Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Masterarbeit

Ertrag und Qualität bei Bio-Winterweizen: Einfluss von Bodentrends und äußeren Einwirkungen

verfasst von

Thomas UNGER, BSc

im Rahmen des Masterstudiums

Nutzpflanzenwissenschaften

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Wien, Dezember 2021

Betreut von:

Ao.Univ.Prof. DI Dr. Heinrich Grausgruber
Institut für Pflanzenzüchtung
Department für Nutzpflanzenwissenschaften

Eidesstattliche Erklärung

Ich, Thomas Unger, erkläre eidesstattlich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Thomas Unger

Wien, Dezember 2021

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wurde auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten für beide Geschlechter.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die zum Gelingen meiner Masterarbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Heinrich Grausgruber, welcher immer Zeit für meine Anliegen hatte und mich während meiner Arbeit mit viel Engagement unterstützte. Seine fachliche Kompetenz und „gerade Linie" erleichterten die Zusammenarbeit.

Ein großer Dank ergeht an meinen Mitbetreuer Dr. Sebastian Michel, MSc für die Unterstützung im Rahmen meiner Arbeit.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Versuchstechniker Dipl.-Ing. Stefan Kutschka für seine Hilfsbereitschaft bei diversen Analysen und Einschulungen. Darüber hinaus nahm er sich stets Zeit für fachliche Beratung.

Mein außerordentlicher Dank gilt der Saatzucht Donau in Probstdorf für die Bereitstellung sowie die Einschulung des NIR-Gerätes. In diesem Zusammenhang möchte ich erwähnen, dass es nicht selbstverständlich derartig sensible Geräte zur Verfügung zu stellen.

Nicht zuletzt danke ich Mary Violet Berger vom Institut für Lebensmitteltechnologie, die mir die RVA Analyse ermöglicht hat und mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist.

Ein herzliches Dankeschön an Angelika und Silvia Marko für ihre konstruktive Kritik und das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir meine gesamte Ausbildung an der BOKU ermöglicht haben. Sie förderten mich und vermittelten mir die richtigen Werte anzustreben. Danke für die jahrelange Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung I
Danksagung II
Inhaltsverzeichnis III
Abstract V
Abkürzungen und Einheiten VI
1. EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG 1
2. LITERATURÜBERSICHT 2
2.1 Evolution, Taxonomie und Entwicklung des Weizens 3
2.2 Weizenzüchtung 7
Pedigree-Methode 7
Doppelhaploiden Methode 8
Hybridzüchtung von Weizen 9
2.3 Qualitätseigenschaften von Weizen 10
Mahlfähigkeit 10
Mehlausbeute 11
Grießbildungsvermögen und Griffigkeit 12
Ganzkornaschegehalt (Mineralstoffgehalt) 14
Hektolitergewicht und Tausenkorngewicht 14
Backfähigkeit 14
Backvolumen 15
Teigverarbeitungseignung 15
Rohprotein 16
Feuchtkleber 17
Sedimentationswert 18
Fallzahl 19
Farinogramm 20
Korn-, Mahl- und Backqualitätsmerkmale im Überblick 23
2.4 Umwelteinflüsse 23
Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf Weizen 23
Auswirkungen der Düngung auf die Qualität von Weizen 25
Standortanforderungen von Weizen 26
Räumliche Variabilität im Einfluss auf Weizen 27
Statistische Modelle 27

3. MATERIAL UND METHODEN 29
3.1 Versuchsstandort 29
Versuchsplan 30
3.2 Pflanzenmaterial 30
3.3 Indirekte Qualitätsmerkmale 33
Tausendkorngewicht 33
Siebung 33
Nahinfrarotspektroskopie 34
3.4 Datenauswertung 35
4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION 37
4.1 Kornertrag 38
4.2 Tausendkorngewicht 41
4.3 Korngröße 42
4.4 Hektolitergewicht 42
4.5 Feuchtklebergehalt 44
4.6 Proteingehalt 45
4.7 Schlussfolgerung und Ausblick 47
4.8 Appendix 49
5. REFERENZEN 50
6. TABELLENVERZEICHNIS 61
7. ABBILDUNGSVERZEICHNIS 62

Abstract

Wheat is one of the most important agricultural products in the world and makes up 50% of the daily carbohydrate intake in developed countries. Wheat has a unique position among agricultural products, as wheat flour is the only product that can be processed into high voluminous bread. Wheat grain yield and end-use quality can vary greatly and depend on many factors. Differences in soil fertility, rainfall and temperature can have a major influence. Breeding of new wheat varieties takes several years. Therefore, it is important to achieve a high selection efficiency in any test environment so that the performance of breeding lines can be reliable identified. Soil maps are useful tools and support the selection in breeding. The aim of this thesis was to identify spatial variation for yield and quality traits using different statistical approaches. Therefore an organic winter wheat field trial was evaluated with a basic spatial model (AR1×AR1, first order autocorrelation in two dimensions). This basic spatial model was compared to a lattice design model, a row-column design plus first order autocorrelation and two nearest neighbor approaches. Best model selection was based on the -2 Log-likelihood value. The best models were different depending on the traits. The nearest neighbor approach EW2 (East-West 2) was the best for quality traits. The statistical analysis has shown that in the present test site spatial variation was present and could have been accounted for by the used statistical models. Modelling of spatial variation in breeding trials can result in more precise data and therefore increase selection efficiency during the breeding process.

Abkürzungen und Einheiten

°C	Grad Celsius
AACC	American Association of Cereal Chemists
Abb.	Abbildung
AGES	Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH
AMA	Agrarmarkt Austria
BBCH	Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie
BQG	Backqualitätsgruppe
BSL	Beschreibende Sortenliste
BU	Brabender Units
ca.	zirka
cP	Centipoise
EE	Extensogrammeinheiten
EU	Extensogrammunits
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
g	Gramm
GPE	GlutoPeak-Einheiten
ha	Hektar (10^4 m^2)
Hrsg.	Herausgeber
ICC	International Association for Cereal Science and Technology
ISO	Internationale Organisation für Normung
Iss	Issue
kg	Kilogramm (10^3 g)
L	Liter
min	Minute
mL	Milliliter (10^{-3} L)
mm	Millimeter (10^{-3} m)
N	Stickstoff
N_{min}	mineralisierter Stickstoff

N_{opt}	ökonomisch optimale N-Düngung
NIR	Nahinfrarotspektroskopie
PU	Promylograph Einheiten
QTL	Quantitative Trait Locus
RVA	Rotationsviskosimeter
s	Sekunde
t	Tonne (10^3 kg)
TM	Trockenmasse
USD	US-Dollar
WAex	Wasseraufnahme Extensogramm

1. EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG

Die Sicherstellung von Lebensmitteln zählt zu den Hauptaufgaben der Landwirtschaft. Mit steigender Weltbevölkerung steigt der Druck dieser Anforderung nachzukommen. Ein Ansatzpunkt zur Steigerung der agrarischen Produktion ist die Erhöhung der Produktivität. Hohe Produktionszuwächse in der Agrarproduktion werden in Nordamerika und in Asien realisiert, während Australien aufgrund von längeren Trockenzeiten im Jahresverlauf einen geringen jährlichen Ertragsanstieg verzeichnet. Viele europäische Länder weisen ein, global betrachtet, sehr hohes Ertragsniveau auf. Doch in den letzten Jahren wuchs die Nachfrage nach Nahrungsmittel stärker als das Angebot (Zeddies 2010).

Umso wichtiger ist es den Innovationsprozess in der landwirtschaftlichen Forschung und Züchtung voranzutreiben. Die Agrarforschung zielt darauf ab, Produktivitätszuwächse zu generieren, wird aber zunehmend durch politische Rahmenbedingungen eingeschränkt. Durch Einsatz von effizienten statistischen Auswertungsverfahren können der Aufwand und die Kosten in der Züchtungsforschung sowie praktischen Züchtung gesenkt werden. In der Sortenentwicklung ist es daher sehr wichtig in jeder Generation eine hohe Selektionseffizienz zu erreichen. Dies kann durch ein passendes Versuchsdesign bzw. durch eine statistische Auswertung erreicht werden. Die vorliegende Masterarbeit knüpft an diesen Punkten an. Es sollen mithilfe der Statistik Bodentrends in Feldversuchen erkannt und korrigiert werden.

Im Zuge der Erstellung dieser Masterarbeit sollte überprüft werden, ob mit Hilfe der Statistik Bodentrends bei indirekten Qualitätsmerkmalen sichtbar sind. Dazu wurden Proben aus einem Bio-Winterweizenversuch aus Raasdorf untersucht. Im Rahmen der Arbeit soll konkret die Frage „*Können Bodentrends mithilfe der Statistik bei indirekten Qualitätsmerkmalen sichtbar gemacht werden?*“ beantwortet werden.

2. LITERATURÜBERSICHT

Weizen (*Triticum* L.) gilt mit einer Anbaufläche von rund 220 Millionen Hektar als eine der bedeutendsten Kulturpflanzen der Welt. 2017 wurden weltweit 218 Millionen Hektar Weizen kultiviert und durchschnittlich 3,5 t ha^{-1} geerntet (FAO 2019). Als Weizenüberschussländer gelten die USA, Kanada, Australien, Argentinien und Frankreich (Belitz et al. 2008). Die höchste Produktion und Anbaudichte ist zwischen dem 30. und 60. nördlichen Breitengrad zu verzeichnen. Aber auch zwischen dem 27. und 40. südlichen Breitengrad ist die Kulturart Weizen vorzufinden (Diepenbrock et al. 2005). Ausgewählte Produktionsregionen und deren Erträge sind in Tabelle 1 dargestellt.

Laut AMA Mehrfachantrag wurden 2018 österreichweit 258 236 ha Weichweizen ausgesät, davon wurden 34 968 ha biologisch bewirtschaftet. Somit ist der Winterweizen in Österreich, sowohl im konventionellen als auch im biologischen Landbau, die wichtigste Kulturart (AMA 2018).

In den Industriestaaten werden durch den Verzehr von Brot etwa 50% des Kohlenhydratbedarfs und rund 30% des Bedarfs an Protein gedeckt. Auch zur Mineralstoff- und Spurenelementversorgung leisten Getreideerzeugnisse einen wesentlichen Beitrag. Für die Broterzeugung wird vorrangig Weizenmehl verwendet, infolgedessen nimmt Weizen im Gegensatz zu anderen Getreidearten wie Reis, Hirse und Mais eine Sonderstellung ein (Belitz et al. 2008).

Tabelle 1: Weltweite Weizenproduktion und Weizenerträge (Quelle: Wrigley 2016)

Land/Region	Produktion (t)	Ertrag (t ha^{-1})	Gesamte Getreideproduktion (t)
Europäische Union	143 000 000	5,5	304 000 000
China	121 000 000	5,0	480 000 000
Indien	93 000 000	3,1	240 000 000
USA	58 000 000	3,2	436 000 000
Russland	52 000 000	2,2	88 000 000
Weltweit	706 000 000	3,2	2 432 000 000

2.1 Evolution, Taxonomie und Entwicklung des Weizens

Entscheidend für den Übergang von Jägern und Sammlern zu Landwirten war u.a. die Domestikation von Weizen. Dieses Schlüsselereignis fand vor etwa 15 000 Jahren im „Fruchtbaren Halbmond" im Nahen Osten statt (Golovnina et al. 2007). Zur Bildung der heute wirtschaftlich wichtigen Weizenarten führten interspezifische Kreuzungen, Mutationen und die Allopolyploidisierung (Faris 2014). Die aus der Domestizierung stammenden hexaploiden Weizenarten teilen diverse Mutationen mit deren Vorläuferarten. Alle wilden diploiden und hexaploiden Vorläuferarten haben spröde Ährenspindeln, harte Hüllspelzen und sind nicht freidreschend. *T. aestivum* erbte die weiche Hüllspelze von seiner Vorläuferart *T. turgidum*. Die Mutation in *T. turgidum*, welche weiche Hüllspelzen hervorruft, fand im A und B Genom statt. Mutationen einer nicht-freidreschenden Spelze und einer freidreschenden Spelze fanden ausschließlich in *T. turgidum* statt und wurde an *T. aestivum* vererbt. Abbildung 1 zeigt die Phylogenie von Weichweizen (*T. aestivum*).

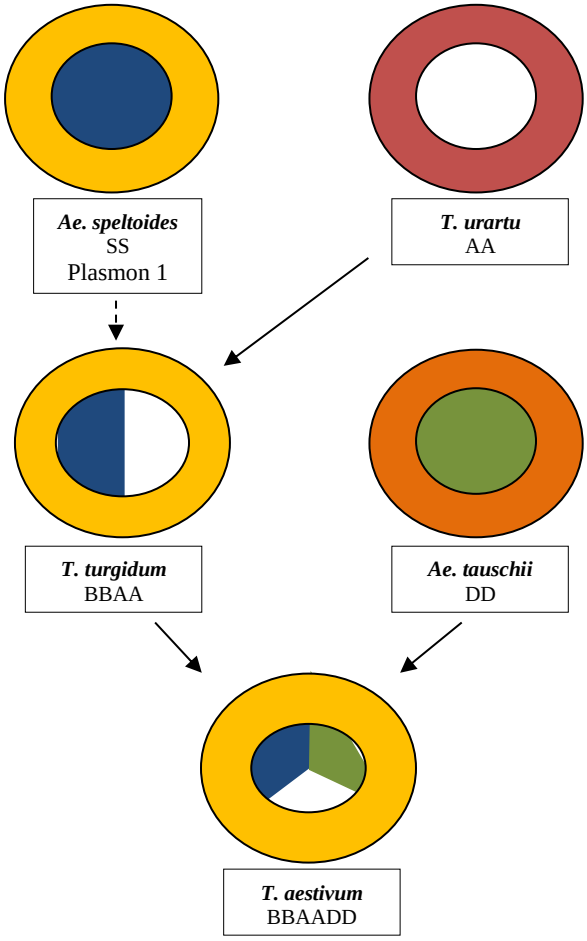

Abbildung 1: Phylogenie von *Triticum aestivum* (modifiziert nach Gill et al. 2007). Der innere Kreis kennzeichnet den kerngenetischen Weg und der äußere Kreis den zytoplasmatischen Weg. Die strichlierte Linie zwischen *Aegilops speltoides* und *T. turgidum* bedeutet, dass der Spender des B Genoms nicht genau identifiziert ist.

Einkorn (*T. monococcum*) und Emmer (*T. dicoccum*) werden als frühe Weizenformen bezeichnet und sind unter den ersten Fruchtarten, die der Mensch domestiziert hat. Überreste von domestiziertem Emmer wurden 7800 bis 7600 v. Chr. im Damaskus-Becken, dem heutigen Syrien, gefunden. Einkorn wurde in der heutigen Türkei 6900 v. Chr. nachgewiesen (Lev-Yadun et al. 2000). Das Wort Weizen stammt aus dem Germanischen und steht in Verbindung mit dem Adjektiv „weisz", also vom weißen Mehl, welches der Weizen liefert (Miedaner 2014). Die altdeutsche Wurzel des Getreidenamens „hwaitja" kommt vom Ausdruck „hwita", was „weiß" bedeutet (Bjørnstad 2016). Der Weizen (*Triticum* L.) gehört der Familie der Süßgräser (*Poaceae*) an. Durch das Mahlen der Körner zwischen zwei Steinen konnte einfach Mehl hergestellt werden. Die Gattung *Triticum* ist sehr vielseitig und besitzt Formen mit verschiedenen Ploidiestufen. Eine diploide Form ist das Einkorn, tetraploide Formen sind der Emmer und der Hartweizen (*T. durum*) und hexaploide Formen sind Weichweizen und Dinkel (*T. spelta*) (Miedaner 2014).

Gegenwärtig hat der Anbau von *T. aestivum* und *T. durum* weltweit die größte Bedeutung, wobei 95% der weltweiten Anbaufläche *T. aestivum* ausmacht (Wrigley 2016). Sogenannte „alte Weizenarten" sind Emmer, Einkorn und Dinkel, welche nur eine geringe weltweite Bedeutung haben. In den letzten Jahren werden Emmer, Einkorn und Dinkel vermehrt in Müslis und Broten verarbeitet, da der Konsument diesen Weizenarten gesundheitsfördernde Eigenschaften zuspricht. Durch den zusätzlichen Arbeitsschritt der Entspelzung in der Mühle und dem niedrigeren Ertrag der sogenannten „alten Weizensorten" hält sich deren Einsatz in Grenzen (Geißlitz et al. 2019).

Die Weizentaxonomie hat eine lange Geschichte und sorgt in der Forschungsgemeinschaft oft für Verwirrung. Dies kommt durch Vorhandensein konkurrierender Weizenklassifizierungen und die Verwendung verschiedener botanischer Namen für ein und dieselbe Art zu Stande. Westliche Wissenschaftler folgen überwiegend der Klassifizierung nach MacKey (1966) und van Slageren (1994), wohingegen östliche Wissenschaftler, mit einigen Ausnahmen, die Klassifizierung nach Dorofeev et al. (1979) bevorzugen. Das heutige Ziel der Taxonomen ist es Klassifizierungen zu erstellen, die phylogenetische Beziehungen wiederspiegeln.

Die Verwirrung in der Taxonomie der Weizenforschung wird noch weiter durch das Fehlen einheitlicher Kriterien innerhalb der heutigen taxonomischen Behandlungen zur Unterscheidung von natürlichen und künstlichen Hybriden verstärkt (Bernhardt 2015). Es gibt auch zahlreiche künstlich geschaffene Hybride mit ungültigen Namen. Verwendete Unterscheidungskriterien sind meist morphologischer, ökologisch-geographischer, biochemischer, zytogenetischer und molekulargenetischer Natur (Goncharov 2011).

Durch enorme Ertragssteigerungen und Modernisierung der Landwirtschaft wurde die Zeit um 1870 bis 1914 von Jan Luiten van Zanden als die „erste Grüne Revolution" bezeichnet (Miedaner 2014). 1914 brachte Nazareno Strampelli seine erste Hochertragsweizensorte Carlotta auf den Markt. Die Sorte Carlotta brachte gute Erträge bis im vierten Jahr ein trockener und heißer Sommer kam. Um dieses Problem zu beheben, kreuzte Strampelli ein Kurzstrohgen (*Rht8*) und ein Gen zur sehr frühen Abreife (*Ppd-D1*) aus der japanischen Sorte Akakomugi ein. Daher entkam die Sorte aufgrund der frühen Abreife der Trockenheit in der Kornfüllungsphase und durch das kurze Stroh war sie wenig lagergefährdet (Salvi et al. 2012). Das *Rht8* Gen brachte eine Verkürzung der Pflanzenhöhe um 10 cm und das *Ppd-D1* Gen eine frühere Abreife um 8 Tage (Borojevic & Borojevic 2005). Das *Rht* Gen kodiert einen Wachstumsrepressor, welcher vom Pflanzenhormon Gibberellinsäure (GA) unterdrückt wird. Die eingekreuzten *Rht* Gene bewirkten eine verringerte Reaktion gegenüber von GA (Hedden 2003).

Die „zweite Grüne Revolution" startete in den 1960er Jahren mit der Einkreuzung der *Rht* Gene im Weizen (Hedden 2003). Durch die Reduzierung der Pflanzenhöhe kam es in weiterer Folge zu einem erhöhten Einsatz von Mineraldüngern (Miedaner 2014). Die Pflanzenhöhe gilt als wichtiges ökonomisches Merkmal, welches starken Einfluss auf Ertrag und Qualität hat. Das hohe Düngerniveau führte zu längeren Weizenpflanzen und damit zu verstärktem Auftreten von Lager nach Starkniederschlagereignissen. Durch eine wesentliche Verringerung der Pflanzenhöhe wurde der Ernteindex von Weizen erhöht. Anstatt der Strohproduktion wurde die Kornproduktion verbessert (Würschum et al. 2017). Durch die „Grüne Revolution" wurde der Ernteindex von 50% auf 60% zu erhöhen. Laut Austin et al. (1980) ist der Kornertrag stark mit dem Ernteindex korreliert. Die genetischen Ertragszuwächse beim Weizen schwankten nach der „Grünen Revolution" zwischen 0,5-0,8% pro Jahr. In absoluten Zahlen gab es bei Sommerweizen eine durchschnittliche genetisch bedingte Ertragszunahme von 40 kg ha^{-1} pro Jahr. Heutzutage sind die genetischen Ertragszuwächse bei

Sommerweizen etwa 0,6-1,0% pro Jahr. In vielen Teilen der Welt, einschließlich Nordamerika und Europa, stagnieren allerdings die Erträge (Valluru et al. 2015).

