

Anpassung von Kulturpflanzen an den Klimawandel

Gernot Bodner^{1*}

Zusammenfassung

Die österreichische Landwirtschaft muss besonders in den Ackerbaugebieten im Osten des Landes künftig mit vermehrten Stresssituationen für die Kulturpflanzen rechnen. Neben Wasserstress wirkt sich bei den Getreidearten besonders Hitze ertragsreduzierend aus. Dementsprechend gilt es stressresistente Arten, Sorten und Managementoptionen zu kombinieren. Ertragsdaten der Ackerbauarbeitskreise in Niederösterreich zeigen, dass Sonnenblume und Zuckerrübe am widerstandsfähigsten gegen Stress sind. Im Management kann ein früher Saattermin und reduzierte Bearbeitung in Stressjahren zu Ertragsvorteilen führen, kann jedoch in guten Jahren das Ertragsrisiko erhöhen. Der Zwischenfruchtbau kann als Fruchtfolgeelement mit geringem Ertragsrisiko unter Stressbedingungen eingestuft werden. Insgesamt sollte das Management der Nutzpflanzensysteme eine optimale Ressourcennutzung sichern, um so klimatische Stresssituationen optimal abzupuffern.

Schlagwörter: Klimawandel, Stressresistenz, Trockenheit, Fruchtfolge, Bodenbearbeitung

Summary

Austrian crop production is likely to face increased stress incidence in the Eastern parts of the country. Beside water stress, heat is the most relevant yield limiting factor particularly for cereals. Facing stress, a combination of resistant species, cultivars and adapted management measures is recommended. Data from the Chamber of Agriculture in Lower Austria show that sunflower and sugar beet are best adapted to resist environmental stresses. Earlier seeding and reduced tillage can provide yield advantages in stress years, while under favorable conditions these options tend to increase the yield risk. Cover cropping is a rotation element with low yield risk even under more stressful conditions. In summary crop production should strive to optimize resource use in order to better buffer the more frequent climatic stress situations.

Einleitung

In der wissenschaftlichen Gemeinschaft herrscht weitgehender Konsens über globale klimatische Veränderungen, die wesentlich anthropogener Ursache sind. Mittlerweile liegen künftige Klimaszenarien vor, die eine kleinräumige, regionale Abschätzung der Veränderungen in Temperatur und Niederschlag erlauben und damit eine vorausschauende Anpassung der betroffenen Sektoren unterstützen (Strauss et al. 2013).

Die Landwirtschaft stellt einen besonders sensiblen Sektor dar, da die Produktion weitgehend von natürlichen Umweltfaktoren abhängt. Der Großteil der Nutzpflanzenproduktion ist in seiner Ertragsleistung von klimatischen Wachstumsfaktoren abhängig, die der Landwirt nicht steuern kann.

Die wichtigsten mit dem Klimawandel direkt zusammenhängenden Stressfaktoren sind Wasser- und Hitzestress. Beide Stressfaktoren beeinflussen vielfältige Prozesse im Pflanzenwachstum, die in Summe zu signifikanten Ertragsminderungen führen können (Bodner et al. 2015). Wasserstress führt unmittelbar zu einem verringerten Wachstum aufgrund eines verringerten Turgordrucks, der die Zellstreckung herabsetzt. Um weiteren Wasserverlust des Gewebes zu verhindern, schließen die Pflanzen ihre Spaltöffnungen und schränken damit auch die Fähigkeit

zur Kohlenstoff-Assimilation ein. Dehydriert das Gewebe weiter, so kann es zu starken physiologischen Schädigungen der Pflanze kommen. Besonders sensitiv reagieren die meisten Nutzpflanzenarten bei Wassermangel während der Blüte. Eine gestörte Befruchtung führt zu signifikanten Ertragseinbußen, die bei Mais bis zu 50 % des Ertragspotentials betragen. Stress in der früheren vegetativen und späteren generativen (Kornfüllung) Phase geht ebenfalls mit Mindererträgen einher, die jedoch nicht so stark sind wie bei Stress während der Blüte.

