

Bernd Kuhlmann

**Der Beitrag der Reichsbodenschätzung
zur Erklärung von räumlichen Ertrags-
unterschieden als Grundlage für eine
teilflächenspezifische Landwirtschaft**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Der Beitrag der Reichsbodenschätzung zur Erklärung von
räumlichen Ertragsunterschieden als Grundlage
für eine teilflächenspezifische Landwirtschaft





Institut für Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft
der Justus-Liebig-Universität Gießen

**Der Beitrag der Reichsbodenschätzung zur Erklärung
von räumlichen Ertragsunterschieden als Grundlage für
eine teilflächenspezifische Landwirtschaft**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. agr.)
am Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotropologie und
Umweltmanagement
der Justus-Liebig-Universität Gießen

eingereicht von
Dipl.-Ing. agr. Bernd Kuhlmann
geb. in Groß-Gerau

Gießen, 2013



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2014

Zugl.: Gießen, Univ., Diss., 2013

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und Umweltmanagement der Justus-Liebig-Universität Gießen unter dem Titel „Der Beitrag der Reichsbodenschätzung zur Erklärung von räumlichen Ertragsunterschieden als Grundlage für eine teilflächenspezifische Landwirtschaft“ als Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. agr.) angenommen.

Dekan: Prof. Dr. Dr. -Ing. P. Kämpfer

Mitglieder der Prüfungskommission:

Vorsitzender:	Herr Prof. Dr. E. A. Nuppenau
1. Gutachter:	Herr Prof. Dr. Dr. h. c. F. Kuhlmann
2. Gutachter:	Herr Prof. Dr. H.-G. Frede
Prüfer:	Herr Prof. Dr. H. Seufert
Prüfer:	Herr Prof. Dr. G. Leithold

Tag der Disputation: 6. Dezember 2013

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2014

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2014

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-95404-872-4

eISBN 978-3-7369-4872-3



Inhaltsverzeichnis

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	<i>I</i>
<i>Abbildungsverzeichnis</i>	<i>V</i>
<i>Tabellenverzeichnis</i>	<i>VIII</i>
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	2
1.2 Vorgehensweise	3
2 Ertragsbildung in landwirtschaftlichen Kulturbeständen	5
2.1 Bestandteil Pflanze	5
2.1.1 Biochemische Grundlagen	6
2.1.2 Chronologischer Ablauf der Ertragsbildung	7
2.1.3 Ertragsstruktur	12
2.2 Bestandteil Boden	15
2.2.1 Boden als Pflanzenstandort	16
2.2.2 Boden als Wasserlieferant	23
2.2.3 Boden als Nährstofflieferant	33
2.3 Bestandteil Klima	40
2.3.1 Strahlung	41
2.3.2 Licht	44
2.3.3 Temperatur	45
2.3.4 Wasser	50
2.4 Identifizierung der ertragsbeeinflussenden Wachstumsparameter mit dem größten Einfluss auf den Ertrag	65
2.4.1 Nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes (nFKdB)	66
2.4.2 Evapotranspiration (ETP)	68
2.4.3 Klimatische Wasserbilanz (KWB)	72
3 Kleinräumige Wachstumsfaktoren	75
3.1 Der Begriff Heterogenität	75
3.1.1 Ursachen und Formen der Heterogenität	75
3.1.2 Maße zur Heterogenitätsberechnung	77
3.1.3 Heterogenitäten ausgewählter Boden- und Bodennährstoffparameter	80
3.2 Räumliche Variabilität der Wachstumsfaktoren	84
3.2.1 Flächenhomogene Wachstumsfaktoren	86
3.2.1.1 Klima	86
3.2.1.1.1 Niederschlag	86
3.2.1.1.2 Strahlung	87
3.2.1.1.3 Temperatur	87
3.2.1.1.4 Verdunstung	87
3.2.1.2 Applizierte Düngung	88
3.2.1.3 Saatgut	88
3.2.1.4 Pflanzengenetik	89
3.2.2 Flächenheterogene Wachstumsfaktoren	89
3.2.2.1 Flächenheterogene Wachstumsfaktoren mit mengenmäßiger Stabilität	89
3.2.2.1.1 Geologie	89
3.2.2.1.2 Bodenarten	90
3.2.2.1.3 Nutzbare Feldkapazität	92
3.2.2.1.4 Relief	92



3.2.2.2	Flächenheterogene Wachstumsfaktoren mit mengenmäßiger Variabilität.....	93
3.2.2.2.1	Bodenwasser	93
3.2.2.2.2	Stickstoffverfügbarkeit.....	94
3.2.2.2.3	Grundnährstoffverfügbarkeit.....	95
3.3	Möglichkeiten der Erfassung der kleinräumigen Wachstumsfaktoren....	95
3.3.1	Übersicht über die Erfassungsmethoden.....	95
3.3.2	Bodenkarten.....	99
3.3.3	Reichsbodenschätzung.....	99
3.3.4	Digitale Hof-Bodenkarten.....	100
3.3.5	Digitale Geländemodelle	101
3.3.6	Leitfähigkeitsmessung	102
3.3.7	Messung des Durchdringungswiderstandes	104
3.3.8	Georadar	105
3.3.9	Grundnährstoffkartierung	105
3.3.10	N _{min} -Messung.....	106
3.3.11	Fernerkundung.....	106
3.3.12	YARA-N-Sensor.....	109
3.3.13	Pendelsensor (CROP-Meter)	111
3.3.14	Ertragskartierung	112
3.3.15	Erfahrungswissen des Landwirts	114
3.3.16	Vergleich einiger Erfassungsmethoden	114
3.4	Herleitung der geeigneten Wachstumsparameter und Erfassungsmethoden für die Fragestellung dieser Arbeit.....	115
4	<i>Inhaltliche, technologische und ökonomische Rahmenbedingungen des Precision Farmings.....</i>	118
4.1	Idee des Precision Farmings und historische Entwicklung	118
4.1.1	Inhalt und Aufbau des Precision Farmings	118
4.1.2	Historische Entwicklung des Precision Farmings.....	120
4.1.3	Precision Farming aus systemtheoretischer Sichtweise	122
4.2	Technische Komponenten des Precision Farmings	123
4.2.1	Satellitennavigation	124
4.2.1.1	Aufbau und Bestandteile eines GNSS	124
4.2.1.2	Funktionsweise eines Satellitennavigationssystems	125
4.2.1.3	Global Positioning System (GPS).....	126
4.2.1.4	GPS-Korrekturdienste.....	127
4.2.1.5	Galileo.....	129
4.2.2	Ertragskartierung	129
4.2.3	Geographische Informationssysteme (GIS)	132
4.2.4	LBS / ISOBUS.....	132
4.3	Precision Farming-Anwendungen.....	134
4.3.1	PF-Bodenbearbeitung	134
4.3.2	PF-Aussaat.....	135
4.3.3	PF-Grunddüngung	137
4.3.4	PF-Stickstoffdüngung	138
4.3.5	PF-Pflanzenschutz	142
4.3.6	PF-Wachstumsreglerapplikation.....	145
4.3.7	PF-Beregnung	146
4.4	Ökonomie des Precision Farmings.....	147
4.4.1	Grundlagen der Ökonomie des Precision Farmings.....	148
4.4.2	Methoden der Precision Farming-Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	149
4.4.3	Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von Precision Farming	151
4.4.4	Break-Even-Analyse für Precision Farming-Technologie	152
4.4.5	Rentabilität einzelner Precision Farming-Verfahren.....	162
4.4.6	Fazit zur Ökonomie des Precision Farmings	166
4.5	Ökologie des Precision Farmings	168



