

Praktische Anwendbarkeit von Trockenstressparametern für die Weizenzüchtung

Practical applicability of drought stress parameters for winter wheat breeding

Clemens Flamm^{1*}, Sabrina Scheriau¹, Elisabeth Zechner², Maren Livaja³ und János Pauk⁴

Abstract

In order to incorporate a drought stress parameter in wheat breeding, this parameter should fulfill following requirements: (i) applicable with little input for a wide assortment, (ii) reproducible over different environments, and (iii) validity for the character drought stress. The measurements of root capacity, stomatal conductance, osmotic potential and flag leaf temperature do not meet the first simple application requirement. The parameters of the 'escape strategy' and chlorophyll content are quickly testable and can be reproduced well in different locations. Leaf rolling, plant height and yield parameters correlate closely over locations. A good correlation between the investigated parameters and yield under drought conditions was found except for leaf rolling and plant height.

Furthermore, it was shown that awns are not responsible for the drought tolerance of a variety. A principle component analysis over all drought stressed locations revealed that a combination of the parameters test weight, plant height and leaf senescence contribute to grain yield losses under drought stress. Further analysis of irrigated and non-irrigated Austrian trials in 2012 obtained two significant principal components which are correlated to yield components determined in the period from heading and flowering to ripening, respectively.

Summarizing, the parameters heading, ripening, grain filling period, leaf senescence and chlorophyll content are most likely suitable to identify drought tolerant genotypes. Leaf rolling and appearance of awns gave little information about drought tolerance. Other tested parameters are too time consuming or difficult to reproduce.

Keywords

Chlorophyll content, drought avoidance, drought tolerance, escape strategy, leaf rolling, reproducibility, *Triticum aestivum*

Einleitung

Trockenstress und dessen Effekt auf die Pflanzen ist weltweit einer der wichtigsten Begrenzungsfaktoren der Maximierung der Weizenproduktion (JONES und CORLETT 1992). Pflanzen reagieren auf Wasserdefizit mit physiologischen, biochemischen und molekularen Veränderungen. Diese Anpassungen unterliegen sehr komplexen und unterschiedlichen Mechanismen (HALL 2001, CHAVES et al. 2003, JONES 2004). LEVITT (1972) entwickelte eine Einteilung der Mechanismen, die nach wie vor Gültigkeit besitzt: (1) Dürrefluht (*escape strategy*), (2) Vermeidung der Austrocknung (*avoidance*) und (3) Toleranz gegenüber dem Austrocknen (*tolerance*).

Die erste Strategie ist durch eine schnellere Pflanzenentwicklung charakterisiert. Durch eine frühere Reife versucht die Pflanze, einer späteren Dürrephase zu entkommen. Das Stadium des Ährenschiebens, die Blüte und Gelbreife werden rascher erreicht. Dies geht einher mit einer höheren Wachstumsrate aber kürzeren Wachstumszeit und einem höheren Gasaustausch, wodurch die Blattseneszenz früher erfolgt.

Die Austrocknung kann einerseits durch Senkung des Wasserverbrauches vermieden werden. Dies ist durch Reduktion der Transpirationsrate, einer dickeren Wachsschicht, einer Verringerung der Blattoberfläche (SALIH et al. 1999) sowie durch Reduktion der stomatären Leitfähigkeit (LUDLOW und MUCHOW 1990, RAY und SINCLAIR 1997) möglich. Andererseits ist auch eine verbesserte Wassernutzung erfolgreich. Dies wird beispielsweise durch höheres Wurzelwachstum erreicht (SALIH et al. 1999).

Eine weitere Reaktion ist die Austrocknungstoleranz. Pflanzen können lang anhaltende Perioden von Trockenstress mittels osmotischer Anpassung besser überdauern. Dabei wird der Turgor in den Zellen möglichst lange aufrechterhalten. Die Pflanzen werden zwar gestresst, behalten aber noch eine gewisse Produktivität.

Für alle beschriebenen Mechanismen und Strategien gibt es Möglichkeiten, diese zu messen oder zu schätzen. In

¹ Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH, Spargelfeldstraße 191, A-1220 WIEN

² Saatucht Edelfhof, Edelfhof 1, A-3910 ZWETTL

³ Technische Universität München, Lehrstuhl für Pflanzenzüchtung, Emil Ramann Straße 4, D-85354 FREISING

⁴ Cereal Research Non-Profit Company, Department of Biotechnology, P.O. Box 391, H-6701 SZEGED

* Ansprechpartner: Clemens FLAMM, clemens.flamm@ages.at



der folgenden Arbeit soll die praktische Durchführbarkeit ausgewählter Methoden sowie deren Aussagekraft bezüglich Trockenstress aufgezeigt werden.

Material und Methoden

Es wurden Versuche der Jahre 2010-2012 aus den Cornet-Projekten *Wheat Stress* und *Efficient Wheat* analysiert. Die Versuche lagen in Deutschland, Österreich und Ungarn. An drei Standorten wurden die Versuche in einer beregneten und einer unberegneten Variante ausgeführt. Aufgrund der natürlichen Regenverteilung wurden die Versuche in trocken und feucht eingeteilt (Tabelle 1).