Hitzestress wurde von verschiedenen Autoren als wesentlicher abiotischer Umweltstress für die Nutzpflanzenproduktion vor allem in gemäßigten Gebieten gefunden (Maracchi et al. 2005). Hitzestress ist ähnlich wie Wasserstress besonders bei der Befruchtung kritisch. Dazu kommt die Beschleunigung der phänologischen Entwicklung und damit, besonders bei Kulturen mit kurzer Vegetationszeit (Sommergerste), eine unzureichende Ausbildung von Pflanzenorganen für die Ausschöpfung des Ertragspotentials. Bei Kombination von Hitze- und Trockenstress kann es zu einer starken Schädigung des pflanzlichen Metabolismus kommen, indem aufgrund eines Überschusses an Strahlungsenergie reaktive Sauerstoffspezies gebildet werden, die etwa den Photosyntheseapparat angreifen.

¹ Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung Pflanzenbau, Arbeitsgruppe Pflanzliche Produktionsökologie, Universität für Bodenkultur Wien, Konrad Lorenz Straße 24, A-3430 Tulln

* Ansprechpartner: Dr. Gernot Bodner, gernot.bodner@boku.ac.at



Die möglichen Abwehrstrategien von Pflanzen gegen Stress wurden von Levitt (1980) zusammengefasst. Diese umfassen (i) das zeitliche Entkommen, etwa durch angepasste Reifezeiten, (ii) das Vermeiden von Stress durch verbesserte Ressourcenaufnahme oder sparsame Ressourcennutzung, sowie (iii) das Tolerieren von Stress, etwa durch Schutzmechanismen des Metabolismus. Viele Stressreaktionen sind mit hohem Ertragspotential wenig kompatibel. So kann eine zu frühe Abreife Vegetationszeit kosten, in der noch ausreichend Wachstumsfaktoren zur Verfügung stehen. Eine übermäßig sparsame Ressourcenaufnahme, etwa eine kleine Blattfläche, kann zu einer unzureichenden Ausnutzung von Wachstumsfaktoren führen (z.B. schlechte Strahlungsnutzung) und Ressourcen ungenutzt lassen. Ziel der Stressresistenz in der Nutzpflanzenproduktion ist daher in erster Linie Anpassungsmechanismen zu finden, die eine optimale Ausnutzung der natürlich vorhandenen Ressourcen garantieren. Diese sind theoretisch kompatibel mit hohem Ertrag bei gleichzeitig hoher Stressresistenz.

Neben der Anpassung der Kulturpflanzen (Artenwahl in der Fruchtfolge, Sortenwahl) sind Managementfaktoren relevant, um die Pflanzenproduktion gegen klimatischen Stress zu rüsten. Dazu gehören Bodenbearbeitung, Bestandese-tablierung (Saatzeit, Saatstärke) und angepasste Düngung.

Der Beitrag diskutiert auf Grundlage empirischer Fakten aus dem österreichischen semi-ariden Produktionsgebiet wichtige Anpassungsstrategien der Kulturpflanzen an den Klimawandel und daraus folgende Zukunftsoptionen hinsichtlich Fruchtfolgen und ausgewählter Managementfaktoren.

Material und Methoden

Der Analyse liegt die Auswertung von Ertragsdaten von Ackerbauarbeitskreisen der Landwirtschaftskammer Niederösterreich zugrunde. Diese umfassen Kulturpflanzenerträge sowie detaillierte Angaben zum Management, die von Landwirten aufgezeichnet werden. Die hier verwendeten Daten stammen von den Arbeitskreisen Baden, Krems, Horn, Hollabrunn, Mistelbach und Wiener Neustadt und umfassen in etwa den Zeitraum 2002 bis 2014.

Neben den Ertrags- und Managementdaten werden Klimadaten der Wetterstationen der ZAMG verwendet, um (i) die verschiedenen Standorte zu differenzieren, sowie (ii) Zusammenhänge zwischen Ertrag und Witterung zu analysieren. Aus den Basisdaten wurden einige abgeleitete Indikatoren errechnet (Tabelle 1).

Die statistischen Analysen wurden mit dem Programm SAS durchgeführt. Die Zusammenhänge zwischen Ertrag und

klimatischen Indikatoren wurden mittels linearer Regression (PROC REG) ermittelt. Varianzanalytische Gegenüberstellungen erfolgten als paarweiser Vergleich mittels Welch-Zweistichprobentest, der besonders bei inhomogenen Varianzen stabile Ergebnisse sichert (PROC TTEST).

