

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, Ökötrophologie 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).

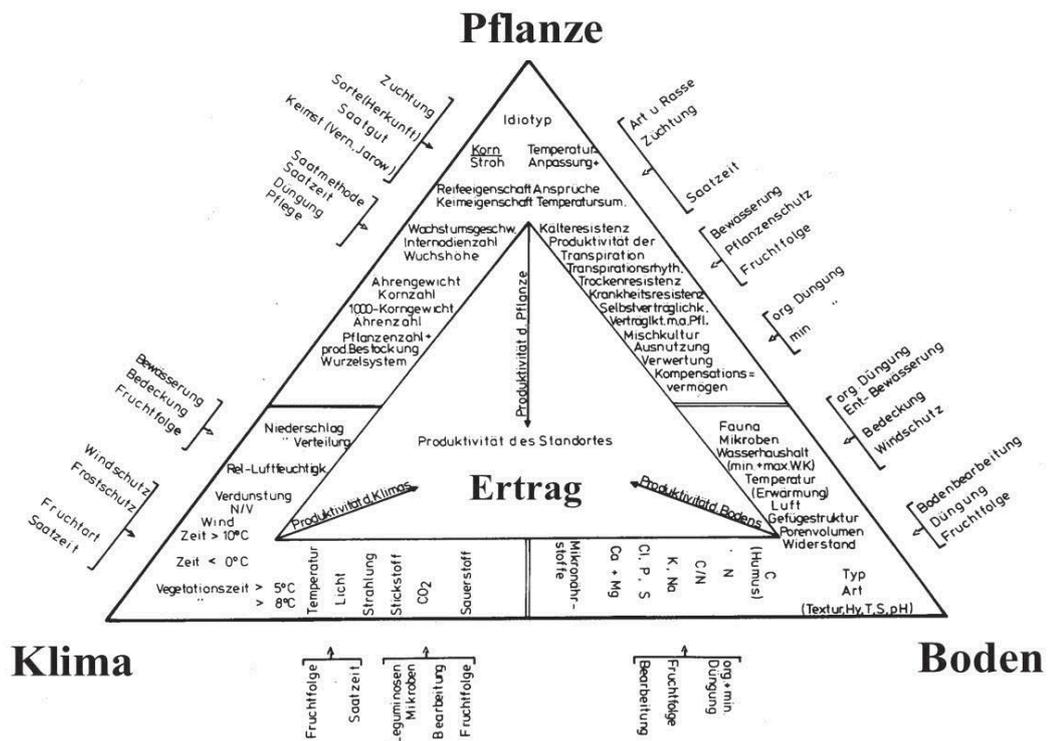


Abbildung 1: Wirkungsdreieck der Wachstumsfaktoren (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 13)

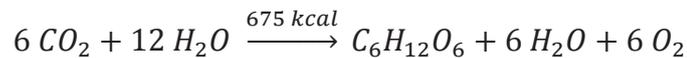
In diesem Wirkungsdreieck werden auch zahlreiche Interdependenzen zwischen den drei hauptsächlichen Produktivkräften abgebildet, die zusammen die Produktivität des Standortes, den Ertrag, determinieren. Die Bedeutung der einzelnen Wachstumsfaktoren wird in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.



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 Nettphotosyntheserate 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 Nettphotosyntheseraten 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.

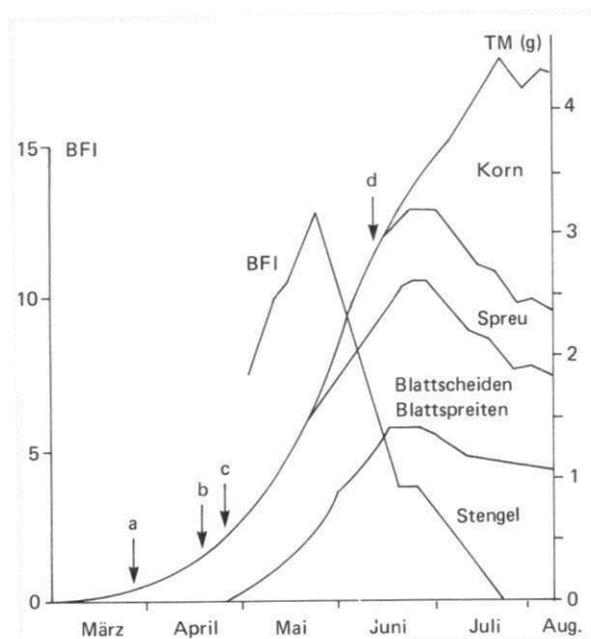


Abbildung 2: Gewichtsanteile einzelner Pflanzenteile im Vegetationsverlauf (GEISLER, 1983, S. 44)

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.

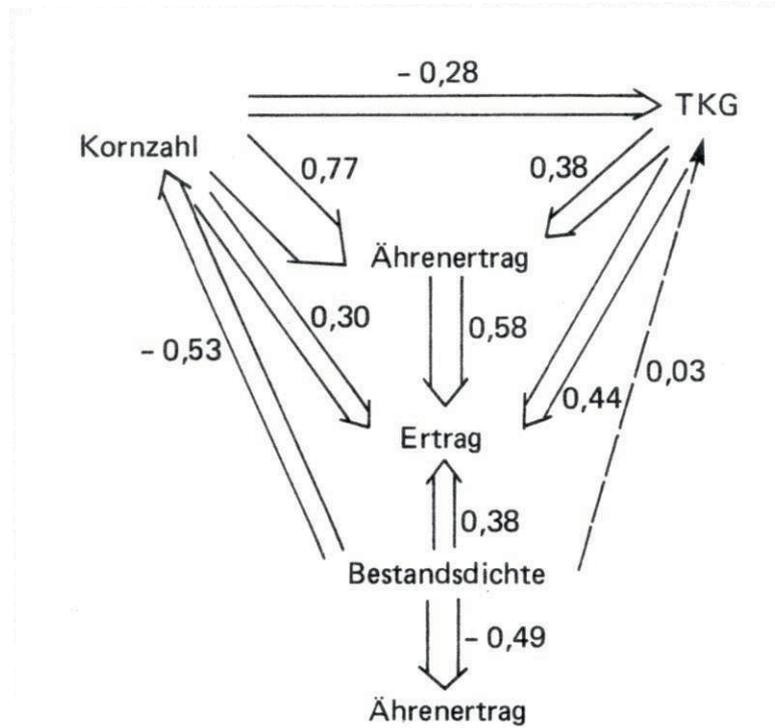


Abbildung 3: Korrelationen zwischen Ertragskomponenten bei Weizen (GEISLER, 1983, S. 28)

In dieser Übersicht ist zu erkennen, dass es das vorrangige Ziel bei der Maximierung des Kornertrages sein muss, die Anzahl der Karyopsen pro Fruchtstand bei gleichzeitiger Steigerung der Anzahl der Fruchtstände pro Fläche zu erhöhen.

2.2 Bestandteil Boden

Der zweite Wachstumsfaktor im Wirkungsdreieck von E. VON BOGUSLAWSKI ist der Boden. SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL definieren Boden wie folgt: „Ein Boden besteht aus Mineralien unterschiedlicher Art und Größe sowie organischen Stoffen, dem Humus. Minerale und Humus sind in bestimmter Weise im Raum angeordnet, bilden miteinander ein Bodengefüge mit einem bestimmten Hohlraumssystem, dieses besteht aus Poren unterschiedlicher Größe und Form, die mit Bodenlösung, d.h. Wasser mit gelösten Salzen und Gasen, und Bodenluft gefüllt sind. Ein Boden weist Horizonte auf, die oben streuähnlich sind, nach unten gesteinsähnlicher werden“ (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 1). Den Pflanzen dient der Boden als Standort, in dem sie verankert sind und dem sie zur Erhaltung ihrer Lebensfunktionen Nährstoffe, Wasser und Sauerstoff entziehen. Die Fähigkeit eines Bodens, den Pflanzen als Standort zu dienen, wird als Bodenfruchtbarkeit bezeichnet (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 1).

Von zentraler Bedeutung für diese wissenschaftliche Arbeit ist die auf teilflächen-spezifischer Basis stattfindende Untersuchung des Sachverhaltes, dass die Ertragsleistung eines Bodens als Standort für Kulturpflanzen häufig nicht mit seiner Ertragsfähigkeit in Einklang steht, „weil erstere außerdem durch zahlreiche nicht bodeneigene Faktoren wie Klima, Pflanzenart, Bodenbearbeitung, Düngung, Schädlingsbefall usw. beeinflusst wird“ (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 1). Zu welchem Anteil die Bodenfruchtbarkeit, auch das Ertragspotenzial genannt, die tatsächliche Ertragsleistung erklären und prognostizieren kann, wird auf möglichst kleinräumiger Basis mit den Hilfsmitteln der GPS-gestützten Reichsbodenschätzung (siehe Kapitel 7) und der satellitengestützten Ertragskartierung (siehe Kapitel 8) untersucht und analysiert (siehe Kapitel 9) und stellt die zentrale Aufgabenstellung dieser Dissertation dar.

VON BOGUSLAWSKI weist darauf hin, dass die Eignung eines Bodens als Pflanzenstandort v. a. von der Durchwurzelbarkeit des Bodens und der Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen abhängt (V. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 127). In Analogie zu seinem Wirkungsdreieck wird in den drei folgenden Unterkapiteln auf die drei Funktionen des Bodens als Pflanzenstandort, Wasser- und Nährstofflieferant detailliert eingegangen.

2.2.1 Boden als Pflanzenstandort

Der Begründer der deutschen Agrarwissenschaften, Albrecht Daniel Thaer, befand in seinem Werk „Grundzüge der rationellen Landwirtschaft“, dass sich die Unterscheidung in Bodenarten als Messgröße für die Qualität des Bodens eigne: „Man hat bisher die Bodenarten nach dem Grade ihrer Fruchtbarkeit, die man an ihnen bemerkte, und nach den mehr oder minder edleren Früchten, die sie reichlich zu tragen vermochten, empirisch abgebildet“ (THAER, 1821, S. 120).

Die Bodenarten begründen sich auf bestimmten Mischungsverhältnissen der Korngrößenfraktionen, die sogenannte Körnung oder Textur des Bodens. Die Bedeutung der Textur für die Fruchtbarkeit des Bodens ist schon seit Jahrhunderten bekannt (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 189). Die Körnung ist eine der wichtigsten Eigenschaften für die Ertragsfähigkeit des Bodens (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 21), denn so sind z. B. der Wasser- und Lufthaushalt entscheidend von der Textur des Bodens abhängig (MÜCKENHAUSEN, 1993,



S. 260). Auch die Durchwurzelbarkeit des Bodens wird stark von seiner Körnung beeinflusst.

Ein Boden besteht aus Bodenteilchen verschiedenster Größe. Eine grobe Untergliederung erfolgt zunächst in Feinboden und in Skelettboden. Zu dem Feinboden werden alle Bodenteilchen gezählt, die einen kleineren Durchmesser als 2 mm aufweisen. Entsprechend zählen alle Bodenteilchen mit mehr als 2 mm Durchmesser zum Bodenskelett. Der Feinboden unterteilt sich weiter in die drei Hauptkornfraktionen Sand (63-2000 μm Durchmesser), Schluff (2-63 μm) und Ton (kleiner als 2 μm).

Ist eine der drei Korngrößenfraktionen dominant im Mengenverhältnis eines Bodens, so wird dieser Boden entsprechend der vorherrschenden Korngrößengruppe Sand-, Schluff- oder Tonboden genannt. Wenn die Dominanz einer Korngrößenfraktion weniger deutlich ausfällt, wird der Name der am zweitstärksten vertretenen Gruppe dem Namen des Bodens vorangestellt, z. B. schluffiger Ton.

Ein zu großer Anteil einer Korngrößenfraktion im Mengenverhältnis eines Bodens führt oft zu negativen Auswirkungen auf die Qualität eines Bodens. Als Beispiel sei hier auf die hohe Anzahl der Grobporen in einem reinen Sandboden verwiesen. Idealerweise verteilen sich die Hauptkorngrößenfraktionen in einem für die Ertragsfähigkeit eines Bodens idealen Mengenverhältnis. Der Lehm Boden vereinigt Sand-, Schluff- und Tonanteile in einem für das Pflanzenwachstum idealen Mischungsverhältnis. Eine besonders günstige Zusammensetzung besitzt der sandige Lehm Boden mit einem Sandanteil von 50 % und einem Schluff- und Tonanteil von jeweils 25 %. Die Einstufung der einzelnen Bodenarten anhand des prozentualen Anteils von Sand, Schluff und Ton wird durch das Bodenartendiagramm in Abbildung 4 deutlich.

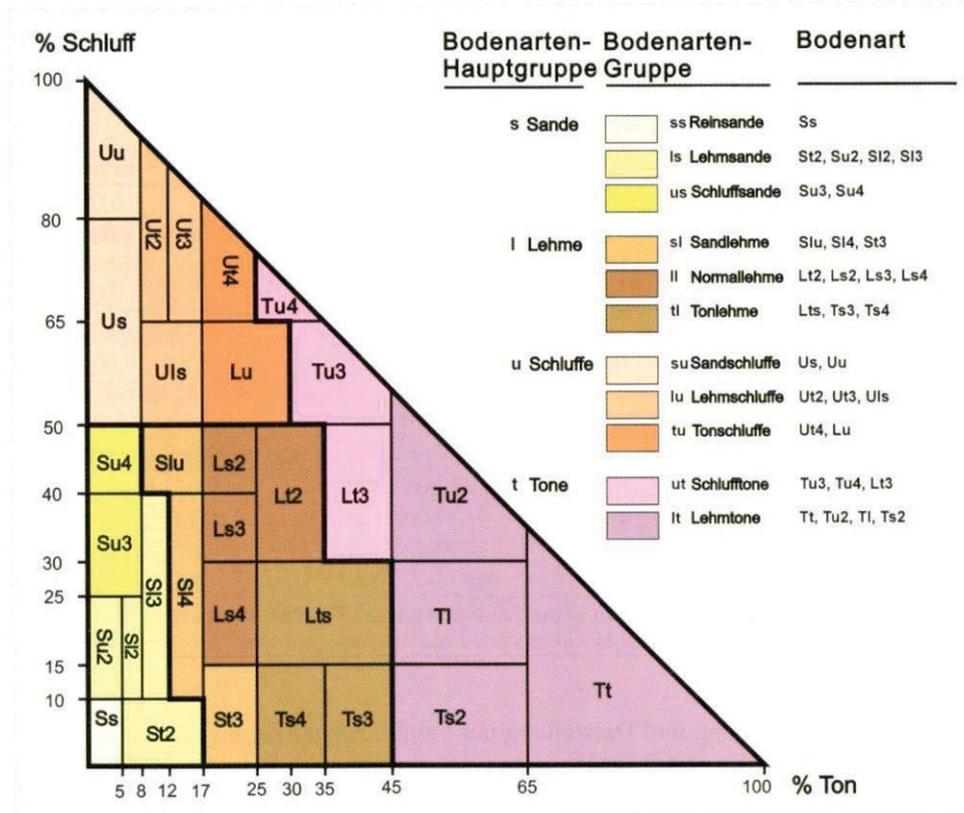


Abbildung 4: Bodenartendiagramm (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, 2005, S. 142)

Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile der wichtigsten Bodenarten unter dem Gesichtspunkt der Bodenfruchtbarkeit für den Pflanzenbau diskutiert.