Laut Brisson et al. (2010) ist der Grund für die Stagnation der Erträge nicht genetischen Ursprungs. Der genetische Fortschritt wird teilweise durch den Klimawandel abgeschwächt. Auch agrarpolitische und wirtschaftliche Einflüsse, wie die Zunahme der ökologischen Landwirtschaft, eine Veränderung der Fruchtfolge und Verringerung der Stickstoffdüngung wirken sich auf die Weizenerträge negativ aus. Hülsenfrüchte wurden in der Fruchtfolge häufig durch Raps ersetzt wodurch die Stickstoffbilanz der Weizenvorfrüchte verschlechtert wurde.

Bedingt durch das ständig wandelnde Klima könnte es daher in naher Zukunft notwendig sein, auf eine erneute landwirtschaftliche Revolution und Neo-Domestizierung von Weizen zu setzen, um auch in Zukunft die steigende Weltbevölkerung ernähren zu können. Diesbezüglich wird es notwendig sein aus dem Genpool alter Weizen-Verwandter zu schöpfen (Faris 2014). Die starke Selektion im Zuge der Domestikation und der Züchtung führte zu einer erheblichen Abnahme der genetischen Vielfalt in den Genpools. Das genetische Potential zur Anpassung an die Herausforderungen des Klimawandels wurde somit geringer (Voss-Fels et al. 2015). Biodiversitätsgebiete mit nahen Verwandten der heutigen kultivierten Weizenarten sind daher von höchster Wichtigkeit. Wildweizen und *Aegilops*-Arten von diesen Flächen dienen als Spender von Weizenplasmon, des B- und D-Genoms. Diese Genetik dient der Züchtungsforschung und der Sicherheit der Nahrungsressourcen (Goncharov et al. 2009).

Synthetischer hexaploider Weizen (SHW) ist eine solche wichtige genetische Ressource, um agronomisch wichtige Gene auf Weichweizen zu übertragen. SHW bietet neue Quellen für Verbesserungen des Ertragspotenzials, der Trockenheits- und Krankheitsresistenz, sowie der Nährstoffnutzungseffienz. Seit den späten 1980er Jahren hat CIMMYT (International Maize and Wheat Improvement Center) über 1000 SHW Linien entwickelt. So konnten mit *Sr33* und *Sr45* wichtige Resistenzgene gegen *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* (Getreideschwarzrost) in SHW gefunden werden. Auch gegen *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* (Braunrost) wurde ein Resistenzgen (*Lr32*) in einem SHW identifiziert. *Ae. tauschii* und SHW sind auch bekannte Quellen für genetische Variation gegen abiotischen Stress (Li et al. 2018).

2.2 Weizenzüchtung

Pedigree-Methode

Bei der Weizen wird die Linienzüchtung angewandt. Weizen ist ein Selbstbefruchter und ist somit für diese Züchtungsart gut geeignet. Ziel der Kreuzung zweier Eltern ist, nach mehrfacher Selbstbefruchtung, eine homozygote Sorte. In jeder Generation verringert sich der Anteil des Heterozygotiegrades eines Gen-Locus um die Hälfte. Die Auswahl der Ausgangsvariation der Kreuzungseltern spielt hierbei eine wesentliche Rolle. Meistens werden Sorten ausgewählt, die sich in ihren Merkmalen gut ergänzen. Hauptsächlich werden Einfachkreuzungen durchgeführt, selten auch Dreifachkreuzungen. Um Zeit zu sparen erfolgt die Vermehrung der Kreuzungskörner im Glashaus. Die geernteten F_1-Körner werden bereits getrennt beobachtet und es erfolgt schon vor der Ernte der F_2 eine Auslese mit dem Augenmerk auf Merkmale mit hoher Erblichkeit (Heritabilität) wie zum Beispiel Pflanzenlänge, Zeitpunkt des Ährenschiebens und einfach vererbte Krankheitsresistenzen. Ab der F_5 kann vorsichtig eine Ertragsselektion durchgeführt werden. In der F_6 stehen schon mehrere Kilo Saatgut zur Verfügung, welches häufig in Experimenten auf 10 m² Parzellen an mehreren Orten angesät wird. Eine Wertprüfung der Sorte wird in der Regel ab der F_8 vom Sortenamt durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt liegt der Homozygotiegrad bei rund 99,2%, auf jedes einzelne Gen bezogen. Diese Züchtungsmethode, auch Pedigree-Methode genannt, ist das Standardschema für die Züchtung von Liniensorten. Im Wesentlichen wird zuerst eine Ausgangsvariation erstellt, danach über mehrere Jahre eine Selektion der spaltenden Generationen durchgeführt und zum Schluss ein Sortenaufbau mit Leistungsprüfungen getätigt (Miedaner 2018).

Doppelhaploiden Methode

Die Doppelhaploiden-Methode ist eine neuere Zuchtmethode, die die Linienzüchtung um etwa zwei Jahre verkürzt. Im Labor werden in einem Schritt vollständig homozygote Nachkommen erzeugt, sogenannte Doppelhaploide. So wird die Selektion vor allem für komplex vererbte Merkmale genauer und von einer Kreuzung wird die maximale genetische Variation genutzt. Bereits in der F_2 kann der Züchter die genetisch wertvollen Genotypen auslesen, da die Einzelpflanzen zu diesem Zeitpunkt schon vollständig homozygot sind. Mit Hilfe von molekularen Markern erfolgt die Auswahl von wichtigen monogenetischen Merkmalen. Die Selektion ist bei dieser Zuchtmethode der entscheidende Punkt, deshalb wird dabei das Verfahren der mehrstufigen, gewichteten Selektion genutzt. Hierbei wird in jeder Generation eine andere Kombination von Merkmalen, je nach Umfang der Prüfung und nach Gewichtung der einzelnen Merkmale, durchgeführt. Während die Anzahl der Genotypen durch die Selektion sinkt, steigt der Prüfaufwand je Genotyp. Am Anfang, wenn nur Einzelpflanzen oder Reihen zur Verfügung stehen, werden nur einfach zu erfassende Merkmale mit hoher Heritabilität ausgelesen. Zuerst erfolgt eine Auswahl der besten 50%. Aus diesen 50% wird in späteren Stufen noch eine genauere Auslese von 5-10% durchgeführt. Im folgenden Schritt wird die Zuchtlinie bei der Sortenzulassung angemeldet. Damit besteht die Verpflichtung, die Sorte mit maximaler Homogenität und Sortenreinheit zu erhalten. In jeder Vermehrungsstufe müssen daher sichtlich abweichende Einzelpflanzen entfernt werden. Bei Weizen kann es in der Häufigkeit von 1-3% zu Auskreuzungen durch Fremdbefruchtung kommen. Selten, aber aufgrund der großen Anzahl der Einzelpflanzen, kann es auch zu Mutationen kommen (Miedaner 2018).

Hybridzüchtung von Weizen

Die Hybridzüchtung von Selbstbefruchtern besteht im Wesentlichen aus drei Selektionsschritten. Im Beobachtungsanbau oder in der Ertragsprüfung werden Elternlinien aufgrund ihrer Eigenleistung selektiert. In einer mehrortigen Ertragsprüfung wird die allgemeine Kombinationseignung (GCA, *general combining ability*) zwischen den Elternlinien in einer Testkreuzung ermittelt. Abschließend werden die mehrortig und mehrjährig getesteten Hybriden selektiert. Hierbei wird auch die GCA und auch die spezifische Kombinationseignung (SCA, *specific combining ability*) erfasst. Die Ertragserhöhung beruht in der Hybridzüchtung auf der Heterosis. Hybridsorten haben im Durchschnitt eine bessere Ertragssicherheit. Diese ergibt sich einerseits aufgrund der allgemeinen Zunahme der Ertragsstabilität durch Heterozygotie und andererseits durch verschiedene Resistenzgene, welche sich aus der Möglichkeit der Kombination der Eltern ergeben. Bei der Qualitätsverbesserung bietet die Hybridzüchtung bei Selbstbefruchtern keine generellen Vorzüge (Becker 2011).

Vorteile bieten Weizenhybride in der Toleranz gegenüber Hitze und Trockenstress, schnellerem Wachstum im Herbst und Frühling sowie einer effizienteren Wassernutzung aufgrund tieferer Bodendurchwurzelung (Schachschneider 2018). Den positiven Effekten stehen die Nachteile des hohen Aufwandes der Saatgutproduktion und der hohe Aufwand bei der Züchtung gegenüber, da bei Selbstbefruchtern das natürliche Reproduktionssystem überwunden werden muss (Becker 2011).

In Europa hat sich die Hybridweizenzüchtung mittels Gametoziden (CHA, *chemical hybridization agents*) etabliert. Die CHAs verhindern die Bildung von lebensfähigen Pollen auf dem mütterlichen Kreuzungspartner. Hierbei werden Mutterlinien abwechselnd mit Spenderlinien angebaut, wobei die Mutterpflanzen chemisch sterilisiert werden. Eine chemische Behandlung der väterlichen Pflanzen wird vermieden. Die F_1 der bestäubten Mutterpflanzen wird als Hybridsaatgut geerntet. In Indien und China erfolgt die Züchtung mittels zytoplasmatischer männlicher Sterilität (CMS, *cytoplasmatic male sterility*) und der PGMS-Methode (*photoperiod sensitive genic male sterility*). Ein generelles Problem der Hybridzüchtung von Weizen ist der hohe Saatgutpreis. Die CMS Züchtung hat sich speziell in der Reis- und Roggenzüchtung bewährt. CMS Weizenhybride reagieren sehr empfindlich auf Umwelteinflüsse, insbesondere auf Temperatur und Photoperiode (Mette et al. 2015).

Der Einsatz von Transgenen in der Hybridweizenzüchtung befindet sich noch in Erprobung. Gentechnisch veränderte Hybridisierungssysteme für die kommerzielle

Hybridsaatgutproduktion spielen zurzeit eine untergeordnete Rolle. Derzeit befindet sich das Saatgutproduktionssystem SeedLink^{TM} auf dem Markt und stellt eine wertvolle Ergänzung zu den konventionellen Methoden dar (Kempe & Gils 2011).

2.3 Qualitätseigenschaften von Weizen

Die Qualitätsanforderung von Weizen ist in den letzten Jahrzenten stark angestiegen, da die Wirtschaftlichkeit der Produktion in den Mühlen wesentlich von der Rohstoffqualität abhängt. Im Winterweizensortiment des Alpenvorlandes konnte zum Beispiel in den vergangenen Jahrzehnten eine genotypisch bedingte Zunahme des Hektolitergewichtes festgestellt werden. Auch die Indexwerte der Krankheitsresistenzen zeigten in den letzten Jahren die Erfolge der Resistenzzüchtung (AGES 2019a).

Die Verwertung von Weichweizen erfolgt in Österreich hauptsächlich über Backweizen für Brot, Gebäck und Kekse etc., Futterweizen und Ethanolweizen. Nur geringe Mengen finden eine Verwendung in der Vermälzung für Brauzwecke oder für Nährmittel als Flocken, Grieß und Speisekleie. Seit 2013 wird im großen Ausmaß Weizenstärke erzeugt. 2016 wurden in Österreich 7 200 ha Winterweizen zur Saatguterzeugung herangezogen. Backweizen wird in großen Mengen nach Italien und andere Länder exportiert (AGES 2019a).

Der Weichweizenbedarf in Österreich liegt bei 67-70 kg Weizen bzw. 56-59 kg Weizenmehl pro Kopf und Jahr, das sind in Summe 580 000 bis 600 000 t Weizen jährlich. Der Verarbeitungswert von Backweizen wird durch die Mahlfähigkeit und die Backqualität bestimmt. Dabei wird zwischen zwei Untersuchungsverfahren unterschieden. Zum einen indirekte Untersuchungsverfahren wie Hektolitergewicht, Proteingehalt und Fallzahl und zum anderen direkte Untersuchungsverfahren wie Mahlversuche, teigphysikalische Tests und Backversuche. Mahl- und Backqualität stehen in keiner direkten Beziehung zueinander (AGES 2019a).

Mahlfähigkeit

Der Begriff Mahlfähigkeit wird grundsätzlich in die Parameter Mehlausbeute/Ausmahlungsgrad und das Grießbildungsvermögen/Griffigkeit eingeteilt. In der „Österreichischen Beschreibenden Sortenliste" sind noch zusätzlich das Tausendkorngewicht, das Hektolitergewicht, der Ganzkornaschegehalt (Mineralstoffgehalt) und die Kornhärte angeführt.

Mehlausbeute

Die Mehlausbeute stellt einen entscheidenden Faktor für die Rentabilität der Mühle dar. Denn bei einer Steigerung der Mehlausbeute um 1%, steigt der Wert pro Tonne Weizen um etwa 2 $ (Marshall et al. 1986). Hauptsächlich hängt die Mehlausbeute vom Sortenmerkmal ab, weniger von technologischen Verbesserungen. Die Mehlmenge, die aus 100 kg Weizen bei definiertem Asche- und Feuchtigkeitsgehalt gewonnen werden kann, ist das Maß für die Mehlausbeute. Der Aschegehalt in g pro 100 kg wasserfreiem Mehl ergibt den Mehltyp. Mehl vom Typ W 500 hat daher einen Aschegehalt von 0,5%. In Österreich ist W 700 das am meisten verwendete Weizenmehl. Weitere wichtige Mehle sind W 480 (Weizenauszugsmehl, 0,33-0,58% Asche) und W 1600 (Weizenbrotmehl, 1,50-1,75% Asche) (AGES 2019).

Die Typeneinteilung ist in DIN-Normen geregelt und wird auch lebensmittelrechtlich überwacht. Generell kann gesagt werden: je höher die Typennummer, desto höher der Mineralstoffgehalt und desto dunkler das Mehl (Seibel 2005). Die Mehlfarbe variiert aber zwischen Sorte, Jahr und Anbauort (Hook 1984).

Ein durchschnittliches Weizenkorn besteht aus 82% Endosperm, 3% Keimling und Scutellum/Keimblatt und 15% Kleie (Marshall et al. 1984). In Mühlenbetrieben kann mit einer durchschnittlichen Mehlausbeute von 79-82% gerechnet werden. Wichtige Parameter sind Oberfläche, Form und Größe der Körner, Kornausbildung, Haftfähigkeit von Schale und Körper, Ausprägung der Bauchfurche, Kornhärte sowie der Endosperm- und Ganzkorn-Aschegehalt. Unterschiede in der Mehlausbeute können zwischen Trockengebieten und Feucht- und Übergangslagen festgestellt werden. Im Trockengebiet ist mit einem 1,0-1,5% höherem Mehlanfall aufgrund der Kornfüllung zu rechnen (AGES 2019a). Laut Parker et al. (1999) ist die Mehlausbeute genetisch durch Gene auf den Chromosomen 3A und 7D kontrolliert. 22% und 19% der genetischen Variation sollen die Loci auf oben genannten Chromosomen bestimmen.

Gaines et al. (1997) stellten fest, dass kleine Weizenkörner dasselbe Verhältnis von Endosperm und Kleie aufweisen wie große Körner, sofern die Mühleneinstellungen entsprechend optimiert sind. Kleine geschrumpelte Körner weisen hingegen eine verminderte Qualität auf. Geschrumpelte Körner haben einen höheren Aschegehalt und eine geringere Mehlausbeute.

Weitere wichtige Parameter für die Mahlqualität sind Faktoren wie die Trennbarkeit, die Stärkebeschädigung, der Feinheitsgrad und der Energiebedarf, welcher für den Müller kein unbedeutender Faktor ist. Sämtliche Faktoren werden durch den Proteingehalt und über die Stärkebeschaffenheit beeinflusst, welche wiederum in direkter Beziehung zu diversen Umwelteinflüssen (Klima, Düngung und Boden) stehen. Diese Abhängigkeiten treffen auf den erforderlichen Energieverbrauch während des Vermahlungsprozesses zu.

Die klimatischen Bedingungen während der Vegetation beeinflussen die Reinigungsverluste der Getreidepartien. Durch Schrotung, Sichtung, Auflösung und Ausmahlung werden Weizenmehle schrittweise gewonnen. Steigt der Ausmahlungsgrad an, so steigt auch der Anteil des Proteingehaltes und der Feuchtklebergehalt sinkt prozentual ab. Da der Feuchtklebergehalt ein wichtiges Kriterium für das Backvolumen ist, wird der Ausmahlungsgrad oft auf etwa 75% begrenzt (Seibel 2005).

Die Kornmikrostruktur ist ausschlaggebend für den Mehlertrag. Dabei ist eine gleichmäßige Korngrößenverteilung erwünscht. Viele kleine und runde Stärkekörnchen bringen eine höhere Mehlausbeute mit sich (Edwards et al. 2008).

Grießbildungsvermögen und Griffigkeit

Die Griffigkeit und das Grießbildungsvermögen sind auf die Kornhärte des Weizens zurückzuführen. Das bedeutet, dass bei der Vermahlung von harten Weizenkörnern ein höherer Anteil an Grieß anfällt und das Mehl somit griffiger ist. Erkannt wird die Griffigkeit durch das körnigere Gefühl beim Reiben des Mehles zwischen den Fingern. Bei weicheren Weizenkörnern ist der Grießanteil geringer und das Mehl besteht aus mehr Feinanteilen. Diese sind glatt und die Mehlfarbe erscheint mehr weiß. Bei griffigeren Mehlen erscheint die Farbe etwas gelber und dunkler. Äußerlich sind harte Weizen an einem bräunlicheren und glasigen Aussehen erkennbar, weiche Weizen sind sehr oft durch matte, weiße bis hellgelbe Farben gekennzeichnet. Vom äußeren Eindruck allein, kann allerdings keine genaue Zuordnung getätigt werden (Seibel 2005).

Die im Endosperm befindlichen Eiweiß und Stärkekörner bestimmen durch ihre Bindung die Kornhärte und sind sortenabhängig. Wie oben erwähnt wird der Feinheitsgrad des Mehles (Griffigkeit) als Indikator für die Kornhärte bei der österreichischen Sortenwertprüfung definiert. Auf einem Luftstrahlsieb mit 75 µm wird Mehl der Type 700 für drei Minuten gesiebt. Wenn dabei mindestens 50% Mehl auf dem Sieb verbleiben, wird von hoher Kornhärte gesprochen. Griffige Mehle können durch die höhere mechanische Stärkebeschädigung bei der Teigbereitung mehr Wasser binden. Vorteilhaft sind dabei die längere Brotfrischehaltung und die höhere Teigausbeute (AGES 2019a). In Tabelle 2 sind einige Weizenmehltypen mit deren Mineralstoffgehalten zu sehen.

Genetisch wird die Kornhärte durch das Gen *Ha* am Chromosom 5D bestimmt (Hogg et al. 2004). Cane et al. (2004) stellten fest, dass die Allele *Pina-D1a* und *Pinb-D1b* des Weizenproteins Puroindoline B eine hohe Kornhärte hervorrufen und somit eine gute Wasseraufnahme des Mehles und eine hohe Mehlausbeute bewirken. Eine Punktmutation in den Allelen *Pina-D1a* und *Pinb-D1b* führte zu einer Veränderung von Glycerin zu Serin (Cane et al. 2004). Ein Großteil der harten Weizen haben eine Punktmutation im Puroindoline B oder ein fehlendes Puroindoline A (Martin et al. 2001).

Mühlereitechnisch werden Mahlprodukte je Partikeldurchmesser in die Gruppen Schrot (>500 µm), Grieß (200-500 µm), Dunst (120-200 µm) und Mehl (14-120 µm) eingeteilt (Belitz et al. 2008).

Tabelle 2: Klassifizierung von Weizenmehltypen (Quelle: AGES 2019a).

Mehltype	Mineralstoffgehalt (in g/100 g TM)
405	<0,50
550	0,51-0,63
812	0,64-0,90
1050	0,91-1,20
1600	1,21-1,80

Ganzkornaschegehalt (Mineralstoffgehalt)

Der Ganzkornaschegehalt bei Weizen liegt zwischen 1,6-2,3% und hängt großteils von der Aleuronschicht bzw. von der Frucht- und Samenschale ab (AGES 2019a). Zugunsten einer kurzen Analysedauer bei der Veraschung von 900°C, werden Verluste von flüchtigen Mineralstoffen in Kauf genommen. Der Aschegehalt wird auf die Trockensubstanz bezogen (Frede 2010). Bei geringem Mineralstoffgehalt verbessert sich die Ausbeute und somit die Wirtschaftlichkeit der Mühlen. Tendenziell haben Sommerweizen einen niedrigeren Mineralstoffgehalt als Winterweizensorten (Seibel 2005).