Ergebnisse und Diskussion

Witterung und Ertrag

Abbildung 1 zeigt die klimatischen Indikatoren der untersuchten Standorte als Boxplots.

Die stärkste Differenzierung zeigen der Niederschlag und dessen Verteilung. Am trockensten sind die Standorte Hollabrunn und Mistelbach, wobei in Mistelbach ein geringerer Anteil der Niederschläge in der Vegetationszeit fällt. Bei den Strahlungs- und Hitzeindikatoren fällt erwartungsgemäß der Bezirk Horn mit signifikant geringeren Werten auf. Die abgeleiteten Trockenindikatoren PDSI und CMI, die die Abweichung der Einzeljahre vom langjährigen (30 Jahre) Mittel zeigen, bringen keine signifikante Differenzierung der Standorte.

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse des Zusammenhangs zwischen den Erträgen der Kulturen Zuckerrübe, Körnermais, Winterweizen und Sommergerste und klimatischer Indikatoren. Die Abbildung gibt jene Indikatoren wieder, die den stärksten Zusammenhang mit den Jahreserträgen ergaben.

Die Getreideerträge zeigten den stärksten Zusammenhang mit der kumulativen Zahl an Hitzestunden, während Körnermais und Zuckerrübe als Kulturen mit langer Vegetationszeit stärker auf die verfügbaren Niederschläge (Verteilung bzw. kombinierter Index aus Hitze und Bodenfeuchte) ansprechen. Das weist darauf hin, dass besonders bei Getreide die Wirkung der Hitze sowohl auf Phänologie als auch Befruchtung stark den Ertrag beeinflusst. Es sei angemerkt, dass die Hitzeindikatoren in den meisten Fällen keinen signifikanten Zusammenhang mit den Niederschlagsindikatoren zeigen, also eine vom Niederschlag unabhängige Erklärungsvariable darstellen.

Kulturarten und Fruchtfolge

Im derzeitigen Fruchtartenverhältnis ist Winterweizen die klar dominante Kulturart, gefolgt von Körnermais und Sommergerste. Zuckerrübe, Winterraps, Silomais und Wintergerste folgen mit einem ähnlichen Flächenanteil um 10 % (Grüner Bericht 2013). Diese Kulturarten bilden damit die Stützpfeiler der derzeitigen Fruchtfolgen im Osten Österreichs.

Tabelle 1: Klimatische Indikatoren.

Kurzfristige Indikatoren (aktuelle Situation)	
Niederschlag	Höhe (Jahr, kritische Perioden, Monat), Verteilung (In- vs. off-season)
Referenzevapotranspiration	Höhe und Verteilung (s.o.), Verhältnis zu Niederschlagshöhe
Temperatur	Hitzetage und kumulierte Temperatur über 27°C
Hitze+Trockenheit	Multiplikativer Indikator aus Hitzetagen und Wasserdefizit (FAO56)
Langfristige Indikatoren (Abweichung vom Normalwert)	
Palmer Drought Severity Index	Niederschlag, Temperatur, Bodenspeicher
Crop Moisture Index	s. PDSI, aber wöchentlich