Im Jahr 2010 erhielten die beregneten Versuche 40-58 mm zusätzliches Wasser (Österreich) bzw. 10 mm (Ungarn); 2011 wurden 80-90 mm (Österreich) bzw. 44 mm (Ungarn) sowie 2012 60-80 mm in Österreich beregnet. Die einbezogenen Sorten wurden von deutschen, österreichischen und ungarischen Züchtern ausgewählt und zeigten eine große Variabilität hinsichtlich Wuchshöhe, Abreife und Qualitätseigenschaften.

Das Testsortiment wurde entsprechend der Österreichischen Beschreibenden Sortenliste (AGES 2013) bzw. dem österreichischen Backqualitätsschema 1994 (OBERFORSTER et al. 1994) in drei Backqualitätsgruppen (Qualitätsweizen, Mahlweizen und Futterweizen) eingeteilt. Die Sorten 'Bitop', 'Capo', 'Element', 'Exklusiv', 'Komarom', 'Midas', 'GK Békés', 'GK Kalász' und 'GK Petur' wurden den Qualitätsweizen zugeordnet. Die Sorten 'Eurofit', 'Eurojet', 'Tacitus', 'Brilliant', 'Hybred', 'JB Asano', 'Pegassos', 'Premio', 'Tiger', 'GK Fény', 'GK Hunyad', 'GK Rába' und 'GK Szala' entsprechen der Mahlweizengruppe. Bei den Sorten 'Hyland' und 'Robigus' handelt es sich um Futterweizen.

Die Versuche wurden als Gitteranlagen mit drei Wiederholungen angebaut. Die Düngung erfolgte ortsüblich. Folgende Merkmale wurden erhoben: Kornertrag (KOEQ, dt·ha⁻¹), Datum Ährenschieben, Blüte und Gelbreife (DTAE, DTBL, DTGR; Tage nach 31. Dezember), Tage zwischen diesen Stadien (GRAE (Einkörnungsdauer), GRBL und BLAE), Fahnenblattseneszenz (SZF1-3; Schätzung in % zu 3 Terminen), Wuchshöhe (WHOE, cm), Bestandesdichte (BEST, Ähren·m⁻²), Tausendkorngewicht (TKG, g bei 86% TS), Kornzahl pro Ähre (KZAE), Kornzahl pro m² (KZM2), Ährgewicht (AEGW, g) und Hektolitergewicht (HLGW, kg). Weiters wurden das Blattrollen (BLRO, Schätzung, %), die elektrische Leitfähigkeit der Wurzeln (EKA, mittels 3 Escort ELC 133A LCR meter, nF), das osmotische Potenzial (OSP, Osmometer Vapro 5520, MPa), die Oberflächentemperatur des Fahnenblattes (OTEM, Infrarot Thermometer, Scan Temp 490 Dostmann Electronic GmbH, °C), der

Chlorophyllgehalt des Fahnenblattes (SPD1-3, SPAD-502 Konica Minolta, SPAD-Einheiten zu 3 Terminen) und die Leitfähigkeit der Spaltöffnungen (STO2-3; Leaf Porometer, Decagon Devices, mmol·m⁻²·s⁻¹ zu 2 Terminen) erhoben.

Die statistische Verrechnung erfolgte mit SPSS. In die Varianzanalyse wurden die Versuche 2010-2011 einbezogen, da von 2012 nur die Daten der österreichischen Prüfungen vorlagen. Die weiterführenden Analysen wurden mit der Statistiksoftware R (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2012) durchgeführt. Hierfür wurden nur mehr die trocken-gestressten Versuche verwendet bzw. jene Standorte, an denen beide Varianten vorkamen (beregnet und unberegnet) und bei denen es Unterschiede zwischen diesen Varianten gab (Tat und NWe).

Aufgrund der Vielzahl der zu untersuchenden Parameter wurde neben der Varianzanalyse eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Mittels Hauptkomponentenanalyse sollen Korrelationen in diesen erhobenen Parametern erkannt werden, um somit diese Parameter ohne Informationsverlust auf wenige Hauptkomponenten reduzieren zu können. Die erhaltenen Hauptkomponenten ergeben sich als Linearkombinationen der ursprünglichen Parameter (TABACHNICK und FIDELL 2007).

In weiterer Folge lässt sich der Einfluss der Hauptkomponenten auf den Trockenstress modellieren. Dazu wurden gemischte lineare Modelle berechnet. In linearen gemischten Modellen werden die fixen Effekte (die bereits im klassischen linearen Regressionsmodell herangezogen werden) um sogenannte zufällige Effekte erweitert. Die fixen Effekte beschreiben den Einfluss von Prädiktorvariablen auf eine Zielvariable für die Gesamtpopulation. Mit zufälligen Effekten soll ein gegebenenfalls abweichendes Verhalten von bestimmten Clustern abgebildet werden (WEST et al. 2007). In den vorliegenden Analysen wurden die Cluster Sorte, Jahr und Ort als zufällige Effekte modelliert. Eine wichtige Information zu zufälligen Effekten liefert deren Varianzkomponente. Mit dieser kann ermittelt werden, welcher Anteil der Gesamtvarianz der Daten auf den jeweiligen Cluster (zufälligen Effekt) entfällt. Je größer der Anteil, desto größer ist die clusterspezifische Variation.