Der Sandboden

Der Sandboden verfügt über ein geringes Gesamtporenvolumen, in dem die Grobporen überwiegen. Dieser Sachverhalt sorgt für einen günstigen Lufthaushalt des Bodens. Die Wasserhaltefähigkeit der Sandböden ist dagegen unterdurchschnittlich, da die Grobporen kaum in der Lage sind, das Wasser gegen die Schwerkraft in Wurzelnähe zu halten. Auch die Nährstoffkapazität ist gering und in Sandböden besteht eine große Gefahr der Nährstoffauswaschung. Aus ackerbaulicher Sicht positiv zu bewerten ist die schnelle Erwärmung und die schnelle Abtrocknung der Sandböden, was eine frühzeitige Befahrbarkeit im Frühjahr und eine generell leichte Bearbeitbarkeit der Flächen bei allen Feuchtezuständen ermöglicht. Nachteilig wirkt sich die zügige Frühjahrserwärmung der Sandböden auf den Humusgehalt aus, da auf Grund der frühzeitigen Bodenerwärmung die Bodenmikroorganismenaktivität angeregt wird, was zu einem intensiven Abbau der organischen Substanz und zu einer geringen Humusbildung führt. Zusammengefasst



verfügt der (reine) Sandboden nur über eine geringe Ertragsfähigkeit, die aber über entsprechende Düngergaben und Beregnung deutlich verbessert werden kann.

Der Tonboden

Der Tonboden entspricht hinsichtlich der wesentlichen Bodencharakteristika dem Gegenteil des Sandbodens. Er verfügt über das höchste Porenvolumen aller Bodenarten. Allerdings besteht das Porenvolumen des Tonbodens vorwiegend aus Feinporen. Dies garantiert zwar eine hohe Wasserkapazität, sorgt aber für eine eher niedrige nutzbare Feldkapazität, da das Wasser nicht für die Pflanzen verfügbar ist. Die schlechte Wasserleitfähigkeit der Tonböden verursacht häufig eine Vernässung der Böden. Bei Wasseraufnahme quillt der Boden, während sich bei Trockenheit Spaltenrisse bilden. Der geringe Anteil an Grobporen bedingt eine schlechte Durchlüftung der Tonböden. Das Ergebnis dieser bodenphysikalischen Kennwerte ist die schwere ackerbauliche Bearbeitbarkeit der Böden, die nur in einer kleinen Spanne des Feuchtezustandes überhaupt sinnvoll mechanisch zu bearbeiten sind, weswegen man sie oft als „Minutenböden“ bezeichnet. Positiv zu bewerten ist das hohe Nährstoffhaltevermögen, was die Gefahr der Nährstoffauswaschung deutlich vermindert. Auf Grund der schwierigen Bearbeitbarkeit werden die Tonböden oft als Grünland genutzt. Erst mit einer Erhöhung des Sand- und Schluffanteils gewinnt die Nutzung der (reinen) Tonböden im Ackerbau an Bedeutung.

Der Schluffboden

Der Schluffboden neigt zur Verschlämmung und zur Dichtlagerung. Infolgedessen kommt es bei Schluffböden oft zu Wasserstau und schlechter Durchlüftung des Bodens. Auch die Nährstoffversorgung der Pflanzen ist von geringer Qualität, so dass die reinen Schluffböden nur über eine geringe Ertragsfähigkeit verfügen. Die Verbreitung von Schluffböden ist in Deutschland relativ klein. Nur in den Marschen in den deutschen Küstengebieten sind sie in nennenswertem Umfang vorhanden.



Der Lehmboden

Wie oben bereits dargestellt, verfügt der Lehmboden über eine ausgewogene Mischung an Sand-, Schluff- und Tonfraktionen, die ihn zu einem Boden machen, der die positiven Eigenschaften der einzelnen Korngrößenfraktionen auf sich vereinigt und die negativen Eigenschaften mehr als kompensiert. Der hohe Anteil an Mittelporen sorgt in Lehmböden für eine gute Durchlüftung des Bodens und für einen ausgewogenen Lufthaushalt. Die günstige Porengrößenverteilung garantiert zudem eine hohe nutzbare Feldkapazität und damit eine gute Wasserversorgung der Pflanzen. Auch das Nährstoffbindungsvermögen bewegt sich bei den Lehmböden auf einem guten bis mittleren Niveau. Alle hier aufgeführten bodenkundlichen Parameter lassen den Lehmboden zur fruchtbarsten Bodenart mit der höchsten Ertragsfähigkeit aller Bodenarten werden. Innerhalb der Lehmböden ragt bezüglich der Ertragsfähigkeit noch der Lösslehm Boden heraus. Lössböden verfügen neben einem hohen Anteil an Grobschluff noch über einen 12 % - 20 %-igen Tonanteil, der die Grobschluff- und Sandteilchen zusammenklebt. Die idealen Mischungsverhältnisse an Hauptkorngrößenfraktionen finden sich in den Bodenartenausprägungen „sandiger Lehm“ und „lehmiger Sand“. Die Lehmböden sind in der BRD weit verbreitet. Gebiete, in denen die Lössböden verstärkt auftreten, werden in Süddeutschland als Gäulandschaften (Straubinger Gäuböden) und in Norddeutschland als Börden (Magdeburger Börde oder Hildesheimer Börde) bezeichnet.

Der Skelettboden

In Skelettböden treten verstärkt die Bodenteilchen mit mehr als 2 mm Durchmesser auf, was zu einer schlechten mechanischen Bearbeitbarkeit dieser Böden führt. Der Wurzelraum für Pflanzen ist auf Skelettböden gering. Zudem verfügen Skelettböden nur über ein geringes Wasser- und Nährstoffbindungsvermögen. Ihre Eignung für den Ackerbau ist deshalb sehr eingeschränkt und vielmals werden die Skelettböden als Grünland genutzt. Das Vorkommen der Skelettböden liegt v. a. in den deutschen Mittelgebirgsregionen.

In der Abbildung 5 wird die prozentuale Verteilung der einzelnen Bodentexturen auf der Fläche der alten Bundesländer aufgezeigt.

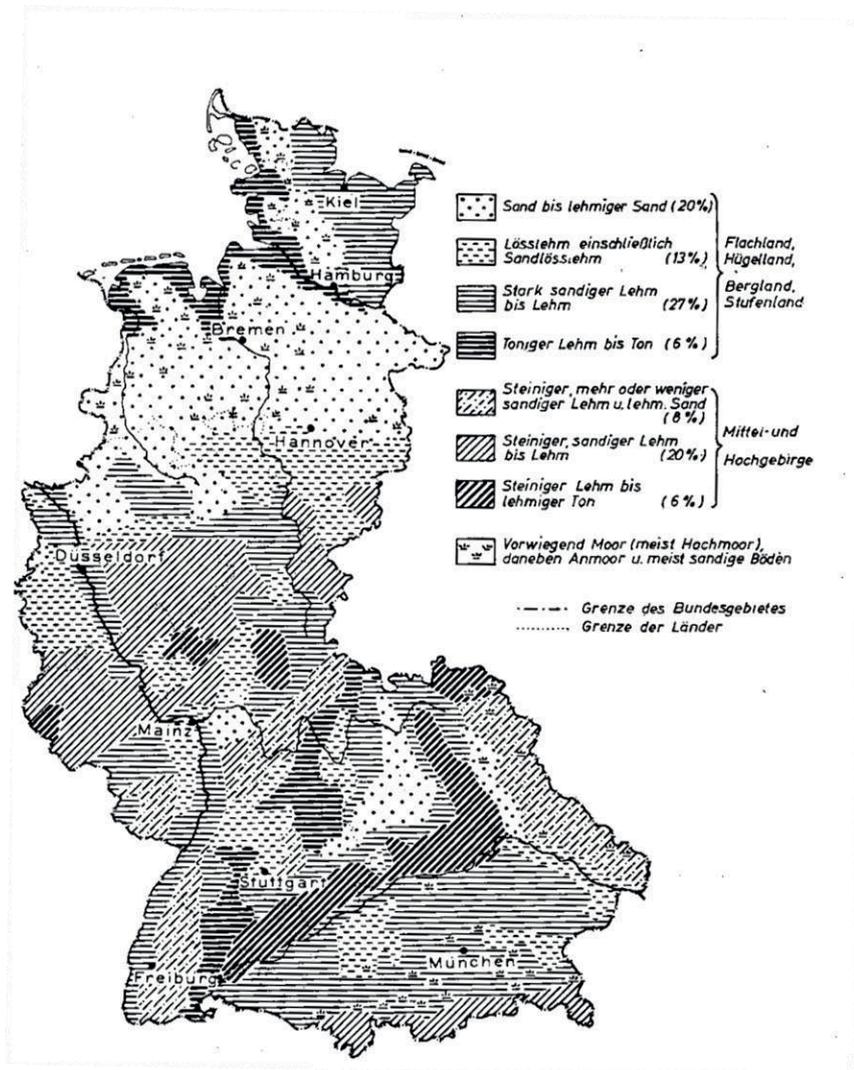


Abbildung 5: Landkarte der Bodentexturen der alten Bundesländer (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 199)

Die vorherrschende Bodenart auf den für die wissenschaftliche Fragestellung dieser Arbeit genutzten Flächen des Lehr- und Versuchsbetriebes Marienborn-Heldenbergen ist der aus Löss entstandene Lehm Boden (siehe Kapitel 7.4.2).

Die Bodenfruchtbarkeit wird allerdings nicht allein von der Textur bestimmt, sondern von folgenden Faktoren mit beeinflusst: Humusgehalt, Humusform, Basengehalt, Kationenkombination, Tonmineralgarnitur, Gefüge und bodentypische Entwicklung. Auf die Bedeutung des Bodengefüges für die Eignung des Bodens als Pflanzenstandort wird nachfolgend eingegangen.

Die Beurteilung eines Bodens als Pflanzenstandort hängt von seinem Gehalt an mittleren Poren zur Sicherstellung des Wasserhaushaltes an pflanzenverfügbarem Wasser und vom Gehalt an Grobporen zur Aufrechterhaltung eines funktionieren-



den Lufthaushalt ab. Das Bodengefüge entscheidet im Wurzelraum durch seine Porengrößenverteilung über die Wasserversorgung der Pflanze, denn aus dem Porenraum deckt die Pflanze ihren kontinuierlichen Wasserbedarf. Dieser Wasserspeicher ist umso wichtiger, je geringer und ungleichmäßiger die Niederschläge sind, die zur Auffüllung des Bodenwasserspeichers dienen (Näheres zum Bodenwasser, siehe Kapitel 2.2.2). Daraus folgt, dass ein hoher Gehalt an Mittelporen umso wichtiger ist, je trockener die klimatischen Bedingungen sind. Umgekehrt gewinnt der Anteil an Grobporen zur guten Durchlüftung umso mehr an Bedeutung, je feuchter die klimatischen Verhältnisse sind. Auch Böden mit Grund- bzw. Stauwassereinfluss und Beregnungsflächen sind zur Vermeidung von Luftmangel auf einen entsprechenden Anteil von Grobporen angewiesen. Demgegenüber steht die Bedeutung der Feinporen zurück, da das in den Feinporen gehaltene Wasser nicht für die Pflanzen verfügbar ist. Lössböden besitzen ein ausgezeichnetes Mischungsverhältnis mit genügend Grob- und Mittelporen. Die ideale Kombination von Grob- und Mittelporen findet man in der Schwarzerde vor, was sich auch in den hohen Wertzahlen in der Reichsbodenschätzung (RBS) von 90 - 100 widerspiegelt.

Aus ackerbaulicher Sicht und der Zielsetzung der Maximierung des pflanzlichen Ertrags muss das Bodengefüge angestrebt werden, das optimal zu der auf Grund der zu erwartenden Witterungsverläufe sich ergebenden Wasserhaushaltssituation passt.

Ein wichtiger Einflussfaktor auf das Bodengefüge sind die angebauten Kulturpflanzen. Die einzelnen Pflanzenarten wirken durch ihre pflanzenphysiologischen Besonderheiten, hier besonders durch die Form der Durchwurzelung und dem jahreszeitlichen Verlauf des Bewuchses des Bodens, verschiedenartig auf den Boden ein. Die günstigste Wirkung auf das Bodengefüge besitzen die Gräser. Sie durchwurzeln die obersten 5 – 10 cm sehr intensiv, hinterlassen eine hohe Menge organischer Substanz und verursachen dadurch eine starke biologische Aktivität. Der Raps erzeugt im Vergleich zu den Gräsern weniger organische Masse, sorgt aber mit seiner zügigen und intensiven Durchwurzelung des Bodens für eine schnelle Bodengefügeverbesserung. Demgegenüber verbessern die Getreidepflanzen das Bodengefüge nicht, da sie zum einen die Bodenoberfläche schlecht abdecken und zum anderen durchwurzeln sie die Ackerkrume und weniger die



tieferen Bodenschichten. Eine noch schlechtere Wirkung auf das Bodengefüge haben die Hackfrüchte, die auf Grund ihres späten Vegetationsbeginns den Boden noch mehr dem Regen und der Strahlung aussetzen und auch nur über eine geringe Durchwurzelungsintensität verfügen.

Anhand dieser Beispiele wird die Bedeutung der Bodenbedeckung deutlich. Eine flächenhafte Bodenbedeckung verhindert die Zerstörung von Bodenaggregaten durch aufschlagenden Regen.

Die Durchwurzelbarkeit des Bodens ist einer der wesentlichsten Faktoren für die Ertragsfähigkeit von Böden. Fördernd auf die Durchwurzelung des Bodens wirkt ein nicht zu hoher mechanischer Widerstand für die Wurzeln. Zudem sorgt ein funktionierender Gasaustausch dafür, dass der O₂-Bedarf der Pflanzen gedeckt wird und das bodenbürtige CO₂ abtransportiert wird. Demgegenüber stehen mehrere Faktoren, die die Durchwurzelung des Bodens hemmen, wie z.B. toxische Stoffe oder Festgestein. Vor allem in Tonböden tritt zuweilen Luftmangel infolge Vernässung oder hoher Lagerungsdichte auf, der den Gasaustausch behindert.