Hektolitergewicht und Tausenkorngewicht

Erwünscht sind Weizen mit einem Tausendkorngewicht (TKG) von 36-50 g bei einer TS von 86%, bei mittlerer bis großer Kornausprägung. Beim Hektolitergewicht (HLG) variieren die Werte grundsätzlich zwischen 62-87 kg hL^{-1}. Bei der Premium- und Qualitätsweizenerzeugung werden oft Verträge angeboten, in denen ein Basiswert von 80 kg hL^{-1} gefordert wird. In Mahlweizenkontrakten wird meist die Basis 79 kg hL^{-1} (mind. 76 kg hL^{-1}) und bei Ethanolweizenverträgen wird ein HLG von 76 kg hL^{-1} vorausgesetzt. (AGES 2019a).

Backfähigkeit

Generell wird unter dem Begriff Backfähigkeit die Fähigkeit des Mehles ein lockeres, äußerlich ansprechendes und voluminöses Gebäck auszubilden verstanden. In Österreich wird seit dem Österreichischen Backqualiätsschema 1994 in neun Backqualitätsgruppen (BQG) eingeteilt (Oberforster et al. 1994). Wobei Sorten mit einer BQG von neun eine sehr gute Backqualität aufweisen und Sorten mit der BQG 1 eine sehr niedrige. Seit der Österreichischen BSL 2019 werden alle Parameter mit dem gleichen Beurteilungsschema (1 bedeutet eine niedrige, 9 die höchste Merkmalsausprägung) beurteilt (AGES 2019a). Die Einteilung in die BQG wird über zwei Merkmale aus einem Semmelbackversuch mit der Rapid-Mix-Teigbereitung (modifizierter RMT-Backversuch), sowie 4 indirekten Parametern und drei Kennzahlen aus teigrheologischen Untersuchungen klassifiziert. Für jedes zu untersuchende Merkmal gibt es eine Mindestausprägung, welche bei Unterschreitung des Mindestwertes einzelner Merkmale durch höhere Werte anderer Merkmale rechnerisch kompensiert werden können. Gibt es Mängel in der Verarbeitungseignung der Mehle oder eine schlechte Ausprägung des Backvolumens, kann dies nicht kompensiert werden.

Weizensorten werden in drei große Gruppen zusammengefasst. Die höchste Gruppe umfasst BQG 9-7 und stellt die Gruppe der Qualitäts- und Aufmischweizen dar. Sorten der BQG 6-3 werden als Mahlweizen klassifiziert, sonstige Weizen und Futterweizen rangieren in den BQG 2-1. Gekennzeichnet sind Qualitätsweizen durch eine gute Eigenbackfähigkeit. Aufmischweizen mit hohem Proteingehalt eignen sich zur Aufwertung schwächerer Mahlweizen. Futterweizen sind aufgrund stark negativer Teigeigenschaften und schlechter Eigenbackfähigkeit nicht backfähig. Bei sehr mangelhafter Mehlausbeute werden Winterweizensorten ohne Rücksicht auf ihre Backeignung den sonstigen Weizen und Futterweizen zugeteilt. Für „Premiumweizen" wird in der konventionellen Wirtschaftsweise ein Proteingehalt über 15% und eine Fallzahl von mindestens 280 s vorausgesetzt (AGES 2019a).

Backvolumen

Zur Ermittlung des Backvolumens wurde der RMT (Rapid-Mix-Test) als Standardmethode entwickelt. Für die Durchführung eines RMT wird nach Standardvorschriften ICC Standard Methode No. 131 ein Schnellkneter, eine Teigteil-Wirkmaschine und eine Langwirkmaschine benötigt. Für die Wasserzugabe wird der Wert aus dem Farinogramm herangezogen (Seibel 2005). Die Volumenausbeute wird auf Basis von 100 g eines Mehltypen W 700 ermittelt. Verkaufserfolg und günstige Teigeigenschaften resultieren häufig aus den Werten des Backvolumens. Bei österreichischen Semmelbackversuchen variieren die Werte zwischen 360-780 mL pro 100 g Mehl. Jedoch ist die mittlere Sortenvariation bei 408-656 mL pro 100 g Mehl zu finden. Ab dem Erntejahr 2003 wurden beim österreichischen Semmelbackversuch 0,002% Ascorbinsäure zugesetzt. Wünschenswert sind hohe Gebäckgewichte, welche aus hoher Wasseraufnahme resultieren. Richtwerte sind 1300-1359 g pro 1 kg Mehleinwaage. Nicht nur das Gewicht und das Volumen des Gebäckstückes werden beurteilt, sondern auch die Ausprägung des Sternbildes (Kaisersemmeln), die Porung der Krume sowie die Bräunung der Kruste (AGES 2019a).

Teigverarbeitungseignung

Bei der Teigverarbeitungseignung wird die in der Praxis übliche Teigführungsweise eingehend geprüft. Der Prozess beginnt mit einem intensiven Kneten, einem maschinellen Pressen, dem Teigteilen, später dem Rundwirken und je nach Semmelform bei Langsemmeln das Flachwalzen und Langrollen oder bei der Kaisersemmel das Einpressen des Sternes. Eine kurze Ruhezeit und eine hohe Triebkraft sind wesentliche Merkmale der

Teigverarbeitungseigenschaft. Nach einer intensiven Teigbearbeitung und Beanspruchung ist eine gute Differenzierung der Volumenbildung und der Gebäckform zu erkennen. Bei der Bewertung der Ergebnisse oder bei der Ursachenerhebung von Mängeln sind nach wie vor Kenntnisse über die Inhaltstoffe wie Protein, Kleber, Fallzahl, Rheologie usw. sehr wichtig (Seibel 2005).

Rohprotein

Die Eiweißmenge und die Eiweißqualität spielen für die Backfähigkeit eine wesentliche Rolle. Beeinflusst wird der Rohproteingehalt durch die Sorte, die Witterung und über die Düngung bzw. das N Angebot. Der Rohproteingehalt heimischer Sorten bewegt sich zwischen 8-19%, wobei der genotypische Unterschied bei 3,6% liegt. Wird Weizen im Pannonischen Trockengebiet angebaut, kann im Durchschnitt mit einem 0,5-1% höherem Wert im Gegensatz zum Alpenvorland gerechnet werden und gegenüber dem Mühl- und Waldviertel wird mit einem um 1,5-3% höherem Wert gerechnet. Der Mindestrohproteingehalt bei Qualitätsweizen beträgt 14%, bei Mahlweizen 12,5% und die Interventionsgrenze liegt bei 10,5% (AGES 2019a). Das zur Intervention angebotene Getreide muss Mindestqualitätskriterien erfüllen, um in der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft vermarktungsfähig zu sein.

Abweichungen in Backversuchen lassen sich im heutigen Sortenspektrum bis zu 80% auf Schwankungen im Proteingehalt erklären. Früher war die Verwendung des Sedimentationswertes in Kombination mit dem Rohproteingehalt typisch für einen hohen Erklärungswert bei Backversuchen. Heute ist die alleinige Verwendung des Proteingehaltes üblich (Seibel 2005).

Bei der Kjeldahl Bestimmungsmethode nach ICC Standard Nr. 105/2 werden die organischen Bestandteile des Probenmaterials in Gegenwart eines Katalysators oxidiert. Ammonium wird in einem weiteren Schritt destilliert und titriert. Die Stickstoffmenge wird durch die Titration ermittelt und mit einem spezifischen Faktor multipliziert. Bei Weizen wird die Umrechnungsformel N×5,7 herangezogen.

Eine andere Standardmethode ist die Stickstoffbestimmung nach Dumas. Dabei handelt es sich um eine Verbrennungsmethode, welche im ICC Standard Nr. 167 beschrieben ist. Bei dieser Methode wird die Probe unter Sauerstoffeinfluss verbrannt. Das resultierende Stickoxid wird in Stickstoff umgewandelt und gemeinsam mit Helium wird die Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu reinem Helium gemessen (Freund & Kim 2006).

Eine weitere Testmethode ist die NIR Messung. Mit dieser Zusammensetzungsanalyse können über 30 Messwerte aus Getreide und Hülsenfrüchten generiert werden. Die ICC hat für diese Methode das Standard Verfahren Nr. 159 zur Bestimmung des Proteingehaltes im gemahlenen Weizen und im Mehl definiert (Chen et al. 2013).

Feuchtkleber

Kleber und Feuchtgluten sind andere Bezeichnungen für Feuchtkleber. In Österreich liegt die Schwankungsbreite des Feuchtklebergehaltes bei 13-45%. Zur Bestimmung des Feuchtklebergehaltes wird Mehl mit einer Kochsalzlösung in Verbindung gebracht und angeteigt. Dadurch werden Stärke und lösliche Eiweißverbindungen ausgewaschen. In einer Zentrifuge wird überschüssiges Wasser abgetrennt. In diesem Verfahren wird die Höhe des Feuchtklebers berechnet und in Prozent des Mehlgehaltes angegeben. Dies macht rund 80-85% des gesamten Eiweißgehaltes des Korns aus (AGES 2019a). Die restlichen 15-20% des Gesamtproteins machen die Strukturproteine Albumine und Globuline aus. Glutenine und Gliadine werden als Speicherproteine bezeichnet (Herzog et al. 2017). Die im Endosperm befindlichen Glutenine und Gliadine sind die Hauptbestandteile. Kleberproteine binden Wasser, quellen in der Teigbereitung auf und wirken als elastischer Widerstand gegen die sich ausdehnenden Gärgase. Qualitätsweizen erfordert mindestens 30%, Mahlweizen mindestens 28% Feuchtkleber (AGES 2019a).

Wie auch beim Rohprotein spielen Düngung, Witterung und Anbaubedingungen eine wichtige Rolle für die Güte des Klebers. Die Genetik der Weizensorte ist überwiegend für den Feuchtklebergehalt und die Feuchtkleberqualität ausschlaggebend. Da der Feuchtkleber eine entscheidende Rolle in der Backeignung einnimmt, ist der Bedarf der Praxis an schnellen, aber auch genauen Verfahren zu dessen Bestimmung entsprechend hoch, denn Backtests sind zeitintensive und aufwändige Methoden. Zur Kleberauswaschung stehen diverse Standardmethoden, die eine verbesserte Wiederholgenauigkeit mit sich bringen, zur Verfügung (Seibel 2005). Dies sind die Methoden der Handauswaschung nach AACC Method 38-10, die Kleberauswaschmaschine nach ICC Standard Nr. 106/2 und ein Glutomatic-Gerät nach ICC Standard Nr. 137/1 (Freud & Kim 2006). Im Glutomatic Gerät wird das Mehl mit einer gepufferten 2%igen Kochsalzlösung geknetet und der Kleber ausgewaschen. Um den Glutenindex zu bestimmen wird der ausgewaschene Kleber in einer hochtourigen Zentrifuge gegen einen Lochsiebmantel gepresst. Der Glutenindex errechnet sich aus dem im Lochsiebmantel nicht-durchgedrungenen Kleber dividiert durch den Gesamtkleber mal

hundert. Mit dem Glutenindex ist es möglich physikalische Eigenschaften des Klebers zu beurteilen und zu standardisieren.

Ein Vorteil des Verfahrens der Kleberauswaschung ist es, Kleberschäden und schwache Kleber zu erkennen. Getreidewanzenbefall sowie zu starke Erwärmung des Weizens bei der Trocknung führen zu Kleberschäden und können beim obigen Verfahren erkannt werden (Seibel 2005). In Tabelle 3 sind Eigenschaften der Mehle bei unterschiedlichen Feuchtklebergehalten angeführt.

Tabelle 3: Beurteilung des Feuchtklebergehaltes bei Weizenmehl der Type 550 (Quelle: Seibel 2005).

< 20% ungenügend	20-24% gering	25-30% normal	> 30% hoch
- zu geringe Wasseraufnahme	- unbefriedigende Wasseraufnahme	- einwandfreie Teigentwicklung und Gärtoleranz	- längere, gute Quellung (u. U. etwas trockene Teige)
- feuchte, nachlassende Teige - schlechte Gärtoleranz - mangelhafter Ausbund	- geschwächtes Gashaltevermögen - geringe Gärtoleranz- - unbefriedigender Ausbund	- einwandfreie Gebäcke	- hohe Gärtoleranz (u.U. Gebäckfehler) -Ausbund mit hartsplittriger, glanzarmer Krume

Sedimentationswert

Im Sedimentationstest nach Zeleny wird die Kleberqualität und die Klebermenge über die Quellfähigkeit des Kleberproteins gemessen. Mehl wird zunächst mit einem Farbstoff und einer milchsäurehaltigen Lösung unter ständiger Bewegung vermengt. Die Kleberteile quellen auf und bilden das Sediment. Nach einer bestimmten Zeiteinheit wird die Höhe des abgesetzten Sediments im Messzylinder abgelesen und somit das Volumen bestimmt. Hohe Sedimentationswerte und langsame Sedimentation bedingen eine hohe Kleberqualität und Klebermenge. Dieser Test ist schnell durchzuführen und wenig aufwändig (Herzog et al. 2017). Sedimentationswerte variieren üblicherweise zwischen 10-75 ml. Wesentlich stärker genetisch fixiert ist der Sedimentationswert gegenüber dem Proteingehalt. Beim Qualitätsweizen werden Werte zwischen 45-50 mL erreicht. Kontrakte fordern oft einen Sedimentationswert von mehr

als 35 mL, welcher von Mahlweizensorten oft nicht erreicht wird. Als nicht interventionsfähig gelten Weizenpartien unter 22 mL (AGES 2019a).

Fallzahl

Die Fallzahl nach Hagberg-Perten misst die Aktivität stärkelösender Enzyme (Amylasen), welche durch Auswuchsschädigung verringert werden kann. Übliche Werte liegen zwischen 62-500 s. Für Premiumweizen wird eine Fallzahl von mindestens 280 s vorausgesetzt, Qualitätsweizen >250 s, Mahlweizen >220 s und Ethanolweizen >180 s. Auch ohne erkennbaren Auswuchs kann es sein, dass es zu niedrigen Fallzahlen kommt. In Außenschichten der Körner wird dabei Alpha-Amylase angereichert und es kommt während der späten Kornreife zu einer Alpha-Amylaseaktivität. Liegt der sichtbare Auswuchs über 2-3%, so kann von einer unbefriedigenden Fallzahl ausgegangen werden. Deutlich zu niedere Fallzahlen (<220 s) beeinträchtigen die Verkleisterungsfähigkeit, schwächen die Krumenelastizität von Gebäcken und mindern die Teigausbeute. Es gibt auch enzymarme Mehle mit einer Fallzahl höher als 350 s, die eine gewisse Triebschwäche aufgrund von verringertem Gehalt an vergärbaren Zuckern haben. Diese Triebschwäche kann durch Mehlbehandlungsmittel, wie zum Beispiel Ascorbinsäure, kompensiert werden. Im Pannonischen Trockengebiet spielt die Auswuchsfestigkeit eine nicht so relevante Rolle wie in Feuchtgebieten (AGES 2019a).

Zur Analyse der Fallzahl wird Weizenschrot mit destilliertem Wasser versetzt und kräftig geschüttelt. Durch die Wasserzugabe verkleistert die Stärke. Das mit einem Rührstab versehene Röhrchen wird in das kochende Wasserbad des Fallzahlgerätes eingetaucht und nach einer Rührzeit von 60 s wieder hochgezogen. Die Wassermehl-Suspension verflüssigt sich je nach Enzymaktivität mehr oder weniger und das Viskosimeter sinkt je nach dem schneller oder langsamer. Erreicht das Viskosimeter den unteren Messpunkt, wird die Zeit erfasst. Diese ermittelte Zeit wird mit den 60 s Rührzeit addiert und ergibt die Fallzahl (Herzog et al. 2017). In Tabelle 4 sind Eigenschaften der Mehle bei verschiedenen Fallzahlen angeführt.

Tabelle 4: Beurteilung der Fallzahl bei Weizenmehl der Type 550 (Quelle: Seibel 2005).

< 200 s	200 s - 300 s	> 300 s
- erhöhte Enzymaktivität	- gute Lockerung	- geringe Enzymaktivität
- schnelle Gare		- verzögerte Gare
- nachlassende Teige		- geringer Trieb
- feuchte Krume		- kleines Volumen
- unelastische Krume		- geringe Bräunung
		- geringe Frischhaltung
		- Neigung zu Trockenkrümeln

Farinogramm

Beim Farinogramm können mehrere Werte, wie die Teigstabilität, die Teigentwicklungszeit und die Qualitätszahl, abgelesen werden. Diese Werte sollten möglichst hoch sein. Knetwerkzeuge messen den Widerstand, den der Teig verursacht und es wird ein Kraft-Zeit-Diagramm aufgezeichnet. Der Teig wird standardisiert auf 500 Farinogramm Einheiten (FE) eingestellt. Bei Qualitätsweizen sind eine Teigentwicklungszeit von über 4,5 min, eine Stabilität von über 6 min und eine Qualitätszahl von mehr als 80 mm (=8 min) zu erreichen (AGES 2019a).

Mittels Farinogramm lässt sich die Wasseraufnahme erfassen, hierbei wird die Menge an Wasser festgestellt, die hinzugefügt werden muss um eine maximale Konsistenz von 500 FE zu erreichen. Dabei wird von 14% Kornfeuchtigkeit ausgegangen. Durch die Wasseraufnahme kann auf die Teigausbeute geschlossen werden.

Bei der Teigentwicklungszeit wird die Zeit von Beginn der Teigknetung und dem Kurvenmaximum gemessen.

Die Teigerweichung gibt Auskunft über den Konsistenzabfall. Dieser Abfall wird 12 min nach dem Konsistenzmaximum gemessen und zeigt wie stark der Teig durch die mechanische Beanspruchung erweicht ist.

Die Teigstabilität gibt an, wie lange der Teig seine ideale Konsistenz hält. Dabei wird einerseits die Zeit gemessen, in der die Kurve erstmals die 500 FE schneidet und andererseits jener Punkt, beim welchem die Kurve die 500 FE wieder unterschreitet. Die Teigstabilität ist die Resistenz des Teiges gegenüber mechanischer Belastung ohne Schaden am Teig zu nehmen.

Die Qualitätszahl wird aus der Länge entlang der Zeitachse errechnet; von der Wasserzugabe bis an jenen Punkt, an dem die Mitte der Kurve um 30 FE gegenüber der Kurvenmitte abfällt (Seibel 2005). Sämtliche Teigkennzahlen sind in Abb. 2 dargestellt.

Für das Screening neuer Weizensorten in frühen Selektionsphasen stehen oft nur geringe Mengen an Probenmaterial zur Untersuchung bereit. Deshalb wird in diesen Stadien oft der Mikro-Z-Arm-Mixer angewandt. Dieses Instrument benötigt nur 4 g Probenmenge pro Test um Ergebnisse zu liefern. Dadurch können in der Züchtung schon sehr früh teigrheologische Daten gewonnen werden und die Interaktion zwischen Struktur und Funktion im Mehl betrachtet werden (Tömösközi et al. 2003).