Ergebnisse und Diskussion

Praktische Durchführbarkeit

Parameter der „Dürreflucht“ (Ährenschieben, Gelbreife, Einkörnung, Blattseneszenz) sind einfach festzustellen und relativ rasch zu erheben. In ähnlicher Weise gehen die Parameter zur Vermeidung des Austrocknens wie das Blattrollen und die Begrannung.

Tabelle 1: Versuchsstandorte in Deutschland, Österreich und Ungarn (2010-2012)

Table 1: Test locations in Austria, Germany and Hungary (2010-2012)

Klima	2010	2011	2012
Feucht	Fel ¹ , Rog, Sel, Söl, Uff, Bre (u,b), Tat (b), StA, Kis, Sze (u,b)	Fel, Rog, Sel, Söl, Bre (b), Tat (b), Sze (b)	NWe (b), Tat (b)
Trocken	Mor, Tat (u)	Die, Mor, Uff, Brei (u), Tat (u), StA	NWe (u), Tat (u), StA

¹b, beregnet; u, unberegnet; Die, Dietersheim (Oberbayern); Fel, Feldkirchen (Oberbayern); Mor, Morgenrot (Sachsen-Anhalt); Sel, Seligenstadt (Franken); Söl, Söllingen (Niedersachsen); Rog, Roggenstein (Oberbayern); Uff, Uffenheim (Franken); Bre, Breitstetten (NÖ, Marchfeld); NWe, Niederweiden (NÖ, Marchfeld); Tat, Tattendorf (NÖ, Steinfeld); StA, St. Andrä am Zicksee (Burgenland, Seewinkel); Kis, Kiszombor (Südungarn); Sze, Szeged (Südungarn)

Der Einsatz des Leaf Porometers erfordert hingegen hohen Aufwand während eines kurzen Zeitfensters (zwischen 11 und 15 Uhr bei wolkenlosem Himmel), da stets nur einzelne Blätter gemessen werden können. Nach Anzeige des ersten Messwertes, muss die Zange, in der das Blatt eingespannt war, getrocknet werden. Pro Parzelle werden mehrere Blättern gemessen.

Der Wurzeltiefgang und die Intensität des Wurzelsystems werden mit der elektrischen Leitfähigkeit erhoben. Die Messung selbst erzielt rasch ein Ergebnis, man stößt jedoch bei skelettreichen Böden bald an Grenzen. Bei geringer Bodenfeuchte lässt sich der Sensor nicht leicht in den Boden einstecken. An tau- oder regennassen Beständen ist eine Messung nicht möglich.

Über die Austrocknungstoleranz gibt das Osmometer Auskunft. Dazu werden Blätter bis zur völligen Aufsättigung in destilliertem Wasser eingelegt. Nach oberflächlicher Trocknung werden die Proben gefroren, bis sie zu einem

späteren Zeitpunkt gepresst werden um den Zellsaft für die Analyse im Osmometer zu gewinnen.

Die Messung der Oberflächentemperatur des Blattes setzt eine gleichbleibende Sonneneinstrahlung und möglichst geringe Windgeschwindigkeit voraus. Das heißt, ein umfangreiches Sortiment unter freiem Himmel zu messen, ist unmöglich, da beispielsweise in pannonischen Regionen meist ein Wind weht und wolkenlose Atmosphäre um die Mittagsstunden im Jahr 2010 eine Seltenheit war. Die gewonnenen Daten sind oftmals mit hohen Versuchsfehlern behaftet. Deshalb wurde dieses Merkmal im Jahr 2011 nicht mehr gemessen. Die Methode erscheint für Gewächshausversuche eher geeignet. FRIEDLHUBER et al. (2011) fand hingegen an einem kleineren Sortiment und mittels Wärmebildkamera signifikante Unterschiede zwischen den Sorten. Von den Messparametern ist der Chlorophyllgehalt des Fahnenblattes am raschesten und einfachsten zu realisieren. Ähnliche Ergebnisse erzielte auch TEIZER (2010).

Tabelle 2: Deskriptive Statistik und Varianzanalyse der Parameter Kornertrag (KOEQ), Ährenschieben (DTAE), Gelbreife (DTGR), Einkörnungsdauer (GRAE), Blattseneszenz (SZF), Wuchshöhe (WHOE) und Bestandesdichte (BEST) über alle Umwelten (2010-2011)

Table 2: Descriptiv statistics and ANOVA of the parameters yield (KOEQ), heading (DTAE), ripening (DTGR), grain filling period (GRAE), leaf senescence (SZF), plant height (WHOE) and ears per square meter (BEST) over all environments (2010-2011)