4.6	Precision Farming in der landwirtschaftlichen Praxis.....	170
4.6.1	Einstiegsmuster und Hemmnisse bei der Praxiseinführung von Precision Farming	170
4.6.2	Verbreitung einzelner Precision Farming-Verfahren.....	172
4.6.3	Globale und regionale Verbreitung der Precision Farming-Technologie	174
4.6.4	Precision Farming-Forschungsprojekte in Deutschland	176
5	<i>Geographisches Informationssystem (GIS)</i>	177
5.1	Historie und verschiedene Formen des GIS.....	177
5.2	Aufbau und Aufgaben eines GIS.....	177
5.3	GIS in der Landwirtschaft.....	179
5.4	Das Geographische Informationssystem ArcGIS	180
6	<i>Datenerhebung auf dem Lehr- und Versuchsbetrieb Marienborn- Heldenbergen der Justus-Liebig-Universität Gießen</i>	181
6.1	Betriebsvorstellung.....	181
6.2	Übersicht über durchgeführte Datenerhebungen.....	183
7	<i>Bodenschätzung</i>	188
7.1	Geschichte der Bodenschätzung in Deutschland	188
7.2	Inhalt und Aufbau der Reichsbodenschätzung.....	188
7.3	Praktische Durchführung einer Bodenschätzung.....	192
7.4	Bodenschätzung auf dem Lehr- und Versuchsbetrieb Marienborn- Heldenbergen	193
7.4.1	Praktische Durchführung	193
7.4.2	Allgemeine Beschreibung der Bodenschätzungsergebnisse	196
7.4.3	Die Ergebnisse der Bodenschätzung der drei Versuchsschläge	199
8	<i>Ertragskartierung in Marienborn</i>	201
8.1	Theorie der Ertragskartierung.....	201
8.2	Ertragsdatenerhebung in Marienborn	202
8.2.1	Technische Ausstattung	202
8.2.2	Praktische Durchführung der Ertragsdatenerhebung	203
8.2.3	Umfang der Ertragsdatenerhebung	205
8.3	Bearbeitung der Ertragsdaten und Ergebnisse	206
9	<i>Analyse des Zusammenhangs der Ertragsergebnisse mit den Nachschätzungsdaten der Reichsbodenschätzung</i>	214
9.1	Auswahl der Versuchsschläge	214
9.2	Aufbereitung der Ertragsdaten nach der 10-er Methode	215
9.3	Ausgewählte Bodenkennwerte für den Vergleich zwischen RBS und den Ertragswerten	216
9.3.1	Bodenzahl	216
9.3.2	Ackerzahl.....	216
9.3.3	Modifizierte Ackerzahl	217
9.3.4	Nutzbare Feldkapazität	217
9.3.5	Bodenzahl / Ackerzahl mit eliminierten Vorgewendepunkten	217
9.3.6	Eliminierung der L4Lö-Bodenschätzpunkte	218
9.3.7	Eliminierung der Bodenschätzpunkte mit dem Bodentyp Kolluvisol.....	218
9.3.8	Verwendetes statistisches Verfahren	218



9.4	Darstellung und Beschreibung der Ergebnisse.....	219
9.4.1	Hofacker	219
9.4.2	Lettkippel.....	222
9.4.3	Köhlerwald	225
9.5	Analyse der Ergebnisse	228
9.5.1	Rangfolge der Bodenkennwerte auf Grundlage der ermittelten Bestimmtheitsmaße	228
9.5.2	Rangfolge der Ertragskartenjahre einzelner Schläge auf Grundlage der ermittelten Bestimmtheitsmaße.....	230
9.5.3	Einfluss des Klimas	231
10	<i>Verwertung der Analyseergebnisse</i>	235
10.1	Bisherige Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Ergebnissen der RBS und Ernteerträgen.....	235
10.2	Unterteilung der Schläge in Teilschläge	237
11	<i>Umsetzung der Ergebnisse zur Vorbereitung der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung</i>	240
11.1	Eignung der RBS für die Zwecke des PF	240
11.2	Vorgehensweise zur Einführung der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	242
12	<i>Zusammenfassung</i>	244
13	<i>Summary.....</i>	248
14	<i>Literaturverzeichnis</i>	250

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Wirkungsdreieck der Wachstumsfaktoren	5
Abbildung 2:	Gewichtsanteile einzelner Pflanzenteile im Vegetationsverlauf.	11
Abbildung 3:	Korrelationen zwischen Ertragskomponenten bei Weizen	15
Abbildung 4:	Bodenartendiagramm	18
Abbildung 5:	Landkarte der Bodentexturen der alten Bundesländer	21
Abbildung 6:	pF-Kurven verschiedener Bodenarten.....	27
Abbildung 7:	Verhältnis von Feldkapazität und Permanenten Welkepunkt	29
Abbildung 8:	Der Stickstoff-Kreislauf	36
Abbildung 9:	Zusammenhänge zwischen BFI, Strahlung und CGR	42
Abbildung 10:	Zusammenhang zwischen aufgefänger Strahlung und CGR... ..	43
Abbildung 11:	Kurve der Netto-C-Assimilation	47
Abbildung 12:	Niederschlagskarte der BRD für den Zeitraum 1961-1990	52
Abbildung 13:	Der Verlauf des Dampfdruckes in Millibar	54
Abbildung 14:	Abhängigkeit der Verdunstung vom Sättigungsdefizit der Luft.	55
Abbildung 15:	Abhängigkeit der Bodenwasserspannung von der potenziellen Evapotranspiration	57
Abbildung 16:	Dreistufiges Modell zur Berechnung der Klimatischen Wasser- bilanz eines Pflanzenbestandes	66
Abbildung 17:	Wasserhaushaltskurve	73
Abbildung 18:	Kennwerte der Variogramme	78
Abbildung 19:	Heterogenität in Einheiten der BÜK 1000	80
Abbildung 20:	Mediane Variogramm-Distanzen von Landschaften und Betrieben des preagro-Projektes.	83
Abbildung 21:	Häufigkeiten der Substratwechsel.....	90
Abbildung 22:	Leitfähigkeitsmessverfahren mit EM 38.....	103
Abbildung 23:	Aufnahmezeiträume und Anwendungsmöglichkeiten für Ferner- kundungsdaten	107
Abbildung 24:	Messgeometrie des YARA-N-Sensors.....	110
Abbildung 25:	Messprinzip der Pendelbewegung.....	111
Abbildung 26:	Ergebnisse der Genauigkeits- und Kostenanalyse	115
Abbildung 27:	Mögliche Effekte teilschlagbezogener Bewirtschaftung auf einem heterogenen Standort.....	119
Abbildung 28:	Teilbereiche des präzisen Ackerbaus	120
Abbildung 29:	Darstellung der technischen und wissensbasierten Bereiche einer teiflächenspezifischen Bewirtschaftung.....	123