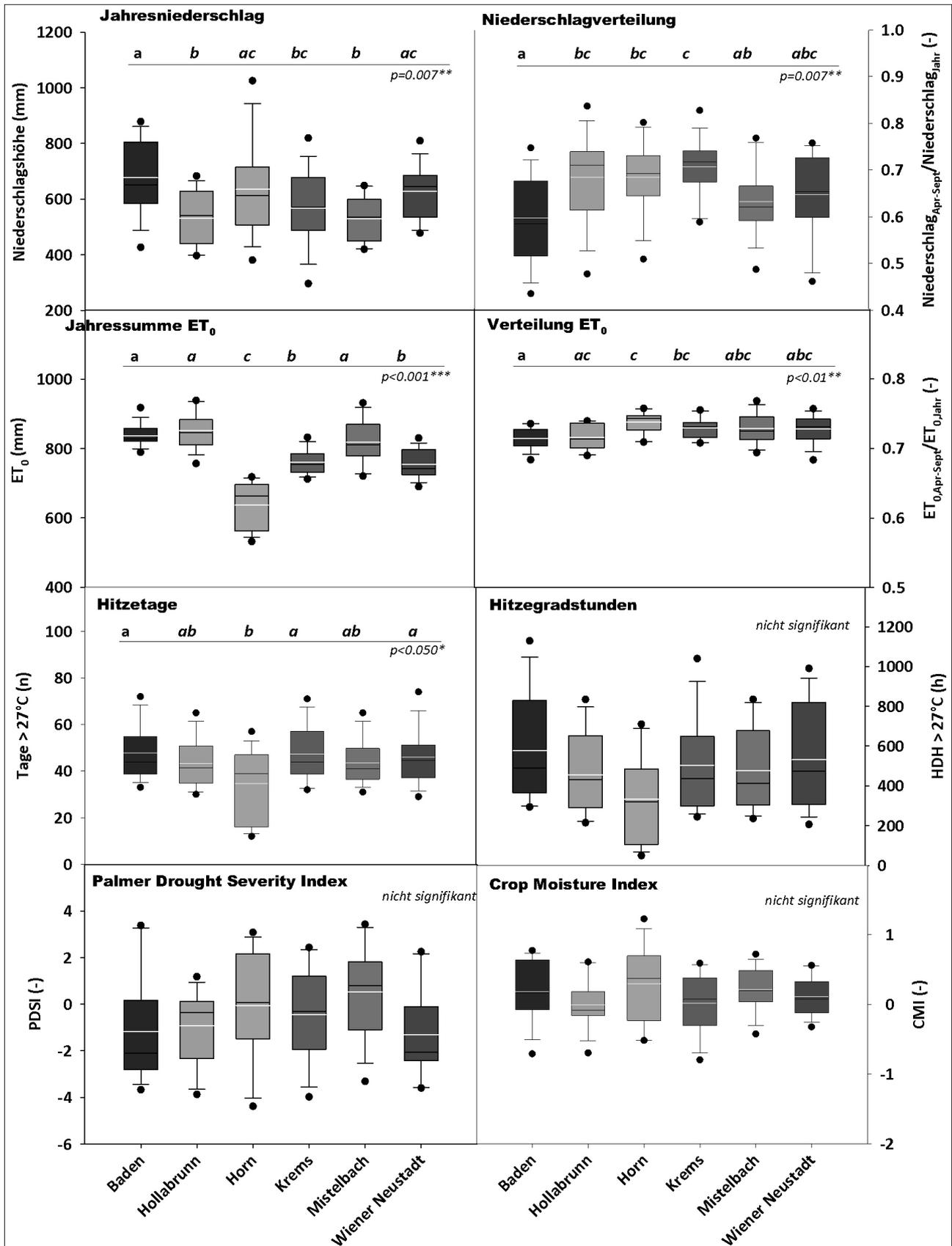


Abbildung 1: Meteorologische Standortcharakteristika (Boxplots der Jahre 2002-2014 mit Median und Mittelwert). Gleiche Buchstaben zeigen jene Fälle ohne signifikante Unterschiede ($p<0,05$).

