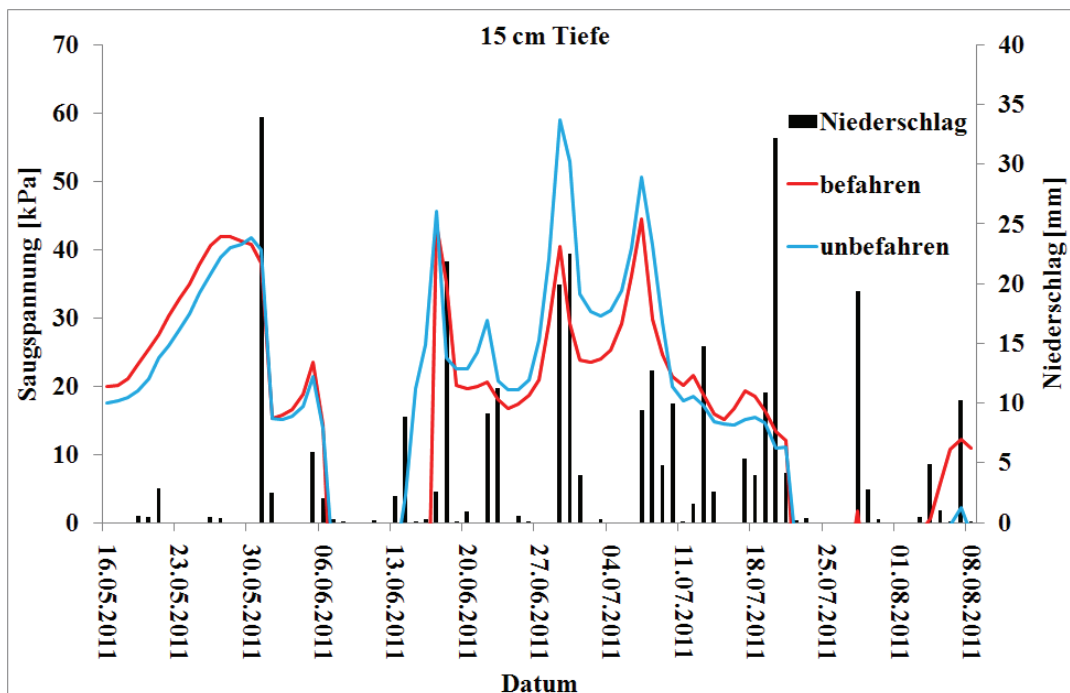


Abb. 6: Saugspannungen über die Zeit in 15 cm Tiefe im unbefahrenen vs. befahrenen Bereich, Betrieb 1.