	KOEQ	DTAE	DTGR	GRAE	SZF1	SZF2	SZF3	WHOE	BEST
N	14	14	14	14	10	10	10	14	10
Min	19,2	129	168	29	0	0	2	44	211
Max	137,4	163	210	62	100	100	100	127	1030
Mittel	66,9	146	188	42	20	58	84	85	451
Jahr (J)	158,97**	28732,84**	12929,27**	645,84**	2,01	39,28**	19,66**	2323,57**	61,26**
Geotyp (G)	62,60**	953,89**	176,57**	95,36**	20,87**	44,91**	32,22**	318,07**	7,31**
Umwelt (U)	823,50**	3579,78**	4042,08**	1782,23**	100,38*	180,19**	130,96**	984,61**	168,22**
J×G	2,70**	15,208**	14,54**	20,83**	1,38	2,53**	1,49	4,35**	0,89
J×U	148,01**	1752,27**	816,77**	1130,73**	52,28**	78,75**	70,20*	253,61**	93,67
G×U	3,07**	7,401**	4,57**	5,02**	2,29**	1,69**	2,74**	2,20**	1,38**
J×G×U	1,68**	4,63	3,29**	4,07**	1,17	1,73**	1,59**	1,58**	1,22
Fehler	50,17	0,80	1,41	1,76	195,99	305,38	150,52	18,66	3587,71

Tabelle 3: Deskriptive Statistik und Varianzanalyse von Chlorophyllgehalt (SPD), Wurzelkapazität (EKA), Stomataleitfähigkeit (STO), osmotisches Potenzial (OSP) und Blatttemperatur (OTEM) über alle Umwelten (2010-2011)

Table 3: Descriptive statistics and ANOVA of the chlorophyll content (SPD), root capacity (EKA), stomatal conductance (STO), osmotic potential (OSP) and leaf temperature (OTEM) over all environments (2010-2011)

	SPD1	SPD2	EKA	STO2	STO3	OSP	OTEM
N	12	7	5	4	2	4	2
Min	17,27	4,80	0,17	21,85	22,18	1,02	8,40
Max	65,49	61,37	1237,01	608,46	266,28	57,78	32,50
Mittel	48,29	45,84	124,80	292,67	100,64	11,82	20,63
Jahr (J)	1912,06**	2631,16**	448,94**	845,90**	-	52423,91**	-
Geotyp (G)	96,60**	42,49**	0,97	4,27**	-	0,99	2,83**
Umwelt (U)	144,82**	366,63**	0,08	138,12**	9,83**	45,46**	60,42**
J×G	7,25**	7,26**	3,04**	1,09	-	1,20	-
J×U	249,40**	185,00**	-	7,20**	-	-	-
G×U	3,25**	3,61**	0,51	1,28	-	0,93	2,83**
J×G×U	3,81**	1,89**	-	0,90	-	-	-
Fehler	6,59	18,14	24342,96	5048,14	978,11	0,01	9,18

Tabelle 4: Intervarietale Korrelation der Parameter an den Standorten mit Trockenstress (2010-2012)

Table 4: Intergroup correlation of investigated parameters at the locations with drought stress (2010-2012)

Parameter	Korrelationskoeffizienten		
Ertrag und Ertragsstruktur			
Kornertrag	-0,090	bis 0,777**	
1000-Korngewicht	0,400 *	bis 0,903**	1
Bestandesdichte	-0,305	bis 0,588**	
Kornzahl pro Ähre	-0,050	bis 0,777**	1
Kornzahl pro m ²	0,234	bis 0,830**	1
Ährenreife	-0,263	bis 0,610**	2
Parameter der Dürrefluht			
Ährenschieben	0,825 **	bis 0,976**	1
Blüte	0,689 **	bis 0,971**	1
Gelbreife	0,404 *	bis 0,889**	1
Einkörnungsdauer	-0,229	bis 0,773**	2
Fahnenblattseneszenz 1	-0,134	bis 0,831**	1
Fahnenblattseneszenz 2	0,252	bis 0,932**	1
Fahnenblattseneszenz 3	0,200	bis 0,978**	1
Parameter zur Vermeidung von Austrocknung			
Blattrollen	0,443 *	bis 0,771*	1
Wuchshöhe	0,681 **	bis 0,941**	1
Stomatäre Leitfähigkeit	0,036	bis 0,233	
Elektrische Wurzelkapazität	-0,091	bis 0,630**	
Parameter der Austrocknungstoleranz			
Chlorophyllgehalt im Blatt 1	0,053	bis 0,912**	1
Chlorophyllgehalt im Blatt 2	0,050	bis 0,822**	1
Chlorophyllgehalt im Blatt 3	0,026	bis 0,821**	
Oberflächentemperatur		0,002	
Osmotisches Potenzial	-0,424 *	bis 0,689**	

1 = Korrelation $\geq 70\%$; 2 = Korrelation 50-69% der Standorte

Varianzanalyse

In der Varianzanalyse über alle Standorte (Tabelle 2, Tabelle 3) zeigten sich bei den einzelnen Parametern meist hoch signifikante Jahres- (J), Genotyp- (G) und Umwelteffekte (U). Auch die Wechselwirkungen J×G, G×U, J×U und J×G×U waren in den meisten Fällen statistisch signifikant. Bei den Merkmalen KOEQ, DTAE, DTGR und GRAE hatten das Jahr, die Umwelt und deren Wechselwirkung den größten Einfluss. Bei der Fahnenblattseneszenz hatte das Jahr von den Hauptfaktoren den geringsten, die Umwelt den höchsten Einfluss auf die Gesamtvarianz. G×U war zu allen drei Terminen hoch signifikant. Bei WHOE waren sämtliche Faktoren und Wechselwirkungen hoch signifikant. Hingegen zeigte BEST nur Signifikanzen in den Hauptfaktoren und in der Wechselwirkung G×U. Die Fehlervarianz war dabei relativ hoch. Beim Chlorophyllgehalt zeigten sich wie beim Kornertrag hohe Jahres- und Umwelteinflüsse. Die Parameter EKA und OSP wiesen jeweils sehr hohe Fehlerwerte auf. Bei OSP war das Jahr die entscheidende Einflussgröße; die Aussagen zu OTEM sind durch den geringen Datenumfang beeinträchtigt.