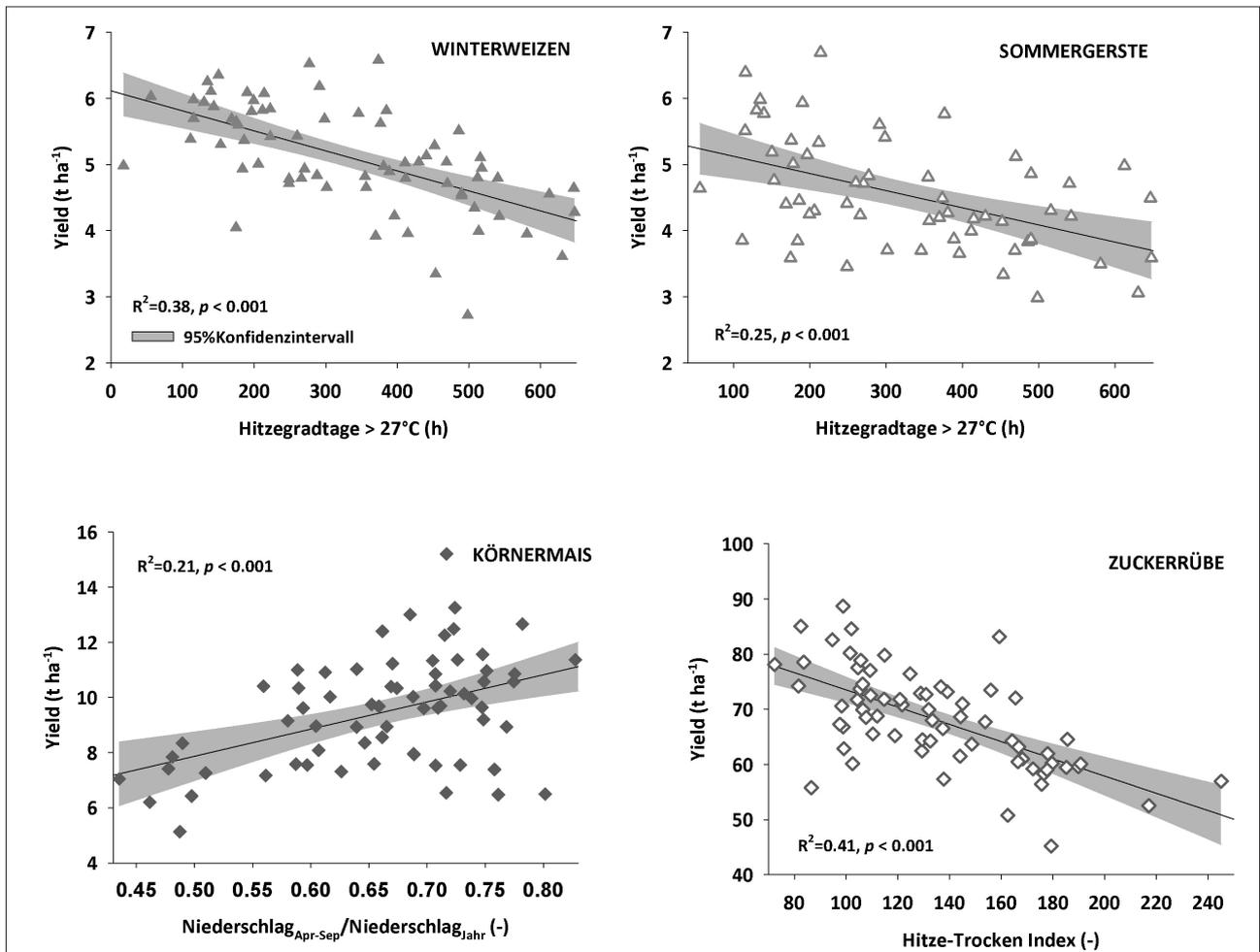


Abbildung 2: Lineare Regression von Erträgen ausgewählter Hauptfrüchte und klimatischer Indikatoren.

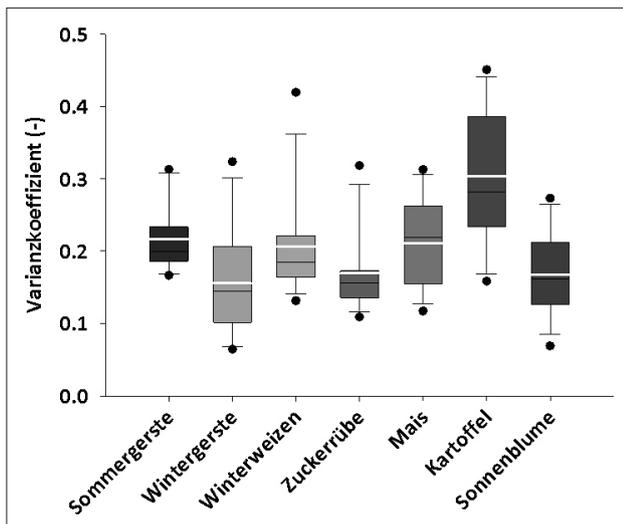


Abbildung 3: Ertragssensitivität ausgewählter Kulturpflanzen.