Abbildung 30: Precision Farming-Zyklus	124
Abbildung 31: Prinzipieller Aufbau des differenziellen GPS	127
Abbildung 32: Komponenten der Ertragskartierung	130
Abbildung 33: Landwirtschaftliches BUS-System (LBS)	133
Abbildung 34: Ablaufdiagramm des Moduls preagro-N-WW.....	139
Abbildung 35: Notwendige Erhöhung des Naturalertrages bis Break-Even.....	161
Abbildung 36: Notwendige Reduktion der kumulierten Betriebsmittelkosten bis Break-Even.....	162
Abbildung 37: Von den PF-Nutzern angewandte PF-Methoden	172
Abbildung 38: Prozentualer Anteil der durch PF abgedeckten Flächen in den USA	173
Abbildung 39: Räumliche Verbreitung des N-Sensors in Deutschland und Österreich	174
Abbildung 40: CROP-Meter-Karte des Schlates Hofacker aus dem Jahr 2005	185
Abbildung 41: Ackerschätzungsrahmen	190
Abbildung 42: Einteilung der Bodenarten für die Bodenschätzung.....	191
Abbildung 43: ALK-Karte von Marienborn mit GPS-eingemessenen Bodenbohrpunkten	193
Abbildung 44: Menge an pflanzenverfügbarem Wasser (nFK) und Bodenzahl	198
Abbildung 45: Schema der Messung des Korndurchsatzes im Körnerelevator mittels Lichtschranke	202
Abbildung 46: Anteile der einzelnen Ackerkulturen an der Gesamtfläche der erfolgreichen Ertragskartierungen.....	206
Abbildung 47: Rohdatenertragskarte.....	207
Abbildung 48: Ertragskarte Wintergerste Hofacker 2005.....	209
Abbildung 49: Zwei Weizenertragskarten des Schlates Hofacker der Jahre 2004 und 2007 mit gleicher Legende.....	210
Abbildung 50: Ertragserwartungskarte Weizen für den Schlag Hofacker	212
Abbildung 51: Ertragserwartungskarte Gerste für den Schlag Hofacker.....	213
Abbildung 52: Graphische Darstellung der Bestimmtheitsmaße zwischen Ertrag und ausgewählten Bodenkennzahlen des Schlates Hofacker ...	221
Abbildung 53: Prozentuale Abweichungen der Erträge der einzelnen Bodenklassen vom Durchschnitt der ausgewählten Ertragspunkte des Schlates Hofacker.....	222
Abbildung 54: Prozentuale Abweichungen der Erträge der einzelnen Bodenklassen vom Durchschnitt der ausgewählten Ertragspunkte des Schlates Lettkippel.....	225
Abbildung 55: Prozentuale Abweichungen der Erträge der einzelnen Bodenklassen vom Durchschnitt der ausgewählten Ertragspunkte des Schlates Köhlerwald	228



Abbildung 56: Wasserhaushaltskurven der Jahre 2004 und 2005 für den Standort Marienborn	233
Abbildung 57: Beispiel für eine Teilschlagunterteilung des Schlates Hofacker auf Grundlage einer mehrjährigen Ertragskartierung	239



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Effektiver Wurzelraum ($W_{Z_{\text{reff}}}$), nutzbare Feldkapazität (nFK) und Menge an pflanzenverfügbarem Wasser im durchwurzelten Bodenprofil (Wpfv)	30
Tabelle 2:	Nährelementeausnutzung verschiedener Bodenarten.....	39
Tabelle 3:	Verteilung der Niederschläge und der Verdunstung auf die Jahreszeiten.....	53
Tabelle 4:	Transpirationskoeffizienten verschiedener Kulturpflanzen	60
Tabelle 5:	Wirkung von Wassermangel	64
Tabelle 6:	Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit der Temperatur	70
Tabelle 7:	Proportionalitätsfaktoren zur Verwendung in der HAUDE-Formel....	71
Tabelle 8:	Klimadaten Marienborn 1961 – 1990.....	73
Tabelle 9:	Variogramm-Kenngrößen von Bodenparametern	82
Tabelle 10:	Heterogenität der Wachstumsfaktoren	85
Tabelle 11:	Bewertung der Heterogenität in den am häufigsten vorkommenden Bodeneinheiten der BÜK 1000	91
Tabelle 12:	Verfahren zur Erfassung der kleinräumigen Heterogenität.....	98
Tabelle 13:	Auswahl der zentralen Wachstumsparameter und der dazugehörigen Erfassungsmethoden.....	116
Tabelle 14:	Meilensteine der Entwicklung des Precision Farmings.....	121
Tabelle 15:	Übersicht gängiger Korrekturdatendienste	128
Tabelle 16:	Praxisverfügbare Systeme der teilflächenspezifischen N-Düngung	141
Tabelle 17:	Kostenpositionen der PF-Technologie	153
Tabelle 18:	Kosten von PF-Dienstleistungen	153
Tabelle 19:	Standarddeckungsbeiträge ausgewählter Ackerkulturen 2011/2012.	154
Tabelle 20:	Break-Even-Analyse der PF-Technologie für einen extensiven Marktfruchtbetrieb 1999.....	156
Tabelle 21:	Break-Even-Analyse der PF-Technologie für einen extensiven Marktfruchtbetrieb 2013.....	158
Tabelle 22:	Break-Even-Analyse der PF-Technologie für einen intensiven Marktfruchtbetrieb 2013.....	159
Tabelle 23:	Break-Even-Analyse der PF-Technologie für einen extensiven Marktfruchtbetrieb 2013 mit verändertem Kostengerüst	160
Tabelle 24:	Aussagen verschiedener Studien zur Wirtschaftlichkeit von PF.	163



Tabelle 25:	Jährliche Kosten der differenzierten Bodenbeprobung und Grundnährstoffapplikation bei einem 4-jährigen Planungszeitraum	164
Tabelle 26:	Ausprägungen von GIS mit typischen Anwendungsbeispielen ..	177
Tabelle 27:	Chronologische Abfolge der Maßnahmen zur Vorbereitung der Einführung der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung.....	184
Tabelle 28:	Entstehungsarten der Bodenarten im Ackerschätzungsrahmen ..	191
Tabelle 29:	Ausschnitt aus der aufbereiteten Bodenschätzungsmatrix der Betriebsflächen	197
Tabelle 30:	Statistische Kennzahlen der Bodenparameter der Versuchsschläge	199
Tabelle 31:	Anteil der erfolgreich durchgeführten Ertragskartierungen an der gesamten Ertragskartierungsfläche.....	205
Tabelle 32:	Kennwerte der Versuchsschläge.....	214
Tabelle 33:	Bestimmtheitsmaß zwischen Ertrag und ausgewählten Bodenkennwerten für den Schlag Hofacker in %.....	220
Tabelle 34:	Durchschnittserträge der einzelnen Bodenklassen des Schlags Hofacker in dt/ha	221
Tabelle 35:	Bestimmtheitsmaß zwischen Ertrag und ausgewählten Bodenkennwerten für den Schlag Lettkippel in %.....	223
Tabelle 36:	Durchschnittserträge der einzelnen Bodenklassen des Schlags Lettkippel in dt/ha.....	225
Tabelle 37:	Bestimmtheitsmaß zwischen Ertrag und ausgewählten Bodenkennwerten für den Schlag Köhlerwald in %.....	226
Tabelle 38:	Durchschnittserträge der einzelnen Bodenklassen des Schlags Köhlerwald in dt/ha	227
Tabelle 39:	Rangfolge der Bodenkennwerte für die einzelnen Ertragskartierungsjahre	229
Tabelle 40:	Rangfolge der Bodenparameter mit dem höchsten Erklärungsbeitrag	230
Tabelle 41:	Monatliche Niederschläge für den Zeitraum 2002-2008 am Standort Marienborn.....	231
Tabelle 42:	Monatliche Niederschläge für den Zeitraum April bis Juli der Jahre 2002-2008 am Standort Marienborn	232
Tabelle 43:	Monatliche Werte der Klimatischen Wasserbilanz der Jahre 2002-2008 am Standort Marienborn.....	232