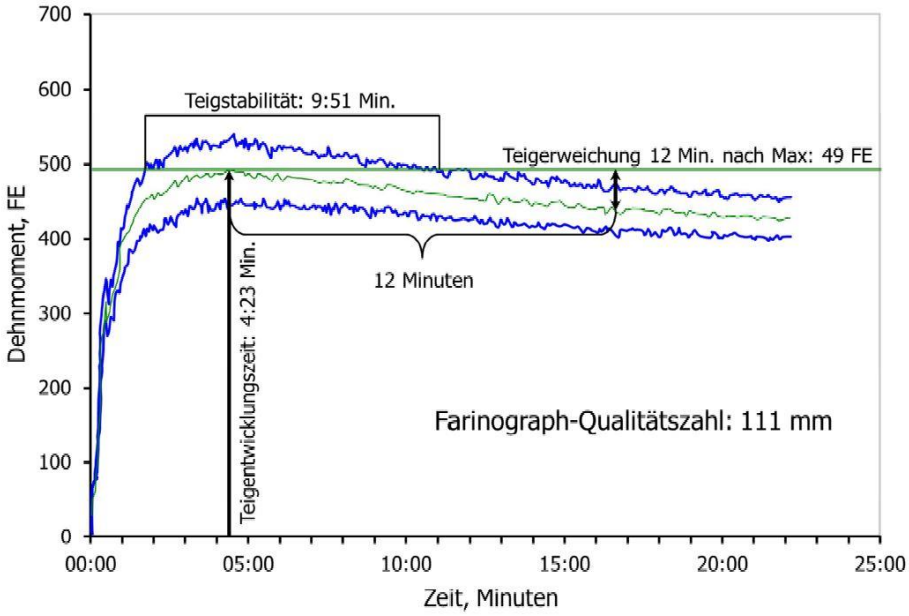

Abbildung 2: Diverse Teigkennzahlen aus dem Farinogramm: Teigentwicklungszeit, Teigstabilität, Teigerweichung 12 Minuten nach Maximum (Quelle: AGES 2019a).

Extensogramm

Das Extensogramm misst die Dehnbarkeit und den Dehnwiderstand von Teigen. Dadurch werden Informationen über späteres Backverhalten generiert. Der Widerstand steigt mit steigender Kleberqualität. Bei einer Reifezeit von 45 min wird der Teig homogenisiert und im Anschluss bis zum Reißen gedehnt. Diese Messung wird nach 90 min und 135 min wiederholt. Das Klebergerüst wird bei längerer Teigreife stabiler (Seibel 2005).

Dabei werden die Parameter Dehnbarkeit in mm, Dehnwiderstand, Verhältniszahl (Dehnwiderstand/Dehnbarkeit) und Energie ermittelt. Die Dehnbarkeit in mm oder auch

Dehnlänge sollte für Backzwecke möglichst lang sein, somit liegt die durchschnittliche Variation bei 118-224 mm Dehnlänge. Der Dehnwiderstand sollte in einem ausgewogenen Verhältnis zur Dehnlänge stehen. Günstig sind Dehnwiderstände von 400-600 Extensogramm Einheiten (EE) im Maximum abgelesen. Die Verhältniszahl sollte bei 2,5-3,0 liegen. Die Teigenergie besteht aus der Fläche, die von der Extensogrammkurve umschlossen ist und sollte möglichst groß sein. Die gewünschte Dehnlänge und die gewünschte Energie von mehr als 115 cm² werden von guten Weizensorten, vor allem im Trockengebiet, fast immer erreicht (AGES 2019a). In Tabelle 5 sind einige Richtwerte des Extensogramms angeführt und in Abb. 3 ist ein Extensogramm schematisch abgebildet.

Tabelle 5: Richtwerte eines Extensogramms für Mehl der Type 550 (Quelle: Seibel 2005).

Parameter	Spannbreite	Optimum	Aussage
Dehnbarkeit (mm)	80-180	120-150	Klebergüte
Dehnwiderstand (EE)	300-600	450-550	Gashaltevermögen Gärtoleranz
Verhältniszahl	2-5	3-4	Teigführung
Energie (cm²)	80-160	120-140	

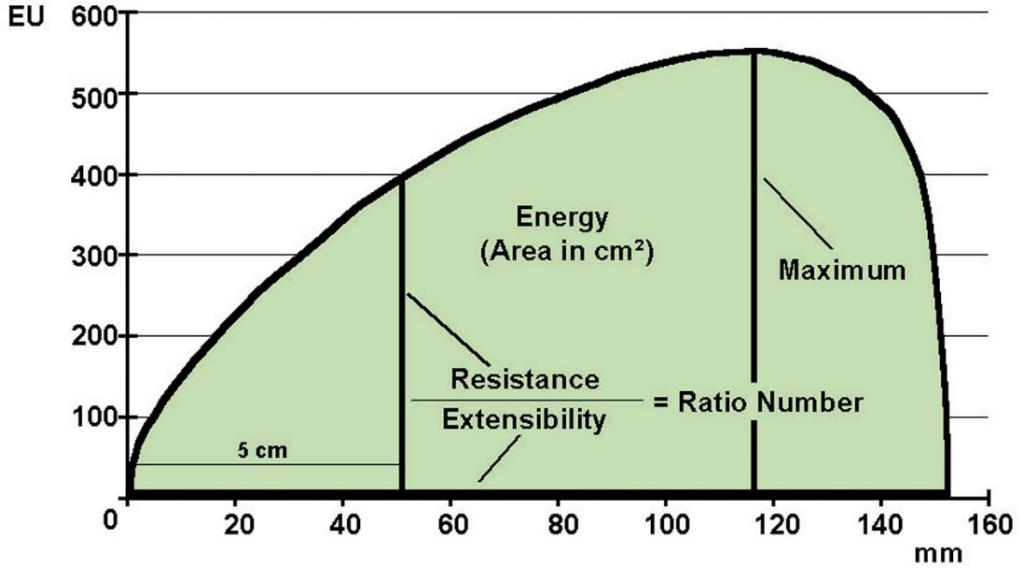

Abbildung 3: Extensogramm mit den Parametern Dehnbarkeit (*extensibility*), Dehnwiderstand bei 5 cm Dehnung (*resistance*) und bei Maximum (*maximum*), Verhältniszahl (*ratio number*) und Teigenergie (*energy*) (Quelle: Brabender, Duisburg).

Korn-, Mahl- und Backqualitätsmerkmale im Überblick

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Variationsbreiten der Korn-, Mahl- und Backqualitätsmerkmale des österreichischen Winterweizensortiments.

Tabelle 6: Ausgesuchte Qualitätsmerkmale im Überblick (Quelle: modifiziert nach AGES 2017).

Merkmal	Sortimentsbereich		
	unterer	mittlerer	oberer
Tausendkorngewicht (68% TS), g	36 (1)	42,3 (5)	50,4 (8)
Hektolitergewicht, kg	72,3 (1)	78,8 (5)	83,3 (9)
Mehlausbeute (W 550), %	66,7 (1)	71,8 (5)	77,0 (7)
Mehlausbeute (W 700), %	75,7 (1)	80,3 (5)	84,9 (7)
Kornhärte (Griffigkeit), %	41,7 (2)	48,0 (4)	59,3 (5)
Rohprotein (N×5,7), %	11,9 (1)	13,7 (5)	15,5 (9)
Feuchtkleber, %	22,7 (1)	29,8 (5)	36,6 (9)
Farinogramm-Wasseraufnahme, %	55,1 (1)	59,3 (5)	64,9 (8)
Farinogramm-Teigentwicklung, min	2,4 (1)	4,6 (5)	6,9 (9)
Farinogramm-Teigstabilität, min	1,6 (1)	6,9 (5)	13,8 (9)
Farinogramm-Qualitätszahl, mm	32 (1)	81 (5)	141(9)
Farinogramm-Teigerweichung (12 min), FE	51 (9)	86 (5)	122 (1)

2.4 Umwelteinflüsse

Im Laufe der Vegetation wirken mehrere äußere Einflüsse auf Kulturpflanzen ein. Auch nach der Ernte können, durch falsche Trocknung oder Lagerung, noch Veränderungen am Erntegut entstehen. Eine wesentliche Rolle im Vegetationsverlauf ist der Niederschlag bzw. die Witterung, die Düngung und diverse Bodeneinflüsse sowie Bodeneigenschaften.

Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf Weizen

Für die Keimung benötigt der Weizenkeimling einen Wassergehalt von 30-35% und eine minimale Keimtemperatur von 2°C bis 4°C. Bei 6°C bis 8°C erfolgt eine gleichmäßige Keimung. Junge Getreidepflanzen sind sehr kältetolerant und können bei Temperaturen von -15°C bis -25°C den Winter überdauern. Jedoch ist die Kältetoleranz sortenabhängig. Neben den Auswinterungsschäden können komplexe Schädigungen, wie zum Beispiel Frosttrocknis,

welche durch fehlende Wassernachlieferung bei gefrorenem Boden entsteht, dem Weizen schaden. Auch mechanische Verletzungen und Sauerstoffmangel unter einer langen anhaltenden Schneedecke schädigen Weizenpflanzen. Die optimalen Temperaturen für Weizen während der Vegetation liegen zwischen 15°C und 20°C. Für den Ausreifeprozess sind wärmere, aber nicht zu hohe Temperaturen und trockene Witterung ab der Gelbreife entscheidend, da die Austrocknung der Körner in dieser Phase passiver Natur ist.

Der Wasserbedarf während der Hauptvegetation liegt im Schossen bei 5 mm täglich. Bei einem Kornertrag von 10 t ha^{-1} und einem Ernteindex von 50%, wird eine oberirdische Trockenmasse von 20 t ha^{-1} generiert. Bei derartigen Bedingungen ist das Bodenwasser der ertragsbegrenzende Faktor. Entscheidend ist auf vielen Standorten die Niederschlagsverteilung, da nur dadurch das Standortpotenzial voll ausgeschöpft werden kann. Die Jahresniederschlagsmenge sollte bei günstiger Verteilung 500 mm bis 600 mm überschreiten (Diepenbrock et al. 2005).

Das Bodenwasser ist maßgeblich für die Wasseraufnahme der Pflanzen über den Transpirationsstrom verantwortlich, um Biomasse zu bilden. Im Bodenwasser sind lösliche Nährstoffe enthalten, die für die Pflanze aufnehmbar sind. Deshalb stehen Pflanzenwachstum und Bodenwasser in einer positiven Beziehung. Bezugnehmend auf den Wassergehalt im Boden gibt es einen Bereich zwischen permanenten Welkepunkt und Feldkapazität. Beide Faktoren führen beim permanenten Welkepunkt zum Absterben der Pflanze oder bei der Feldkapazität zu einer Überversorgung und somit zu einer Verminderung der Trockenmassebildung. Der Transpirationskoeffizient lässt sich aus der Beziehung zwischen Wasserverbrauch in Liter und gebildeter Trockenmasse errechnen. In der Regel haben Kulturpflanzen, die aus einem Gebiet mit niedrigem Wasserangebot stammen, einen niedrigen Transpirationskoeffizient. In Zukunft wird dem Transpirationskoeffizienten aufgrund von Witterungsänderungen und trockenerem Klima größere Bedeutung zukommen. Bei steigender Temperatur erhöht sich auch die Evapotranspiration und somit der Wasseranspruch. Trockenheit zeigt sich auch in einer Verkürzung der Vegetationsdauer (Flückiger & Rieder 1997). Nicht nur die Trockenheit, sondern auch der Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration verringert die Leitfähigkeit der Stomata und somit die Transpiration (Manderscheid et al. 2018).

Der Einfluss der Trockenheit auf die Kornqualität ist abhängig vom Zeitpunkt des Stresses auf die Pflanze. Wasserstress vor der Blüte kann eine Verringerung der Kornzahl pro

Fläche bedeuten. Die Kornzusammensetzung und die Qualitätsmerkmale werden durch Umweltbedingungen stark beeinflusst. Schwankungen in der Stickstoffaufnahme bringen bemerkenswerte Änderungen im Korneiweißgehalt mit Auswirkung auf die Teigeigenschaft mit sich. Wasserstress während der Blüte und der Teigreife kann aber eine Erhöhung des Mehlproteingehaltes und der Viskosität hervorrufen. Stress zu diesem Zeitpunkt bedeutet allerdings eine Verringerung der Mehlausbeute (Ozturk & Aydin 2004). Die Stickstoffaufnahme in der Pflanze hängt sehr stark vom pflanzenverfügbaren Wasser und dem Bodenzustand ab. Deshalb ist die Kenntnis über Bodenverdichtungen, Wasserverfügbarkeit und Bodenbeschaffenheit wichtig für eine effiziente N-Düngung (Tilling et al. 2007).

Auswirkungen der Düngung auf die Qualität von Weizen

Intensive Bewirtschaftungsweise und hohe N-Düngung beeinflussen die Backqualität von Weizen positiv. In intensiven Betrieben wird gegenüber extensiv wirtschaftenden Betrieben vermehrt gedüngt und dadurch steigt die Backqualität (Varga et al. 2003). Neben der Backqualität steigt auch der Ertrag mit entsprechender Düngung. Zur Ermittlung des Nährstoffbedarfs sollten Bodenuntersuchungsverfahren angewandt werden. Bei der Grunddüngung wird im Wesentlichen der Entzug der Nährstoffe durch Abtransport des Ernteguts (Stroh, Körner) ausgeglichen. Keiner gesonderten N-Zufuhr bedarf es zur Bestandesentwicklung im Herbst. Im Herbst benötigt die Weizenpflanze wenig Stickstoff und kommt mit dem N-Gehalt des Bodens und der N-Nachwirkung der Vorfrucht meist gut zurecht. Bei der Stickstoffdüngung im Frühjahr müssen Ziele und Faktoren wie Ertragserwartung, Sorte, Qualitätsziel und Bestandesentwicklung berücksichtigt werden (Guddat et al. 2015).

Neben den Zielen der Düngung müssen auch andere Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Ein wichtiger Faktor ist die Stickstoffmineralisierung, welche vom Humusgehalt, der Bodenbearbeitung, der Vorfrucht, der Bodenstruktur und von nachwirkenden organischen Düngern wie Mist, Pflanzenrückstände und Gründüngern abhängt. Neben dem schwankenden N-Gehalt im Boden ist auch der Mineralisierungszeitpunkt (Wirkungszeitpunkt) ein zu berücksichtigender Einflussfaktor. Die Nitratauswaschung, Denitrifiktion und Ammoniakverflüchtigung und deren Ausmaß sind nur kaum bis gar nicht zu quantifizieren (Flisch et al. 2001). In Tabelle 7 sind einige Mineralstoffe und deren Pflanzenwirkung sowie Auswirkungen auf Backeigenschaften angeführt.

Heute orientiert sich die N-Düngung nach dem ökonomischen Optimum, wohingegen vor einigen Jahren die Orientierung am Maximalertrag lag. Generell bringt die N-Düngung eine bessere Qualität und einen höheren Ertrag mit sich, doch bei einem N-Düngereinsatz in zu großen Mengen und zu einem ungünstigen Zeitpunkt kann es auch zu Qualitätsminderungen an der Kulturpflanze kommen. Laut Richner et al. (2010) sind die Medianwerte des N-Optimums

bei Futterweizen und Brotweizen fast identisch. Futterweizensorten sind in der Lage bei gleichem N-Angebot einen deutlich höheren Ertrag bei geringerer Qualität zu bilden. Das N-Optimum ist laut Richner et al. (2010) als jene N-Menge definiert, bei welcher der Grenzerlös den Grenzkosten der N-Düngung entspricht. In Tabelle 8 sind N-Düngerwerte im ökonomischen Optimum zu sehen.

Tabelle 7: Einfluss der Düngung auf Planzen- und Qualitätsmerkmale (Quelle: Seibel 2005).

Mineralstoff	Pflanze	Backeigenschaften
N	Wachstum, ertragsbegrenzender Faktor	Proteingehalt
P	Wurzelausprägung, Energiestoffwechsel, Trockenheitsresistenz	Stärkequalität
K	Streckenwachstum der Zelle, Wasserregulation	Stärkegehalt, Stärkequalität
Mg	Photosynthese	-
S	Bildung der Aminosäuren Methionin und Cystein	Kleberqualität und Backverhalten

Tabelle 8: Ökonomisches Optimum der N-Düngung (Quelle: Richner et al. 2010)

Kultur	Versuchsumwelten	Ökonomisches Optimum der N-Düngung (kg N/ha)		
		Minimumwert	Medianwert	Maximalwert
Brotweizen	19	97	165	234
Futterweizen	19	85	157	224

Standortanforderungen von Weizen

Weizen bevorzugt kalkhaltige und humusreiche Substrate. Deshalb ist der Weizenanbau traditionell auf Löß- und Schwarzerdeböden beheimatet. Verdichtete und staunasse Böden erschweren Keimung und Wachstum. Eine lockere und durchlässige Krume kann sich aber bei starker Trockenheit während der Hauptvegetation negativ auf die Kornausbildung auswirken (Seibel 2005).

Räumliche Variabilität im Einfluss auf Weizen

Das räumlich variable Ertragspotenzial geht mit dem ökonomischen Nutzen und der ökologischen Vorteilhaftigkeit einher. Mit einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung können gezielt Betriebsmittel wie Dünger und Pflanzenschutzmittel angepasst an die Bodenunterschiede ausgebracht werden. Räumlich exakte Ertragsdaten können mittels Satellitennavigation geortet werden. Da jährlich unterschiedliche Witterungseinflüsse auf den schlaginternen Ertrag Einfluss haben, ist das räumliche Ertragspotenzial erst nach mehrjähriger Erfassung der Ertragsdaten möglich. Geographische Informationssysteme geben ebenso eine wichtige Auskunft über den Standort.

Der Ertrag ist nicht nur von der Produktivität des Bodens abhängig, sondern auch von der Produktivität der Pflanzen und des Klimas. Diese drei Parameter wurden von Boguslawski (1979) in seinem bekannten Wirkungsdreieck der Wachstumsfaktoren dargestellt.

Über den Boden als Pflanzstandort werden Nährstoffe, Wasser und Sauerstoff entnommen. Auch organische Stoffe wie Humus beeinflussen das Pflanzenwachstum. Humus und Mineralstoffe sind im Boden räumlich angeordnet und bilden das Bodengefüge. Je nach Bodengefüge bilden sich Hohlräume, die mit Bodenlösung gefüllt sind. Die Bodenlösung wird durch das Wasser mit darin gelösten Salzen und Gase, sowie mit Bodenluft gebildet (Kuhlmann 2014).

Um Einflüsse von Bodenunterschieden in der Pflanzenzüchtung möglichst gering zu halten, werden Feldversuche mehrjährig und an verschiedenen Standorten durchgeführt. In Einzeljahresanalysen können nur sehr vage Schätzungen der Wechselwirkung mit dem Jahr gemacht werden. Derartige Analysen führen zu verzerrten Aussagen über die genetische Varianz und der Varianz zwischen Genotyp-Umwelt-Wechselwirkung (Arief et al. 2014).

Statistische Modelle

Da Tests zur Qualitätsbewertung zeitaufwändig und kostenintensiv sind, werden verschiedene statistische Modelle und Versuchsdesigns zur Auswertung der Tests verwendet. (Grausgruber et al. 2000). Durch die Verwendung von geeigneten experimentellen Designs kann die räumliche Variabilität gesteuert werden. In den meisten Sortenversuchen wird ein vollständiges oder unvollständiges Blockdesign verwendet und mittels traditioneller Varianzanalyse verrechnet. Bei der Verwendung von Blockdesigns wird aber die räumliche Variation nicht berücksichtigt. So müssen vom Versuchsansteller Versuchsfelder bzw. Blöcke

ausgesucht werden die homogen sind. Um die räumliche Variabilität erkennen zu können, stellte Papadakis (1937) seine Idee vor, Informationen des unmittelbaren Nachbarn einzubeziehen. Diese Methode wird Nächste-Nachbarn-Methode genannt. Dabei werden benachbarte Zellen innerhalb der Reihen oder Spalten herangezogen. Dies basiert auf den Korrelationen zwischen den Residuen. Gibt es kein räumliches Muster sind die Korrelationen gering. Sind Muster feststellbar sind benachbarte Residuen ähnlicher und weisen eine höhere Korrelation auf (Burgueño et al. 2000).

Gilmour et al. (1997) unterscheiden zwischen großen, globalen Variationen, fremden Variationen und natürlicher Variation. Natürliche Variation durch zum Beispiel unterschiedlicher Bodentiefe oder Bodenfeuchtigkeit kann durch eine autoregressive Korrelationsstruktur (AR) modelliert werden. Dadurch wird die natürliche Variation durch das Modellieren des direkten Produktes der Korrelationsstruktur entlang der Zeilen und Spalten bestimmt. Das heißt, die Korrelation zwischen zwei Beobachtungen (Parzellen) hängt von ihrer räumlichen Distanz ab. Diese Struktur wird als AR1×AR1 Modell bezeichnet. Das AR1×AR1 Modell wird gerne verwendet, um lokale Variationen entlang von Spalten (=Fahrten) und Zeilen (=Blöcken) zu erkennen (Cooper et al. 2001).