Reproduzierbarkeit der Parameter

Um Aussagen über die praktische Verwendbarkeit der einzelnen Parameter in der Züchtung tätigen zu können, ist die Reproduzierbarkeit der Parameter über die Umwelten bedeutsam. Dazu wurde jedes Merkmal über die Standorte intervarietale korreliert. In Tabelle 4 ist die Variation der Kor-

relationskoeffizienten der einzelnen Parameter dargestellt. Die mit „1“ gekennzeichneten Parameter zeigten eine Korrelation ab 70% der Standorte; jene mit „2“ gekennzeichneten von 50-69% der Standorte. Der Kornertrag zeigte bei 46% der Standorte eine Signifikanz. Mit Ausnahme von BEST waren die Ertragskomponenten über die Umwelten gut bis sehr gut reproduzierbar. Die höchste Übereinstimmung wurde bei TKG erzielt. Die „Dürrefluht“-Parameter korrelierten ebenfalls gut bis sehr gut über die Umwelten. Bei den Merkmalen DTAE und DTBL wurde sogar in 100% der Fälle eine hochsignifikante Übereinstimmung gefunden. Auch SZF1-3 wiederholten sich oft an anderen Standorten. Lediglich GRAE variierte in größerem Ausmaß.

Bei den Parametern die mit der Vermeidung der Austrocknung assoziiert sind korrelierten BLRO und die WHOE intervarietale sehr stark über die verschiedenen Orte hinweg; STO2-3 und EKA hingegen gar nicht bis sehr selten.

Bei der Austrocknungstoleranz zeigte der Chlorophyllgehalt je nach Entwicklungsstadium eine hohe bis mittlere Übereinstimmung. Die frühesten Messungen (BBCH 43-59) und die mittleren Messungen (BBCH 60-71) korrelierten in 71 bzw. 70% der Fälle. Bei einer späteren Messung wurde eine Übereinstimmung noch in 40% der Standorte erzielt. Bei OSP war die Übereinstimmung nur zufallsbedingt.

Kornertrag unter Trockenstress

Korrelationen zwischen KOEQ unter Trockenbedingungen und den einzelnen Parametern waren signifikant bei folgenden Merkmalen: KZAE ($r=0,62^{**}$), KZM2 ($r=0,67^{**}$), AEGW ($r=0,62^{**}$), Entwicklungsstadien ($r=0,48^*$ bis $0,51^*$), SZF1-3 ($r=-0,47^*$ bis $-0,64^{**}$), SPD1-3 ($r=0,44^*$ bis $0,66^{**}$) und OSP ($r=0,67^{**}$). Bei allen übrigen Parametern konnten keine Zusammenhänge zu KOEQ festgestellt werden.

Um auch komplexere Verbindungen zu erhalten, wurde in einem gemischten linearen Modell geprüft, ob die Herkunft, die Backqualität oder die Begrannung einen Einfluss auf KOEQ bei trockengestressten Versuchen haben. Es zeigte sich, dass die Herkunft einen signifikanten Einfluss auf KOEQ hatte. Um Schwankungen von Ort und Jahr abzufangen, wurden diese Faktoren als zufällige Effekte ins Modell aufgenommen. Die Begrannung hatte keinen signifikanten Einfluss. Die Backqualität lieferte lediglich eine Mehrinformation, wenn die Begrannung im Modell berücksichtigt wurde. RICHARDS et al. (2002) schlug eine Selektion auf Grannen zur Erhaltung der photosynthetischen Aktivität und Verbesserung der Transpirationseffizienz vor.

Tabelle 5: Hauptkomponenten und zugrundeliegende (ursprüngliche) Parameter zur Modellierung des Kornertrages unter Trockenbedingungen (2010-2012)

Table 5: Principal components and underlying parameters for the modeling of yield under drought stress (2010-2012)

Hauptkomponente	Parameter
PC1	DTGR, GRAE, GRBL, DTBL, DTAE
PC2	DTAE, DTBL, GRBL
PC3	HLGW, WHOE, SZF1
PC4	BLAE, BEST, WHOE

Neben diesen kategoriellen Variablen sollte auch der Einfluss der übrigen Parameter auf KOEQ untersucht werden. Es wurden jene Merkmale in das Modell einbezogen, bei denen mindestens 240 (von 290) Beobachtungen vorhanden waren. Dies traf auf DTAE, DTBL, DTGR, BLAE, GRBL, GRAE, WHOE, TKG, HLGW, BEST und SZF1 zu. Mittels Hauptkomponentenanalyse (PCA) wurden diese 11 Parameter auf 4 Hauptkomponenten (PCs) reduziert. Jeder der vier gewonnenen PCs wurde aus den elf ursprünglichen Merkmalen berechnet. Welche von diesen den größten Teil zur jeweiligen Hauptkomponente beitrugen, kann *Tabelle 5* entnommen werden.