Abbildung 3 zeigt eine Einschätzung der Stresssensitivität von Fruchtfolgegliedern, wobei hier auch Kartoffel und Sonnenblume als Extreme berücksichtigt wurden. Der Varianzkoeffizient zeigt das Ausmaß der Ertragsreaktion

einzelner Kulturen auf unterschiedliches Angebot an Wachstumsfaktoren. Die Boxplots fassen dabei immer Jahre und Standorte als Umwelten zusammen und zeigen den Median sowie das Mittel über die Umwelten als auch die gesamte Schwankungsbreite als Folge der unterschiedlichen Böden und Managementmaßnahmen auf den Einzelschlägen. Klar sind Zuckerrübe, Sonnenblume und Wintergerste am ertragsstabilsten, während Kartoffel am sensitivsten auf variable Umwelten reagiert. Sommergerste, Winterweizen und Körnermais liegen auf einem ähnlichen Niveau dazwischen.

Zuckerrübe und Sonnenblume können als Vermeider von Stress interpretiert werden. Sie sind in der Lage, vor allem den Wasserhaushalt des Bodens optimal auszunutzen. Zuckerrübe steht zumeist auf tiefgründigen Standorten, ist in der Lage den Boden entsprechend intensiv und tief zu durchwurzeln und reagiert bei Trockenheit mit osmotischer Anpassung im Blatt: Die Spaltöffnungen bleiben über längere Zeit geöffnet, auch bei reduziertem Blattwasserpotential (anisohydrisches Verhalten). Sonnenblume zeichnet sich ebenfalls durch ein sehr dichtes Wurzelsystem aus und weist sehr reißfeste Xylemelemente auf. D.h. selbst bei hohen Wasserpotentialgradienten kommt es erst spät zu einer Unterbrechung der Leitgefäße durch Luft-Embolien.

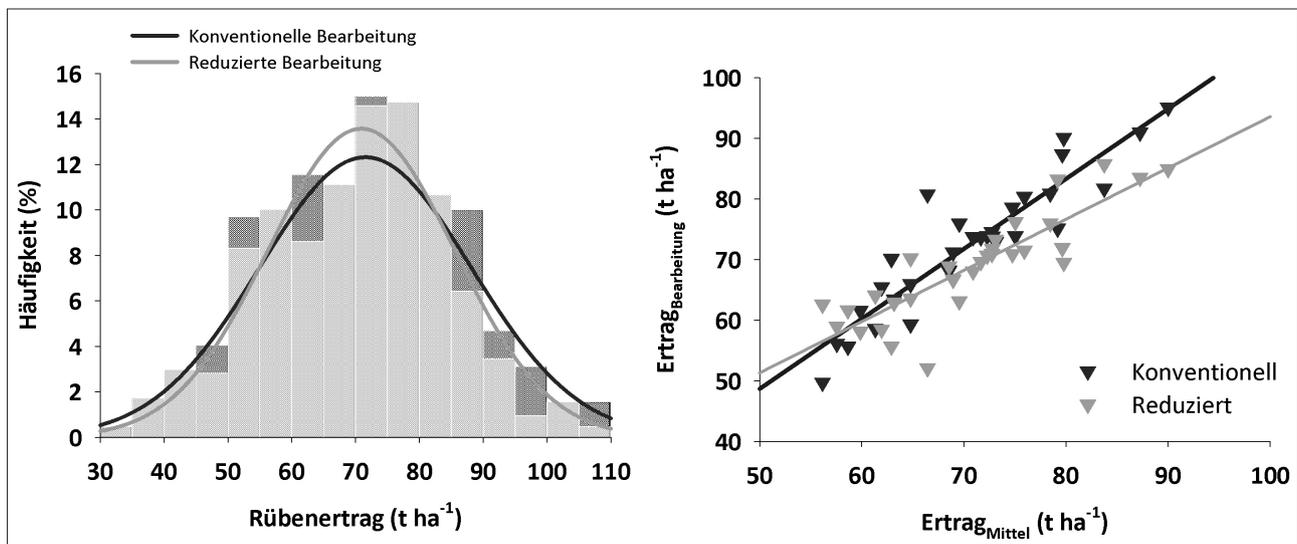


Abbildung 4: Ertragswirkung von konventioneller (Pflug) vs. reduzierter (nicht wendend) Grundbodenbearbeitung bei Zuckerrübe.