Durch Variogramme werden vorhandene Fremdvariationen sichtbar gemacht und dienen als wichtiges Instrument zur grafischen Interpretation. Enthält das Residuum kein Muster so ist das Variogramm flach. Sind aber starke Muster im Variogramm zu sehen, zeigt dies eine fremde Variation an (Burgueño et al. 2000). Wichtig für die Abschätzung genotypischer Effekte ist das richtige Versuchsdesign. Nur dadurch kann die Leistung der räumlichen Modellierung gesteigert werden. Die Versuchsgröße und die Feldheterogenität beeinflussen die Leistung der Versuchspläne und die räumliche Korrektur. Bei großen Versuchen und hoher Variabilität ist die Wahl des Versuchsdesigns ausschlaggebend für eine hohe Präzession der Ergebnisse (Borges et al. 2019).

3. MATERIAL UND METHODEN

3.1 Versuchsstandort

Der Winterweizen Versuch RAO17 wurde auf der biologisch bewirtschafteten Fläche der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf, im Ortsgebiet von Raasdorf (KG Pysdorf) (N 48.2330°, O 16.5917°) angelegt (Abb. 4).

Laut BFW (2019), liegt das Versuchsfeld in der großflächig verbreiteten Praterterrasse. Der Bodentyp ist ein Tschernosem aus kalkhaltigen Feinsedimenten. Die Wasserverhältnisse sind als mäßig trocken, mit einer hohen Speicherkraft und mäßiger Durchlässigkeit einzustufen. Das vorliegende Profil ist ein A-AC-C1-C2 Profil. Die beiden A-Horizonte sind von lehmigem Schluff, sandigen Lehm bis Lehm geprägt. Der A-Horizont hat eine Gründigkeit von 50 cm. Der C1 Horizont ist ein sandig bis lehmiger Schluff und der C2 Horizont ist Sand bis sandiger Schluff. Im A-Horizont herrschen mittelhumose Verhältnisse, der AC-Horizont wiederum ist schwach humos. Die Humusform ist Mull. Der Kalkgehalt ist hoch und die Bearbeitbarkeit ist sehr gut. Generell ist die Versuchsfläche als hochwertiges Ackerland einzustufen.

Abbildung 4: Orthofoto der Versuchsfläche in Raasdorf. Das Versuchsfeld ist dreiseitig von Windschutzanlagen umgeben. Die roten Linien kennzeichnen die Bodenunterschiede (Quelle: BFW 2019).

Versuchsplan

Der Feldversuch RAO17 wurde mit 15 Weizengenotypen als 5×3 Gitteranlage mit 10 Wiederholungen angelegt. In Abb. 5 ist der Versuchsplan dargestellt. Jede einzelne der 10 Wiederholungen besteht also aus 3 Teilblöcken zu je 5 Sorten. Jeweils zwei Wiederholungen, in Summe also 6 Teilblöcke, stehen hintereinander. In Summe ergeben sich dadurch 6 Reihen (*rows*) und 25 Säulen (*columns*). Die Einzelparzellen waren 1,25 m breit und 10 m lang. Inklusive der Fahrspuren und Zwischenwege ergibt sich dadurch eine Gesamtbreite des Versuchs von 37,5 m und eine Gesamttiefe von 65 m.

12	2	13	7	4	13	11	14	4	12	7	6	10	14	11	6	14	8	5	10	5	13	2	12	6
8	11	9	6	10	3	1	6	15	8	9	8	1	12	4	7	12	2	1	3	1	4	3	11	15
5	15	1	3	14	2	7	10	5	9	2	3	15	13	5	15	9	11	4	13	10	14	7	8	9
3	6	12	10	13	13	1	6	14	7	11	5	12	3	7	10	4	9	8	6	6	9	8	1	2
4	2	5	7	14	15	3	4	9	2	9	13	14	6	1	14	15	3	13	11	4	12	13	10	5
11	8	15	9	1	12	10	5	11	8	8	10	4	2	15	1	5	7	2	12	14	7	11	15	3

Abbildung 5: Row-Column Feldplan (6×25) mit genotypischer Randomisation: 1, Adesso; 2, Alessio; 3, Amicus; 4, BTX296; 5, Capo; 6, Edison; 7, Ehogold; 8, Emilio; 9, Energo; 10, Erla Kolben; 11, Gaudio; 12, Laurenzio; 13, Loosdorfer Austro Bankut; 14, Marienhofer Kolben; 15, Renan.

3.2 Pflanzenmaterial

Im Bioversuch 2017 standen 15 Winterweizensorten (*Triticum aestivum* L.) aus unterschiedlichen Zuchtprogrammen und Zuchtperioden. Die Sorten sind nachfolgend kurz beschrieben und in Tabelle 9 zusammengefasst.

Adesso (Saatzucht Donau) wurde 2012 in Österreich zugelassen. Der Grannenweizen zeichnet sich durch hohe Proteingehalte, einer hohen Backqualität (BQG 8) und ein hohes Hektolitergewicht aus und ist besonders an das Pannonische Trockengebiet angepasst. Die Sorte ist allerdings stark anfällig gegenüber Gelbrost (AGES 2019a).

Alessio (Saatzucht Donau) wurde 2016 als Qualitätsweizen (BQG 7) zugelassen. Die Sorte zeigt eine exzellente Blattgesundheit und eignet sich daher auch gut für den biologischen Anbau (AGES 2019a).

Amicus (Saatzucht Donau) ist eine frühreife, kurzstrohige Sorte die 2011 in Ungarn, 2012 in Kroatien und 2016 in Rumänien zugelassen wurde. Die Sorte wurde auch in Georgien vermarktet, wo sie sich als sehr widerstandsfähig gegenüber dort auftretende Krankheiten herausstellte (Natsarishvili et al. 2016, Ujmajuridze et al. 2018).

Austro Bankut Grannen (Saatzucht Piatti) war von 1949 bis 1968 als Zuchtsorte registriert und von 2008 bis 2010 als Erhaltungssorte. In der Sortenbeschreibung von 1961 wurde die Sorte als Aufmischweizen mit sehr hoher Feuchtklebermenge charakterisiert (AGES 2019b).

BTX296 ist eine BOKU Zuchtlinie aus der Kreuzung Capo×Glenlea. Glenlea ist ein alter kanadischer Sommerweizen der als ʻextra strong gluten' Weizen gilt (Evans et al. 1972), basierend auf einer doppelten Expression des *Glu-B1x7* Allels ($Bx7^{OE}$, *Glu-B1al*) (Li et al. 2014) und sich als exzellenter Aufmischweizen für kleberschwächere Partien erwies (Bushuk 1980). BTX296 zeichnet sich durch hohe Kleber- und Backqualität aus.

Capo (Probstdorfer Saatzucht) wurde 1989 in Österreich zugelassen und hat sich bis heute als Qualitätsweizensorte (BQG 7) bewährt. Der langstrohige Qualitätsweizen überzeugt heute noch mit stabilen Erträgen und Proteingehalt. Er hat eine besonders gute Bestockungsfähigkeit und sollte deshalb dünn gesät werden (AGES 2019a)**.**

Edison (Saatzucht Edelhof) wurde 2001 in Österreich zugelassen. Die Sorte hatte aufgrund seiner guten Alveogramm Werten eine Zeit lang als Exportweizen (BQG 7) eine gewisse Bedeutung. Die Sorte ist aber stark anfällig für Zwergsteinbrand (Huss & Bürstmayr 2011).

Ehogold (Saatzucht Edelhof) ist ein wuchshoher Typ und deshalb gut unkrautunterdrückend. Ehogold wurde 2014 zugelassen und verfügt er über eine gute Backqualität (BQG 8) und ein hohes Hektolitergewicht. Ehogold kommt auch auf schlechteren Standorten gut zurecht. Durch seine gute Bestockungsfähigkeit ist er spätsaatverträglich und sehr stabil im Ertrag (AGES 2019a).

Emilio (Saatzucht Edelhof) wurde 2013 in Österreich als frühreife, robuste und winterharte Sorte (BQG 7) zugelassen. Im Pannonikum bringt er auch unter schwierigen

Bedingungen gute Leistungen. Die Proteingehalte bei Emilio sind nur mittelmäßig (AGES 2019a).

Energo (Saatzucht Edelhof) wurde 2009 zugelassen. Es handelt sich um einen Qualitätsweizen der BQG 7 der mit einer guten Ertragsstabilität in allen Regionen überzeugt. Energo ist anfälliger gegen Braunrost, hat aber eine gute Auswuchstoleranz, ein hohes Tausendkorngewicht und einen hohen Proteingehalt (AGES 2019a).

Erla Kolben (Kärntner Saatbau) wurde bereits 1961 zugelassen und war jahrzehntelang die Sorte mit der höchsten Backqualität (BQG 9). Der Kolbenweizen ist mit heutigen modernen Qualitätsweizen hinsichtlich des Ertrags- und Resistenzniveaus nicht mehr konkurrenzfähig (Oberforster & Werteker 2009), hat jedoch noch eine geringe Bedeutung im biologischen Landbau.

Gaudio (Saatzucht Donau) wurde erstmals 2014 in Ungarn zugelassen, weiters 2016 in Kroatien, 2017 in Tschechien (Mezlik 2018) und 2018 in der Slowakei. Der kurzhalmige Grannenweizen eignet sich durch seine frühe Abreife und enormes Ertragspotenzial für die Ethanolweizenproduktion im Trockengebiet.

Laurenzio (Saatzucht Donau) ist ein 2012 zugelassener Qualitätsweizen (BQG 7) der sich durch eine hohe Proteinqualität und ein hohes Tausendkorngewicht auszeichnet. Laurenzio zeigt auch für Exportweizen geforderte gute Alveogramm Werte (AGES 2019a).

Marienhofer Kolben (Saatgutzüchtung Oser) war von 1951 bis 1966 in der österreichischen Sortenliste eingetragen, wurde jedoch bereits früher von Gustav Pammer aus österreichischen und ungarischen Landsorten entwickelt (Pammer & Ranninger 1928). Die Sorte zeichnet sich durch eine sehr hohe Klebermenge mit guter Kleberqualität aus, ist jedoch anfällig auf Braun- und Schwarzrost (AGES 2019b).

Renan (INRA/Agri Obtentions) wurde erstmals 1991 in Frankreich zugelassen. Die kurzstrohige Sorte der BQG 7 ist durch einen mittelmäßigen Kornertrag und ein hohes Tausendkorngewicht gekennzeichnet und hat gute Resistenzen gegenüber Blattkrankheiten (Hanzalova et al. 2007). Renan war über Jahre hinweg neben Capo die wichtigste Qualitätsweizensorte in Österreich (Grausgruber et al. 2000).

Tabelle 9: Beschreibung der verwendeten Weizensorten

Sorte	Backqualität[1]	Zulassung[2]	Zulassungsland
Adesso	8	2012	AT, DE
Alessio	7	2016	AT
Amicus	A2	2012	HR, HU, RO, RS
Austro Bankut	-	1948	AT
BTX296	-	-	Zuchtstamm
Capo	7	1989	AT, HU
Edison	7	2001	AT
Ehogold	8	2014	AT
Emilio	7	2013	AT
Energo	7	2009	AT, HR
Erla Kolben	9	1961	AT
Gaudio	B1	2014	CZ, HR, HU, SK
Laurenzio	7	2012	AT
Marienhofer Kolben	-	1951	AT
Renan	7	1991	AT, BE, BG, DE, FR, HR, RO, SI

[1] Einstufung der Backqualität entsprechend der AGES Beschreibenden Sortenliste von 1 bis 9 (höchste Qualität) bzw. der ungarischen Sortenbeschreibung; ISO 3166 Ländercodes: AT, Österreich; BE, Belgien; BG, Bulgarien; CZ, Tschechien; DE, Deutschland; FR, Frankreich; HR, Kroatien; HU, Ungarn; RO, Rumänien; RS, Serbien; Sl, Slowenien, SK, Slowakei

[2] Jahr der Erstzulassung

3.3 Indirekte Qualitätsmerkmale

Tausendkorngewicht

Das Tausendkorngewicht wurde mit einem Contador Zählgerät (Pfeuffer GmbH, Kitzingen, Deutschland) ermittelt. Von jeder Probe wurden zweimal 500 Körner gezählt und gewogen und auf das TKG hochgerechnet.

Siebung

Die Siebung der Weizenproben wurde mit dem Sortimat (Pfeuffer GmbH, Kitzingen, Deutschland) durchgeführt, welcher die Proben in die Korngrößen >2,8 mm, >2,5 mm, >2,2 mm und <2,2 mm siebt (Abb. 6). Es wurden zweimal 50 g der Probe je eine Minute gesiebt. Um genauere Ergebnisse zu erreichen, wurden anstatt der üblichen 100 g Probe nur je 50 g Proben verwendet, da sich bei einer größeren Probenmenge die Sieboberfläche schnell verlegt und kleinere Körner nicht auf die engmaschigen Siebe durchfallen können. Die einzelnen Größenfraktionen wurden separat abgewogen und die Siebfraktionen auf Prozent umgerechnet. Um eine Probenvermischung zu verhindern, wurde nach jeder Probe eine Sichtkontrolle der Siebe durchgeführt.

Abbildung 6: Pfeuffer Sortimat mit den Sieben 2,8 mm, 2,5 mm und 2,2 mm

Nahinfrarotspektroskopie

Für die Bestimmung des Wassergehaltes, des Proteingehaltes, der Wasseraufnahme im Extensogramm (WAex) und des Klebergehaltes wurde das NIRFlex N-500 FT-NIR Spektrometer (Büchi Labortechnik AG, Flawil, Schweiz) herangezogen (Abb. 7). Eine Petrischale mit der Probe wurde randvoll angefüllt und auf das Gerät gestellt. Die Beprobung dauerte rund eine halbe Minute. Die erfassten Spektren werden von einem Computer mittels hinterlegter Kalibration automatisch in die entsprechenden Gehalte an Inhaltsstoffen umgerechnet.

Abbildung 7: Nirflex N-500 Solids Analysegerät mit Direktausgabe der Messdaten am Computer (Saatzucht Donau, Probstdorf).

3.4 Datenauswertung

Die statistische Auswertung des Feldversuches WWRAO2017 erfolgte mit den Softwarepaketen Genstat® 19 Ed., ASReml® (VSNi, Hemel Hempstead, UK) und SAS® 9.4 (SAS Institute, Cary, NC). Neben den bei Gilmour et al. (1997) und Burgueño et al. (2000) beschriebenen Modellen wurde auch eine Nächste-Nachbarn-Analyse nach Papadakis (1937) angewandt.

Modelle

Es kamen folgende Modelle zum Einsatz: (i) Blockanlage, (ii) Gitteranlage, (iii) 2-dimensionale Autoregression (AR1×AR1), (iv) Row + Column + AR1×AR1, (v) Papadakis Nächste-Nachbar Ost-West 2 und (vi) Nord-Süd 2 zur Anwendung. Mit diesen sechs Modellen wurden die Merkmale Kornertrag, Tausendkorngewicht, Korngröße, Hektolitergewicht, Feuchtklebergehalt und Proteingehalt verrechnet.

Für die Identifikation des besten Modells wurde wie in Burgueño et al. (2000) der -2 Log-likelihood Wert (*deviance*) herangezogen. Von jedem der sechs Merkmale wurde von den jeweils besten Modellen ein Variogramm erstellt. Variogramme sind eine hilfreiche grafische Unterstützung zum Erkennen von räumlichen oder systematischen Trends. Systematische Trends können durch agronomische Prozesse bei der Durchführung von Versuchen entstehen. Beispiele dafür sind die Aussaat und Ernte in Schlangenlinien, Maschineneffekte oder auch ungleiche Parzellengrößen. Demensprechend kann dann das Modell angepasst werden und Versuchsfehler können entschärft werden.

Der AIC (*Akaike Information Criterion*) wurde zum Zweck der statistischen Identifizierung entwickelt. Wenn es mehrere kongruierende Modelle (Basismodel und Alternativmodelle) gibt wird der AIC durch das Modell und der Maximum-Likelihood-Schätzungen der Parameter definiert = -2LL + 2k. Dabei ist das Modell mit dem kleinsten AIC Wert auszuwählen (Akaike 1974).

Der SED-Wert (Standardfehler der Differenz) eignet sich, um Unterschiede zwischen festen Sorteneffekten zu testen. Der SED ist aber kein geeigneter Wert für die Auswahl eines räumlichen Modells, da der SED stark vom jeweiligen räumlichen Modell beeinflusst wird. Das bedeutet, dass das beste räumliche Modell nicht unbedingt den kleinsten SED Wert aufweisen muss.

0106	0206	0306	0406	0506	0606	0706	0806	0906	1006	12	8	6	14	11
0105	0205	0305	0405	0505	0605	0705	0805	0905	1005	1105	1	3	8	4
0104	0204	0304	0404	0504	0604	0704	0804	0904	1004	1104	1204	10	13	5
99,54	45,42	53,60	34,32	38,52	-0,26	0703	0803	0903	1003	1103	1203	1303	4	6
11,70	0202	0302	0402	0502	0602	0702	0802	0902	1002	1102	1202	1302	1402	10
55,62	0201	0301	0401	0501	0601	0701	0801	0901	1001	1101	1201	1301	1401	1501

Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Row-Column Feldplan mit EW2- und NS2-Residuen-Werten vom Merkmal Kornertrag pro m²

In Abb. 8 ist die Berechnung der Papadakis Nächste-Nachbar Methode dargestellt: die Werte für die nachfolgenden Formeln für die Nord-Süd (NS) bzw. Ost-West (EW) Kovariablen sind farblich hervorgehoben. Die zwei roten Werte sind Residuen und der grüne Wert kennzeichnet den $NS2_{0101}$ Wert.

$$NS2_{1.1} = \frac{res_{1.2} + res_{1.3}}{2} = \frac{11{,}7 + 99{,}54}{2} = \mathbf{55{,}62}$$

Der $EW2_{0403}$ Wert ist in Abb. 8 blau markiert und die orangen Werte sind die Residuen der jeweiligen Nachbarparzellen. Nachfolgend die Formel zur Berechnung des $EW2_{0403}$ Wertes.

$$EW_{4.3} = \frac{res_{2.3} + res_{3.3} + res_{5.3} + res_{6.3}}{4} = \frac{45{,}42 + 53{,}6 + 38{,}52 - 0{,}26}{4} = 34{,}32$$

4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In Tabelle 10 sind sämtliche Merkmale mit den sechs verschiedenen Modellen zu sehen. Das jeweils beste Modell sowie das beste Papadakis Nächst-Nachbar Modell wurde in der Tabelle fett gedruckt hervorgehoben.

Es ist klar ersichtlich, dass bei drei Merkmalen das Modell *Row+Col+AR1×AR1* das beste Modell war, in zwei Fällen die *Gitteranlage* und in einem Fall das *AR1×AR1* Modell. Bei den Nächste-Nachbar-Modellen war *EW2* bei allen sechs Merkmalen das bessere Modell.

Dies zeigt, dass nicht immer das räumliche Modell das bessere Modell ist. Das Hinzufügen einer räumlichen Komponente zum linearen Modell macht aber durchaus Sinn. In Müller et al. (2010) zeigte sich in einer Analyse von 64 Gerstenversuchen, dass in 42,2% der Versuche das lineare Modell das beste Modell und in 12,1% das räumliche Modell das beste Modell war. Das Papadakis Modell stellt sich in diesem Feldversuch ebenfalls als sehr wirksames Modell heraus.

Der Sortenversuch von Smith und Casler (2004) zeigte, dass sich durch die Verwendung von einem RCBD (*randomized complete block design*) eine Verbesserung von durchschnittlich 15% ergibt, zusätzlich 17% durch die Verwendung einer Gitteranlage und nochmals zusätzlich 22-30% durch eine NNA. Im vorliegenden Versuch war die Blockanlage neben der Papadakis NS2 Methode das ineffizienteste Model. Die Gitteranlage oder die Berücksichtigung eines zweidimensionalen Trends war in allen Merkmalen überlegen.