2.2.2 Boden als Wasserlieferant

Die herausragende Bedeutung des Bodenwassers für den Pflanzenstandort formuliert Mückenhausen: „Ökologisch ist es der wichtigste Faktor des Pflanzenstandortes, indem es der Pflanze das Leben schlechthin ermöglicht und ihr die benötigten Nährstoffe übermittelt“ (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 305). Auch v. BOGUSLAWSKI verweist auf die zentrale Rolle des Bodenwassers für die Ertragsbildung der Pflanzen (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 128). MÜCKENHAUSEN definiert das Bodenwasser als „der flüssige Anteil des Dreiphasen-Systems Boden“ (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 305) und unterteilt es in die drei Gruppen Oberflächenwasser, Sicker- und Sinkwasser sowie Haftwasser (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 306 ff.), wobei das Haftwasser nochmals in Adsorptionswasser, osmotisches Wasser, Kapillarwasser, stehendes Kapillarwasser, Grundwasser, Stauwasser und Wasserdampf untergliedert wird. EHLERS wählt eine Aufteilung des Bodenwassers aus Sicht der Verfügbarkeit des Wassers für die Pflanze, indem er Gravitationswasser, pflanzenverfügbares Wasser und Totwasser unterscheidet (EHLERS, 1996, S. 39).

Der erstgenannten Definition nach zählt das Oberflächenwasser zum Bodenwasser. Es entsteht, wenn durch Regen mehr Wasser der Bodenoberfläche zugeführt wird, als der Boden aufnehmen kann. Dieses überschüssige Wasser fließt oberirdisch ab (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 171). Die Menge des Oberflächenwassers hängt von der Intensität des Niederschlagsereignisses (Niederschlagsdichte) einerseits und der Hangneigung, der Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens und der bereits erfolgten Verschlammung des Bodens andererseits ab. Aus ackerbaulicher Sicht ist das Oberflächenwasser negativ zu bewerten, da es zu einer Verschlammung des Bodens und zu Bodenerosion führen kann (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 306). Das Oberflächenwasser ist als die Restgröße des Niederschlags anzusehen, die nicht in den Boden aufgenommen werden kann. In Abhängigkeit der oben genannten Einflussfaktoren dringt zunächst ein Teil des Regenwassers in den Boden ein, wobei zwischen Sickerwasser und Sinkwasser unterschieden wird.

Das Sickerwasser gelangt in den engeren Hohlräumen des Bodens, den sogenannten langsam dränenden Poren, in den Bodenraum. Der Vorgang der Versickerung wird auch Infiltration genannt. Dementsprechend bezeichnet man die maximal mögliche Aufnahmemenge eines Bodens als Infiltrationsrate. Die Wasseraufnahme eines Bodens über die weiteren Hohlräume, die schnell dränenden Poren, heißt Infiltration („Wasserverschlucken“), und das so abfließende Wasser wird als Sinkwasser bezeichnet (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 306).

Der dritte Bestandteil des Bodenwassers ist das Haftwasser. Nach Mückenhausen versteht man darunter den Anteil des Bodenwassers, „der vom Boden durch Adsorptions- und Kapillarkräfte sowie durch osmotische Kräfte gegen die Schwerkraft festgehalten wird“ (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 306). Nach Maßgabe dieser Definition unterteilt sich das Haftwasser in verschiedene Ausprägungen. Das Adsorptionswasser umhüllt die festen Bodenteilchen, ohne dabei Menisken zu bilden. Die Bindung der Wassermoleküle an die Bodenteilchen steigt mit zunehmender spezifischer Oberfläche der Bodenteilchen, die wiederum mit abnehmender Korngröße zunimmt. Dies ist auch die Erklärung für die gute Wasserhaltefähigkeit tonreicher – und damit über viele kleine Bodenteilchen verfügender – Böden. Zum Adsorptionswasser hinzugezählt wird oftmals das osmo-



tische Wasser, das den Anteil des Adsorptionswassers umschreibt, der den Bodenteilchen durch Diffusion zugeführt wird (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 306-307).

Im Gegensatz zum Adsorptionswasser wird das Kapillarwasser durch Bildung von Menisken im Boden gehalten. Diese Menisken werden zum einen durch Adhäsionskräfte zwischen der Bodenteilchenoberfläche und den Wassermolekülen und andererseits durch Kohäsionskräfte zwischen den Wassermolekülen gebildet. Mit abnehmendem Durchmesser der Bodenporen muss immer mehr Energie aufgewendet werden, um die Wassermoleküle aus ihren Bindungen herauslösen zu können, und ab einem Porendurchmesser von $0,2 \mu\text{m}$ und kleiner ist das Kapillarwasser nicht mehr pflanzenverfügbar (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 308). Eine Sonderform des Kapillarwassers stellt das stehende Kapillarwasser dar. Darunter wird das von der Grundwasseroberfläche durch Adhäsions- und Kapillarkräfte aufsteigende Bodenwasser verstanden.

Die allgemein bekannteste Form des Bodenwassers stellt das Grundwasser dar. Unter dem Grundwasser versteht man das Sickerwasser, das auf einer undurchlässigen Schicht des Untergrundes gestaut wird, die tiefer als 1,5 m unter Flur liegt. In der Schicht des Grundwassers sind alle Hohlräume mit Wasser gefüllt. Die obere Begrenzung des Grundwassers, die Grundwasseroberfläche, unterliegt einem jahreszeitlichen Gang. Im Winter und im Frühjahr steht das Grundwasser hoch, während es im Sommer und im Herbst in Abhängigkeit der Niederschlagsmenge, der Verdunstung und des Abflusses mehr oder weniger tiefer steht (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 309-310). Bei grundwasserbeeinflussten Böden wird das Grundwasser zur Berechnung des pflanzenverfügbaren Wassers herangezogen.

Vom Grundwasser unterscheidet sich das Stauwasser dadurch, dass sich die undurchlässige Schicht, auf der sich das Stauwasser ansammelt, nicht tiefer als 1,5 m unter der Bodenoberfläche befindet. Das Stauwasser füllt also recht oberflächennah alle Poren aus, was dazu führt, dass es zumeist im Sommer durch Verdunstung verschwindet (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 310-311).

Zur Verdeutlichung des Bodenwasserhaushaltes als ein Regelsystem wird die Wasserhaushaltsgleichung verwendet. Sie hat folgendes Aussehen:



$$N = E + I + T + S + A + \Delta R \text{ (mm)}$$

Darin sind:

N	Niederschlag
E	Evaporation
I	Interzeption
T	Transpiration
S	Sickerwasserspende
A	Oberflächenabfluss
ΔR	Änderung des im Boden gespeicherten Wasservorrates

Quelle: EHLERS, 1996, S.28

Die Wasserhaushaltsgleichung dient dazu, die Veränderung des Bodenwasservorrates in Abhängigkeit des Niederschlages unter Berücksichtigung der in der Formel aufgeführten Faktoren zu quantifizieren. Es wird hierbei angenommen, dass die Pflanzen mit ihrem Wasserbedarf bevorzugt bedient werden. Der Bodenwasserhaushalt unterliegt einem charakteristischen jahreszeitlichen Verlauf, der sich durch den Einfluss der Witterung und die jahreszeitlich wechselnde Stoffwechselintensität der Pflanzen ergibt (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S.191). In dem in Deutschland vorherrschenden gemäßigt-humiden Klima wird über den Zeitraum der Vegetationspause das Wasserhaltevolumen des Bodens aufgefüllt. Ab April und Mai wird v. a. das in der obersten Bodenschicht gespeicherte Wasser durch den Vegetationsbeginn der Pflanzen und die dabei erfolgende Transpiration verbraucht. Die ansteigenden Temperaturen führen zu einer erhöhten Evaporation des Bodens, was sich auch in sinkenden Bodenwassergehalten ausdrückt (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 193). Über das gesamte Jahr betrachtet, fallen im gemäßigt-humiden Klima durch Niederschläge mehr Wassermengen an, als unter den gegebenen klimatischen Bedingungen verdunstet werden können. Daraus ergibt sich v. a. im Winterhalbjahr ein Wasserüberschuss, der die Evapotranspirationsverluste in der Vegetationszeit der Pflanzenbestände wieder ausgleicht, so dass die Feldkapazität des Bodens zu Beginn der Vegetationsperiode im Frühjahr wieder aufgefüllt ist (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 195).



Ein bestimmter Anteil des Bodenwassers folgt nicht der Schwerkraft und versickert im Boden, sondern wird durch eine mehr oder weniger große Wasser- spannung im Boden gehalten. Diese Saugspannung wird von der Oberfläche der Bodenteilchen ausgeübt und nimmt mit zunehmender Annäherung an diese zu (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 312). Gemessen wird die Wasser- spannung in cm Wassersäule. Um den großen Saugspannungsbereich besser darstellbar zu machen, verwendet man die Messgröße pF. Der pF-Wert stellt den dekadischen Logarithmus der cm Wassersäule dar (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 313). Der Name pF-Wert leitet sich von den Begriffen p von Potenzial und F für freie Energie des Wassers ab (SCHOFIELD, 1935, S. 37-48).

Die Wasser- spannung ist abhängig vom Wassergehalt des Bodens. Die Beziehung zwischen Wasser- spannung und Wassergehalt des Bodens wird durch die sogenannte pF-Kurve dargestellt. Verdeutlicht werden sollen Gestalt und Form der pF-Kurve anhand der Abbildung 6 (EHLERS, 1996, S. 38).

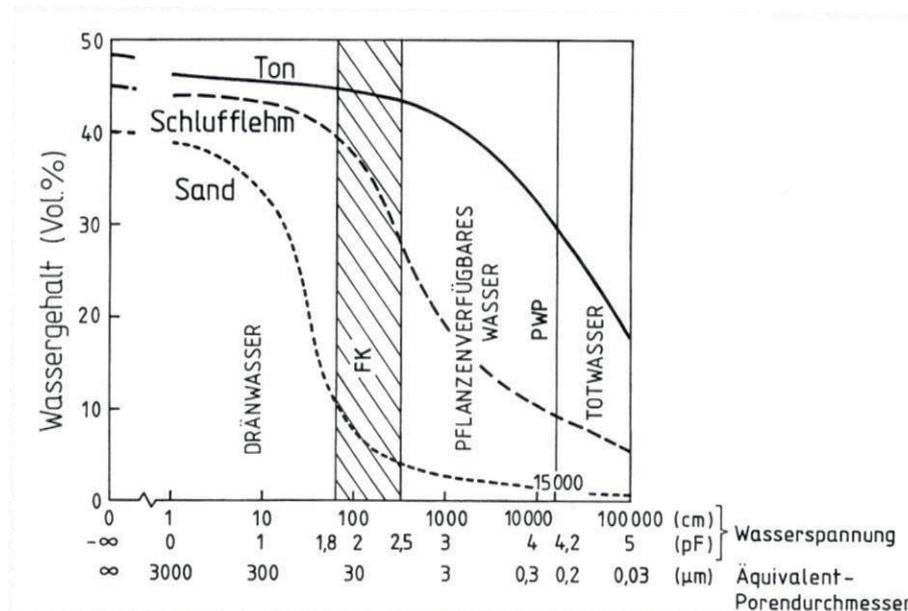


Abbildung 6: pF-Kurven verschiedener Bodenarten (EHLERS, 1996, S. 38)

Auf den Koordinatenachsen sind verschiedene Wasser- spannungen mit den Einhei- ten cm Wassersäule, pF-Wert, Äquivalentporendurchmesser sowie Wassergehalte in Prozent abgetragen. Innerhalb der Graphik sind die Verläufe der pF-Kurven verschiedener Bodenarten eingezeichnet. Anhand des Verlaufes der pF-Kurven kann man mit Hilfe der abgetragenen Äquivalentporendurchmesser erkennen, bei

welchen Porengrößenklassen die einzelnen Bodenarten entwässern. Damit können auch Rückschlüsse auf die Anteile einzelner Porengrößenklassen in den einzelnen Bodenarten gezogen werden. So entwässert der Sandboden v. a. im Bereich der Grobporen schon bei einem pF-Wert von 1 bis 1,8. Der Schlufflehm verfügt dagegen über einen hohen Anteil an Mittelporen, die bei pF-Werten zwischen 2 und 3 das Wasser abgeben. Die Tonböden verfügen über relativ viele Feinporen, in denen auf Grund des geringen Durchmessers der Poren eine große Anziehungskraft der Bodenteilchen auf das Wasser gegeben ist. Dadurch entwässert der Tonboden erst bei relativ hohen Wasserspannungen.

In der Abbildung 6 sind zwei Kardinalpunkte des pflanzenverfügbaren Bodenwassers eingezeichnet: die Feldkapazität (FK) und der Permanente Welkepunkt (PWP). MÜCKENHAUSEN definiert die Feldkapazität als „die Wassermenge (Gew-% oder Vol-%), die ein natürlich gelagerter Boden mit freiem Wasserabzug zwei Tage nach längerer Regenperiode oder nach ausreichender Beregnung gegen die Schwerkraft speichern kann. Diesem Wassergehalt entspricht ein pF zwischen 1,8 und 2,5“ (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 313-314). Der permanente Welkepunkt entspricht dem Wasserzustand des Bodens, an dem dieser nur noch das Bodenwasser enthält, das mit höherer Saugspannung im Boden gebunden wird, als es die Pflanzen entfalten können, es also zu irreversiblen Welken der Pflanze kommt (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 316). In der Abbildung 6 kann anhand der Differenz der Schnittpunkte der pF-Kurven mit den eingezeichneten Geraden des PWP und der FK für jede Bodenart an der Ordinate die Menge des pflanzenverfügbaren Wassers in der Dimension Vol% abgelesen werden. In Zahleneinheiten entspricht dies der Größe mm gespeichertes Wasser pro dm Bodentiefe des Bodenprofils (EHLERS, 1996, S. 39).

Die Höhe der Feldkapazität ist von mehreren Faktoren abhängig. So nimmt zunächst die Körnung Einfluss auf die FK, denn mit zunehmender Feinkörnigkeit vergrößert sich die absorbierende Oberfläche für Wasser. Die FK erhöht sich mit zunehmendem Anteil an Feinporen, die Kapillarwasser enthalten (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 314). Dieser Sachverhalt wird auch in der Abbildung 6 dargestellt, in der die pF-Kurve des feinkörnigen und feinporenenrichen Tons oberhalb der pF-Kurven für Schlufflehm und Sand verläuft. Die ackerbauliche Vorzüglichkeit des Schlufflehms gegenüber dem Ton ergibt sich aus der größeren Wasserka-



pazität, die für die Pflanze nutzbar ist. Die Pflanzen vermögen nur das Wasser aufzunehmen, das mit einer geringeren Saugspannung als $pF = 4,2$ gebunden ist. Zieht man dieses für die Pflanzen nicht verfügbare Wasser von der FK ab, erhält man die sogenannte nutzbare Feldkapazität (nFK).