In einem weiteren linearen gemischten Modell wurde der Einfluss der errechneten Hauptkomponenten untersucht. Herkunft, Sorte, Ort und Jahr wurden durch entsprechende fixe bzw. zufällige Effekte berücksichtigt. Es zeigte sich, dass nur Hauptkomponente 3 einen signifikanten Einfluss auf KOEQ ausübt. Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die lineare Kombination der Parameter HLGW, WHOE und SZF1 zu einer Erhöhung des absoluten Kornertrages unter Trockenstress beiträgt.

Bei allen übrigen Parametern, bei denen eine Hauptkomponentenanalyse aufgrund von vielen fehlenden Werten nicht sinnvoll war, wurde der Einfluss eines Parameters ohne Berücksichtigung der anderen Parameter mittels Modellierung untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Parameter SPD1, SPD2, STO2, OSP2 und SZF2 einen signifikanten Einfluss auf KOEQ haben. Wobei das Ergebnis für STO2 aufgrund der sehr geringen Anzahl an Beobachtungen mit großer Unsicherheit behaftet bleibt.

Kornertragsdifferenz als Maß der Trockentoleranz

Neben dem absoluten Kornertrag ist der Ertragsverlust unter Trockenstress im Vergleich zu einer ausreichenden Wasserversorgung ein weiteres Indiz für Trockentoleranz. Dazu wurden österreichische Versuche ausgewählt, bei denen beide Varianten vorkamen und Trockenstress während der Vegetationsperiode auftrat. In Tattendorf 2010 litten die Genotypen erst sehr spät unter Trockenstress, wodurch auch teilweise nicht absicherbare Mehrerträge auftraten. In *Abbildung 1* sind die genotypisch bedingten Kornertragsdifferenzen an den Standorten dargestellt.

Innerhalb der Qualitätsweizen sind die Sorten 'Exklusiv', 'Bitop' und 'GK Kalász' den Sorten 'GK Petur' und 'Capo' überlegen. Bei den Mahlweizen erwiesen sich 'GK Hunyad', 'Premio' und 'Brilliant' trockenresistanter als 'Eurojet', 'Hybrid' und 'JB Asano'. Zur statistischen Verrechnung wurden zwei Fälle untersucht: (1) Tattendorf 2010-2012 und (2) Tattendorf und Niederweiden 2012. Aus den Werten der Versuche Tattendorf 2010 bis 2012 konnte mit 13 Parametern eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt werden. Diese wurden auf vier Hauptkomponenten reduziert (*Tabelle 6*).

Mittels Modellierung wurde der Einfluss der Parameter auf KOEQ untersucht. Im Modell wurde der Faktor Beregnung berücksichtigt. Unberegnung wurde als Referenz gewählt. Das heißt, die Konstante (*intercept*) gibt das Grundniveau für einen unberegneten Versuch einer Qualitätsweizensorte aus Österreich an. *Tabelle 7* zeigt, dass PC1

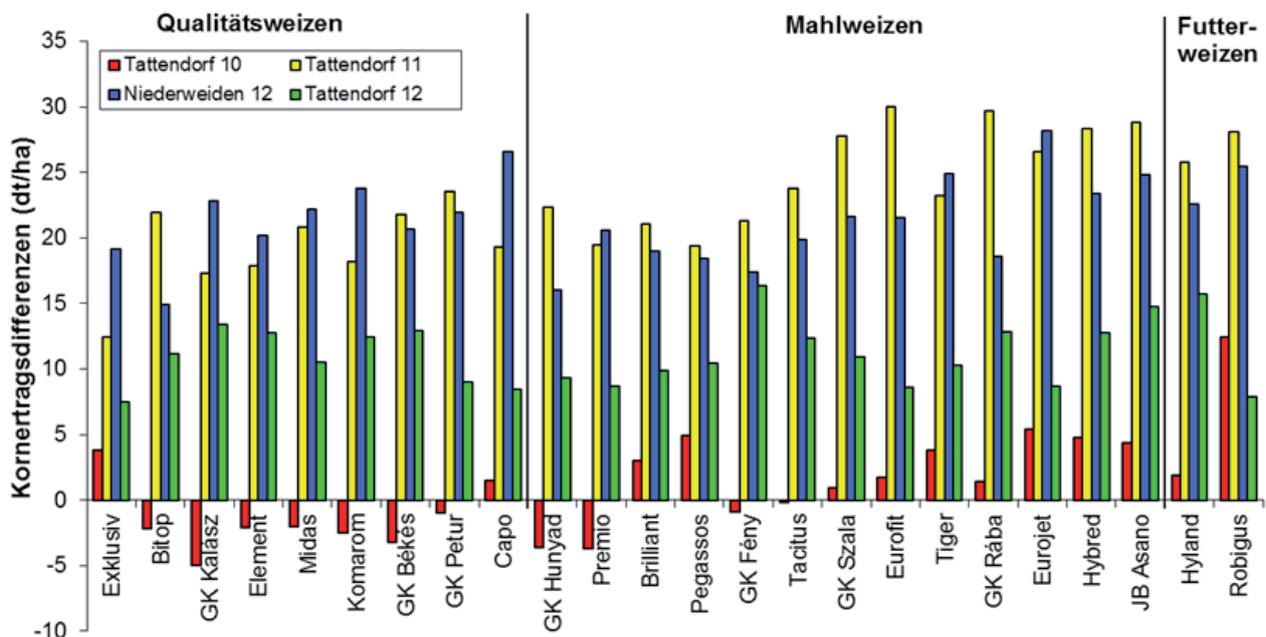


Abbildung 1: Kornertragsdifferenz zwischen beregneten und nicht beregneten Versuchen (2010-2012, gereiht nach steigender Differenz)