Zu den Kulturen, die dem Stress ausweichen gehören jene, die relativ früh abreifen. Wintergerste hat hier einen Vorteil gegenüber Sommergerste und Winterweizen. Insgesamt gelten Winterungen gegenüber Sommerungen als stressresistenter, da sie einen Teil der Vegetationszeit unter kühleren Bedingungen durchlaufen und im Frühjahr bereits Wurzeltiefe vorgebaut haben, um frühe Trockenklemmen abzapuffern. Dementsprechend ist es verwunderlich, dass die Daten ähnliche Stresssensitivität von Winterweizen und Sommergerste zeigen. Winterweizen ist möglicherweise deshalb relativ sensibel, da er über die Bestockung ein hohes Ertragspotential hat, das jedoch bei Stress stark reduziert werden kann. Dies kann zu einem entsprechend hohen Varianzkoeffizienten führen.

Die Kartoffel ist aufgrund des flachen Wurzelsystems und der starken Anfälligkeit der Knollenausbildung auf Trockenheit sehr ertragsinstabil. Die tendenziell eher leichteren Böden und das sehr wasserintensive Management (hohe Oberfläche der Dämme) erhöhen zusätzlich das Stressrisiko.

Die Auswertung zeigt, dass es in der Fruchtfolge durchaus Optionen von weniger stresssensitiven Kulturen gibt. Zu diesen würden auch neue Kulturen wie Hirse gehören, die unter Trockenbedingungen in Versuchen durchaus bessere Erträge als Silomais bringen können. Dennoch muss davon ausgegangen werden, dass die Stresssensitivität für die Fruchtfolgeentscheidung der Landwirte nur sekundäre Bedeutung gegenüber ökonomischen Überlegungen hat. Dementsprechend müssen auch Managementoptionen innerhalb der Kulturen selbst berücksichtigt werden.

Managementoptionen

Die wichtigste Managementoption stellt der Saattermin dar. Zahlreiche Versuche bei Getreide zeigen, dass Frühsaaten an leichteren Standorten, die regelmäßig an Trockenstress zur Kornfüllung leiden, im Ertrag besser abschneiden. Der Nachteil ist das erhöhte Krankheitsrisiko (z.B. Gelbverzwergung). Innerhalb eines optimalen Saatfensters (+/- 7

Tage) zeigen die Ertragsdaten der Ackerbauarbeitskreise, dass ein früherer Saattermin beinahe an allen Standorten und Jahren im Ertrag höher liegt (Abbildung nicht gezeigt). Dies kann auf eine frühere Blüte/Reife (Stress-Entkommen), aber auch eine bessere Nutzung des Wachstumsfaktors Strahlung in frühen Entwicklungsstadien zurückgeführt werden.

Eine zweite wichtige Managementoption bietet das Bodenbearbeitungssystem. Bodenbearbeitungsversuche zeigten, dass unter Trockenbedingungen reduzierte Bearbeitung tendenziell ertraglich besser abschneidet, unter feuchteren Bedingungen dagegen die stärker lockernde konventionelle Pflugbearbeitung höhere Erträge liefert (Lahmar 2010). Ein Beispiel dafür gibt auch *Abbildung 4* für Zuckerrübe.

In 83,3 % der Fälle (Jahr x Ort) zeigt sich bei Zuckerrübe in den untersuchten Bezirken kein signifikanter Ertragseffekt. In 16,7 % der Fälle liegen die Erträge bei reduzierter Bearbeitung niedriger. Jedoch schneidet reduzierte Bearbeitung in Stressjahren mit Mittelträgen unter 60 t ha⁻¹ besser ab. Die Zuckerrübe kann als sensibel gegenüber reduzierter Bearbeitung eingestuft werden. Trotzdem wird bei stärkerem Umweltstress eine wassersparende Bodenbearbeitung effektiv. Ähnliche Tendenzen zeigen sich auch bei Körnermais, ohne jedoch deutliche Ertragsnachteile für die höheren Ertragslagen (Abbildung nicht gezeigt).

Ein vom Umweltstandpunkt wichtiges Fruchtfolgeelement in Österreich ist der Zwischenfruchtbau. Im Zusammenhang mit Wasserknappheit steht die zusätzliche Kultur jedoch immer wieder zur Diskussion. Ertragsergebnisse zeigen aber, dass das Risiko eines negativen Ertragseffekts sehr gering ist (*Abbildung 5*). Bei Körnermais treten in 85,1 % der Fälle bei den untersuchten Umwelten keine signifikanten Ertragseffekte auf, bei Sommergerste in 73,5 % der Fälle. Ertragsnachteile können am ehesten bei Körnermais auftreten, der in Trockenjahren und im Falle von geringen Winterniederschlägen auf eventuell etwas geringere Unterbodenfeuchte nach Zwischenfrucht mit leichten Mindererträgen reagiert.