Abbildung 7 verdeutlicht den Sachverhalt, dass mit zunehmendem Tongehalt zwar die FK bis zu einem Maximalwert ansteigt und dann stagniert, aber der kontinuierliche Anstieg des Verlaufes des permanenten Welkepunktes und die sich dadurch vergrößernde Menge des für die Pflanze nicht verfügbaren „Totwassers“ dazu führen, dass im Bereich des Schlufflehms das Maximum an pflanzenverfügbarem Wasser erreicht wird (EHLERS, 1996, S. 27).

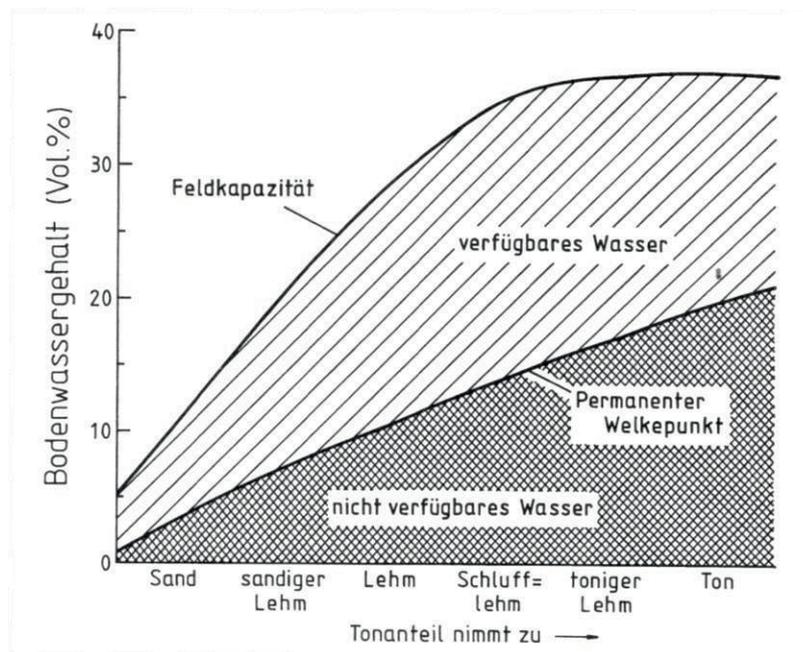


Abbildung 7: Verhältnis von Feldkapazität und Permanenten Welkepunkt (EHLERS, 1996, S. 27)

Die Bodenkenngröße der nFK ist ein wesentlicher Faktor zur Beurteilung der Ertragsfähigkeit eines Bodens (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 197). Zur Quantifizierung dieser ertragsbeeinflussenden Komponente – auch im Hinblick auf die sich kleinräumig ändernden Verfügbarkeiten an Bodenwasser – wird folgende Formel zur Berechnung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers (W_{pfl}) genutzt (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 197):

$$W_{pfl}(mm) = FK(mm/dm) - PWP(mm/dm) * Wz_{reff}(dm)$$



Darin sind:

- W_{pfl} pflanzenverfügbares Bodenwasser (in mm)
- FK Feldkapazität (in mm/dm)
- PWP permanenter Welkepunkt (in mm/dm)
- Wzr_{eff} effektive Durchwurzelungstiefe (in dm)

Durch den bereits definierten Begriff der nutzbaren Feldkapazität (nFK) lässt sich die Formel verkürzt darstellen:

$$W_{pfl} = nFK * Wzr_{eff}$$

Es sei darauf hingewiesen, dass diese Formel nur auf grundwasserunbeeinflussten Böden zutrifft. Bei Ackerböden mit Grundwasseranschluss wird zur Berechnung der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge eine von der Bodenart abhängige tägliche Wasseraufstiegsrate mit der Dauer der Hauptwachstumsphase (in Tagen) multipliziert und zur nFK des effektiven Wurzelraumes hinzuaddiert.

Die nutzbaren Feldkapazitäten und der effektive Wurzelraum sind stark von der vorherrschenden Bodenart abhängig (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 199). In der Tabelle 1 sind der effektive Wurzelraum und die pflanzenverfügbare Bodenwassermenge der einzelnen Bodenarten aufgeführt (RENGER / STREBEL, 1980, S. 572 ff.).

Bodenart	Wzr_{eff} cm	nFK $cm^3 cm^{-3}$	W_{pfl} mm
Grobsand	50	0,06	30
Mittelsand	60	0,09	54
Feinsand	70	0,12	84
lehmiger Sand	75	0,16	120
schluffiger Sand	80	0,18	144
Schluff	100	0,25	250
stark lehmiger Schluff	110	0,21	231
sandiger Lehm	100	0,17	170
schluffiger Lehm	110	0,19	209
toniger Lehm	110	0,15	165
lehmiger Ton	100	0,14	140
schluffiger Ton	100	0,14	140

Tabelle 1: Effektiver Wurzelraum (Wzr_{eff}), nutzbare Feldkapazität (nFK) und Menge an pflanzenverfügbarem Wasser im durchwurzelten Bodenprofil (W_{pfl}) (EHLERS, 1996, S. 117)



Zusätzlich wurde in einer eigenen Tabelle die nFK / dm berechnet, um einen Anhaltspunkt für die Wasserhaltefähigkeit der einzelnen Bodenarten unabhängig von der tatsächlichen Durchwurzelungstiefe aufzuzeigen.

Ob die maximal mögliche pflanzenverfügbare Bodenwassermenge erreicht wird, ist zum einen von der Lagerungsdichte des Bodens abhängig. Die Werte der Tabelle 1 gehen von einer mittleren Lagerungsdichte aus. Bei verdichteten Böden verringert sich die nFK (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 199).

Anhand der Formel auf der vorherigen Seite ist die Abhängigkeit der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge von der tatsächlichen Durchwurzelungstiefe zu erkennen. Diese ist stark beeinflusst von der angebauten Pflanzenart und auch wiederum von der Lagerungsdichte des Bodens (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 199). Ein verdichteter Boden erzeugt durch einen erhöhten mechanischen Widerstand und eine unzureichende Sauerstoffversorgung ein gebremstes Tiefenwachstum und eine eingeschränkte Stoffwechselaktivität der Wurzeln und vermindert dadurch die Durchwurzelung des Bodens und damit den effektiven Wurzelraum (BOONE, 1988 aus EHLERS, 1996, S. 219).

Die Verwendung der nFK als Rechengröße ist nur zulässig, wenn die Feldkapazität zu Beginn der Vegetationsperiode aufgefüllt worden ist. Im gemäßigt-humiden Klima in Mitteleuropa ist davon in den allermeisten Jahren auszugehen (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 199).

Der Feldkapazität des Bodens als Maßeinheit zur Quantifizierung des Wasserhaltevermögens stehen auf der rechten Seite der Wasserhaushaltsgleichung mehrere Komponenten des Wasserverbrauchs gegenüber. Eine dieser Ausgabegrößen, die zu einer Abnahme des Wassergehaltes des Bodens führen, ist die Evaporation (EHLERS, 1996, S. 51). Man bezeichnet die Evaporation auch als die „unproduktive Verdunstung des Bodens“, weil im Gegensatz zur Blatttranspiration mit diesem Wasserverbrauch keine Nettoproduktivität einhergeht (EHLERS, 1996, S. 51). Als Evaporation definiert man den Prozess des Heraustretens und des Übergangs des Bodenwassers aus dem feuchten Boden an oder nahe der Bodenoberfläche von der flüssigen Phase in die Dampfphase. Sobald ein Dampfdruckdefizit entsteht, diffundieren die Wasserdampfmoleküle von der Bodenoberfläche hinweg in die Umgebungsluft. Die Grundvoraussetzungen zur



Entstehung von Evaporation sind das Vorhandensein von Energie, Sättigungsdefizit und Konvektion. Zudem spielt zu einem geringen Teil die Oberflächenbeschaffenheit des Bodens eine Rolle (EHLERS, 1996, S. 51).

Auf einem mit einem Pflanzenbestand bewachsenen Boden vollzieht sich die Evaporation gleichzeitig mit der Transpiration, der produktiven Verdunstung der Pflanzen. Da diese beiden Größen nur schlecht zu trennen sind, werden sie häufig unter dem Begriff der Evapotranspiration zusammengefasst (EHLERS, 1996, S. 28).

Durch die Transpiration der Pflanze entsteht ein Potenzialgefälle zwischen dem Wasser im Boden und dem in der Pflanze. Bei ausreichender Wasserversorgung entscheidet v. a. die Höhe der potenziellen Evapotranspiration (ET_p) über die Menge der Wasseraufnahme durch die Pflanze (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 201). SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL verstehen unter potenzieller Evapotranspiration „die auf Grund der Sonneneinstrahlung, der Temperatur und der Windgeschwindigkeit maximal mögliche Evapotranspiration einer kurz geschnittenen dichten Pflanzendecke (Rasen), bei der der Wassernachschub niemals als begrenzender Faktor auftritt“ (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 201).

Sobald aber die Wasserspannung des Bodens auf Grund des sinkenden Bodenwassergehaltes nachlässt, bleibt die Wasseraufnahme der Pflanze hinter der potenziellen Evapotranspiration zurück. Daraufhin schränkt die Pflanze ihre Transpiration ein und der verbleibende geringere Wasserverdunstungswert wird als aktuelle Evapotranspiration bezeichnet. Unter der Voraussetzung einer ausreichenden Bodenfeuchte, die eine Evaporationsrate gemäß des Verdunstungsanspruchs der Atmosphäre sicherstellt, kann mit klimatisch ermittelten Raten der potenziellen Evapotranspiration eine Abnahme des Bodenwasservorrates berechnet werden. Diese Überlegungen stellen den Kern der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) dar, die zusammen mit der quantitativen Darstellung der Evapotranspiration anhand von Berechnungsformeln in Kapitel 2.4.3 erläutert wird.



2.2.3 Boden als Nährstofflieferant

Die Ertragsstärke eines Standortes hängt entscheidend von seiner Fähigkeit ab, über Austauschvorgänge Nährstoffe für die Pflanzen verfügbar zu machen (GEISLER, 1988, S. 160).

Der natürliche Gehalt an mineralischen Nährstoffen im Boden entstammt dem Ausgangsgestein des Bodens und ist durch Verwitterungsprozesse entstanden (GEISLER, 1988, S. 158). Die Bodenart bestimmt in großem Maß darüber, welche Nährstoffe naturgegeben vorhanden sind und auf welche Art und Weise und in welcher Menge diese Nährstoffe in eine Form transformiert werden können, die für die Pflanzenwurzel aufnehmbar ist. Eine wichtige Rolle ist in diesem Zusammenhang dem Medium Wasser beizumessen, das entscheidenden Einfluss auf diese biochemischen Vorgänge nimmt.

Die Ertragsleistung eines Pflanzenbestandes ist sehr stark auf eine optimale Versorgung mit den für den Aufbau der vegetativen und generativen Organe benötigten Nährstoffen über die gesamte Vegetationsperiode hinweg angewiesen. Als lebensnotwendig für die Ernährung der Pflanze gelten jene Nährstoffe, die nicht durch andere ersetzbar sind. Hinsichtlich ihres mengenmäßigen Bedarfs unterscheidet man Makro- und Mikronährstoffe (GEISLER, 1988, S. 150).

Die Pflanze bezieht alle benötigten Nährstoffe aus dem Boden. Pflanzenverfügbar sind diese Nährelemente nur dann, wenn die Minerale gelöst in der Bodenlösung vorliegen und über spezifische Aufnahmeprozesse von der Pflanzenwurzel aufgenommen werden können.

Neben dem nativen Anteil der Bodennährstoffe sind als weitere Quellen der Nährstoffzufuhr die organische und die mineralische Düngung, die Atmosphäre und das Grundwasser zu nennen (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 221).

Einen zentralen Stellenwert innerhalb der Bodennährstoffe besitzen die leicht für die Pflanze verfügbaren Nährstoffe, da sie sich unmittelbar auf die Bodenfruchtbarkeit auswirken (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 222).

Mit Hilfe von Nährstoffbilanzen gewinnt man einen Überblick über Nährstoffentzüge und –zufuhren. Der kalkulierbare Anteil der Nährstoffentzüge des Bodens wird durch die Nährstoffaufnahme der Pflanze und die Abfuhr der Ernteprodukte



gebildet. Die Höhe dieser Entzüge ist abhängig von der angebauten Pflanzenart, der Pflanzensorte, dem Ertrag und dem Nährstoffgehalt des Erntegutes (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 222). Als Richtgröße zur Kalkulation der Nährstoffentzüge bei der Aufstellung von Nährstoffbilanzen und Düngungsmaßnahmen dienen Tabellen, die den normativen Nährstoffentzug von Pflanzen anzeigen. Den nichtkalkulierbaren Anteil der Nährstoffentzüge bilden die Nährstoffverluste durch Auswaschung ins Grundwasser oder Verflüchtigung in die Atmosphäre.

Nur ein kleiner Teil der im Boden vorhandenen Nährstoffe ist für die Pflanzen verfügbar. Folgende Faktoren beeinflussen die Verfügbarkeit eines Nährstoffes für die Pflanze:

- Konzentration in der Bodenlösung
- Vorrat im Wurzelraum
- Nachlieferungsrate in die Bodenlösung
- Transportrate an die Pflanzenwurzel
- Wurzeldichte
- Wurzelausscheidungen
- Mikrobielle Aktivität in der Rhizosphäre (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 224)

Da die Pflanzen aus dem Boden nur die Nährstoffe aufnehmen können, die in gelöster Form vorliegen, stellt die Nährstoffkonzentration der Bodenlösung einen wichtigen Indikator für das Nährstoffaufnahmepotenzial einer Pflanze an einem bestimmten Standort dar. Man nennt dies die Nährstoffintensität. Addiert man zur Nährstoffintensität noch die innerhalb eines Jahres aus der festen Phase nachlieferbaren Nährstoffe hinzu, erhält man die Nährstoffquantität. Erweitert man den Nachlieferungszeitraum auf 3 - 5 Jahre, spricht man von der Nährstoffkapazität eines Bodens (SCHILLING, 2000, S. 252).

Die Nährstoffkonzentration innerhalb des Bodenprofils kann auf Grund von durch Grund- oder Sinkwasser ausgelösten Verlagerungsprozessen und der Nährstoffaufnahme der Pflanzen starken Schwankungen unterliegen. Die Nährstoffrekrutierung der Pflanzen beschränkt sich hierbei nicht nur auf den Oberboden, sondern



bezieht auch den Unterboden mit ein (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 224-225).

Kurzfristig verfügbar für die Pflanze ist nur der Anteil des Nährstoffvorrates, der mit der Bodenlösung in einem Gleichgewicht steht. Im Gegensatz dazu sind die in der organischen Substanz gebundenen Nährstoffe erst nach dem mikrobiellen Abbau pflanzenverfügbar.