Tabelle 10: Werte wichtiger Merkmale und Modelle

Modell	Kornertrag			Tausendkorngewicht		
	-2LL[1]	σ^2_{error}[2]	SED[3]	-2LL	σ^2_{error}	SED
Blockanlage	1233,9	2440,3	22.09	329,0	2,83	0,75
Gitteranlage	**1219,8**	**1819,4**	**20.19**	304,5	1,84	0,65
AR1×AR1	1224,3	2936,4	20.32	285,6	4,04	0,56
Row + Col + AR1×AR1	1221,8	2623,4	20.30	**282,9**	**3,22**	**0,56**
EW2	**1215,2**	**2254,9**	**21.31**	**262,8**	**1,93**	**0,62**
NS2	1245,1	2824,4	23.81	348,2	3,67	0,86
Modell	**Korngröße**			**Hektolitergewicht**		
	-2LL	σ^2_{error}	SED	-2LL	σ^2_{error}	SED
Blockanlage	558,25	15,57	1,76	136,45	0,65	0,36
Gitteranlage	546,82	12,03	1,64	102,39	0,38	0,30
AR1×AR1	521,03	21,24	1,36	**70,84**	**1,17**	**0,24**
Row + Col + AR1×AR1	**521,02**	**20,93**	**1,37**	70,84	1,17	0,24
EW2	**498,05**	**11,06**	**1,49**	**39.04**	**0,37**	**0,27**
NS2	576,28	19,87	2,00	170,21	0,98	0,44
Modell	**Feuchtklebergehalt**			**Proteingehalt**		
	-2LL	σ^2_{error}	SED	-2LL	σ^2_{error}	SED
Blockanlage	1233,9	2440,3	22,09	329,0	2,83	0,75
Gitteranlage	**1219,8**	**1819,4**	**20,19**	304,5	1,84	0,65
AR1×AR1	1224,3	2936,4	20,32	285,6	4,04	0,56
Row + Col + AR1×AR1	1221,8	2623,4	20,30	**282,9**	**3,22**	**0,56**
EW2	**1215,2**	**2254,9**	**21,31**	**262,8**	**1,93**	**0,62**
NS2	1245,1	2824,4	23,81	348,2	3,67	0,86

[1] -2LL, -2 *Log-likelihood* (*deviance*); [2] s^2_{res}, Fehlervarianz; [3] SED, *standard error of difference*

4.1 Kornertrag

Beim Merkmal Kornertrag zeigten sich die Modelle *Gitteranlage* und *EW2* als die besten Modelle (Tabelle 10). In diesem Versuch zeigt sich ein geringer Bodenunterschied. Somit kann das Versuchsfeld als homogen bezeichnet werden. Einen leichten linearen Trend im Variogramm (Abb. 9) kann man in den letzten Reihen des Versuches erkennen. Innerhalb der Spalten ist kaum ein Trend zu erkennen. Die Effizienz der Gitteranlage ist mit 109% gegenüber der Blockanlage zwar gering, aber dennoch gegeben.

$$Effizienz\ (\%) = \frac{SED\ RCBD \times 100}{SED\ Lattice} = \frac{22{,}09\ \times 100}{20{,}19} = 109{,}41$$

Der externe Einfluss auf den Kornertrag kann sehr viele Gründe haben. Ein wichtiger Begriff in diesem Zusammenhang ist *Precision Farming*. Godwin et al. (2003) hat Ertragskartierungen zur Bestimmung von Trends herangezogen. In diesen Kartierungen wird unter anderem sichtbar, dass bei der Ernte das Gewicht des Mähdreschers am Vorgewende

ansteigt und die dabei einhergehenden Bodenverdichtungen einen Einfluss auf den Ertrag haben. Als die wichtigste langfristige Ursache für Ertragsschwankungen in den Versuchsfeldern wurden Bodenunterschiede und die damit verbundene Wasserhaltekapazität genannt. Die Verfügung von Pflanznährstoffen wurde aus agronomischer Sicht als nicht einschränkend bewertet.

Die Bewertung der Variation des Feldes kann Grundlage für weitere agronomische Inputs sein. Großen Einfluss auf räumliche Variation zwischen einzelner Anbausaisonen haben nicht nur Bodenunterschiede und Bewirtschaftungsfaktoren, sondern auch klimatische Bedingungen. Bodenbedingungen interagieren sehr stark mit klimatischen Einflüssen. Bei trockenem Wetter sind bodenphysikalische Eigenschaften wie Textur, Schüttdichte und organische Substanz, die die Wasserhaltekapazität beeinflussen, entscheidend für das Pflanzenwachstum. In den Feldversuchen von Diacono et al. (2012) wurde festgestellt, dass in der speziellen Umgebung des Versuches die zeitliche Variation höher ist als die räumliche Variation.

Im zweijährigen süditalienischen Weizenversuch von Basso et al. (2009) erklärte der Bodenwassergehalt in beiden Versuchsjahren den größten Teil der räumlichen Variabilität. Die in Ertragskartierungen enthaltenen Informationen müssen richtig interpretiert und bewertet werden, um einen Nutzen daraus zu ziehen. Eine ordnungsgemäße Bewertung kann nur unter Berücksichtigung mehrerer Jahre und verschiedener Kulturen erfolgen. Die Präzisionslandwirtschaft berücksichtigt oftmals nur unzureichend zeitliche Variationen.

Stefanova et al. (2009) berücksichtigen bei der Versuchsauswertung auch die Fahrrichtung der Parzellensämaschine und des Parzellenmähdreschers, um nicht systematische Trends wie das Fahrmuster in Schlangenlinien zu korrigieren. So können Ergebnisse im Anschluss besser interpretiert werden.

Laut Knörzer et al. (2010) führen räumliche Modelle nicht immer zu einer Verbesserung der Modellleistung. In Weizenversuchen waren die Basismodelle für die Merkmale Kornertrag und TKM besser geeignet. Bei anderen Merkmalen wie Blattflächenindex und Bestandesdichte konnte mithilfe von räumlichen Modellen eine Verbesserung erreicht werden. Auch im vorliegenden Versuch zeigen räumliche Modelle bei den Merkmalen Kornertrag und Feuchtklebergehalt keine Verbesserung zur Gitteranlage.

Campbell und Bauer (2007) empfehlen für Feldversuche auf sehr heterogenen Versuchsflächen zur Verbesserung der Versuchsgenauigkeit die Verwendung der NNA oder anderer räumlicher Modelle.

Laut Diacono et al. (2012) wird der Kornertrag als Ergebnis der Wechselwirkung zwischen pflanzengenetischen Merkmalen, Bodeneigenschaften, Feldmanagement und die klimatischen Bedingungen bezeichnet. Im vorliegenden Experiment sind Daten zu den klimatischen Bedingungen nicht berücksichtigt worden, da diese auf Grund der Größe des Feldversuches innerhalb dessen nicht variierten und somit keine zusätzliche externe Variation verursachten.

Da die Variogramm-Modellierung sehr empfindlich auf starke Abweichungen von der Normalität reagiert und außergewöhnlich große Werte sehr gut in Form von räumlichen Änderungen im Variogramm zu sehen sind, kann man beim Merkmal Kornertrag von einer sehr guten Homogenität der Daten sprechen.

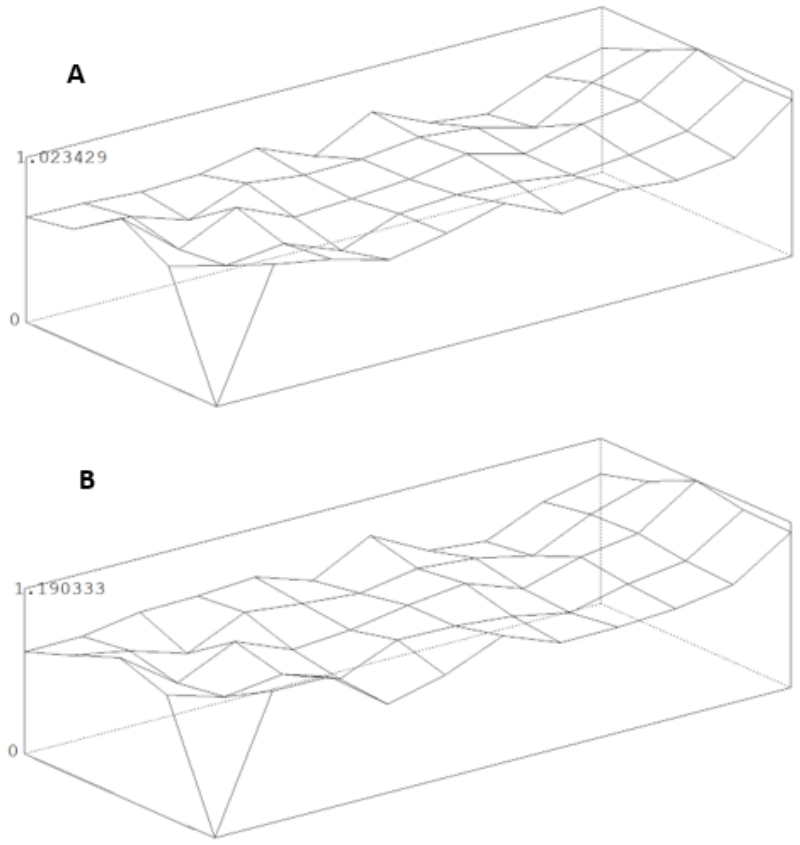

Abbildung 9: Variogramm für den Kornertrag: **A** Gitteranlage; **B** Papadakis EW2

4.2 Tausendkorngewicht

Die besten Modelle des Merkmales Tausendkorngewicht waren das *Row+Column+AR1×AR1* und das *EW2* Modell. In Abb. 10A ist ein leichter, linear ansteigender Trend entlang der Reihen zu erkennen. Entlang der Spalten fällt am Anfang des Versuches das TKG in beide Richtungen nach außen hin leicht ab. Abb. 10B zeigt ein sehr homogenes Versuchsfeld mit nur einzelnen „Ausreißern“ die genotypisch erklärt werden können. Die Effizienz des *Row+Column+AR1×AR1* Modells im Vergleich zum Basismodell ist mit 134% sehr gut.

$$Effizienz\ (\%) = \frac{SED\ RCBD \times 100}{SED\ \mathrm{Row + Col + AR1 \times AR1}} = \frac{0{,}75\ \times 100}{0{,}56} = 133{,}93$$

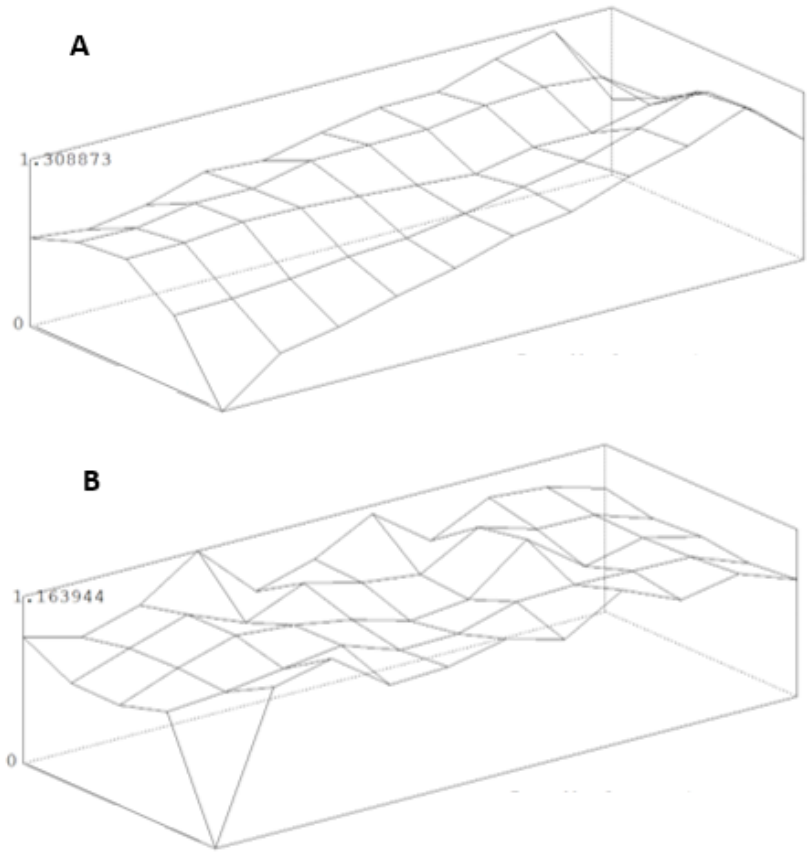

Abbildung 10: Variogramm für das TKG: **A** Row + Col + AR1×AR1; **B** Papadakis EW2

Arbeiten zu räumlichen Trends zu Merkmalen abseits des Kornertrages sind rar und deutlich geringer in ihrer Anzahl. Eine Variabilität im TKG innerhalb einer Parzelle als auch innerhalb eines Feldes kann vielfältige Ursachen haben. Neben Bodenunterschieden können zum Beispiel auch Schwankungen im Blühzeitpunkt, der Bestandesdichte oder der Pflanzenarchitektur signifikante Einflüsse auf Variationen in den Ertragskomponenten und somit auch im TKG zur Folge haben wie von Beral et al. (2020) gezeigt werden konnte. Dadurch sind Schwankungen im TKG innerhalb eines Feldbestandes ein und derselben Sorten natürlich vorhanden und auch entsprechend feststellbar (Roberts 1987, Stafford 1999). Räumliche Trends im TKG in Züchtungsversuchen mit vielen verschiedenen Genotypen konnten aber auch nachgewiesen werden, wie zum Beispiel von Lado et al. (2013) und Rodríguez-Álvarez et al. (2018).

4.3 Korngröße

Beim Merkmal Korngröße hatten genauso wie beim TKG die Modelle *Row+Column+AR1×AR1* bzw. *EW2* den geringsten *-2 Log-likelihood* Wert. Abb. 11 zeigt Variogramme die jenen für das TKG sehr ähnlich sind, wodurch der hohe Zusammenhang zwischen TKG und Korngröße (Sortierung) ersichtlich ist. Wie beim TKG ist auch für die Korngröße die Effizienz des *Row+Column+AR1×AR1* Modells zum Basismodell mit 128% sehr gut und ähnlich hoch.

$$Effizienz\ (\%) = \frac{SED\ RCBD \times 100}{SED\ \mathrm{Row + Col + AR1 \times AR1}} = \frac{1{,}76\ \times 100}{1{,}37} = 128{,}47$$

4.4 Hektolitergewicht

Abb. 12 gibt die Variogramme für das HLG wider. Im Falle des Modells *AR1×AR1* kann man einen linearen Trend entlang der *columns* erkennen. Entlang den *rows* verläuft der Versuch etwas kurvilinear. Das Variogramm des *EW2* Modells zeigt sich hingegen sehr ausgeglichen. Beim HLG konnte die höchste Effizienz aller Merkmale im Vergleich zum Basismodell mit 150 % festgestellt werden.

$$Effizienz\ (\%) = \frac{SED\ RCBD \times 100}{SED\ \mathrm{AR1 \times AR1}} = \frac{0{,}36\ \times 100}{0{,}24} = 150$$

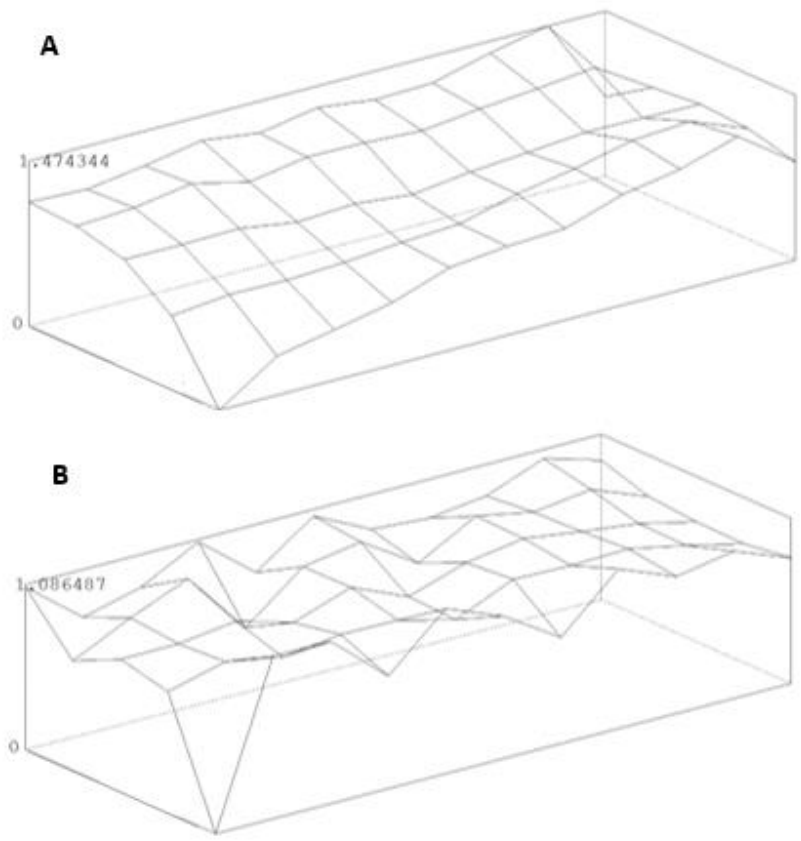

Abbildung 11: Variogramm für die Korngröße: **A** Row + Col + AR1×AR1; **B** Papadakis EW2

Die Kornfüllungsphase des Weizens ist ein wichtiger Zeitraum für die Bildung eines hohen HLG. Trockenstress und hohe Temperaturen verringern die Verlagerung der Kohlenhydratreserven von den vegetativen Organen ins Korn (Diacono et al. 2012). Räumliche Unterschiede im Bodenwasserhaushalt können sich somit auch auf räumliche Trends im HLG auswirken. Feldtrends bei der Korngröße und beim HLG von Weizen wurden sowohl auf Schlagebene als auch auf Parzellenebene von anderen Autoren berichtet (Rosielle 1980, Mulla et al. 1992, Berndtsson & Bahri 1995).

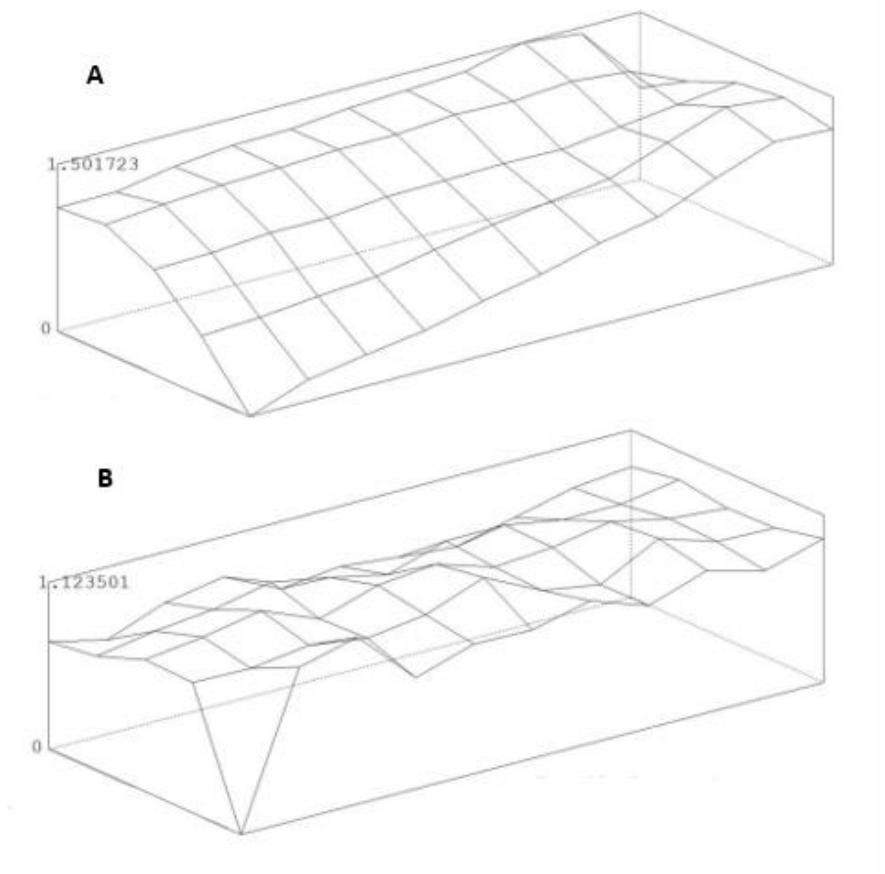

Abbildung 12: Variogramm des HLG: **A** AR1×AR1; **B** Papadakis EW2

4.5 Feuchtklebergehalt

Der räumliche Trend für den Feuchtklebergehalt ist in Abb. 13 dargestellt. In den beiden Grafiken ist ein leichter Randeffekt sichtbar. Die Effizienz der Gitteranlage im Vergleich zur Blockanlage ist mit 109% gering, aber gegeben.

$$Effizienz\ (\%) = \frac{SED\ RCBD \times 100}{SED\ \text{Lattice}} = \frac{22{,}09\ \times 100}{20{,}19} = 109{,}41$$

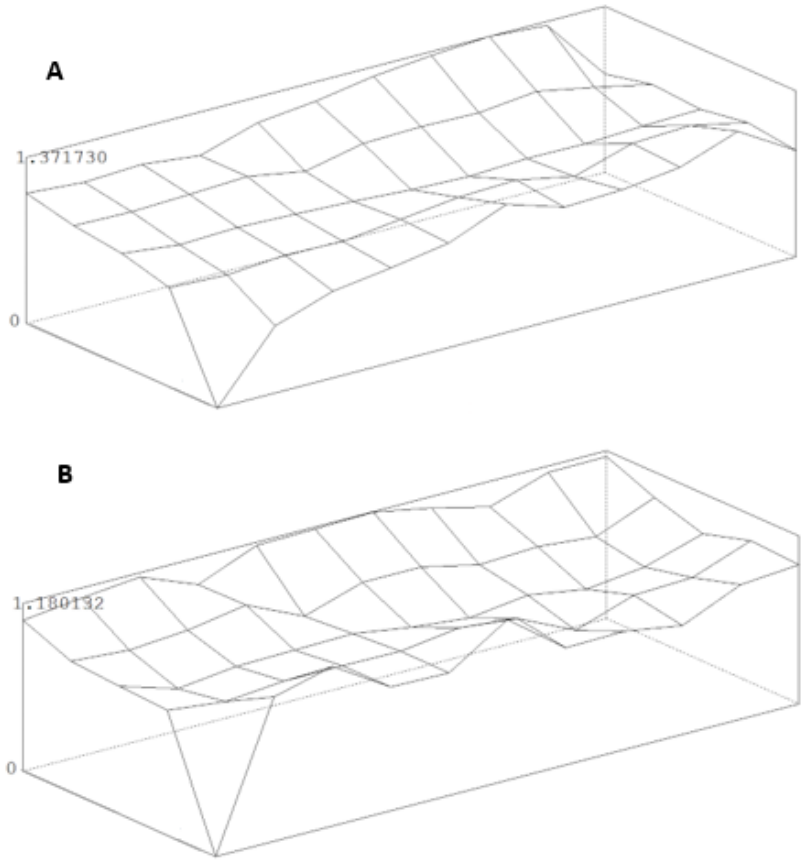

Abbildung 13: Variogramm für den Feuchtklebergehalt: **A** Gitteranlage; **B** Papadakis EW2

4.6 Proteingehalt

Nachdem der Feuchtklebergehalt durch den Proteingehalt bestimmt wird, sind sich Abb. 13 und Abb. 14 sehr ähnlich. Der Proteingehalt ist neben dem Kornertrag ein wichtiges ökonomisches Merkmal in Weizen-Feldversuchen.