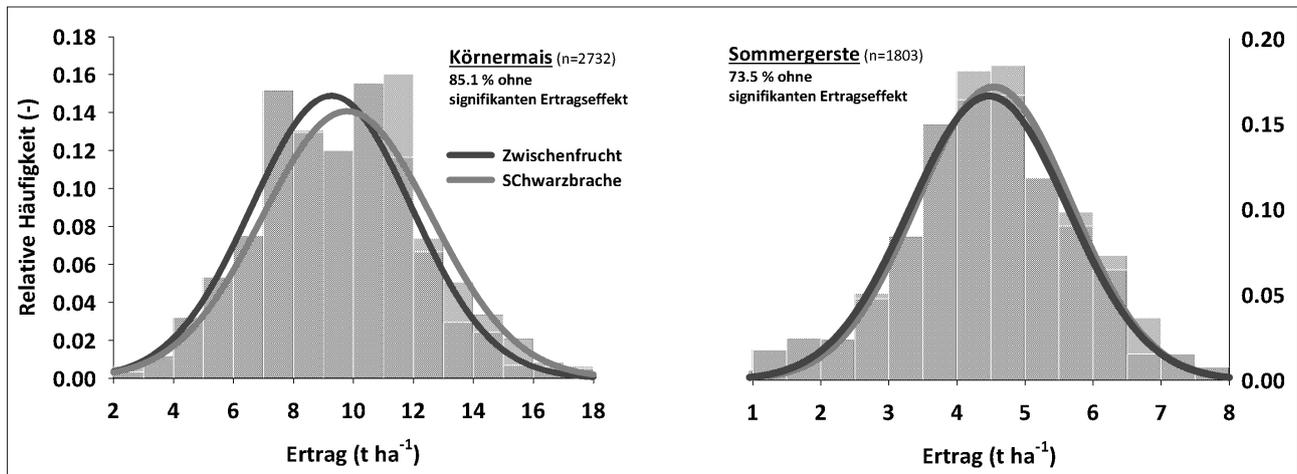


Abbildung 5: Ertragswirkung von Zwischenfrucht vs. Schwarzbrache bei Körnermais und Sommergerste.

Schlussfolgerung

Kulturpflanzen haben verschiedene Strategien auf Trockenheit und Hitzestress zu reagieren. Entscheidend ist eine optimale Nutzung der natürlichen (Boden)ressourcen. Dies kann durch stressresistente Fruchtfolgeglieder und Sorten erreicht werden. Ein wichtiger Beitrag ist jedoch auch ein angepasstes Management, das im Rahmen des bestehenden Arten- und Sortenspektrums die Ausnutzung der natürlich verfügbaren Ressourcen verbessern und über die Bodenfruchtbarkeit diese auch langfristig absichern kann.

Danksagung

Die Daten wurden im Rahmen des ACRP Projekts „Agro Drought Austria - Trockenheitsmonitoringssystem für die Landwirtschaft in Österreich“ ausgewertet. Wir bedanken uns für die Daten bei der Landwirtschaftskammer Nie-

derösterreich und für die finanzielle Unterstützung beim österreichischen Klimafonds.

Literatur

- Bodner G., Nakhforoosh A. & Kaul H.P. (2015) Management of crop water under drought: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 401-442.
- Grüner Bericht (2013) www.gruenerbericht.at
- Lahmar R. (2010) Adoption of conservation agriculture in Europe: lessons of the KASSA project. *Land use policy*, 27(1), 4-10.
- Levitt J. (1980) Responses of plants to environmental stresses. Volume II. Water, radiation, salt, and other stresses (No. Ed. 2). Academic Press.
- Maracchi G., Sirotenko O. & Bindi M. (2005) Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the temperate regions: Europe. *Climatic Change*, 70(1-2), 117-135.
- Strauss F., Formayer H. & Schmid E. (2013) High resolution climate data for Austria in the period 2008–2040 from a statistical climate change model. *International Journal of Climatology*, 33(2), 430-443.