1 Einleitung

Die landwirtschaftlichen Betriebsmittel- und Produktmärkte sind seit der Liberalisierung des europäischen Agrarmarktes starken Preisschwankungen unterworfen, die in ihrer Grundtendenz zu einer deutlichen Steigerung der Faktor- und Produktpreise führten. So sind die Preise für Betriebsmittel insgesamt im Zeitraum von 2005 bis 2012 um 40 % angestiegen, wobei im Bereich des Ackerbaus die Preissteigerungen für Energie (+37,6 %), Saat- und Pflanzgut (+51,1 %) und Düngemittel (+96,8 %) herausragen (DBV, 2012, S. 207). Die daraus resultierenden Produktionskostensteigerungen in Verbindung mit den ebenfalls deutlich erhöhten landwirtschaftlichen Erzeugerpreisen für den gleichen Zeitraum von aggregiert 34,4 % – und hier im Besonderen bei Getreide (+138,3 %) und Raps (172,8 %) – setzen einen deutlichen Anreiz zu einer standortangepassten Intensivierung der Pflanzenproduktion (DBV, 2012, S. 207). Unterstützt wird diese jüngste Entwicklung von den Angebots- und Nachfrageverhältnissen auf den Weltmärkten für Nahrungsmittel, die im Hinblick auf eine Zunahme der Weltbevölkerung, knapper werdenden Bodenressourcen und einem Ausbau der Produktion von Nachwachsenden Rohstoffen in den kommenden Jahren erwartet werden (DBV, 2012, S. 229-231).

Demgegenüber steht ein zunehmendes Umweltbewusstsein der Bevölkerung, was sich im stärker werdenden politischen Druck auf die agrarpolitischen Entscheidungsträger äußert. Infolgedessen wurden in der Vergangenheit die umweltgesetzlichen Auflagen hinsichtlich der Dokumentationspflichten und der Bewirtschaftungseinschränkungen verschärft. Dieser Trend dürfte sich – falls es nicht zu nicht auszuschließenden Versorgungsengpässen in der Nahrungsmittelproduktion kommt – weiter fortsetzen.

Der Landwirt benötigt daher ein Instrumentarium, um im Spannungsfeld des Anreizes zur Intensivierung durch gestiegene Produktpreise, der Optimierung des Betriebsmitteleinsatzes im Hinblick auf gestiegene Faktorpreise unter gleichzeitiger Berücksichtigung umweltgesetzlicher Auflagen auch im eigenen ökonomischen Interesse eine optimale Betriebsmittelintensität zu erreichen.

Ein solches Hilfsmittel zur Maximierung des ökonomischen Ertrages unter gleichzeitiger Minimierung unerwünschter ökologischer Nachteile könnte die Technolo-



gie der teilflächenspezifischen Bestandesführung (Precision Farming) sein. Die Idee des Precision Farmings geht von einer Verlagerung des Entscheidungsraumes bezüglich des standortangepassten Betriebsmittelniveaus von der Gesamtschlagebene auf die räumliche Größe des Teilschlages aus. Mit Hilfe satellitengestützter Ortung und Navigation ist eine Identifizierung kleinräumiger Standortbedingungen möglich, die es erlauben soll, die Höhe der Betriebsmittelapplikationen an das kleinräumige pflanzenbaulich-ökonomische Optimum heranzuführen. Die bei schlageinheitlicher Bewirtschaftung eines mit räumlich variablen Standortvoraussetzungen ausgestatteten Schlages vorkommenden ökonomischen Verschwendungen durch Nichtausnutzung von Ertragspotenzial und zu hoch bemessenen Betriebsmittelgaben und daraus resultierenden möglichen Umweltbelastungen könnten so verringert werden. Voraussetzung für die Anwendung der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung ist die Kenntnis über möglichst kleinräumige Standortvoraussetzungen für das Pflanzenwachstum und die darauf abgestimmte räumlich variable Bestandesführung sowie die Ermittlung der tatsächlichen Ertragsverhältnisse in räumlich hochaufgelöster Form.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Der ökonomische Nutzen und die ökologische Vorteilhaftigkeit der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung erschließt sich durch eine Ausschöpfung des häufig in der Fläche räumlich variabel vorliegenden Ertragspotenzials und die möglichst kleinräumig an die Standortbedingungen angepasste Applikation von Betriebsmitteln wie Saatgut, Dünger und Pflanzenschutzmittel. Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung des Konzeptes des teilschlagorientierten Pflanzenbaus ist zum einen die räumlich exakte Erfassung des pflanzlichen Ertrages. Die Technologie der Satellitennavigation erlaubt eine Ortung der Erntemaschine und eine räumliche Zuordnung des gemessenen Ertrages innerhalb der beernteten Flächen. Da eine zeitliche Veränderung der räumlichen Ertragsstrukturen durch den Einfluss der jährlich wechselnden Witterungsverhältnisse zu erwarten ist, ist eine präzise Quantifizierung und räumliche Zuordnung des schlaginternen Ertragspotenzials erst nach einer mehrjährigen satellitengestützten Erfassung des Ernteergebnisses möglich.

Einer der Hauptgründe für die bisher nur zögerliche Verbreitung des Konzeptes der teilschlagspezifischen Landbewirtschaftung in der landwirtschaftlichen Praxis

ist das Fehlen eindeutiger pflanzenbaulicher Algorithmen für den Umgang mit räumlich variablen Standortbedingungen und daraus resultierenden flächenheterogenen Ertragsergebnissen zu sehen (REICHHARDT / JÜRGENS, 2008, S. 590). Dieser Mangel begründet sich auch in der Unkenntnis darüber, welche Wachstumsfaktoren ertragsrelevant sind, auf welche Weise sie zu erheben sind und welchen Beitrag sie zur Erklärung der festgestellten räumlichen Ertragsheterogenität leisten. Die Bearbeitung dieser drei Fragestellungen bildet den wissenschaftlichen Kern der vorliegenden Arbeit. Das Ziel der Arbeit ist die Identifizierung von ertragsrelevanten Wachstumsfaktoren, mit denen für den Standort der Versuchsfelder auf dem Lehr- und Versuchsbetrieb Marienborn-Heldenbergen die Erklärung der räumlichen Variabilität der Ernteergebnisse beschrieben werden kann. Die auf den Versuchsfeldern ermittelten Zusammenhänge zwischen kleinräumig erhobenen Parametern der bodenbürtigen Standortbedingungen und Ergebnissen einer teilflächenspezifischen Ertragsaufnahme soll als Grundlage der Einführung einer teilschlagorientierten Landbewirtschaftung auf dem Versuchsbetrieb dienen. Die Auswahl der Datenquellen zur Ermittlung der natürlichen Standortvoraussetzungen erfolgt unter der Maßgabe der Übertragbarkeit auf andere Anbauregionen. Aus diesem Grund wird mit der Reichsbodenschätzung eine deutschlandweit konsistent vorliegende Datengrundlage zur Beschreibung der räumlichen Verteilung der Bodenqualitäten ausgewählt. Inwieweit diese Datenquellen den Ansprüchen des Precision Farmings hinsichtlich räumlicher Auflösung und Präzision der Beschreibung der Ertragsfähigkeit gerecht werden, ist eine weitere wichtige Fragestellung dieser Arbeit. Als Kontrollgröße zur Abbildung der tatsächlich realisierten Ertragsverläufe in hoher räumlicher Auflösung wird eine mehrjährige, satellitengestützte Ertragskartierung durchgeführt.