Vollmann et al. (2000) zeigten eine hohe Korrelation zwischen den EW2 Residuen von Kornertrag und Proteingehalt in Sojabohne. Dies bedeutet, dass Feldbedingungen die den Kornertrag fördern auch den Proteingehalt positiv beeinflussen. Deshalb sollten auch bei Qualitätsmerkmalen wie dem Proteingehalt räumliche Analysen angewandt werden, wenn heterogene Feldbedingungen vorherrschen. Vollmann et al. (2000) erklärten die hohe Korrelation damit, dass die Stickstoffverfügbarkeit durch Mineralisation und die symbiotische Stickstofffixierung sowohl den Kornertrag als auch den Proteingehalt erhöhen können. Der Kornproteingehalt ist auch in der Weizenproduktion ein wichtiges Qualitätskriterium und dadurch auch in der Züchtung neuer Sorten ein wichtiges Selektionsmerkmal. Bei der Selektion

auf Proteingehalt muss somit die Genotypleistung an die Feldvariation angepasst werden, da es sonst zu einer Verzerrung der genetischen Bewertung kommen kann. Skerritt et al. (2002) zeigten einen klaren positiven Zusammenhang zwischen Proteingehalt und Bodennitratgehalt über ein Feld verteilt. Die Variation im Proteingehalt war allerdings geringer als jene für diverse Proteinqualitätsparameter wie z.B. SDS-Sedimentationswert oder Gehalt an hochmolekularen Gluteninen. Die räumlichen Trends waren zwar auf einigen Feldern ähnlich, auf anderen jedoch wieder nicht. Dies bestätigt, dass räumliche Trends von Qualitätsmerkmalen die miteinander zusammenhängen nicht immer zwangsläufig dem gleichen Muster folgen müssen.

In der praktischen Produktion spielt die Erfassung räumlicher Unterschiede in der Bodenfruchtbarkeit (N-Gehalt) eine wichtige Rolle hinsichtlich einer räumlich angepassten Düngung um eine wirtschaftlich möglichst effiziente Bewirtschaftung von Weizenfeldern bei denen die Erreichung eines gewissen Proteingehaltes wichtig ist, zu erreichen (Bongiovanni et al. 2007, Basso et al. 2011, Kindred et al. 2015).

Trotz ähnlicher Variogramme der Merkmale Feuchtklebergehalt und Proteingehalt fällt die Effizienz des räumlichen Modells im Vergleich zur Blockanlage beim Merkmal Proteingehalt mit 133,93% höher aus.

$$Effizienz\ (\%) = \frac{SED\ RCBD \times 100}{SED\ \mathrm{Row} + \mathrm{Col} + \mathrm{AR1} \times \mathrm{AR1}} = \frac{0{,}75\ \times 100}{0{,}56} = 133{,}93$$

Neuere Entwicklungen in der Sensortechnologie ermöglichen nun auch die Erfassung räumlicher Trends durch Drohnen- oder Satellitenaufnahmen. Basnet et al. (2003) zeigten für einen australischen Weizenversuch sehr hohe Korrelationen zwischen dem Proteingehalt und Nah-Infrarot-Spektren. Mittels im Mähdrescher eingebauter Sensoren und Waage können Proteingehalte und Kornerträge auch kontinuierlich während der Ernte gemessen werden und dadurch eine Feldkarte in *real time* erstellt werden. Dabei zeigte sich in Australien, dass die Variation im Kornertrag innerhalb eines Feldes deutlich höher ist als jene für den Proteingehalt. Die Korrelation zwischen Kornertrag und Proteingehalt, die ja allgemein bekannt negativ ist, kann innerhalb eines Feldes stark schwanken, von negativ bis auch positiv (Whelan et al. 2009).

Für die praktische Qualitätsweizenzüchtung bedeuten regelmäßig auftretende räumliche Variationen, dass diese durch das Versuchsdesign möglichst gut erfasst und korrigiert werden können um einen möglichst hohen Selektionserfolg über Standorte und Jahre zu erzielen.

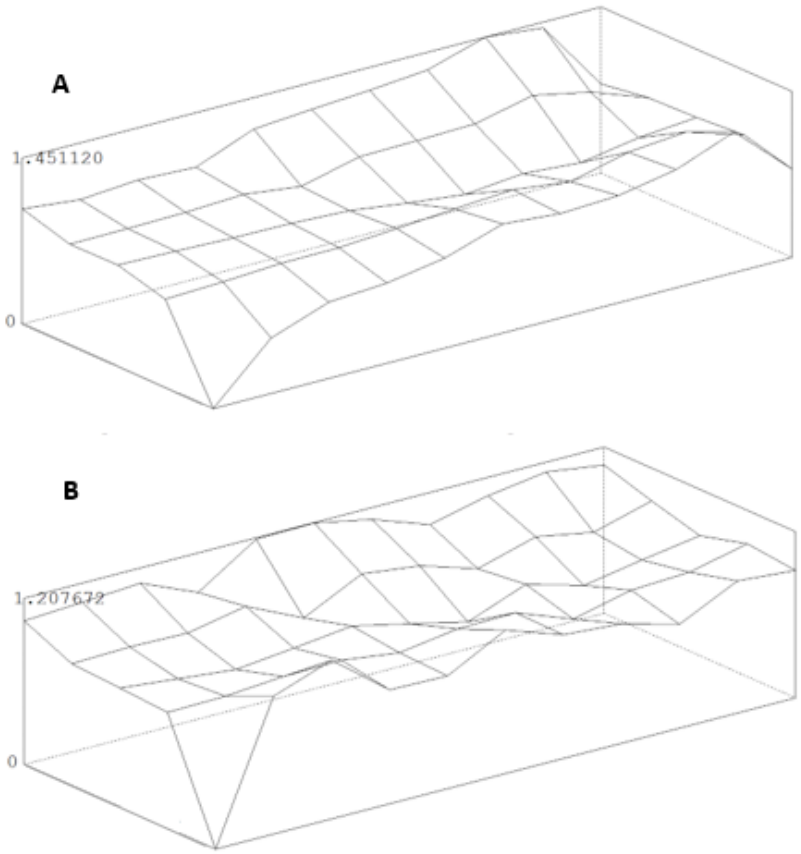

Abbildung 14: Variogramm für den Proteingehalt: **A** Row + Col + AR1×AR1; **B** Papadakis EW2

4.7 Schlussfolgerung und Ausblick

In den Ergebnissen kommt klar zum Vorschein, dass je nach Merkmal ein unterschiedliches statistisches Modell die höchste Güte aufweist. Deshalb kann man kein Alternativmodell als das geeignetste Modell bezeichnen und sollte bei jedem Untersuchungsmerkmal mehrere Modelle heranziehen. In der vorliegenden Arbeit war in jedem zu untersuchendem Merkmal bei den Nächste-Nachbarn Modellen das EW2 Modell das beste Modell. Dies kann aber mit der Anlage des Feldversuches zusammenhängen und kann nicht automatisch auf andere Feldversuche umgelegt werden. Auch muss festgehalten werden, dass neben dem Basismodell (Blockanlage) immer dieselben fünf Alternativmodelle getestet wurden. Ergebnisse von Gilmour et al. (1997), Burgueño et al. (2000), Smith et al. (2001) oder Stefanova et al. (2009) zeigten jedoch, dass manchmal auch deutlich komplexere Modelle

notwendig sind um die räumlichen Trends innerhalb eines Feldes erfassen und korrigieren zu können. Allerdings warnte Gilmour (2000) auch davor zu komplexe Modelle zu verwenden und damit räumliche Variation gänzlich zu beseitigen.

Um Zahlen sichtbarer zu machen, bieten sich Variogramme sehr gut für die grafische Darstellung der räumlichen Trends an. Dies erleichtert Auswertungen und Schlussfolgerungen enorm. Aus den oben dargestellten Ergebnissen geht deutlich hervor, dass gewisse Merkmale sehr eng korrelieren. Beim Feuchtklebergehalt und Proteingehalt zeigen sich die Variogramme trotz unterschiedlicher Verrechnungsmodelle sehr ähnlich. Auch bei den Merkmalen Tausenkorngewicht, Korngröße und Hektolitergewicht kann man eine hohe Ähnlichkeit der Variogramme erkennen. Bei den EW2 Modellen kommt es beim Merkmal Korngröße hingegen zu mehr Ausreißern, im Vergleich zum Hektolitergewicht.

Auch in Zukunft sollten bei Feldversuchen mehrere verschiedene Modelle verglichen werden, um Bodenunterschiede feststellen zu können. Nicht nur in der Pflanzenzüchtung, auch in Sortenversuchen oder Düngeversuchen sollte eine fortgeschrittene Statistik ein gängiges Tool zur Auswertung und Interpretation von Ergebnissen sein.

Bodenkarten mit feldbezogenen Daten werden in der modernen Landwirtschaft immer häufiger. Diese Kartierungen erlauben Einsparungen bei Betriebsmitteln wie Dünger, Pflanzenschutz und Saatgut. Angesichts steigender Rohstoffpreisen machen sich derartige Systeme in überschaubarer Zeit bezahlt. Um die Statistik auch in der Praxis leichter anwenden zu können, wäre ein benutzerfreundliches Programm gespeist mit Daten aus Bodenuntersuchungen, Daten von Stickstoffsensoren usw., ein großer Fortschritt.

4.8 Appendix

Tabelle 11*:* Adjustierte Sorten-Mittelwerte der Prüfmerkmale des jeweils besten Modells

Sorte	Kornertrag (g/m²)	TKG[1] (g)	Siebung >2,5 mm (%)	HLG (kg hL^{-1})	Feuchtkleber (%)	Proteingehalt (%)
Gaudio	476,14	37,29	85,57	77,18	31,78	14,17
BTX296	372,04	41,55	91,12	76,31	38,89	16,68
Amicus	497,20	36,77	83,75	77,50	33,22	14,74
Capo	433,48	38,59	85,90	79,18	36,47	15,81
Emilio	465,96	34,94	64,71	77,87	35,67	15,53
Laurenzio	466,92	40,81	92,73	78,15	36,38	15,95
Alessio	409,77	37,37	89,97	79,15	35,91	15,66
Edsion	420,82	37,17	94,11	75,69	34,82	15,31
Renan	380,28	40,89	91,25	74,18	36,36	16,03
Adesso	458,88	37,40	90,34	79,63	37,06	15,83
Energo	487,34	40,35	94,57	78,40	37,79	16,12
Austro-Bankut	374,79	40,85	96,85	78,98	39,83	17,03
Ehogold	477,19	39,55	87,72	80,10	37,26	16,25
Erla Kolben	409,84	35,21	83,78	78,03	38,69	16,49
Marienhofer Kolben	323,85	39,05	93,31	76,75	42,17	18,29
SED	20,19	0,56	1,36	0,24	0,5396	0,21
Modell	Gitteranlage	R+C+AR1×AR1	R+C+AR1×AR1	AR1×AR1	Gitteranlage	R+C+AR1×AR1

[1] TKG, Tausendkorngewicht; HLG, Hektolitergewicht; SED, *standard error of difference*; R, *random row effect*; C, *random column effect;* AR1×AR1, Autoregression entlang von *rows* und *columns*

5. REFERENZEN

AGES (2017) Österreichische Beschreibende Sortenliste 2017, Landwirtschaftliche Pflanzenarten. Schriftenreihe 21/2017. Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES), Wien.

AGES (2019a) Österreichische Beschreibende Sortenliste 2019, Landwirtschaftliche Pflanzenarten. Schriftenreihe 10/2019. Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES), Wien.

AGES (2019b) SLK-Seltene landwirtschaftliche Kulturpflanzen, Sortenbeschreibung. [http://slk.ages.at/slk-sortenliste-beschreibungen-saatgutbezug/; abgerufen am 26.03.2019]

Akaike H (1974) A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control 19, 716-723. https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705

AMA (2018) Getreideanbauflächen in Österreich 2018 (inkl. Bioflächen) Agrar Markt Austria, Wien. [https://www.ama.at/getattachment/48c60c2d-6563-4b5d-8ee8-dde6bb88a44b/Getreideanbauflaechen_in_Oesterreich_2018_inkl_Bioflaechen-3-Auswertung.pdf; abgerufen am 12.03.2019]

Arief VN, DeLacy IH, Crossa J, Payne T, Singh R, Braun HJ, Tian T, Basford KE, Dieters MJ (2014) Evaluating testing strategies for plant breeding field trials: Redesigning a CIMMYT International wheat nursery. Crop Science 55, 165-177. https://doi.org/10.2135/cropsci2014.06.0415

Austin RB, Bingham J, Blackwell AD, Evans LT (1980) Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. Journal of Agricultural Science 94, 675-689. https://doi.org/10.1017/S0021859600028665

Basnet BB, Apan AA, Kelly RM, Jensen TA, Strong WM, Butler DG (2003) Relating satellite imagery with grain protein content. In: 2003 Spatial Sciences Institute Biennial Conference, Spatial knowledge without boundaries (SSC2003), 22-27 Sep, Canberra, pp 1-11. Australasian Urban & Regional Information Systems Association, Canberra.

Basso B, Cammarano D, Chen D, Cafiero G, Amato M, Bitella G, Rossi R, Basso F (2009) Landscape position and pecipitation effects on spatial variability of wheat yield and grain

potein in southern Italy. Journal of Agronomy and Crop Science 195, 301-312. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00351.x

Basso B, Ritchie JT, Cammarano D, Sartori L (2011) A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field. European Journal of Agronomy 35, 215-222. https://doi.org/doi:10.1016/j.eja.2011.06.004

Becker H (2011) Pflanzenzüchtung, 2. Aufl. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.

Belitz H-D, Grosch W, Schieberle P (2008) Getreide und Getreideprodukte. In: Lehrbuch der Lebensmittelchemie, 6. Aufl., pp 691-768. Springer Verlag, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73202-0_16

Beral A, Rincent R, Le Gouis J, Girousse C, Allard V (2020) Wheat individual grain-size variance originates from crop development and from specific genetic determinism. PLoS One 15, e0230689. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230689

Berndtsson R, Bahri A (1995) Field variability of element concentrations in wheat and soil. Soil Science 159, 311–320.

Bernhardt N (2015) Taxonomic treatments of Triticeae and the wheat genus *Triticum*. In: Molnár-Láng M, Ceoloni C, Doležel J (eds.), Alien introgression in wheat, pp 1-19, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23494-6_1

BFW (2019) eBod - digitale Bodenkarte von Österreich. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien. [https://bodenkarte.at/#/center/16.5948,48.2323/zoom/16; abgerufen am 11.04.2019]

Bjørnstad Å (2016) The social and cultural heritage of wheat. In: Bonjean A, Angus B, van Ginkel M (eds.), The world wheat book, vol. 3, pp 1367-1396. Lavoisier, Paris.

Boguslawski EV (1979) Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung - Problematik, Ergebnisse, Aufgaben. European Journal of Lipid Science and Technology 81, 1-11. https://doi.org/10.1002/lipi.19790810101

Bongiovanni RG, Robledo CW, Lambert DM (2007) Economics of site-specific nitrogen management for protein content in wheat. Computers and Electronics in Agriculture 58, 13-24. https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.01.018

Borges A, González-Reymundez A, Ernst O, Cadenazzi M, Terra J, Gutiérrez L (2019) Can spatial modeling substitute for experimental design in agricultural experiments? Crop Science 59, 44-53. https://doi.org/ 10.2135/cropsci2018.03.0177

Borojevic KA, Borojevic K (2005) The transfer and history of "reduced height genes" (*Rht*) in wheat from Japan to Europe. Journal of Heredity 96, 455-459. https://doi.org/10.1093/jhered/esi060

Brisson N, Gate P, Gouache D, Charmet G, Oury FX, Huard F (2010) Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. Field Crops Research 119, 201-212. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.012

Burgueño J, Cadena A, Crossa J, Bänziger M, Gilmour AR, Cullis BR (2000) User‘s guide for spatial analysis of field variety trials using ASREML. CIMMYT, Mexico, D.F.

Bushuk W (1980) The baking potential of Glenlea wheat. Canadian Journal of Plant Science 60, 737-739. https://doi.org/10.4141/cjps80-104

Campbell BT, Bauer PJ (2007) Improving the precision of cotton performance trials conducted on highly variable soils of the southeastern USA coastal plain. Plant Breeding 126, 622-627. https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2007.01397.x

Cane K, Spackman M, Eagles HA (2004) Puroindoline genes and their effects on grain quality traits in southern Australian wheat cultivars. Australian Journal of Agricultural Research 55, 89-95. https://doi.org/10.1071/AR03108

Chen J, Ren X, Zhang Q, Diao X, Shen Q (2013) Determination of protein, total carbohydrates and crude fat contents of foxtail millet using effective wavelengths in NIR spectroscopy. Journal of Cereal Science 58, 241-247. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.07.002

Cooper M, Woodruff DR, Phillips IG, Basford KE, Gilmour AR (2001) Genotype-by-management interactions for grain yield and grain protein concentration of wheat. Field Crops Research 69, 47-67. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00131-3

Diacono M, Castrignanò A, Troccoli A, De Benedetto D, Basso B, Rubino P (2012) Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in a Mediterranean environment: A multivariate geostatistical approach. Field Crops Research 131, 49-62. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.004

Diepenbrock W, Ellmer F, Léon J (2005) Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, 3. Aufl., Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.

Dorofeev VF, Filatenko AA, Migushova EF, Udaczin RA, Jakubziner MM (1979) Wheat. In: Dorofeev VF, Korovina ON (eds.), Flora of cultivated plants, vol. 1. Kolos, Leningrad.