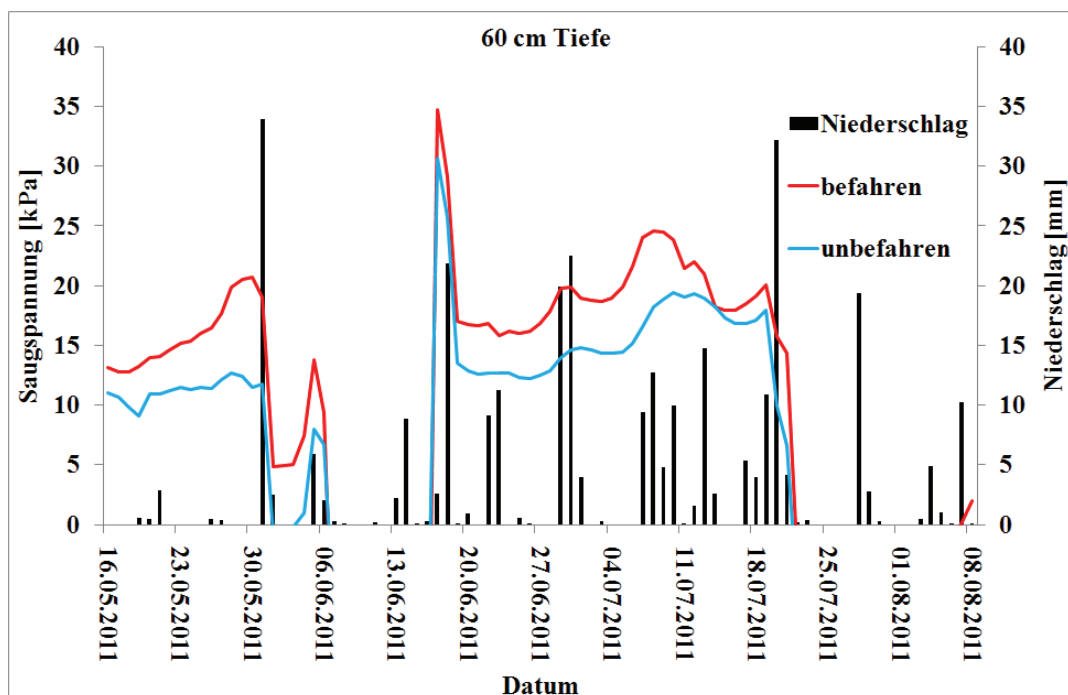


Abb. 7: Saugspannungen über die Zeit in 60 cm Tiefe im unbefahrenen vs. befahrenen Bereich, Betrieb 1.

5 Diskussion

Die bisherigen Ergebnisse der Feldversuche zeigen, dass die notwendigen technischen Instrumente für Controlled Traffic Farming und Strip Tillage in bayerischen landwirtschaftlichen Betrieben grundsätzlich funktionsfähig sind.

In Deutschland ist derzeit ein **CTF-System** nur mit marktüblichen Maschinen und Geräten realisierbar, was einen vergleichsweise hohen Anteil an befahrener Fläche nach sich zieht. Den Anteil der unbefahrenen Fläche so gering wie möglich zu halten gelingt nur durch Steigerung der Arbeitsbreiten und Abstimmung aller Spurweiten. Wie die Erträge insgesamt auf diese Bedingung reagieren, kann nach 3 Projektjahren noch nicht beurteilt werden, genauso wenig wie die Reaktion auf ausgeprägte Trockenheit, wie sie von den Klimaforschern prognostiziert wird.

Herausforderung für den Betriebsleiter ist einerseits die notwendige Abstimmung der Arbeitsbreiten und Spurweiten aller eingesetzten Maschinen und Zugschlepper, andererseits die konsequente Durchsetzung des trassengebundenen Fahrverkehrs. In Zuckerrübenbetrieben ist ein CTF-System derzeit nicht sinnvoll realisierbar, die üblichen Köpfrödebunker mit Hundegang überrollen nahezu das gesamte Feld, auch die in Betrieb 1 eingesetzte Rodetechnik ohne Hundegang belegt einen zu großen Feldanteil mit Spuren.

Die Effekte des „Nicht-Mehr-Befahrens“ auf den Bodenwasserhaushalt sind bisher vielversprechend, eine verbesserte Wasseraufnahme- und Wasserspeicherfähigkeit scheint sich abzuzeichnen. Die Böden wären damit wie erwartet für Trockenperioden gut gerüstet.

Weniger Bodenverdichtungen müssten mit weniger Kraftaufwand für deren Lockerung durch Bodenbearbeitung verbunden sein. Wie bei den Erträgen steht eine Bilanz mit Integration des befahrenen Bereichs noch aus. Mit verbesserter Bodenstruktur sollten auch verringerte Lachgasemissionen einhergehen. Entsprechende Messungen wären sehr sinnvoll, wenn sich der Trend im Bodenwasserhaushalt bestätigt.

Von einer Praxisreife des Verfahrens sollte noch nicht gesprochen werden, dazu sind weitere Feldversuche und Praxiserfahrungen notwendig.

Die bisherigen Ergebnisse zum **Strip-Till-Verfahren** zeigen Ertragsgleichheit gegenüber der auf den Betrieben üblichen Mulchsaat mit Saatbettbereitung. Erwartet würden grundsätzlich durchaus höhere Erträge, da im Lockerungsstreifen Keimbedingungen und Jugendentwicklung optimiert werden. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die 3 Betriebe bisher flächendeckend in Strip Till Tiefe lockerten – wenn auch nicht mit dem Pflug. Ertragsgleichheit spricht also für das Funktionieren des Strip Till Systems. Mehrwert wäre ein verringerter Kraftstoffverbrauch und ein sehr hohes Maß an Erosionsschutz. Grundsätzlich verspricht Strip Till Vorteile für bisher konservierend arbeitende Betriebe aber auch für Betriebe mit situativem Pflugeinsatz.