Die Pflanze nimmt die Bodennährstoffe über ihre Wurzeloberfläche auf. Es existieren zwei Verfahren der Nährstoffaufnahme: die Interzeption und der Transport der gelösten Nährstoffe in der Bodenlösung zur Wurzel hin. In beiden Fällen wirkt sich eine gute Durchwurzelung des Bodens positiv auf das Nährstoffaneignungsvermögen der Pflanze aus. Unter Interzeption wird das aktive Hinwachsen der Wurzel zu den Nährstoffteilchen verstanden (SCHILLING, 2000, S. 248). Es ist unmittelbar ersichtlich, dass ein dichteres Wurzelwerk die Wahrscheinlichkeit erhöht, im Boden vorliegende Nährstoffvorkommen aufzufinden. So weist GEISLER darauf hin, dass „die ständige Verlagerung von aktiv aufnehmender Wurzeloberfläche innerhalb des Bodens von wesentlicher Bedeutung“ für die Nährstoffaufnahme der Pflanzen sei (GEISLER, 1988, S. 161).

Auch der Transport der Nährstoffe zur Wurzel gelingt umso effektiver, je kürzer die dabei zu überwindenden Entfernungen sind. Beim Transport der Nährstoffe zur Wurzel hin werden zwei Verfahren unterschieden: der Massenfluss und die Diffusion (SCHILLING, 2000, S. 249).

Der Massenfluss stellt eine Bewegung der Bodenlösung einschließlich der Nährstoffe zur Pflanzenwurzel hin dar. Diese Bewegung wird durch einen Gradienten in der Wasserspannung ausgelöst, der durch die transpirationsbedingte Wasserentnahme der Pflanzenwurzel entsteht. Die Transportrate der Bodennährstoffe durch den Wasserfluss wird also durch die Transpiration der Pflanze und deren Einfluss auf die Wasserflussrate entscheidend bestimmt. Des Weiteren hängt die Transportleistung des Massenflusses vom Nährstoffgehalt der Bodenlösung und vom Wassergehalt sowie der Porengrößenverteilung des Bodens ab.

Das zweite Nährstofftransportverfahren, die Diffusion, tritt verstärkt in Erscheinung, wenn der Nährstoffbedarf der Wurzel durch den Massenfluss nicht gedeckt werden kann (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 225-226).

Eine herausragende Stellung innerhalb der Nährstoffversorgung von landwirtschaftlichen Kulturpflanzenbeständen nimmt die N-Düngung ein, die durch einige Besonderheiten geprägt ist. Stickstoff ist der Pflanzennährstoff, der den Ertrag der Pflanze am meisten bestimmt. Er ist von daher auch das Nährelement, von dem die Pflanze in der absoluten Höhe am meisten benötigt, zumal der N-Gehalt der Ausgangsgesteine der Böden sehr gering ist. Er unterliegt im Boden vielfachen Umwandlungen und besitzt auf Grund des geringen N-Bevorratungsvermögens der Böden ein hohes Risiko der Auswaschung in tiefere Bodenschichten und das Grundwasser (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 259).

Einen Überblick über Quellen, Umwandlungen und Wirkungen des N innerhalb eines N-Kreislaufes in landwirtschaftlich genutzten Böden bietet Abbildung 8 (SCHILLING, 2000, S. 257).

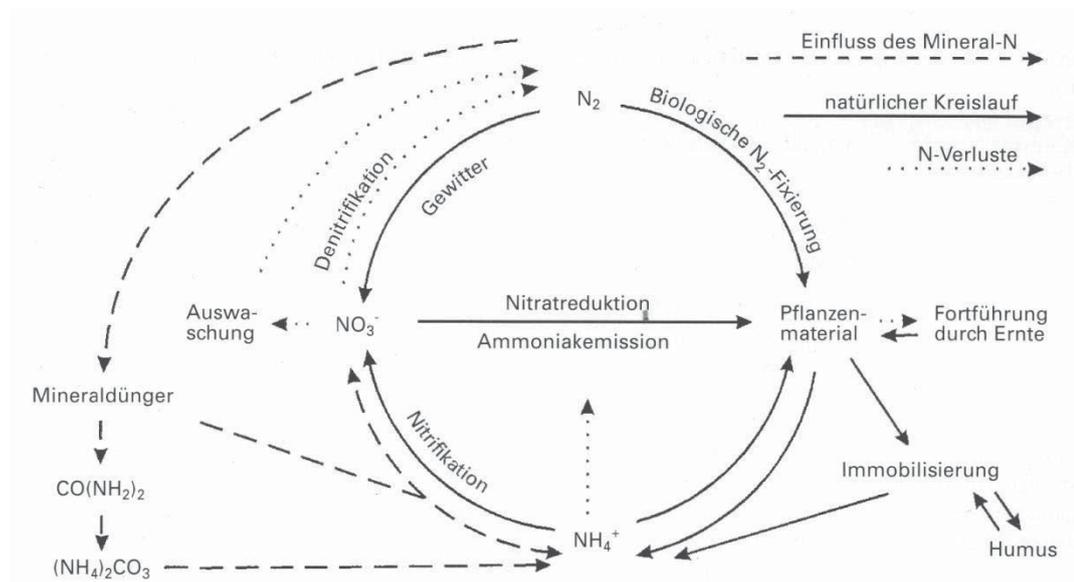


Abbildung 8: Der Stickstoff-Kreislauf (SCHILLING, 2000, S. 257)

Die N-Auswaschung ist abhängig von Klima und Bodenverhältnissen, aber auch von beeinflussbaren Faktoren, wie der Art und Intensität der Bodennutzung, wie angebaute Kultur, Bodenbearbeitung und Aufbau und Umfang der organischen und mineralischen Düngung (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 270).



So sollte neben der Anwendung der N_{\min} -Methode und der Aufteilung der N-Düngung auf mehrere Gaben darauf geachtet werden, dass der Nitratrestbestand nach der Ernte nur noch gering ist, denn die Hauptzeit der N-Auswaschung befindet sich in der vegetationsfreien Zeit von etwa September bis April (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 270).

Die ausreichende Nährstoffversorgung der Pflanze über ihren gesamten Vegetationszyklus hinweg ist eine Grundvoraussetzung für die Realisierung eines hohen Ertrages. Die Entwicklung und das Wachstum der Ertragskomponenten kann hierbei spezifisch durch die N-Düngung beeinflusst werden (GEISLER, 1983, S. 53).

Ist die Abhängigkeit des Saatkorns von der Nährstoffversorgung auf Grund der autarken Ernährung des Saatkorns relativ klein, so gewinnt die Nährstoffversorgung, und hier v. a. die N-Versorgung, in der Jugendphase der Getreidepflanze an Bedeutung. Weniger auf die reine Anzahl an Bestockungstrieben als vielmehr auf die Menge der „produktiven“, d.h. fruchtstandstragenden Halme nimmt die N-Versorgung großen Einfluss. Auch die Festlegung der Anzahl der Ährchenstufen ist auf ein ausreichendes N-Angebot angewiesen, wobei „im Hinblick auf die Ertragsleistung / Fläche dem Einfluss auf die Bestockung eine größere Bedeutung zukommt, als der Anzahl der Ährchenstufen / Fruchtstand“ (GEISLER, 1983, S. 54-55). Umgekehrt fördert N-Mangel die Reduktionsprozesse bei Bestockungstrieben.

In der Hauptwachstumszeit, der Phase des Schossens, unterstützt eine ausreichende Nährstoffversorgung während der Anlage der generativen Organe bis zur Blüte die Entwicklung der Ertragskomponente Karyopsen / Pflanze bzw. pro Fläche (GEISLER, 1983, S. 55).

In der Zeitspanne der Entwicklung und des Wachstums der Karyopse ist die Wirkung des N auf die Ertragshöhe ambivalent. Einerseits fördert eine gute N-Bereitstellung eine hohe Karyopsenanzahl pro Fruchtstand. Andererseits aber besteht zwischen Karyopsenanzahl / Fruchtstand und Gewicht der Einzelkaryopse eine negative Korrelation (GEISLER, 1983, S. 55). Zudem konkurrieren der quantitative Ertragsfaktor „Karyopsengewicht“ und der qualitative Ertragsfaktor „Eiweiß“ miteinander um das N-Angebot. Zur Abschwächung dieser Konkurrenz-



beziehung wird beim Anbau von Getreidesorten mit entsprechenden Qualitätszielen, wie z. B. Backweizen, eine N-Spätdüngung nach Schossbeginn durchgeführt.

Eine weitere positive Wirkung der N-Verfügbarkeit besteht in der Vitalitätsverlängerung der photosynthetisch aktiven Teile der Getreidepflanze, was zu einer längeren Zeitdauer der Assimilation für die Translokation in die Karyopse führt. Dadurch wird die in enger positiver Korrelation zum Ertrag stehende pflanzenbauliche Größe *Blattflächenindex* \times *Dauer der photosynthetischen Aktivität* gefördert.

In einem zweifaktoriellen Feldversuch mit Winterweizen arbeitet ECK (ECK, 1988, S. 902 ff.) den Einfluss der Wasserversorgung auf die N-Ausnutzung des Pflanzenbestandes heraus. Er kommt zu dem Ergebnis, dass bei allen N-Versorgungsstufen die Erträge bei ausreichender Wasserversorgung höher sind als bei Wassermangel. Zu erklären ist dies mit einer durch die Wasserverfügbarkeit erhöhten N-Mineralisation im Boden und die durch das Wasserangebot verstärkten Prozesse des Massenflusses und der Diffusion von Nährstoffen hin zur Pflanzenwurzel (ECK, 1988, S. 902 ff.).

Es handelt sich hierbei um eine Wechselwirkung von Wasserangebot und N-Verfügbarkeit nach dem Ertragsgesetz vom Optimum. Dieses besagt, je näher ein Faktor am Optimum ist (hier das Wasser), desto besser wird ein im Minimum befindlicher Faktor (hier die N-Verfügbarkeit) ausgenutzt. Im selben Versuch kam ECK zu der Erkenntnis, dass eine steigende N-Versorgung des Weizenbestandes den Ernte-Index (= Fraktion des ökonomischen Ertrags als Anteil an dem oberirdischen Biomasse- oder Gesamtertrag) sinken lässt (ECK, 1988, S. 902 ff.).

Einen besonders deutlichen Rückgang des Ernte-Indizes erfuhr der Pflanzenbestand, wenn zu einer guten N-Versorgung eine nur geringe Wasserverfügbarkeit vorhanden war, d. h. N-Verfügbarkeit und Wassermangel führen zu einer verstärkten Assimilateeinlagerung in den Spross- und Blattapparat.

Als weitere bedeutende Auswirkung der N-Düngung identifizieren ECK (1988, S. 902 ff.) und KLAPP (1962, S. 1-5) den dämpfenden Effekt auf den Evapotranspirationskoeffizienten (ETK). Der ETK gibt die Menge an Wasser an, die durch die Evapotranspiration verbraucht wird, um eine Einheit Trockensubstanz zu

erzeugen. SCHULZE und SCHULZE-GEMEN erreichen bei ihren Düngungsversuchen bei Volldüngung den stärksten Rückgang des ETK, der sich überdies beim Kornertrag deutlicher abzeichnete als beim Gesamtbiomassertrag (SCHULZE / SCHULZE-GEMEN, 1957, S. 22 ff.).

Der Einfluss des Standortes auf die Nährstoffverfügbarkeit manifestiert sich v. a. durch folgende Faktoren: Klima, Nährstoffgehalt im Wurzelraum, Durchwurzelungstiefe und Durchwurzelungsintensität, Wasser- und Lufthaushalt des Bodens sowie Tiefe der Ackerkrume (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 230). Die Durchwurzelung eines Bodens hat entscheidenden Einfluss darauf, ob die Pflanze Nährstoffe auch aus dem Unterboden aufnehmen kann.

Die zentrale Größe zur Beurteilung eines Standortes hinsichtlich seines Nährstoffbereitstellungsvermögens ist die Bodenart. Dieser Aspekt ist als wichtigste Steuerungsgröße bei der Planung der später behandelten teilflächenspezifischen Düngung zu betrachten. In Tabelle 2 ist die Nährelementenausnutzung mehrerer Mineraldünger bei verschiedenen Bodenarten aufgeführt (SCHILLING, 2000, S. 435).

Bodenart	Ausnutzungskoeffizient in Prozent			
	N	P	K	Mg
Sand	65	55	80	80
schwach lehmiger Sand	70	55	85	85
stark lehmiger Sand	80	60	90	90
sandiger/schluffiger Lehm	85	60	95	95
schwach toniger Lehm bis Ton	70	55	85	85

Tabelle 2: Nährelementenausnutzung verschiedener Bodenarten (SCHILLING, 2000, S. 435)

Analog zur Bereitstellungskapazität von pflanzenverfügbarem Wasser weist der sandige / schluffige Lehm den höchsten und der Sandboden den niedrigsten Ausnutzungskoeffizienten auf. Dies ist auch die Erklärung dafür, dass Sandböden das größte Nährstoffauswaschungspotenzial besitzen. Durch das bodenartenspezifische Angebot an Bodenporengrößenverteilung nimmt die Bodenart auch Einfluss auf die Durchwurzelungstiefe und –intensität und damit auch auf die Frage, inwieweit der Unterboden als Nährstofflieferant dient. Zudem beeinflusst das Bodengefüge und die Körnung einer Bodenart die Intensität der Wasserflussrate, die zusammen mit der Nährstoffkonzentration der Bodenlösung maßgeblich die Nährstofftransportleistung des Massenflusses zur Pflanzenwurzel bestimmt.



2.3 Bestandteil Klima

Über die Bedeutung der Witterung für den Ertrag schreibt HANUS: „Der Ertrag landwirtschaftlicher Kulturpflanzen ist das Ergebnis eines über längere Zeit andauernden Prozesses, bei dem die verschiedensten Einflussgrößen in vielfältiger Weise zusammenwirken“ (HANUS, 1997, S. 66).

Den Zusammenhang zwischen der Witterung und dem Begriff „Klima“ formuliert HÄCKEL folgendermaßen: „Das Klima eines Ortes zu bestimmen heißt, aus der Wettervielfalt an diesem Ort mit Hilfe von statistischen Mitteln eine überschaubare Zahl von Kenngrößen herauszurechnen, die die typischen Merkmale erkennbar machen (HÄCKEL, 2005, S. 315). Gemeinsam mit van Eimern definiert er Klima als „die für einen Ort oder eine Landschaft typische Zusammenfassung aller bodennahen Zustände der Atmosphäre und Witterung, die Boden, Pflanzen, Tier und Mensch beeinflussen und die sich während eines Zeitraumes von vielen Jahren einzustellen pflegen“ (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 123).

Um räumliche Größeneinheiten mit homogenen klimatischen Bedingungen zu schaffen, unterteilt man das Klima in Teilkimate, sogenannte Klimascales. Eingeordnet werden diese Klimascales nach ihrer flächenmäßigen Ausdehnung, indem man z.B. Klimazonen, Makro-, Meso- und Mikroklima unterscheidet (HÄCKEL, 2005, S. 319).