Figure 1: Yield difference between irrigated and non-irrigated trials (2010-2012, ordered by increasing difference)

Tabelle 6: Hauptkomponenten und ursprüngliche Parameter zur Modellierung des Kornertrages unter Trockenbedingungen (Tattendorf 2010-2012)

Table 6: Principal components and underlying parameters for the modeling of the yield under drought stress (Tattendorf 2010-2012)

Hauptkomponente	Parameter
PC1	DTGR, DTAE, DTBL
PC2	BLAE, SZF1, SZF2, SZF3
PC3	HLGW, GRBL, TKG
PC4	GRAE

Tabelle 7: Ergebnisse des linearen gemischten Modells für den Kornertrag am Standort Tattendorf (2010-2012) mit den gewonnenen Hauptkomponenten als Prädiktoren

Table 7: Coefficients and variance components of the linear mixed model for grain yield at the location Tattendorf (2010-2012) with extracted principal components as covariates

	Parameter
Intercept	47,18
PC1	-189,23
PC2	48,64
PC3	5,53
PC4	129,61
Feucht	-1,31
Herkunft	
DE ¹	-0,85
HU	-1,63
Qualität	
MW	1,31
FW	-5,83
Varianzkomponenten	
Sorte	7,51
Jahr	6,04
Fehler	4,63

¹ DE, Deutschland; HU, Ungarn; MW, Mhlweizen; FW, Futterweizen

Tabelle 8: Hauptkomponenten und ursprüngliche Parameter zur Modellierung des Kornertrages unter Trockenbedingungen (Tattendorf und Niederweiden 2012)

Table 8: Principal components and the underlying Parameters for the modeling of the yield under drought stress (Tattendorf and Niederweiden 2012)

Hauptkomponente	Parameter
PC1	DTGR, SZF2, SZF3, DTBL, DTAE
PC2	KZM2, AEGW, BEST, SPD2
PC3	GRBL, GRAE
PC4	KZAE, TKG, HLGW

zu einer Verringerung des erwarteten Kornertrages beiträgt, während die PC2-4 eine Erhöhung mit sich bringen. Da aber bei PC1 die ursprünglichen Parameter negativ eingehen, verringert sich durch deren Erhöhung die Hauptkomponente. Wenn sich die Kombination von DTGR, DTAE und DTBL erhöht, steigt KOEQ unter Trockenbedingungen.

Die weiteren in *Tabelle 6* genannten ursprünglichen Parameter gehen positiv bei der Bildung der entsprechenden Hauptkomponenten ein. Da PC2-4 auch positiv sind, steigt

Tabelle 9: Ergebnisse des linearen gemischten Modells für den Kornertrag an den Standorten Tattendorf und Niederweiden 2012 mit den gewonnenen Hauptkomponenten als Prädiktoren

Table 9: Coefficients and variance components of the linear mixed model for grain yield at Tattendorf and Niederweiden 2012 with extracted principal components as covariates

	Parameter
Intercept	43,55
PC1	n.s.
PC2	-25,60
PC3	16,72
PC4	n.s.
Feucht	5,43
Herkunft	
DE ¹	-0,96
HU	-0,23
Qualität	
MW	1,93
FW	-1,51
Varianzkomponenten	
Sorte	3,53
Jahr	184,84
Fehler	4,40

¹ DE, Deutschland; HU, Ungarn; MW, Mhlweizen; FW, Futterweizen

der erwartete KOEQ bei Erhöhung der entsprechenden ursprünglichen Parameter. Durch Einbeziehung des erst zur Ernte trockenen Jahres 2010 in das Modell verringert sich der erwartete KOEQ unter Feuchtbedingungen.

Führt man die Hauptkomponentenanalyse für die Standorte Tattendorf und Niederweiden 2012 durch, ergeben sich neue Hauptkomponenten (*Tabelle 8*).

Auch hier konnten die Parameter auf 4 Hauptkomponenten reduziert werden. Die Ergebnisse der Modellierung, bei der sich PC 2 und PC 3 als signifikant herausstellten, sind der *Tabelle 9* zu entnehmen. KZM2, AEGW und BEST gehen negativ in das Modell ein, SPD2 hingegen positiv. Das heißt, eine Erhöhung der Ertragsparameter bewirkt einen höheren Ertrag, ein Anstieg der SPAD-Werte hingegen verringert diesen unter Trockenbedingungen. In *Tabelle 9* ist auch ersichtlich, dass der erwartete Kornertrag für Versuche mit ausreichender Wasserversorgung deutlich höher ist, als für trockene Standorte.