1.2 Vorgehensweise

Der Aufbau der Arbeit stützt sich auf eine für die räumlich differenzierte Analyse des Zusammenhangs des Ertragspotenzials und der gemessenen Erträge unerlässliche, breite theoretische Basis der pflanzlichen Ertragsbildung in Form einer fundierten Literaturrecherche. Diese Darlegung der theoretischen Grundlagen bildet in Kapitel 2 die Basis für die Identifizierung der wesentlichen ertragsbestimmenden Wachstumsfaktoren. Im Hinblick auf eine teilschlagorientierte Bestandesführung, die auch als „Management von Heterogenitäten“ (SCHNEIDER /



WAGNER, 2008, S. 409) bezeichnet wird, werden die beschriebenen Wachstumsfaktoren anschließend in Kapitel 3 unter dem Aspekt der räumlichen Heterogenität diskutiert und hinsichtlich der Möglichkeit der Beeinflussbarkeit durch den Bewirtschafter eingeordnet. In den darauffolgenden Kapiteln 4 und 5 werden der Stand der Wissenschaft in den Themenfeldern Precision Farming mit Schwerpunkt auf die ökonomischen Auswirkungen der teilschlagspezifischen Landbewirtschaftung sowie Geographische Informationssysteme (GIS) dargestellt. Daran schließt sich die Beschreibung und Erläuterung der Datenerhebungen auf den Flächen des Lehr- und Versuchsbetriebes Marienborn-Heldenbergen in Kapitel 6 an. Ausführlich werden in den Kapiteln 7 und 8 die beiden zentralen Verfahren der Datengewinnung im Rahmen dieser Arbeit, die Nachschätzung der landwirtschaftlichen Nutzflächen des Betriebes nach den Vorgaben der Reichsbodenschätzung (RBS) und die mehrjährige satellitengestützte Ertragskartierung, mit den dazugehörigen Ergebnissen vorgestellt.

Im Analyseteil der Arbeit werden zunächst in Kapitel 9 die Ergebnisse der Nachschätzung der Ackerflächen und die Daten der aufbereiteten Ertragswerte räumlich einander zugeordnet. Dann wird mittels einer Korrelationsanalyse der Erklärungsbeitrag einzelner ausgewählter Bodenkennwerte der RBS zu den festgestellten räumlichen Ertragsvariabilitäten quantifiziert. Aus diesen Ergebnissen leitet sich ein Ranking der Bodenparameter hinsichtlich der Erklärung von räumlichen Ertragsheterogenitäten ab, um daraus eine Empfehlung zur Übertragung auf andere Anbauregionen zu generieren.

Aus den Ergebnissen der Nachschätzung, den mehrjährigen Ertragskarten und den Ergebnissen der Analyse des korrelativen Zusammenhangs der beiden Datenquellen wird in Kapitel 10 eine räumliche Aufteilung der Versuchsschläge in Teilflächen empfohlen. Den Abschluss des inhaltlichen Teils der Arbeit bildet in Kapitel 11 die Skizzierung einer möglichen Vorgehensweise der Einführung der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung auf dem Lehr- und Versuchsbetrieb Marienborn-Heldenbergen, bevor mit einer Zusammenfassung in Kapitel 12 die gewonnenen Erkenntnisse abschließend zusammengetragen und bewertet werden.



2 Ertragsbildung in landwirtschaftlichen Kulturbeständen

2.1 Bestandteil Pflanze

Der Ertrag eines landwirtschaftlichen Kulturpflanzenbestandes unterliegt vielfältigen Einflüssen der ihn umgebenden Umwelt. Nach GEISLER beruht die Leistung einer Kulturpflanze „auf einem genetisch vorgegebenem Ertragspotential, das in Abhängigkeit von den Umweltverhältnissen in einem mehr oder weniger großen Umfang realisiert werden kann (GEISLER, 1988, S. 11). VON BOGUSLAWSKI hat dies in seinem bekannten Wirkungsdreieck der Wachstumsfaktoren anschaulich dargestellt und sich dabei auf die drei Produktivkräfte Pflanze, Klima und Boden bezogen (siehe Abbildung 1) (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S.13).

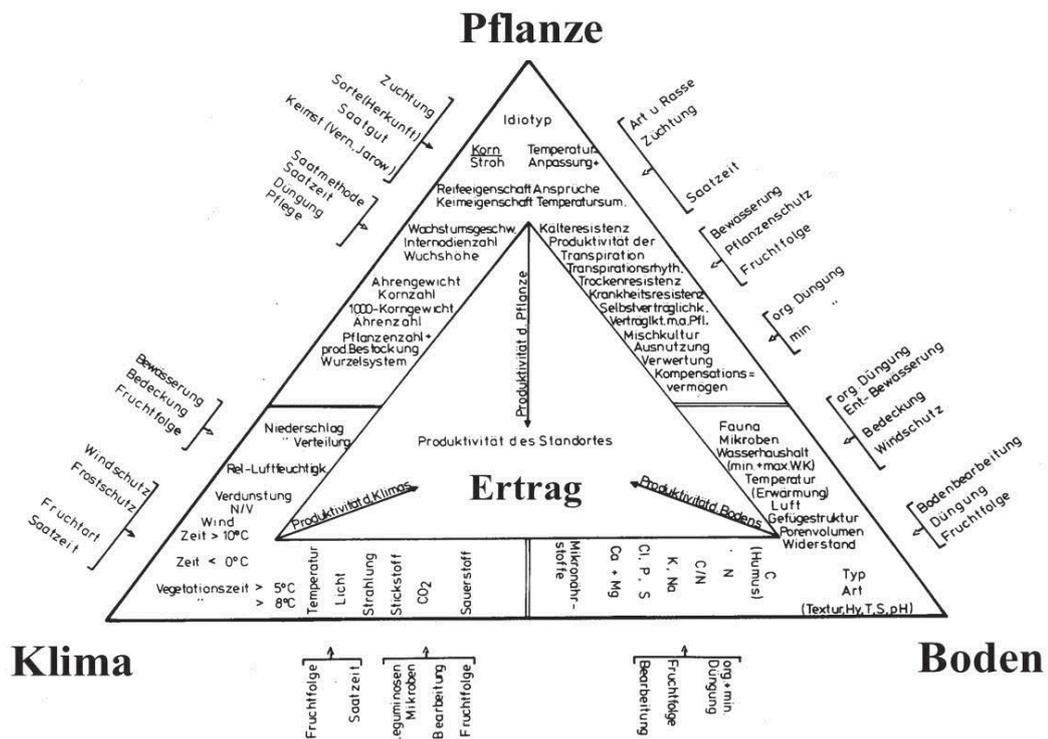


Abbildung 1: Wirkungsdreieck der Wachstumsfaktoren (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 13)

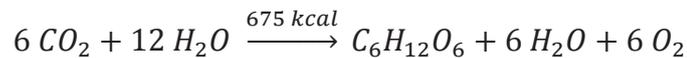
In diesem Wirkungsdreieck werden auch zahlreiche Interdependenzen zwischen den drei hauptsächlichen Produktivkräften abgebildet, die zusammen die Produktivität des Standortes, den Ertrag, determinieren. Die Bedeutung der einzelnen Wachstumsfaktoren wird in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.



2.1.1 Biochemische Grundlagen

Die Ertragsbildung der Pflanzen hängt entscheidend von den zwei biochemischen Vorgängen Photosynthese und Nährstoffaufnahme ab (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 18). Mit Hilfe dieser beiden chemischen Verfahren gelingt es der Pflanze durch eine Assimilation von Stoffen aus der Umwelt über mehrere spezifische Synthesevorgänge die vom Organismus benötigten chemischen Verbindungen aufzubauen (GEISLER, 1988, S. 51).