Für landwirtschaftliche Fragestellungen interessieren v.a. die Größenklassen Mesoklima (Klima einer Gemarkung), Mikroklima (Klima eines Pflanzenbestandes) oder Spotklima (Klima einer Einzelpflanze) (HÄCKEL, 2005, S. 320).

Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf den für die Ertragsbildung wesentlichen klimatischen Einflussfaktoren Strahlung, Licht, Temperatur und Wasser. Diese Klimafaktoren werden v. a. hinsichtlich ihrer Wirkung auf die von GEISLER genannten ertragsbestimmenden Entwicklungsphasen der Getreidepflanze (Keimung, Bestockung, Schossen, Blüte und Karyopsenwachstum) betrachtet (GEISLER, 1983, S. 47).



2.3.1 Strahlung

Die elementare Bedeutung der Strahlung auch für den pflanzlichen Ertrag beschreibt v. BOGUSLAWSKI: „Für alle Lebenserscheinungen ist der Energiefaktor „Strahlung“ entscheidend“ (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 57).

EHLERS bezeichnet die Strahlung als den Wachstumsfaktor, der „eine obere Grenze für die Nettoprimärproduktivität“ setzt (EHLERS, 1996, S. 17).

Physikalisch gesehen handelt es sich bei der Strahlung um elektromagnetische Strahlung in einem Wellenbereich zwischen 10^{-16} und 10^{-6} m. Der energetische Umfang dieser Strahlung beträgt ca. 8 J/cm^2 und wird als Solarkonstante bezeichnet (GEISLER, 1988, S. 83).

Aus pflanzenbaulicher Sicht interessiert der Anteil der Solarkonstante, der die Erdoberfläche erreicht, die sogenannte Globalstrahlung. HÄCKEL definiert sie mathematisch als Summe von direkter Strahlung und diffuser Himmelsstrahlung und bezeichnet sie als das Energieangebot an die Erdoberfläche aus der kurzwelligen Strahlung (HÄCKEL, 2005, S. 197).

Gemessen werden diese Strahlungsströme in Watt pro m^2 (W/m^2), wobei 4,186 Ws einer Kalorie entsprechen (HÄCKEL, 2005, S. 402 und S. 404).

Über die Photosynthese sind Strahlung, Wasserverbrauch und Trockenmasseproduktion eng miteinander verbunden (EHLERS, 1996, S. 132). Die Pflanzen nutzen nur einen Teil der Globalstrahlung zur Photosynthese. Diesen Anteil bezeichnet man als „photosynthetisch aktive Strahlung (PAR)“.

Keine anderen begrenzenden Wachstumsfaktoren vorausgesetzt, erhöht sich mit zunehmender Strahlung die CO_2 -Austauschrate an der Blattoberfläche. Diese stellt die Nettophotosyntheserate dar, die sich aus der Differenz zwischen der Bruttophotosyntheserate und der Respirationsrate, der Atmung der Pflanzen, ergibt (EHLERS, 1996, S. 133). Vor allem bei den C_3 -Pflanzen, wie z. B. Weizen, gerät bedingt durch deren Photorespiration und der Abgabe von bereits gebundenem CO_2 , die CO_2 -Verfügbarkeit mit zunehmender Lichtsättigung als Wachstumsfaktor ins Minimum.

Ein Pflanzenbestand kann umso mehr Strahlung aufnehmen, je größer sein BFI ist. Eine hohe Strahlungsinterzeption hat zum einen den ertragsphysiologischen Vorteil, dass durch ein dichteres Blätterwerk Strahlung in geringerem Umfang bis zum Boden vordringt und dadurch die unproduktive Evaporation des Bodens gemindert wird. Zum anderen steigert ein hoher BFI den Trockenmassezuwachs des Pflanzenbestandes, was durch die Wachstumsrate eines Pflanzenbestandes ausgedrückt wird, die sich wie folgt berechnen lässt:

$$CGR = NAR * BFI$$

Darin sind:

- CGR crop growth rate (=Wachstumsrate des Pflanzenbestandes)
- NAR photosynthetische Nettoproduktivität des Einzelblattes
- BFI Blattflächenindex

(EHLERS, 1996, S. 17)

Die Zusammenhänge zwischen BFI und Strahlungsinterzeption und den daraus resultierenden Werten für NAR und CGR sind in Abbildung 9 dargestellt.

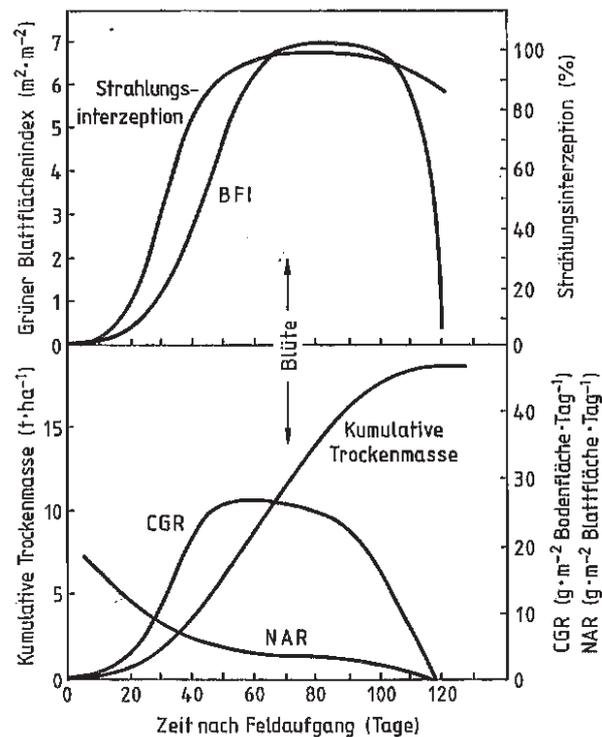


Abbildung 9: Zusammenhänge zwischen BFI, Strahlung und CGR (EHLERS, 1996, S. 135)



Das Integral der CGR über die Zeit stellt die kumulierte Trockenmasse eines Bestandes dar (GEISLER, 1988, S. 94). Neben dem pflanzenbaulichen Ziel eines hohen BFI sollte daher auch eine lange Zeitspanne der photosynthetischen Aktivität der entsprechenden Pflanzenbestandteile angestrebt werden. Die Abhängigkeit der kumulativen Trockenmasse von der Größe des BFI und der Dauer der photosynthetischen Aktivität der Blattflächen erklärt auch, warum trotz sinkender NAR – bedingt durch die mit steigenden Temperaturen größer werdenden Respiration und Alterung der photosynthetisch aktiven Pflanzenteile – und daraus folgenden fallendem CGR die kumulative Trockenmasse weiter ansteigt (siehe Abbildung 10, EHLERS, 1996, S. 135).

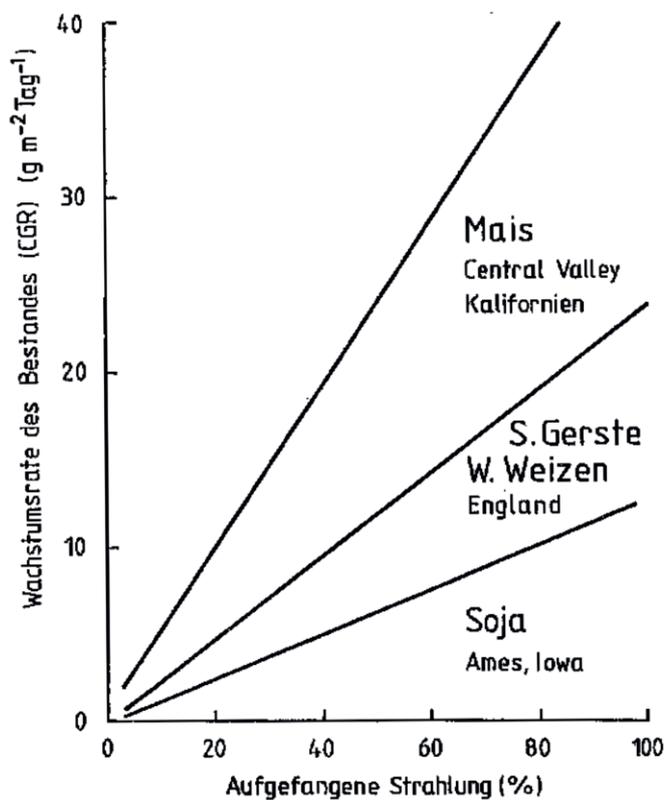


Abbildung 10: Zusammenhang zwischen aufgefänger Strahlung und CGR (EHLERS, 1996, S. 137)

Aus den in Abbildung 10 skizzierten Zusammenhängen ergibt sich eine nahezu lineare Beziehung zwischen der aufgefängenen Strahlung in % der Globalstrahlung und der CGR, gemessen in g/m^2 und Tag (vgl. Ehlers, 1996, S. 137). Anhand dieser Übersicht wird deutlich, dass C_4 -Pflanzen wie Mais eine höhere Strahlungsausnutzungseffizienz besitzen als C_3 -Pflanzen (z. B. Weizen).



2.3.2 Licht

Den Einfluss des Wachstumsfaktors Licht auf den Ertrag beschreibt v. BOGUSLAWSKI: „Das Wachstum und die Entwicklung der höheren Pflanzen ist in vielfacher Weise eine Funktion des Lichtes“ (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 94). Geisler nennt als pflanzenbaulich bedeutsame Reaktionen auf den Lichteinfluss die Keimungsvorgänge mancher Pflanzen, Abhängigkeiten des vegetativen Wachstums und photoperiodische Reaktionen (GEISLER, 1988, S. 94).

Der Mechanismus der lichtabhängigen Keimung stellt sicher, dass nur die Samen zur Keimung gelangen, die nah genug an der Bodenoberfläche liegen und die Energie aufbringen können, um als Keimling bis zur Bodenoberfläche vorzustoßen. Die lichtabhängige Keimung findet sich v. a. bei verschiedenen Unkrautarten, während die meisten Kulturpflanzen bezüglich ihrer Keimung als lichtneutral gelten (GEISLER, 1988, S. 95).

Im Vegetationsverlauf besitzt der Wachstumsfaktor Licht die größte Bedeutung im Hinblick auf die photoperiodische Sensibilität der Getreidepflanzen (GEISLER, 1983, S. 52). Der Vorgang des Photoperiodismus umschreibt die Reaktion der Pflanze auf sich ändernde Tageslängen und damit wechselnde Lichtintensitäten. Die sich verändernde Relation der Licht- und Dunkelphasen im 24 h- Rhythmus beeinflusst den Umsteuerungsprozess von der vegetativen zur generativen Wachstumsphase (GEISLER, 1988, S. 96). Hinsichtlich der photoperiodischen Ansprüche lassen sich Langtagpflanzen, Kurztagpflanzen und tagesneutrale Pflanzen unterscheiden. So wird z. B. bei Weizen, Raps und Gerste die Blütenbildung im Langtag (= Tageslänge mehr als 14 h) gefördert, während bei Mais die Blütenbildung im Kurztag (= Tageslänge weniger als 14 h) verstärkt wird.

Andererseits kann es vorteilhaft sein, dass zuerst Tageslängen herrschen, die den Verbleib der Pflanze in der vegetativen Wachstumsphase fördern, um zunächst eine kräftige Pflanze aufzubauen, die als Voraussetzung für eine hohe Ertragsleistung an Samen und Früchten unabdingbar ist (GEISLER, 1988, S. 96).

Der Einfluss des Wachstumsfaktors Licht ist zu Beginn der Vegetationsperiode einer Getreidepflanze recht gering. Die Keimung und die Anlage der Bestockungstribe sind relativ unabhängig von den Lichtintensitäten, wohingegen die Reduktion der Bestockungstribe durch ungünstige Lichtverhältnisse verstärkt



wird. Der Photoperiodismus kann Einfluss auf Differenzierungsprozesse der Bestockungstriebe und der Blütenanlagen nehmen und zu einer zeitlichen Verkürzung oder Verlängerung der entsprechenden Entwicklungsvorgänge führen (GEISLER, 1983, S. 52-53).

Einen stärkeren Einfluss auf die Ertragsleistung gewinnt der Wachstumsfaktor Licht in der Phase der Kornfüllung, die von der Assimilatbereitstellung abhängig ist. Zudem werden Alterungsprozesse im Bereich hoher Lichtintensitäten gefördert. Zusammengefasst lässt sich allerdings festhalten, dass unter hiesigen Bedingungen Licht nur selten als Minimumfaktor auftritt (GEISLER, 1983, S.53).

2.3.3 Temperatur

Die Temperatur nimmt hinsichtlich der Beeinflussung von Wachstums- und Entwicklungsvorgängen eine zentrale Stellung ein (GEISLER, 1988, S. 99). VON BOGUSLAWSKI umschreibt den Stellenwert der Temperatur in der pflanzlichen Ertragsbildung, indem er darauf hinweist, dass dem Wachstum der Pflanzen durch Temperaturminima bei Gefrieren der Zellen und folgendem Wasserentzug sowie durch Temperaturmaxima und der dadurch bedingten Koagulation des Zellplasmas bei Hitzeeinwirkung Grenzen gesetzt sind, innerhalb derer die Temperatur einen bedeutenden Einfluss auf die Entwicklung und die Wachstumsvorgänge aufweist (V. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 68).

Der Umfang und die Intensität der Einstrahlung bestimmen im Wesentlichen die Temperaturverhältnisse eines Standortes. Infolgedessen ist die herrschende Temperatur stark von der geographischen Breite und der Jahreszeit abhängig. Zudem wird die Intensität der auftreffenden Einstrahlung auch von der Neigung der Erdoberfläche beeinflusst (GEISLER, 1988, S. 99).

Die maßgeblichen Informationen zur Beschreibung der Temperaturbedingungen eines Standortes sind die Temperaturwerte innerhalb eines Pflanzenbestandes, die v. a. durch die Einstrahlung am Tag und die Ausstrahlung in der Nacht bestimmt werden (GEISLER, 1988, S. 100).

Für die quantitative Bewertung eines Standortes können die Jahresmitteltemperaturen herangezogen werden, die aber um den Verlauf der Temperaturen, v. a. während entwicklungsphysiologisch bedeutsamer Phasen, ergänzt werden



sollten (GEISLER, 1983, S. 48). Aus diesen klimatischen Größen wird der pflanzenbauliche Begriff der Vegetationsperiode abgeleitet. Er umfasst die Summe aller Tage, an denen die Tagesmitteltemperatur 5°C überschreitet. Bei frostempfindlichen Pflanzen versteht man unter der Vegetationsperiode die Dauer der zusammenhängenden frostfreien Zeit (KELLER et al., 1997, S. 48).