Von besonderer Bedeutung für viehhaltende oder Biogas-Betriebe ist die Möglichkeit, vor Mais Gülle bei der Lockerung der Streifen zu injizieren. In erosionsgefährdeten Lagen kann so vor Mais auf eine ganzflächige Bodenbearbeitung bzw. Saatbettbereitung verzichtet werden, die das Erosionsschutzniveau durch Gefügelockerung und Einarbeiten von Pflanzenmulch erheblich senkt.

Streifenlockerungsgeräte werden heute in Deutschland angeboten, die Auswahl ist jedoch noch begrenzt. Unsere Aktivitäten zu Strip Till stießen auf breites Interesse bei Beratern und Landwirten, sodass 2010 auf Initiative von Beratern mehrerer Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten verschiedene „Tast- und Schauversuche“ bei Mais angelegt wurden. Das Strip Till Verfahren steht also vor der Praxisreife. In der Feinabstimmung sind noch eine Reihe von Fragen zu klären, wie die standortspezifisch notwendige Lockerungsintensität nach der Vorfrucht, die Wahl des bestgeeigneten Lockerungswerkzeuges und insbesondere die optimale Integration der mineralischen und organischen Düngung.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Bochtis, D. D., Sørensen, C. G., Busato, P., Hameed, I. A., Rodias, E., Green O. and Papadakis, G. (2010): Tramline establishment in controlled traffic farming based on operational machinery cost. *Biosystems Engineering*, Vol. 107, 221-231
- [2] Bommers, Ch. (2009): Immer in der Spur bleiben. *dlz*, Heft 08/2009, 35-39
- [3] Bowman, K. (2008): Economic and Environmental Analysis of Converting to Controlled Traffic Farming. In: 6th Australian Controlled Traffic Farming Conference, 61-68, www.ctfsolutions.com.au/ebm3-doc/132275/Bowman%20Economics.pdf
- [4] Department of Agriculture, Gov. of Western Australia (2004): Tramline Farming Systems – Technical manual, Bulletin 4607, ISSN 1448-0352 www.agric.wa.gov.au/objtwr/imported_assets/content/1we/land/cult/bulletin4607_complete.pdf

- [5] Estler, M. (1989): Landtechnische Maßnahmen zur Verminderung der Bodenerosion bei Reihenfrüchten in Hanglagen. Schriftenreihe des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. 83 S.
- [6] Hermann, W.: Strip-Till: Streifenlockerung bei Zuckerrüben, Raps und Mais - Alternative zur Mulch- und Direktsaat. In: LOP Landwirtschaft ohne Pflug, Heft 7, (2008), 31-34.
- [7] Hermann, W.: Streifenlockerung – eine neue Lösung für Rüben. top agrar, Heft 2, (2010), 62-65.
- [8] Hermann, W., Link-Dolezal, J. und Claupeln, W. (2010): Nur einzelne Streifen lockern – Strip Till – den Boden nur dort lockern, wo Maisreihen stehen. dlz agrarmagazin, Heft 4, 38-41.
- [9] Holpp, M. und Anken, T. (2008): Ackerbau wie auf Schienen. Mulchsaatpraxis, DLG-Mitteilungen, Heft 7/2008, 48-51.
- [10] Holpp, M., Anken, T., Saueter, M., Rek, J., Reiser, R., Zihlmann, U., Oberholzer, H. R., Weisskopf, P., Hensel, O. (2011): Swiss Controlled Traffic Farming Trial – Preliminary Results 2008-2010. In: Precision Agriculture 2011, Czech Centre for Science and Society (ed.), Prag, Czech Republic
- [11] Kingwell, R. and Fuchsbichler, A. (2011): The whole-farm benefits of controlled traffic farming: An Australian appraisal. Agricultural Systems, Vol. 10, 513-521
- [12] Kowalewsky, H.-H. (2009): Geld sparen durch Gülleunterfußdüngung zu Mais. mais, Heft 2/2009, 72-73.
- [13] Kroulik, M., Kviz, Z., Kumhala, F., Hula, J., Loch, T. (2010): Precision Agriculture, 1-17
- [14] Lamers, J. G., Perdok, U. D., Lumkes, L. M. and Klooster, J. J. (1986): Controlled traffic farming systems in the Netherlands. Soil & Tillage Research, Vol. 8, 65-76
- [15] Li, Y. X., Tullberg, J. N., Freebairn, D. M. and C. A. Ciesiolka (2004 a): Effects of controlled traffic and conservation tillage on runoff and crop yield. ASABE Paper No. 041071, 2004 ASAE Annual Meeting, ASABE St. Joseph, MI, USA
- [16] Li, Y. X., Tullberg, J. N. and D. M. Freebairn (2004 b): Infiltration and runoff associated with controlled traffic and soil compaction under simulated rain. ASAE Paper No. 041072, 2004 ASAE Annual Meeting, ASABE St. Joseph, MI, USA
- [17] Licht, M. A., Al-Kaisi, M. (2005): Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. Soil & Tillage Research, Vol. 80, 233-249
- [18] McHugh, A.D., Tullberg, J.N and Freebairn, D.M. (2009): Controlled traffic farming restores soil structure. Soil & Tillage Research, Vol. 104, 164-172
- [19] Morrison, J. E. (2002): Strip Tillage for „No-Till“ Row Crop Production. In: Applied Engineering in Agriculture Vol. 18(3), American Society of Agricultural Engineering, 277-284