Die zentrale Aufgabe der Photosynthese besteht in der Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie, die dem Aufbau organischer Verbindungen aus Wasser und dem CO₂ der Atmosphäre dient. Dies drückt sich in der chemischen Summenformel der Photosynthese aus:



(v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 18).

Die Energie, die für diese biochemischen Vorgänge benötigt wird, wird in der Lichtreaktion der Photosynthese gewonnen und ermöglicht die Spaltung von Wassermolekülen in Sauerstoff und Protonen. Die Protonen werden in Form von NADPH₂ gebunden. Daran anschließend erfolgt die Bindung des CO₂ im sogenannten Calvin-Zyklus. Die Verfügbarkeit an CO₂ bestimmt die Nettophotosyntheserate bei C₃-Pflanzen, während die C₄-Pflanzen bei begrenzter Verfügbarkeit von CO₂ auf pflanzeneigene C₄-Körper zurückgreifen können und dadurch auf steigende Lichtintensitäten auch mit steigenden Nettophotosyntheseraten reagieren können.

Die bei der Photosynthese von CO₂, H₂O und Lichtenergie gewonnenen Kohlenhydrate werden dem Primärstoffwechsel der Pflanzen zugeführt.

GEISLER weist darauf hin, dass die Phytohormone die wesentliche Rolle bei der Steuerung der ertragsbeeinflussenden Vorgänge in der Pflanze spielen (GEISLER, 1983, S. 42). Das Potenzial der Ertragsleistung wird durch die genetische Konstitution der Pflanze vorgegeben, die Höhe der Ausnutzung dieses Ertragspotenzials innerhalb der gesetzten genetischen Grenzen hängt dagegen überwiegend von Umweltfaktoren ab, die auf die Pflanze einwirken (GEISLER, 1988, S.41).



2.1.2 Chronologischer Ablauf der Ertragsbildung

Für v. BOGUSLAWSKI erscheint es zweckmäßig, die pflanzliche Ontogenese in Entwicklungsphasen zu unterteilen, weil die Dauer, die Differenzierung und das Wachstum als Ergebnis der Wirkung der diversen Einflussfaktoren erfasst werden könne. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit einer sehr differenzierten Analyse der Ertragsbildung (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 72).

Der Vegetationsablauf einer Getreidepflanze untergliedert sich in mehrere für die spätere Ertragsleistung bedeutsame Abschnitte. GEISLER unterscheidet hier sechs Phasen (GEISLER, 1983, S. 29 ff.):

1. Keimung
2. Bestockung (Jugendphase)
3. Schossen (Hauptwachstumsphase)
4. Blüte
5. Entwicklung und Wachstum der generativen Organe
6. Trockenmasseentwicklung und Assimilatproduktion

Keimung

Die erste Entwicklungsphase im Vegetationsverlauf einer Getreidepflanze ist die Phase der Keimung. Sie ist abhängig von der ausreichenden Wasseraufnahme des Saatkorns, einer bestimmten Mindesttemperatur und einer ausreichenden Sauerstoffverfügbarkeit. Die Wasseraufnahme der Karyopse initiiert den Beginn einer Reihe von biochemischen Prozessen, die für die Verfügbarkeit der für die pflanzenphysiologischen Entwicklungsvorgänge notwendigen Energie sorgen. Die ersten sichtbaren Anzeichen des Keimungsvorgangs zeigen sich im Durchstoßen der Wurzelanlagen durch die Samenschale. Dem räumlich entgegengesetzt tritt die sogenannte Koleoptile, die das erste Blatt und das meristematische Gewebe umhüllt, aus dem Samen hervor. Nach 6 - 8 Tagen ist das „Spitzen“ des Getreides an der Bodenoberfläche zu erwarten. In dieser Phase ist die Pflanze noch stark von der Versorgung durch die Karyopse abhängig. Erst mit Beginn der Bestockung kann mit Nährstoffen aus der Umwelt der Bedarf der Pflanze gedeckt werden. Parallel dazu beginnt das Wurzelwachstum.



Bestockung

An die Phase der Keimung schließt sich die Jugendphase, die Bestockung, an. Sie beginnt, wenn etwa 4 - 5 Blätter gebildet worden sind. Zunächst entwickelt sich ein Bestockungsknoten, dessen Entstehung durch Lichteinfluss an der Erdoberfläche gesteuert wird. In den Blattachseln der Hauptsprossachse entwickeln sich die dort angelegten Knospen zu Seitenzweigen. Zeitgleich dazu entstehen Adventivwurzeln, deren Umfang in enger Beziehung zur Anzahl der Bestockungstriebe steht. Das Bestockungsvermögen ist art- und sortentypisch und steht überdies in engem Zusammenhang zur Größe des Saatkorns. Zudem wird das Ausmaß der Bestockung erheblich durch die Umweltverhältnisse, v. a. die Bestandesdichte des Getreidefeldes, bestimmt. Auf ungünstige Umweltbedingungen reagiert die Pflanze grundsätzlich mit einer Verlagerung des Wachstums zum Haupthalm hin, was sich dann in einer Reduzierung der Bestockungstriebe äußert. Parallel zum Wachstum der vegetativen Organe setzt sich in der Bestockungsphase die Entwicklung der generativen Organe der Pflanze fort. Zu diesem Zeitpunkt wird die Anlage des Blütenstandes und die Differenzierung der Ährchenanlagen vollzogen. Grundsätzlich kommt es während der Bestockungsphase zu einer Umsteuerung in den Blattanlagen von vegetativem zu generativem Wachstum.

Schossen

Die Bestockung endet mit dem Einsetzen der dritten Entwicklungsphase, dem Schossen. Die Phase des Schossens wird geprägt durch die Streckung der Internodien, die nacheinander, beginnend mit dem untersten Halmglied, den Prozess des Längenwachstums durchlaufen. Nach dem Abschluss des Längenwachstums sind bei den Getreidearten zwischen vier und sieben Internodien gebildet worden. Zeitgleich mit der Streckung der Internodien vollzieht sich die Entwicklung der Blätter, bei der zunächst eine Blatthülle entsteht, die als Halmscheide das Internodium vollständig umgibt. Im weiteren Verlauf des Blattwachstums entwickelt sich die Blattspreite, die in einem bestimmten Winkel zur Sprossachse absteht. Die Größe der Blätter nimmt von unten nach oben zu, wobei das oberste Blatt, das Fahnenblatt, in der Breite besonders kräftig angelegt wird. In die Phase des Schossens fällt auch der Vorgang des Ährenschiebens, bei dem die ersten Teile des Fruchtstandes aus der obersten Blattscheide hervortreten. Auch die



generative Entwicklung der Pflanze durchläuft während des Schossens weitere Wachstumsschritte: Die Ährchen und die Blüten in den Ährchen werden differenziert.

Die Anzahl der ausgebildeten Ährchen berechnet sich aus dem Produkt aus Differenzierungsgeschwindigkeit und Phasenlänge (Ährchenzahl je Tag x Tage Ährenbildungsphase) (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 87). In der Schossphase verfügt die Pflanze über die maximale Anzahl an Blüten. Dieses Blütenmaximum bleibt allerdings nicht vollständig erhalten, weil in der Pflanze Reduktionsprozesse stattfinden, die sich in einer Reduzierung der Anzahl der Ährchen / Fruchtstand und der Anzahl der Blüten / Ährchen ausdrücken. Ausgelöst werden diese Prozesse durch genetisch bedingte art- und sortenspezifische Vorgaben. Aber auch ungünstige Umweltbedingungen veranlassen die Pflanze, über Reduktionsprozesse eine bestimmte Ertragsleistung abzusichern. Innerhalb der Hierarchie der Bestockungstriebe widerfährt dem Haupttrieb die geringste Reduktion, „denn jüngere Triebe innerhalb der Pflanze reagieren empfindlicher auf die Wachstumsbedingungen“ (GEISLER, 1983, S. 36).