Auch allgemein besitzen die Minimumtemperaturen im Vergleich zu den Maximumtemperaturen eine größere pflanzenbauliche Bedeutung. So determinieren die Minimumtemperaturen über die Festlegung der Dauer der Vegetationsperiode den Kreis der anbaufähigen und – würdigen Nutzpflanzen. Sinken die Temperaturen zu weit unter pflanzenartspezifische Optimalwerte, kann es zu schwerwiegenden Störungen des Wachstums- und Entwicklungsprozesses kommen. Bei Unterschreiten der Frosttoleranzgrenze sind Auswinterungsschäden bis hin zum Totalverlust eines Pflanzenbestandes die Folge (KELLER et al., 1997, S. 49-50).

Grundsätzlich wirkt die Temperatur in zwei Richtungen: Sie beschleunigt zum einen die Differenzierungs- und Wachstumsvorgänge, begrenzt aber andererseits die Dauer der Entwicklungsphasen (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 81).

Die Wachstumsgeschwindigkeit der Pflanze wird wesentlich von der Schnelligkeit der Stoffwechselreaktionen in der Zelle bestimmt. Bei einer Temperaturerhöhung um 10°C nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit um das 2- bis 3-fache zu. Diese temperaturabhängige Beschleunigungsrate wird als Q_{10} -Wert bezeichnet (FELLENBERG, 1981, S. 94).

Von den zwei oben aufgeführten grundsätzlichen Temperaturwirkungen ist die zeitliche Veränderung der Entwicklungsphasen von entscheidender Bedeutung für den Pflanzenertrag (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 82). Auch GEISLER verweist darauf, dass die sich mit steigender Temperatur erhöhte Wachstumsrate weniger auf den Ertrag auswirkt als die sich durch steigende Temperaturen verkürzende Wachstumsdauer (GEISLER, 1988, S. 106). Daraus ergibt sich, dass „daher grundsätzlich angenommen werden kann, dass sich niedrige Temperaturen im Vergleich zu hohen Temperaturen günstig auf die Ertragsleistungen auswirken werden“ (GEISLER, 1988, S. 106).



GEISLER identifiziert sechs Entwicklungsprozesse, deren Temperaturabhängigkeit für die Ertragsleistung der Kulturpflanze von entscheidender Bedeutung ist:

- a) CO₂-Assimilation
- b) Atmung
- c) Wachstumsrate
- d) Wachstumsdauer
- e) Translokation
- f) Zellteilung (GEISLER, 1988, S. 104).

Nachfolgend werden Richtung und Intensität der Temperaturwirkung auf den Ertrag bei den genannten Parametern dargestellt.

CO₂-Assimilation

Der biochemische Prozess der CO₂ –Assimilation gewinnt durch steigende Temperaturen an Leistungsfähigkeit. Da aber CO₂ im Freiland meist den begrenzenden Faktor darstellt, hat dies keine praktische Relevanz, v. a. nicht bei C₃-Pflanzen, wie z. B. Weizen (GEISLER, 1988, S. 104).

Atmung

Die Respiration der Pflanze steht in enger Beziehung zur Temperatur. Sie steigt mit zunehmender Temperatur an und nähert sich dem Kurvenverlauf der Brutto-C-Assimilation von unten an, bis sie schließlich den Kompensationspunkt erreicht. An diesem Punkt sind Stoffgewinn durch Photosynthese und Stoffverlust durch Respiration gleich groß (siehe Abbildung 11).

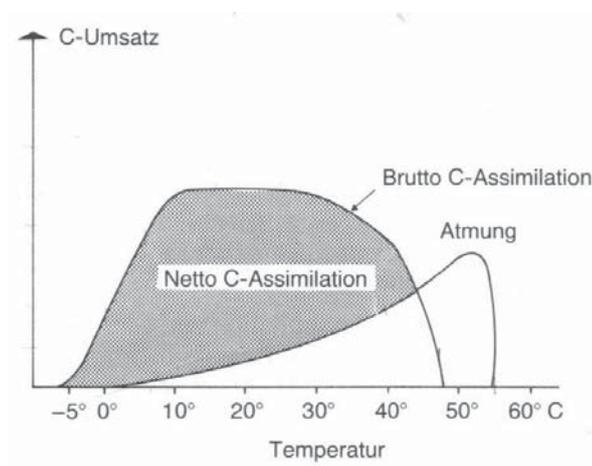


Abbildung 11: Kurve der Netto-C-Assimilation (GEISLER, 1988, S. 106)

Die größte Netto-C-Assimilation erreicht der Weizen bei einer Temperatur von 20°C (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 69).

Wachstumsrate und Wachstumsdauer

Die Temperaturwirkung auf Wachstumsrate und –dauer ist gegenläufig. Die Wachstumsrate erhöht sich mit steigender Temperatur, während sich die Wachstumsdauer verkürzt. Als Resultat gilt, dass innerhalb der für das Wachstum günstigen Temperaturen der Einfluss der Wachstumsdauer wichtiger als die Wachstumsrate ist. Daraus folgt grundsätzlich, dass sich niedrigere Temperaturen positiver auf den Ertrag auswirken als höhere Temperaturen (GEISLER, 1988, S. 106).

Translokation

Der Translokationsprozess, der große Bedeutung für die Ertragsbildung besitzt, beschleunigt sich mit steigender Temperatur. Allerdings nimmt parallel auch die Veratmung der für die Translokation benötigten Assimilate zu, so dass in der Summe auch hier niedrigere Temperaturen eher die Translokation und die Ertragsbildung fördern als höhere Temperaturen (GEISLER, 1988, S. 106).

Zellteilung

Die Zellteilung als Grundlage von Wachstumsleistung und Ertragsbildung nimmt mit steigender Temperatur zu, gleichzeitig wird der Zellzyklus verkürzt. Da die Zellteilungsrate in der Nacht größer als am Tag ist, ist eine Abhängigkeit der Zellteilungsrate von den Nachttemperaturen gegeben (GEISLER, 1988, S. 107).

Neben der temperaturbedingten Steuerung der dargestellten biochemischen Prozesse beeinflusst die Temperatur einzelne pflanzenphysiologische Entwicklungsphasen.

Der Beginn der Keimung setzt das Erreichen pflanzenartspezifischer Minimumtemperaturen voraus, die bei Weizen bei 2-4°C und bei Mais deutlich höher bei 8-10°C liegen. Die Temperaturoptimalbereiche für die Keimung liegen erheblich höher, wohingegen ungünstige Temperaturverhältnisse zu Pflanzenverlusten führen können (GEISLER, 1983, S. 47).



Zwischen der Temperatur und der Anlagerate bei Bestockungstrieben besteht eine positive Korrelation, die sich bei der Festlegung der Anzahl der „produktiven“ Halme nicht mehr feststellen lässt. Dieser korrelative Einfluss wird allerdings von der Einwirkung der Tageslängen auf die Anzahl der Bestockungstriebe überlagert. Für die Anlage der fruchtstandstragenden Halme ist eine Kombination aus relativ kühlen Temperaturen und Tageslängen von mehr als 14 h ideal (GEISLER, 1983, S. 49).

Für die Umsteuerung vom vegetativen hin zum generativen Wachstum liegt bei Getreidepflanzen eine artspezifische Abhängigkeit vom Vernalisationsbedürfnis vor. Unter der Vernalisation versteht man die Wirkung niedriger Temperaturen über einen längeren Zeitraum, die den Vernalisationsanreiz auslösen und schließlich die Blütenbildung induzieren.

Während der Phase des Schossens beschränkt sich der Einfluss der Temperatur auf die Dauer der Phasenlänge, wohingegen der Prozess der Blüte bei eher niedrigen Temperaturen eine höhere Anzahl fertiler Blüten hervorbringt (GEISLER, 1983, S. 50).

In der Kornbildungsphase reduziert sich (bei ausreichender Wasserversorgung) die Zahl wirkender Klimafaktoren auf die Temperatur und die Lichtintensität (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 89).

Da die Ertragsleistung eines Fruchtstandes aus dem Produkt Blattflächenindex multipliziert mit der Zeitdauer der photosynthetischen Aktivität des Blattflächenapparates berechnet wird und hohe Temperaturen die Phase des Wachstums der Karyopse einschränken, besteht eine negative Korrelation zwischen Temperatur und Ertragsleistung eines Fruchtstandes. Bei GEISLER wird deshalb hervorgehoben, „dass die Temperaturbedingungen des Standortes während der Kornfüllungsphase Anbauwürdigkeit der Getreidearten und Ertragsleistung im Getreideanbau bestimmen“ (GEISLER, 1983, S. 51).

Als Besonderheit innerhalb der Temperaturwirkungen auf die Ertragsbildung nennt v. BOGUSLAWSKI die „spezifischen Temperaturwirkungen mit Induktionscharakter“ (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 74 ff.). Neben der oben bereits erwähnten Vernalisation nennt er als weiteres Beispiel für den Thermoperiodismus die



Tagesperiodizität, die die Ansprüche einiger Kulturpflanzen an eine Temperaturamplitude zwischen Tag und Nacht beschreibt.

2.3.4 Wasser

Die besondere Stellung des Wassers als meteorologischen Wachstumsfaktor heben KELLER et al. hervor, indem sie darauf verweisen, dass das Wasser im Gegensatz zu Licht und Temperatur nicht als Energiequelle dient, sondern als Stoffkomponente genutzt wird (KELLER et al., 1997, S. 52).

So besitzt das Wasser große physiologische Bedeutung für das Leben der Pflanze, indem es Einfluss auf die CO₂-Assimilation, die biochemischen Umsetzungen und die Signal- und Reizleitung der Organismen nimmt. Daraus folgert EHLERS, dass zwischen Wasserverbrauch und aufgewachsener Trockenmasse ein enger Zusammenhang bestehen muss (EHLERS, 1996, S. 16).

Auch v. BOGUSLAWSKI weist auf die große Abhängigkeit des Wachstums von „der Anwesenheit des Faktors Wasser“ hin (v. BOGUSLAWSKI, 1981, S. 53).

Wasserkreislauf

Die Pflanze ist durch ihren lebensnotwendigen Transpirationsstrom, der durch den Gradienten des Wasserpotenzials zwischen der atmosphärischen Luft und dem Boden gewährleistet wird (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 200), in einen großen Wasserkreislauf eingebunden. Bei MÜCKENHAUSEN wird ein quantitativer Überblick über einen typischen Verlauf des Wasserkreislaufes in der BRD gegeben. Über das Jahr verteilt fallen demnach Niederschläge von 700 mm. Ca. 2/3 davon (440 mm) gelangen durch Evaporation des Bodens (150 mm) und der Pflanzen (290 mm) zurück in die Atmosphäre. 100 mm Niederschlag versickern in tiefere Bodenschichten und füllen so den Grundwasserspeicher auf. Ungefähr 20 % der Niederschläge (148 mm) fließen direkt oberirdisch wieder ab und gelangen über Bäche und Flüsse in die Meere. Der Rest (12 mm) gelangt durch Verdunstung von Oberflächengewässern und Haushalts- und Industriegewässern wieder in die Atmosphäre (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 330).

Niederschlag

Der Wasserkreislauf speist sich aus den Niederschlägen, die in Form von Regen, Schnee, Hagel oder Tau auftreten können (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 330). Die



Auswirkungen des Niederschlages auf die Ertragsbildung der Kulturpflanzen resultiert zum einen aus der absoluten Höhe und zum anderen aus der zeitlichen Verteilung der Niederschläge unter der Nebenbedingung der zum Zeitpunkt der Niederschläge herrschenden klimatischen Bedingungen. MÜCKENHAUSEN gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung der absoluten jährlichen Niederschlagshöhe und die zeitliche Verteilung der Niederschläge, aufgegliedert nach Jahreszeiten (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 330). Demnach wird in den größten Teilen der BRD ein Jahresniederschlag zwischen 600 und 800 mm erreicht. Nur in vereinzelt Gebieten, v. a. in den Mittelgebirgen und in Regenstaugebieten nördlich und westlich von Mittelgebirgen, wird ein Jahresniederschlag von 1000 mm übertroffen. Im Gegensatz zu diesen Wasserüberschussgebieten finden sich in Deutschland große Gebiete, die mit einem Jahresniederschlag von 500-600 mm auskommen müssen. Dies betrifft v. a. große Teile der neuen Bundesländer. Die Tiefstwerte an Niederschlägen werden in Rheinhessen und im Kerngebiet der Magdeburger Börde erzielt (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 330).



im Winterhalbjahr, beträgt das Verhältnis im Landesinneren 2:1 zugunsten des Sommerhalbjahres (HÄCKEL, 2005, S. 95). Eine detailliertere Übersicht über die durchschnittliche Verteilung der Jahresniederschläge auf die Jahreszeiten in der BRD ist bei Mückenhausen zu finden (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 330). Ergänzend ist an dieser Stelle die jahreszeitliche Verteilung der Verdunstung als eine zentrale Ausgabegröße der Wasserhaushaltsgleichung angegeben (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 330).

	Niederschläge	Verdunstung
Frühjahr	22 %	34 %
Sommer	36 %	40 %
Herbst	24 %	18 %
Winter	18 %	8 %

Tabelle 3: Verteilung der Niederschläge und der Verdunstung auf die Jahreszeiten (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 330).

Die Wirksamkeit der Niederschlagshöhe und ihrer Verteilung auf die Ertragsbildung ist stets in Verbindung mit der am Standort herrschenden Jahresdurchschnittstemperatur und der daraus resultierenden potenziellen Verdunstung zu sehen.

Verdunstung

Unter Verdunstung versteht HÄCKEL „die Überführung von flüssigem Wasser in gasförmigen Wasserdampf“ (HÄCKEL, 2005, S. 94). Es müssen folgende meteorologische Größen in ausreichendem Maße vorhanden sein, damit es zu einer Verdunstung kommen kann:

- Wasser
- Energie
- nicht feuchtegesättigte Luft
- Wind

Einen großen Einfluss auf das Ausmaß der Verdunstung nimmt die Luftfeuchtigkeit, also der Gehalt der Luft an gasförmigem Wasserdampf (siehe Abbildung 13).

Die Menge des Wasserdampfes in der Luft wird in g Wasserdampf je kg Luft gemessen und als spezifische Feuchte bezeichnet. Man kann den Anteil, den der Wasserdampf am gesamten Luftdruck ausmacht, auch als Druck quantifizieren

und bezeichnet diesen als Dampfdruck (e). Die Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf ist allerdings endlich und man bezeichnet die mögliche Höchstmenge an Wasserdampf, welche die Luft enthalten kann, als Sättigungsfeuchte. Analog dazu, als Dampfdruck gemessen, wird diese meteorologische Größe als Sättigungsdampfdruck (E) bezeichnet (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 41). Mit ansteigender Temperatur wird die Luft aufnahmefähiger für Wasserdampf. Dementsprechend erhöht sich auch der Sättigungsdampfdruck mit ansteigender Temperatur. Das Verhältnis zwischen dem herrschenden (e) und dem höchstmöglichen Dampfdruck (E) wird als relative Luftfeuchte (f) beschrieben: $f = e / E \times 100 \%$ (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 42).