Edwards MA, Osborne BG, Henry RJ (2008) Effect of endosperm starch granule size distribution on milling yield in hard wheat. Journal of Cereal Science 48, 180-192. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.09.001

Evans LE, Shebeski RC, McGinnis K, Briggs KG, Zuzens D (1972) Glenlea red spring wheat. Canadian Journal of Plant Science 52, 1081-1082. https://doi.org/10.4141/cjps72-184

FAO (2019) FAOSTAT, Crop statistics. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. [http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC; abgerufen am 11.03.2019]

Faris J (2014) Wheat domestication: key to agricultural revolutions past and future. In: Tuberosa R, Graner A, Frison E (eds.), Genomics of plant genetic resources, pp 439-464. Springer Science+Business Media, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7572-5_18

Flisch R, Herter U, Kessler W, Menzi H, Walther U, Jeangros B, Pellet D, Ryser J-P, Vullioud PA, Frick R, Berner A (2001) Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau 2001. Agrarforschung 8, 1-41.

Flückiger S, Rieder P (1997) Klimaänderung und Landwirtschaft - Ökonomische Inplikationen innerhalb der Landwirtschaft und ihres Umfeldes aus globaler, nationaler und regionaler Sicht. vdf Hochschulverlag, Zürich.

Frede W (2010) Handbuch für Lebensmittelchemiker. Springer Verlag, Berlin.

Freund W, Kim MY (2006) Determining the baking quality of wheat and rye flour In: Popper L, Schäfer W, Freund W (eds.), Future of flour - A compendium of flour improvement, pp 101-116. AgriMedia Verlag, Clenze.

Gaines CS, Finney PL, Andrews LC (1997) Influence of kernel size and shriveling on soft wheat milling and baking quality. Cereal Chemistry 74, 700-704. https://doi.org/10.1094/CCHEM.1997.74.6.700

Geißlitz S, Scherf KA, Köhler P (2019) Proteine im Getreide und die Backeigenschaften. Nachrichten aus der Chemie 67, 38-40. https://doi.org/10.1002/nadc.20194082916

Gill B, Li W, Sood S, Kuraparthy V, Friebe BR, Simons KJ, Zhang Z, Faris JD (2007) Genetics and genomics of wheat domestication - driven evolution. Israel Journal of Plant Sciences 55, 223-229. https://doi.org/10.1560/IJPS.55.3-4.223

Gilmour AR (2000) Post blocking gone too far! Recovery of information and spatial analysis in field experiments. Biometrics 56, 944-945. https://doi.org/10.1111/j.0006-341X.2000.944_1.x

Gilmour AR, Cullis BR, Verbyla A (1997) Accounting for natural and extraneous variation in the analysis of field experiments. Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics 2, 269-293. https://doi.org/10.2307/1400446

Godwin RJ, Wood GA, Taylor JC, Knight SM, Welsh JP (2003) Precision farming of cereal crops: a review of a six year experiment to develop management guidelines. Biosystems Engineering 84, 375-391. https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00031-X

Goncharov NP (2011) Genus *Triticum* L. taxonomy: the present of the future. Plant Systematics and Evolution 295, 1-11. https://doi.org/10.1007/s00606-011-0480-9

Goncharov NP, Golovnina KA, Kondratenko EY (2009) Taxonomy and molecular phylogeny of natural and artificial wheat species. Breeding Science 59, 492-498. https://doi.org/10.1270/jsbbs.59.492

Golovnina KA, Glushkov SA, Blinov AG, Mayorov VI, Adkison LR, Goncharov NP (2007) Molecular phylogeny of the genus *Triticum* L.. Plant Systematics and Evolution 264, 195-216. https://doi.org/10.1007/s00606-006-0478-x

Grausgruber H, Oberforster M, Werteker M, Ruckenbauer P, Vollmann J (2000) Stability of quality traits in Austrian-grown winter wheats. Field Crops Research 66, 257-267. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00079-4

Guddat C, Degner J, Marschall K, Zorn W, Götz R, (2015) Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Winterweizen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena. [https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00024459; abgerufen am 30.11.2021]

Hanzalova A, Dumalasova V, Sumikova T, Bartos P (2007) Rust resistance of the French wheat cultivar Renan. Czech Journal of Genetics and Plant Breeding 43, 53-60. https://doi.org/10.17221/1912-CJGPB

Hedden P (2003) The genes of the Green Revolution. Trends in Genetics 19, 5-9. https://doi.org/10.1016/S0168-9525(02)00009-4

Herzog E, Schöne F, Guddat C (2017) Backqualität von Getreide. Neue Parameter zur Charakterisierung der Backqualität von Weizen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena. [http://www.tll.de/www/daten/untersuchungswesen/futtermittel_agrarproduktpruefung/pdf/baqua_2017.pdf ; abgerufen am 18.03.2019]

Hogg AC, Sripo T, Beecher B, Martin JM, Giroux MJ (2004) Wheat puroindolines interact to form friabilin and control wheat grain hardness. Theoretical and Applied Genetics 108, 1089-1097. https://doi.org/10.1007/s00122-003-1518-3

Hook SCW (1984) Specific weight and wheat quality. Journal of the Science of Food and Agriculture 35, 1136-1141. https://doi.org/10.1002/jsfa.2740351013

Huss H, Bürstmayr H (2011) Bei Zwergsteinbrandrisiko auf die richtigen Sorten setzen! In: LFI (Hrsg.), Bioherbstanbau 2011 - Informationen zu Sorten, Saatgut, Krankheiten und Kulturführung, pp 28-30. Ländliches Fortbildungsinstitut Österreich (LFI), Wien.

Kempe K, Gils M (2011) Pollination control technologies for hybrid breeding. Molecular Breeding 27, 417-437. https://doi.org/10.1007/s11032-011-9555-0

Kindred DR, Milne AE, Webster R, Marchant BP, Sylvester-Bradley R (2015) Exploring the spatial variation in the fertilizer-nitrogen requirement of wheat within fields. Journal of Agricultural Science 153, 25-41. https://doi.org/10.1017/S0021859613000919

Knörzer H, Müller BU, Graeff-Hönninger S, Piepho HP, Wang P, Claupein W (2010) Extension and evaluation of intercropping field trials using spatial models. Agronomy Journal 102, 1023-1031. https://doi.org/10.2134/agronj2009.0404

Kuhlmann B (2014) Ertragsbildung in landwirtschaftlichen Kulturbeständen. In: Der Beitrag der Reichsbodenschätzung zur Erklärung von räumlichen Ertragsunterschieden als Grundlage für eine teilflächenspezifische Landbewirtschaftung, pp 5-15. Cuvillier Verlag, Göttingen.

Lado B, Matus I, Rodríguez A, Inostroza L, Poland J, Belzile F, del Pozo A, Quincke M, Castro M, von Zitzewitz J (2013) Increased genomic prediction accuracy in wheat breeding through spatial adjustment of field trial data. G3 Genes Genomes Genetics 3, 2105-2114. https://doi.org/10.1534/g3.113.007807

Lev-Yadun S, Gopher A, Abbo S (2000) The cradle of agriculture. Science 288, 1602-1603. https://doi.org/10.1126/science.288.5471.1602

Li A, Liu D, Yang W, Kishii M, Mao L (2018) Synthetic hexaploid wheat: yesterday, today, and tomorrow. Engineering 4, 552-558. https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.001

Li J, Han C, Zhen S, Li X, Yan Y (2014) Characterization of HMW glutenin subunit $Bx7^{OE}$ and its distribution in common wheat and related species. Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization 12, 191-198. https://doi.org/10.1017/S1479262113000476

MacKey J (1966) Species relationship in *Triticum*. Hereditas, Suppl 2, 237–276.

Manderscheid R, Dier M, Erbs M, Sickora J, Weigl HJ (2018) Nitrogen supply – A determinant in water use efficiency of winter wheat grown under free air CO_2 enrichment. Agricultural Water Management 210, 70-77. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.034

Marshall DR, Ellison FW, Mares DJ (1984) Effects of grain shape and size on milling yields in wheat. I. Theoretical analysis based on simple geometric models. Australian Journal of Agricultural Research 35, 619-630. https://doi.org/10.1071/AR9840619

Marshall DR, Mares DJ, Moss HJ, Ellison FW (1986) Effects of grain shape and size on milling yields in wheat. II. Experimental studies. Australian Journal of Agricultural Research 37, 331-342. https://doi.org/10.1071/AR9860331

Martin JM, Frohberg RC, Morris CF, Talbert LE, Giroux MJ (2001) Milling and bread baking traits associated with puroindoline sequence type in hard red spring wheat. Crop Science 41, 228-234. https://doi.org/10.2135/cropsci2001.411228x

Mette MF, Gils M, Longin CFH, Reif CH (2015) Hybrid breeding in wheat. In: Ogihara Y, Takumi S, Handa H (eds.), Advances in wheat genetics: from genome to field. Proceedings of the 12th International Wheat Genetics Symposium, pp 225-233. Springer, Tokyo. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55675-6_24

Mezlik T (2018) List of field crop varieties registered in the Czech Republic in 2017. Czech Journal of Genetics and Plant Breeding 54, 39-40. https://doi.org/10.17221/17/2018-CJGPB

Miedaner T (2014) Kulturpflanzen. Botanik-Geschichte-Perspektiven. Springer Verlag, Berlin.

Miedaner T (2018) Pflanzenzüchtung - leicht verständlich. DLG-Verlag GmbH, Frankfurt am Main.

Mulla DJ, Bhatti AU, Hammond MW, Benson JA (1992) A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. Agriculture, Ecosystems & Environment 38, 301–311. https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90152-2

Müller BU, Kleinknecht K, Möhring J, Piepho HP (2010) Comparison of spatial models for sugar beet and barley trials. Crop Science 50, 794-802. https://doi.org/10.2135/cropsci2009.03.0153

Natsarishvili K, Sikharulidze Z, Chkhutiashvili G, Sikharulidze K (2016) Assessment of resistance of local and introduced varieties and breeding lines to Georgian population of wheat stripe rust. Biological Forum – An International Journal 8, 60-64.

Oberforster M, Schmidt L, Wertecker M (1994) Bewertungsschema ‘94 der technologischen Qualität von Weizensorten (Weichweizen). In: Jahrbuch 1993 der Bundesanstalt für Pflanzenbau, pp 257-280. Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Wien.

Oberforster M, Werteker M (2009) Relative Vorzüglichkeit verschiedener Weizensorten in Abhängigkeit von Ertrag, Qualität und Erzeugerpreisen. In: Mayer J, Alföldi T, Leiber F, Dubois D, Fried P, Heckendorn F, Hillmann E, Klocke P, Lüscher A, Riedel S, Stolze M, Strasser F, van der Heijden M, Willer H (Hrsg.), Werte - Wege - Wirkungen: Biolandbau im Spannungsfeld zwischen Ernährungssicherung, Markt und Klimawandel, Beiträge zur 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, 11.-13. Februar, Zürich, pp 302-305. Verlag Dr. Köster, Berlin.

Ozturk A, Aydin F (2004) Effect of water stress at various growth stages on some quality characteristics of winter wheat. Journal of Agronomy and Crop Science 190, 93-99. https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2003.00080.x

Pammer G, Ranninger R (1928) Der rationelle Getreidebau mit besonderer Berücksichtigung der Sortenwahl in Oesterreich. Verlag von Julius Springer, Wien.

Parker GD, Chalmers KJ, Rathjen AJ, Langridge P (1999) Mapping loci associated with milling yield in wheat (*Triticum aestivum* L.). Molecular Breeding 5, 561-568. https://doi.org/10.1023/A:1009678023431

Papadakis JS (1937) Méthode statistique pour des expériences sur champ. Bulletins Scientifiques de l‘Institut d‘Améliorations des Plants a Salonique 23.

Richner W, Flisch R, Sinaj S, Charles R (2010) Ableitung der Stickstoffdüngungsnormen von Ackerkulturen. Agrarforschung Schweiz 1, 410-415.

Roberts MC (1987) Remote-sensing and geographic information system techniques to map spatial variation of wheat grain yield. M.Sc. thesis, Department of Crop Sciences, Oregon State University, Corvallis.

Rodríguez-Álvarez MX, Boer MP, van Eeuwijk FA, Eilers PHC (2018) Correcting for spatial heterogeneity in plant breeding experiments with P-splines. Spatial Statistics 23, 52-71. https://doi.org/10.1016/j.spasta.2017.10.003

Rosielle A (1980) Comparison of lattice designs, check plots and moving means in wheat breeding trials. Euphytica 29, 129-133. https://doi.org/10.1007/BF00037258

Salvi S, Porfiri O, Ceccarelli S (2012) Nazareno Strampelli, the ‘Prophet’ of the Green Revolution. Journal of Agricultural Science 151, 1-5.

https://doi.org/10.1017/S0021859612000214

Schachschneider R (2018) 30 years of hybrid wheat breeding in Europe: recent developments and future prospects. In: 68. Jahrestagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2017, 20-22 November, Raumberg-Gumpenstein, pp 19-26.

Seibel W (2005) Warenkunde Getreide. Inhaltstoffe, Analytik, Reinigung, Trocknung, Lagerung, Vermarktung, Verarbeitung. Agrimedia GmbH, Bergen/Dumme.

Skerritt JH, Adams ML, Cook SE, Naglis G (2002) Within-field variation in wheat quality: implications for precision agricultural management. Australian Journal of Agricultural Research 53, 1229-1242. https://doi.org/10.1071/AR01204

Smith KF, Casler MD (2004) Spatial analysis of forage grass trials across locations, years, and harvests. Crop Science 44, 56-62. https://doi.org/10.2135/cropsci2004.5600

Smith A, Cullis B, Thompson R (2001) Analyzing variety by environment data using multiplicative mixed models and adjustments for spatial field trend. Biometrics 57, 1138-1147. https://doi.org/10.1111/j.0006-341X.2001.01138.x

Stafford JV (1999) An investigation into the within-field spatial variability of grain quality. In: Stafford JV (ed.), Precision '99, Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture, vol. 1, pp 353-361. Sheffield Academic Press, UK.

Stefanova KT, Smith AB, Cullis BR (2009) Enhanced diagnostics for the spatial analysis of field trials. Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics 14, 392-410. https://doi.org/10.1198/jabes.2009.07098

Tilling A, O'Leary GJ, Ferwerda JG, Jones SD, Fitzgerald GJ, Rodriguez D, Belford R (2007) Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. Field Crops Research 104, 77-85. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.03.023

Tömösközi S, Békés F, Haraszi R, Gras PW, Varga J, Salgó A (2003) Application of micro Z-arm mixer in wheat research – Effects of protein addition on mixing properties of wheat dough. Periodica Polytechnica Chemical Engineering 46, 31-38.

Ujmajuridze L, Samadashvili T, Chkhutiashvili G, Fischer K (2018) Grain yield of Austrian wheat varieties and the prospect of their distribution in Georgia. In: 68. Jahrestagung der

Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2017, 20-22 November, Raumberg-Gumpenstein, pp 75-78.

Valluru R, Reynolds MP, Lafarge T (2015) Food security through translational biology between wheat and rice. Food and Energy Security 4, 203-218. https://doi.org/10.1002/fes3.71

Van Slageren M (1994) Wild wheats: a monograph of *Aegilops* L. and *Amblyopyrum* (Jaub. & Spach) Eig (Poaceae). Wageningen Agricultural University Papers 94 (7), 1-512.

Varga B, Svečnjak Z, Jurković Z, Kovačević J, Jukić Ž (2003) Wheat grain and flour quality as affected by cropping intensity. Food Technology and Biotechnology 41, 321-329.

Vollmann J, Winkler J, Fritz CN, Grausgruber H, Ruckenbauer P (2000) Spatial field variations in soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) performance trials affect agronomic characters and seed composition. European Journal of Agronomy 12, 13-22. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(99)00042-8

Voss-Fels K, Frisch M, Qian L, Kontowski S, Fried W, Gottwald S, Snowdon RJ (2015) Subgenomic diversity patterns caused by directional selection in bread wheat gene pools. Plant Genome 8. https://doi.org/10.3835/plantgenome2015.03.0013

Whelan BM, Taylor JA, Hassall JA (2009) Site-specific variation in wheat grain protein concentration and wheat grain yield measured on an Australian farm using harvester-mounted on-the-go sensors. Crop & Pasture Science 60, 808-817. https://doi.org/10.1071/CP08343

Wrigley C (2016) Wheat: An overview of the grain that provides „our daily bread“. In: Wrigley C, Croke H, Seetharaman K, Faubion J (eds.), Encyclopedia of food grains – The world of food grains, vol. 1, 2nd ed., pp 105-116. Elsevier, Oxford.

Würschum T, Langer S, Longin C, Tucker M, Leiser W (2017) A modern Green Revolution gene for reduced height in wheat. Plant Journal 92, 892-903. https://doi: 10.1111/tpj.13726

Zeddies J (2010) Die Welternährung vor dem Hintergrund hoher Agrarpreise. In: Hanisch M. (Hrsg.), Brennpunkt Agrarpreise - Ursachen, Trends und Risikomanagement für die Praxis, pp. 87-109. Institut für Genossenschaftswesen an der Humboldt-Universität zu Berlin und Europäischer Hochschulverlag. Berlin und Bremen.

6. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Weltweite Weizenproduktion und Weizenerträge (Quelle: Wrigley 2016) 2
Tabelle 2: Klassifizierung von Weizenmehltypen (Quelle: AGES 2019a)..... 13
Tabelle 3: Beurteilung des Feuchtklebergehaltes bei Weizenmehl der Type 550 (Quelle: Seibel 2005)..... 18
Tabelle 4: Beurteilung der Fallzahl bei Weizenmehl der Type 550 (Quelle: Seibel 2005). ... 20
Tabelle 5: Richtwerte eines Extensogramms für Mehl der Type 550 (Quelle: Seibel 2005).. 22
Tabelle 6: Ausgesuchte Qualitätsmerkmale im Überblick (Quelle: modifiziert nach AGES 2017)..... 23
Tabelle 7: Einfluss der Düngung auf Planzen- und Qualitätsmerkmale (Quelle: Seibel 2005). 26
Tabelle 8: Ökonomisches Optimum der N-Düngung (Quelle: Richner et al. 2010)..... 26
Tabelle 9: Beschreibung der verwendeten Weizensorten 33
Tabelle 10: Werte wichtiger Merkmale und Modelle 38
Tabelle 11: Adjustierte Sorten-Mittelwerte der Prüfmerkmale des jeweils besten Modells ... 49

7. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Phylogenie von *Triticum aestivum* (modifiziert nach Gill et al. 2007). 3
Abbildung 2: Diverse Teigkennzahlen aus dem Farinogramm: Teigentwicklungszeit, Teigstabilität, Teigerweichung 12 Minuten nach Maximum (Quelle: AGES 2019a). 21
Abbildung 3: Extensogramm mit den Parametern Dehnbarkeit (extensibility), Dehnwiderstand bei 5 cm Dehnung (resistance) und bei Maximum (maximum), Verhältniszahl (ratio number) und Teigenergie (energy) (Quelle: Brabender, Duisburg). 22
Abbildung 4: Orthofoto der Versuchsfläche in Raasdorf 29
Abbildung 5: Row-Column Feldplan (6×25) mit genotypischer Randomisation..... 30
Abbildung 6: Pfeuffer Sortimat mit den Sieben 2,8 mm, 2,5 mm und 2,2 mm..... 34
Abbildung 7: Nirflex N-500 Solids Analysegerät mit Direktausgabe der Messdaten am Computer (Saatzucht Donau, Probstdorf). 34
Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Row-Column Feldplan mit EW2- und NS2-Residuen-Werten vom Merkmal Kornertrag pro m² 36
Abbildung 9: Variogramm für den Kornertrag: **A** Gitteranlage; **B** Papadakis EW2..... 40
Abbildung 10: Variogramm für das TKG: **A** Row + Col + AR1×AR1; **B** Papadakis EW2 .. 41
Abbildung 11: Variogramm für die Korngröße: **A** Row + Col + AR1×AR1; **B** Papadakis EW2..... 43
Abbildung 12: Variogramm des HLG: **A** AR1×AR1; **B** Papadakis EW2..... 44
Abbildung 13: Variogramm für den Feuchtklebergehalt: **A** Gitteranlage; **B** Papadakis EW2..... 45
Abbildung 14: Variogramm für den Proteingehalt: **A** Row + Col + AR1×AR1; **B** Papadakis EW2..... 47