Blüte

Die vierte, für das Ertragsergebnis eines Pflanzenbestandes und hier insbesondere für das Gewicht der Karyopse zentrale Entwicklungsphase im Vegetationsverlauf einer Getreidepflanze ist der Vorgang der Blüte. Da die Getreidearten Weizen, Gerste und Hafer Selbstbefruchter sind, sind sie hinsichtlich des Befruchtungsvorgangs von äußeren Einflüssen relativ unabhängig. Anders sieht dies bei Roggen aus, der Fremdbefruchter ist und auf bestimmte Umweltverhältnisse angewiesen ist. Nach der Bestäubung wird die Bildung der Karyopse, des eigentlichen Ernteproduktes bei Getreide, eingeleitet. GEISLER weist darauf hin, dass sich die Verhältnisse während des Blühverlaufs in unterschiedlichen Einzelgewichten der Karyopsen widerspiegeln (GEISLER, 1983, S. 38). Die Zeitdauer der Blüte einer Pflanze lässt sich wie folgt beziffern: Während die einzelne Blüte in weniger als einer Stunde abgeblüht sein kann, beträgt die Blühdauer eines Ährchens zumeist drei Tage. Der Blühvorgang der gesamten Pflanze kann mehr als eine Woche in Anspruch nehmen. Als ideale, den Blühvorgang optimal fördernde Temperatur wird während der Blühphase ein Wert von ca. 20 °C angesehen.



Entwicklung und Wachstum der generativen Organe

Die Blüte leitet den fünften Entwicklungsschritt der Pflanze ein, die Entwicklung und das Wachstum der generativen Organe. Diese Phase wird in drei Abschnitte unterteilt, die die pflanzenphysiologischen Vorgänge der Entwicklung der Karyopse beschreiben. Die Karyopse enthält ein Vorratsgewebe, das sogenannte Endosperm, von dessen Größe die Trockenmasse der Karyopse abhängt.

Im ersten Entwicklungsabschnitt erfolgt die Differenzierung des Endosperms, wodurch das Potenzial bei der späteren Stärkeeinlagerung determiniert wird. Diese Differenzierung des Endosperms wird durch Umwelteinwirkungen und das Phytohormon Cytokinin beeinflusst. Den zweiten Abschnitt stellt die Volumenvergrößerung der Einzelzelle dar, die schon während der Differenzierung des Endosperms beginnt. Der zentrale und für die Ertragshöhe bedeutendste Abschnitt ist die Phase der Einlagerung der Stärke und des Proteins in die Karyopse. In dieser Phase der Ertragsbildung führt Wassermangel zu erheblichen Ertragsminderungen, wenn es zur Ausbildung des sogenannten Kümmerkorns kommt. In diesem Fall bleibt die Karyopse in ihrem Einzelgewicht deutlich unter ihrem Gewichtspotenzial. Grundsätzlich besteht eine positive Korrelation zwischen dem Endgewicht der Karyopse und der Dauer der Einlagerungsvorgänge.

Eine zentrale Rolle bei der Steuerung der Wachstums- und Entwicklungsvorgänge in der Karyopse übernehmen Phytohormone. Das Phytohormon Cytokinin spielt eine wichtige Rolle bei den Zellteilungsprozessen. Der Vorgang der Assimilateinlagerung in das Endosperm wird zu Beginn durch die Phytohormone der Gibbereline und auf dem Höhepunkt der Einlagerung durch die Auxine gesteuert. Das Phytohormon Abscisinsäure schließlich übernimmt eine wichtige Funktion in der Phase des Reifeprozesses der Karyopse.

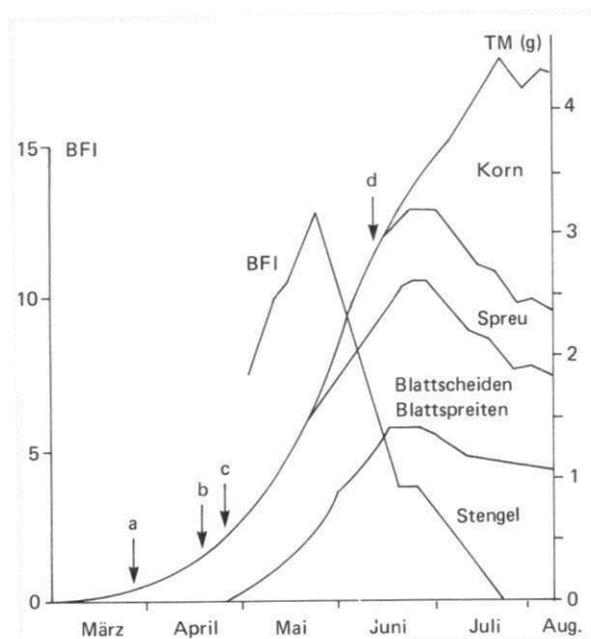


Abbildung 2: Gewichtsanteile einzelner Pflanzenteile im Vegetationsverlauf (GEISLER, 1983, S. 44)

Trockenmasseentwicklung und Assimilatproduktion

Die letzte Phase im Vegetationsverlauf der Getreidepflanze besteht in der Trockenmasseentwicklung der Getreidepflanze und dem abschließenden Abreifungsprozess. Die gewichtsdominierenden Teile der Getreidepflanze verschieben sich im Laufe der Vegetationsperiode (siehe Abbildung 2). Zunächst stellen Blattspreiten und Blattscheiden den größten Gewichtsanteil an der Getreidepflanze. Während der Bestockung verschiebt sich der Schwerpunkt hin zu den Halmen. Mit Beginn der Karyopsenausbildung übernehmen die generativen Organe die dominierende Rolle am Gesamtgewicht der Einzelpflanze. Die voll ausgebildeten Karyopsen können bis zu 40-50 % des Gewichts an der Gesamtspross-trockenmasse ausmachen. Aus der Abbildung 2 ist zudem der Verlauf des Blattflächenindizes (BFI) über die Vegetationsperiode hinweg aufgezeigt. Der Blattflächenindex zeigt die photosynthetisch aktive Fläche der Getreidepflanze im Verhältnis zur Fläche des Bestandes an. In absoluten Zahlen beziffert kann der Blattflächenindex im normalen Maximum bis 6-7, in Ausnahmefällen sogar bis über 10 ansteigen. Sein jahreszeitliches Maximum erreicht der Blattflächenindex – nachdem er während des Schossens stark angestiegen ist – zum Zeitpunkt des Ährenschiebens. Danach sinkt der Blattflächenindex kontinuierlich ab, verursacht durch das Absterben von Blattfläche am Halm von unten nach oben.



Die Ertragsleistung der Pflanze, bzw. des Pflanzenbestandes ergibt sich aus der durchschnittlichen Nettoassimilationsrate und der Vegetationsdauer. Ein Getreidebestand kann pro Tag etwa 240 kg Trockenmasse (TM) / ha bilden. Die Pflanze ist in der Lage, über die Zeit konstante Mengen an Assimilaten einzulagern, da die Assimilate auf dem Weg in die Karyopse zwischengelagert werden können. Auf diese Weise können auf Grund von Mangelzuständen stockende Assimilatenachlieferungen aus dem pflanzeninternen Vorrat ausgeglichen werden. Der TM-Ertrag ist eng korreliert mit der Dauer der assimilatorischen Aktivität der für die Berechnung des BFI wesentlichen Pflanzenteile Fahnenblatt, letztes Internodium und Ähre.