- [20] Nash, P. R. (2010): Alternative tillage and nitrogen management options to increase crop production and reduce nitrous oxide emissions from claypan soils. Master Thesis - Faculty of the Graduate School at the University of Missouri-Columbia
- [21] Omonode, R. A., Gál, A., Smith, D. R. and Vyn, T. J (2011): Nitrous Oxide Fluxes in Corn Following Three Decades of Tillage and Rotation Treatments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 75, 125-136
- [22] Overstreet, L. F. and Hoyt, G. D. (2008): Effects of Strip Tillage and Production Inputs on Soil Biology across a Spatial Gradient. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 72, 1454-1463
- [23] Putte, A., Govers, G., Diels, J., Gillijns, K., Demuzere, M. (2010): Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. *European Journal of Agronomy*, Vol. 33, 231–241
- [24] Qingjie, W., Hao, Ch., Hongwen, L., Wenying, L., Xiaoyan, W., McHugh, A.D., Jin, H. and Huanwen, G. (2009): Controlled traffic farming with no tillage for improved fallow water storage and crop yield on the Chinese Loess Plateau. *Soil & Tillage Research*, Vol. 104, 192-197
- [25] Reeder, R. C. (2002): Maximizing Performanc in Conservation Tillage Systems – an Overview. ASAE Paper No. 021134, 2002 ASAE Annual Meeting / CIGR XVth World Congress, ASABE St. Joseph, MI, USA
- [26] Roberts, M. (2011): Ackern auf dem rechten Weg – Controlled Traffic Farming in Großbritannien. *profi*, Heft 7/2011, 70-73
- [27] Schneider, M., Gunstmann, K., Hofmann, B., Wagner, P. und Christen, O. (2009): Vorteile auf erosionsgefährdeten Standorten. *LOP Landwirtschaft ohne Pflug*, Heft 3, 2009, 20-23.
- [28] Tullberg, J. (2010): Tillage, traffic and sustainability - A challenge for ISTRO. *Soil & Tillage Research*, Vol. 111, 26-32
- [29] Tullberg, J. (2008): CTF and Climate Change. In: 6th Australian Controlled Traffic Farming Conference, 86-90; www.actfa.net/further_reading/documents/Tullberg.Jeff.pdf
- [30] Tullberg, J. N., Yule, D. F. and McGarry, D. (2007): Controlled traffic farming - From research to adoption in Australia. *Soil & Tillage Research*, Vol. 97, 272-281
- [31] Internet 1: www.gmrstrumenti.com/documents/equitensimetro.pdf vom 26.08.2011