Schlussfolgerung

Um einen Trockenstressparameter in der Züchtung realisieren zu können, muss dieser mit geringem Aufwand erfolgreich einsetzbar sein, über die Umwelten gut reproduzierbar und eine Aussagekraft für das Problem Trockenstress besitzen. Die Messungen von EKA, STO, OSP und OTEM erfüllen die Forderung der einfachen Einsetzbarkeit nicht. Die Parameter der „Dürrefluht“ sowie die Chlorophyllmessungen sind rasch durchführbar und können gut über die verschiedenen Umwelten reproduziert werden. BLRO, WHOE und die Ertragsstruktur korrelierten mehrheitlich gut an unterschiedlichen Standorten. Mit Ausnahme von BLRO und WHOE konnte bei diesen Parametern ein Zusammenhang zu KOEQ unter Trockenbedingungen gefunden werden. Weiters wurde aufgezeigt, dass die

Begrannung keine höhere Trockentoleranz einer Sorte bewirkt. Eine Hauptkomponentenanalyse über Standorte mit Trockenstress zeigte, dass die Kombination der Parameter HLGW, WHOE und SZF zu einer Erhöhung des KOEQ beitragen. Eine Hauptkomponentenanalyse der berechneten und trockengetesteten österreichischen Versuche 2012 erzielte zwei signifikante Hauptkomponenten, die aus den Ertragskomponenten und GRAE bestehen.

Zusammenfassend erscheinen die Parameter DTAE, DTGR, GRAE, SZF und SPD am ehesten geeignet trocken-tolerante Genotypen zu identifizieren. BLRO und die Begrannung brachten in diesen Versuchen wenig Aussage über Trocken-toleranz. Die übrigen Parameter sind meist aufwendig zu erheben bzw. nicht genügend reproduzierbar.

Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen von zwei CORNET-Projekten (Collective Research NETWORKING) erzielt, die in Österreich durch die FFG (Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft) und Saatgut Österreich finanziert wurden. In Deutschland wurde das Projekt aus Mitteln der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) und des BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) gefördert. Die Gemeinschaft zur Förderung der privaten deutschen Pflanzenzüchtung e.V. (GFP) beteiligte sich ebenfalls. In Ungarn trat NKTH (National Office for Research and Technology) als Finanzpartner auf.

Literatur

- AGES, 2013: Österreichische Beschreibende Sortenliste 2013, Landwirtschaftliche Pflanzenarten. Schriftenreihe 21/2013. Bundesamt für Ernährungssicherheit, Wien.
- CHAVES MM, MAROCO JP, PEREIRA JS, 2003: Understanding plant responses to drought: from genes to the whole plant. *Funct Plant Biol* 30, 239-264.
- FRIEDLHUBER R, SCHMIDHALTER U, HARTL L, 2011: Einfluss von Trockenstress auf die Bestandestemperatur und den Ertrag bei

Weizen (*Triticum aestivum*). Bericht 61. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2010, 155-158. LFZ Raumberg-Gumpenstein, Irdning.

- HALLAE, 2001: Crop responses to environment. CRC Press, Boca Raton.
- JONES H, 2004: What is water use efficiency? In: BAKON MA (Eds), Water use efficiency in plant biology, 27-41. Blackwell Publ, Oxford.
- JONES HG, CORLETT JE, 1992: Current topics in drought physiology. *J Agric Sci* 119, 291-296.
- LEVITT J, 1972: Responses of plants to environmental stresses. Academic Press, New York.
- LUDLOW MM, MUCHOW RC, 1990: Critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Adv Agron* 43, 107-153.
- OBERFORSTER M, SCHMIDT L, WERTEKER M, 1994: Bewertungsschema '94 der technologischen Qualität von Weizensorten (Weichweizen). *Jahrbuch* 1993, 257-280. Bundesanstalt für Pflanzenbau, Wien.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012: R: A language and environment of statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. (<http://www.R-project.org/>).
- RAY JD, SINCLAIR TR, 1997: Stomatal closure of maize hybrids in response to drying soil. *Crop Sci* 37, 803-807.
- RICHARDS RA, REBETZKE GJ, CONDON AG, VAN HERWAARDEN AF, 2002: Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci* 42, 111-121.
- SALIH AA, ALI I A, LUX A, LUXOVA M, COHEN Y, SUGIMOTO Y, INANAGA S, 1999: Rooting, water uptake and xylem structure adaptation to drought of two sorghum cultivars. *Crop Sci* 39, 168-173.
- TABACHNICK BG, FIDELL LS, 2007: Using multivariate statistics, 5th Ed. Allyn & Bacon, Boston.
- TEIZER B, 2010: Novel selection criteria for drought tolerant winter wheat genotypes and their correlations to drought stress indicators, crop developments, plant morphology, yield and quality parameters. M.Sc. Thesis, BOKU-University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna.
- WEST BT, WELCH KB, GALECKI AT, 2007: Linear mixed models. A practical guide using statistical software. Chapman & Hall, New York.

Anmerkung: Die Online-Version des Tagungsbandes enthält Abbildungen in Farbe und kann über die Homepage der Jahrestagung (<http://www.raumberg-gumpenstein.at/>) - Downloads - Fachveranstaltungen/Tagungen - Saatzüchertagung - Saatzüchertagung 2012) oder den korrespondierenden Autor bezogen werden.