Die letzte Phase des Vegetationsverlaufs einer Getreidepflanze wird abgeschlossen mit dem Stadium der Reife. Die Abreife der Karyopse beginnt mit der Milchreife, in der das Korn ein maximales Volumen aufweist. Der Wassergehalt des Kornes beträgt zu dieser Zeit noch 60 %. Über die Gelbreife (Wassergehalt unter 40 %) sinkt der Wassergehalt bis zur Vollreife auf ca. 16 %. In der Gelbreife wird die Keimfähigkeit der Karyopse erreicht (GEISLER, 1983, S. 38). An die Vollreife schließt sich noch die Totreife mit einer weiteren Verringerung des Wassergehaltes an.

2.1.3 Ertragsstruktur

Der Flächenertrag eines Pflanzenbestandes besteht aus den zwei Komponenten „Anzahl Karyopsen / Fläche“ multipliziert mit der Größe „Mittleres Gewicht der Einzelkaryopse“. Diese beiden Komponenten entwickeln sich zu verschiedenen Zeiten im Vegetationsverlauf einer Getreidepflanze, woraus sich spezifische Abhängigkeiten von Umweltbedingungen und entsprechende Eingriffsmöglichkeiten in der Bestandesführung ergeben. Die beiden genannten Ertragskomponenten sind ihrerseits von mehreren Determinanten abhängig. So wird die Anzahl der Karyopsen / Fläche bestimmt durch:

- Anzahl der Fruchtstände / Fläche
- Anzahl der Ährchen / Fruchtstand
- Anzahl der fertilen Blüten / Ährchen

Das Karyopsengewicht hingegen ist eng korreliert mit dem Blattflächenindex, bzw. mit der Dauer des Blattflächenindizes, d.h. der Dauer des Einlagerungsprozesses von Assimilaten in das Endosperm der Karyopse.

Die Entwicklung, Wachstum und quantitative Festlegung dieser Einflussfaktoren werden zu bestimmten, charakteristischen Zeitpunkten der Vegetationsperiode vorgenommen. Die bodenbedingten Standortvoraussetzungen und die klimatischen Umweltbedingungen zum Zeitpunkt der nachfolgend aufgeführten Vegetationszeitpunkte liefern entscheidende Erklärungen für flächenheterogene Ertragsstrukturen.

Die erste ertragsbeeinflussende Entscheidung – wenn man die optimale Saatbettbereitung und die richtige Sortenwahl als gegeben voraussetzt – erfolgt mit der Festlegung der auszusäenden Körner / Fläche. Mit der Bestimmung der Aussaatmenge ist die maximal mögliche Pflanzenanzahl pro Fläche determiniert, die durch die Wuchsbedingungen im Feld zu einer mehr oder weniger großen Zahl reduziert werden kann. Inwieweit die maximal mögliche Pflanzenanzahl erreicht wird, hängt zunächst von der Keimfähigkeit (KF) des Saatgutes ab. Neben günstigen Umweltbedingungen ist die Anzahl der gekeimten Saatkörner v.a. von der sortentypischen Keimfähigkeitsrate abhängig. Eine weitere Reduzierung der potenziell möglichen Pflanzenanzahl erfolgt durch die Feldaufgangsrate (FA), d.h. der Anzahl der gekeimten Körner, die nicht nur keimen, sondern auch die Erdoberfläche durchstoßen und sich als Pflanze oberirdisch entwickeln. Eine weitere mögliche Verringerung der Pflanzenanzahl / Fläche kann im Verlauf der Vegetationsperiode durch tierische Schädlinge, Pflanzenkrankheiten oder mechanische Beschädigungen bei ackerbaulichen Maßnahmen zum Verlust der Einzelpflanze führen (=Verlustrate VR). Zusammengefasst lassen sich diese Sachverhalte in folgender Formel darstellen:

$$\text{Körner/ha} * \text{KF in \%}/100 * \text{FA in \%}/100 * (1 - \text{VR in \%}/100) = \text{Pflanzen/ha}$$

Die in der Phase der Bestockung verbleibende Anzahl von Pflanzen übt einen starken Einfluss auf die Anzahl der ausgebildeten Halme pro Pflanze aus. Bei gegebener Nährstoffversorgung und ausreichenden klimatischen Bedingungen bildet die Pflanze desto mehr Halme aus, je mehr Standraum sie zur Verfügung hat. Entsprechende Regulierungsprozesse sorgen für die Festlegung der Anzahl der produktiven, also der fruchtstandstragenden Halme. In der Phase der Differenzierung der Fruchtstände und der Blütenanlagen wird zunächst eine maximale Anzahl an Ährchen / Fruchtstand und Blüten / Ährchen gebildet (siehe Kapitel

2.1.2), die aber später in Abhängigkeit vom Versorgungszustand der Pflanze und den klimatischen Bedingungen reduziert wird. Nach Abschluss der Blüte ist die tatsächliche Anzahl der Karyopsen pro Fläche und damit die erste entscheidende Ertragskomponente festgelegt.

Der BFI und die Dauer des BFI determinieren das Gewicht der Einzelkaryopse. Innerhalb des Fruchtstandes findet man die schwersten Karyopsen im mittleren Bereich der Ähre, da dort die Blüten zuerst voll entwickelt sind, am frühesten zur Blüte gelangen und aus diesem Grund der Einlagerungsvorgang am längsten dauert. 85 % - 95 % der Ertragsleistung einer Ähre entfallen auf die mittleren Ährchenstufen, was seine Ursache auch in der an dieser Stelle höheren Anzahl der Karyopsen pro Ährchen hat. Das Einzelkorngewicht (EKG) einer Karyopse ist zudem abhängig von der Position innerhalb des Ährchens, wobei die erste Kornposition nicht die schwerste Karyopse beinhaltet. Die Schwankungen bei der Anzahl der Ährchen pro Fruchtstand sind deutlich höher als die Schwankungen bei der Anzahl der Karyopsen / Ährchen. In absoluten Zahlen beziffert ist von ca. 20 Ährchenstufen / Fruchtstand beim Weizen auszugehen. Da sich zumeist 2,5 – 3 Karyopsen / Ährchen befinden, beträgt die zu erwartende Anzahl an Karyopsen / Ähre im Durchschnitt 50, es können aber auch Werte von über 70 Karyopsen / Ähre erreicht werden.

Die Werte des Proteins als bedeutendster Inhaltsstoff des Weizenkorns korrespondieren nicht mit dem Gewicht der Einzelkaryopse. Innerhalb der Ähre wird die maximale Einweißkonzentration von Karyopsen im unteren Bereich der Ähre erzielt, während zur Spitze der Ähre hin die Eiweißgehalte der Karyopsen zurückgehen. Korrelationen zwischen den Ertragskomponenten sind genetisch vorgegeben und bestimmen die Ertragsbildung in Nutzpflanzenbeständen. Diese biologisch vorgegebenen Korrelationen der Ertragsfaktoren dienen der Bildung einer vitalen und gut bevorrateten Karyopse. Unter Berücksichtigung dieser genetischen Zielvorgabe reagiert die Pflanze auf sich verschlechternde Umweltbedingungen mit Differenzierungs- und Reduktionsprozessen zur Aufrechterhaltung des ertragsphysiologischen Gleichgewichts der Pflanze. In Abbildung 3 werden die Korrelationen zwischen Ertragskomponenten am Beispiel des Weizens dargestellt.