Der Zusammenhang zwischen dem Verlauf des Dampfdruckes und der Lufttemperatur in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte wird anhand der Abbildung 13 dargestellt.

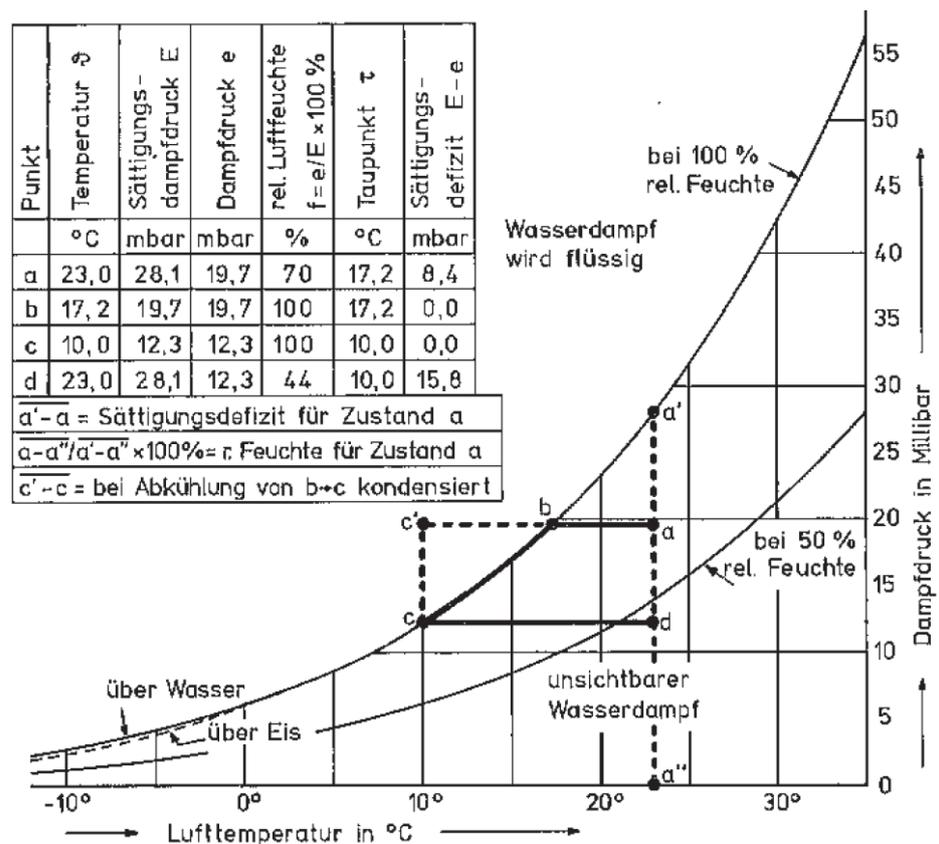


Abbildung 13: Der Verlauf des Dampfdruckes in Millibar (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 42)

Mit Hilfe dieser Übersicht lässt sich die zur Bemessung der Verdunstung maßgebliche Einflussgröße, das Sättigungsdefizit der Luft, von VAN EIMERN UND HÄCKEL



auch als „Dampfhunger“ bezeichnet, graphisch darstellen (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 43). Das Sättigungsdefizit der Luft bildet die Differenz des Dampfdruckes bei einer herrschenden Lufttemperatur (in der Abbildung 13 der Punkt a) und dem maximal möglichen Sättigungsdampfdruck (hier der Punkt a') ab. Das Sättigungsdefizit der Luft entspricht der noch maximal möglichen Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft und beeinflusst damit direkt die Stärke der Verdunstung. VAN EIMERN und HÄCKEL bezeichnen die Verdunstung deshalb als „für die Pflanzen wohl noch wichtiger als alle anderen Feuchtemessgrößen“ (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 43). Zur weiteren Verdeutlichung sei auf die Abbildung 14 verwiesen.

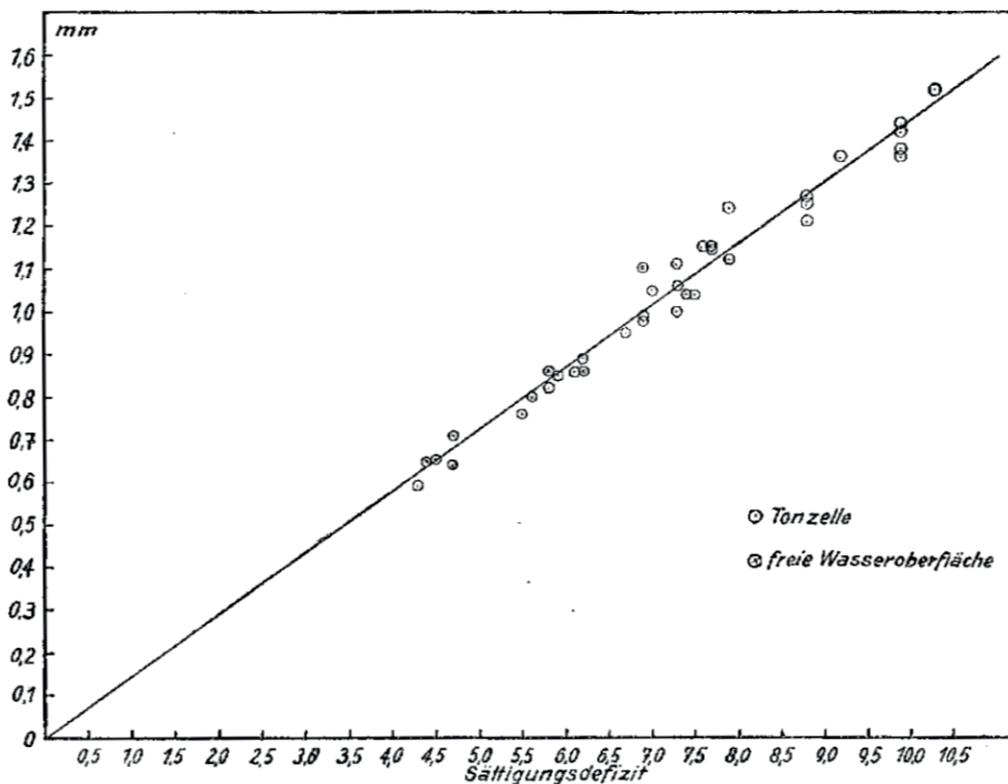


Abbildung 14: Abhängigkeit der Verdunstung vom Sättigungsdefizit der Luft (KUHNE, 1936, S. 72)

Es werden zwei Formen der Verdunstung unterschieden. Eine Verdunstung ohne das Mitwirken von lebenden Wesen, also z. B. die Verdunstung von unbewachsenem Ackerboden, wird als Evaporation bezeichnet. Im Gegensatz dazu spricht man bei einer Verdunstung unter der Mitwirkung aktiver Lebensvorgänge von Transpiration. Hierzu zählt die Verdunstung an Pflanzenblättern. Laufen diese beiden Vorgänge gleichzeitig nebeneinander ab, so spricht man von Evapotrans-



piration, die hier mit dem Begriff der Verdunstung gleichgesetzt wird (HÄCKEL, 2005, S. 94).

Zur quantitativen Bemessung der Verdunstungsrate (also der pro Fläche und Zeit verdunsteten Wassermenge) gilt grundsätzlich, dass diese umso größer ist, je mehr Wasser und je mehr Energie vorhanden sind, je größer das Sättigungsdefizit der Luft und je höher die Windgeschwindigkeit ist (HÄCKEL, 2005, S. 97). Die benötigte Energie liefert die Strahlungsenergie der Sonne. Die Windgeschwindigkeit beeinflusst das Ausmaß der Verdunstung insofern, als dass bei hoher Windgeschwindigkeit die über einem Pflanzenbestand durch die Verdunstung wassergesättigte Luft schneller abtransportiert wird und mit einem größeren Wasserdampf-sättigungsdefizit versehene Luftmassen nachgeschoben werden. VAN EIMERN und HÄCKEL weisen darauf hin, dass bei ungehinderter Wassernachlieferung bis in die Blätter die Stärke der Verdunstung nur von der Zufuhr an Wärmeenergie, d. h. vom Wetter, abhängig ist und bezeichnen diese maximal mögliche Verdunstung eines geschlossenen Pflanzenbestandes als potenzielle Verdunstung, bzw. potenzielle Evapotranspiration (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 45). SCHRÖDTER versteht unter Evapotranspiration den „Gesamtwassertransfer in die Atmosphäre pro Einheit der bewachsenen Bodenfläche [...] und zwar mit den Komponenten Evaporation und Transpiration, die in der Praxis kaum oder nur sehr schwer voneinander zu trennen sind“ (SCHRÖDTER, 1985, S. 15). Zu dem Begriff der potenziellen Evapotranspiration heißt es dort, es sei „diejenige Wasserdampfmenge, die von einer ganz oder teilweise mit Vegetation bedeckten, unter optimaler Wasser- und Nährstoffversorgung stehenden Fläche bei ungehindertem Wassernachschub unter den gegebenen meteorologischen, bodenphysikalischen, vegetationsspezifischen und pflanzenbaulichen Randbedingungen pro Zeiteinheit maximal in die Atmosphäre transferierbar ist“ (SCHRÖDTER, 1985, S. 18). Von dieser meteorologischen Größe kann die tatsächlich stattfindende Verdunstung in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Wassers u. U. deutlich abweichen. Diese wirkende Verdunstung wird als aktuelle Verdunstung definiert. Eine Divergenz der Werte der potenziellen und der aktuellen Evapotranspiration stellt sich nach VAN EIMERN und HÄCKEL erst dann ein, wenn die Bodenfeuchte in der Wurzelzone den Wert von 60 – 70 % der nFK unterschreitet (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 46). EHLERS gibt dazu einen graphischen Überblick über den Zusammenhang zwischen der potenziellen Evapotranspiration, der Bodenwasser-

spannung und der Reaktion der relativen Transpiration (= tatsächliche Transpiration / potenzielle Transpiration) eines Pflanzenbestandes (siehe Abbildung 15) (EHLERS, 1996, S.103).

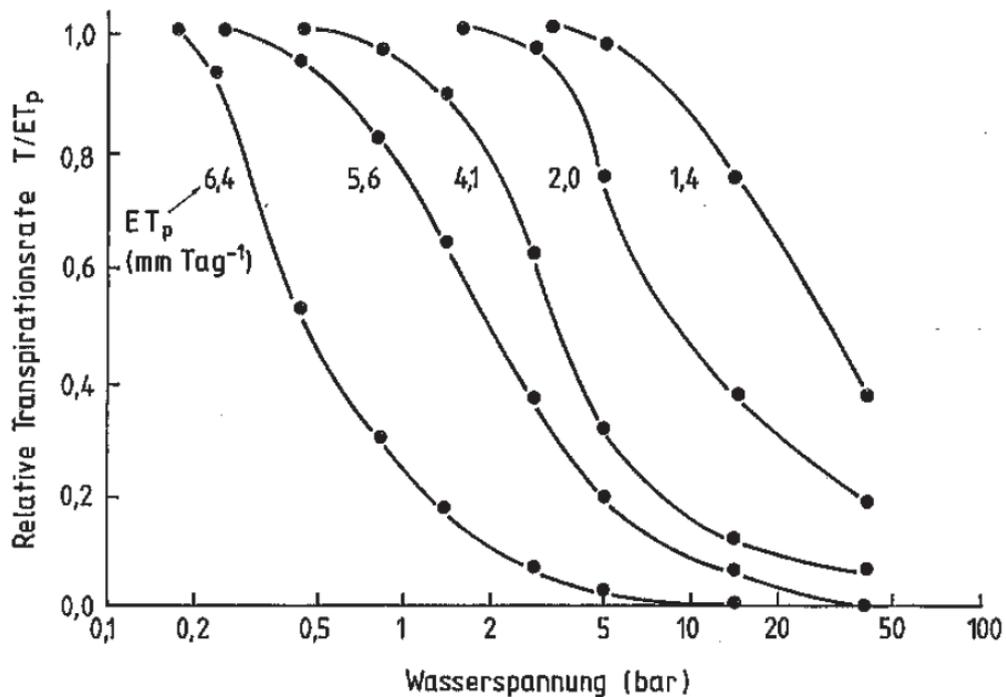


Abbildung 15: Abhängigkeit der Bodenwasserspannung von der potenziellen Evapotranspiration (EHLERS, 1996, S. 103)

Anhand dieser Übersicht kann man erkennen, dass es entscheidend von der Höhe der potenziellen Evapotranspiration abhängt, ab welchem Matrixpotenzial im Boden die aktuelle Transpirationsrate unter die potenzielle Evapotranspirationsrate sinkt. Bei gleicher potenzieller Evapotranspiration wird die Rate der Wasseraufnahme und damit die Transpiration mit fallendem Bodenwassergehalt umso stärker zurückgehen, je stärker die Leitfähigkeit für das Bodenwasser sinkt (EHLERS, 1996, S. 104). Die Verdunstung kann die Höchstwerte der standortspezifischen potenziellen Evapotranspiration nur erreichen, wenn genügend Bodenwasser nachgeliefert wird. Ist die Wassernachlieferung nicht gewährleistet, beginnen die Pflanzen ihre Stomata zu schließen, und die Transpiration verringert sich. Infolgedessen wird die CO_2 -Aufnahme reduziert, wodurch auch die Assimilation zurückgeht und schließlich ganz eingestellt wird.



Quantifizierung der Verdunstung

Grundsätzlich lässt sich die Verdunstung messen. HÄCKEL gibt dazu einen Überblick über die technischen Messinstrumente (HÄCKEL, 2005, S. 394-395). Eine detailliertere Auflistung der direkten und indirekten Verdunstungsmessmethoden ist bei SCHRÖDTER (1985, S. 23-60 bzw. 61-78) zu finden.

Allerdings verfügen diese Messmethoden nur über eine unzureichende Genauigkeit oder verlangen nach einer sehr großen Anzahl von Eingangsparametern, so dass es sich in der Praxis als nützlicher erwiesen hat, die Verdunstung mit Hilfe anderer meteorologischer Größen zu berechnen. Auch aus Gründen der Praktikabilität werden in der Meteorologie Näherungsformeln verwendet (HÄCKEL, 2005, S. 97).

Die für die Messung der Verdunstung bekannteste und weltweit als beste anerkannte Näherungsformel stammt von PENMAN. Die Penman-Formel berechnet die Verdunstung anhand der meteorologischen Größen Temperatur der Luft, Strahlungsbilanz, Windgeschwindigkeit und Sättigungsdefizit der Luft. Näheres zur Penman-Formel findet man bei HÄCKEL, 2005, S. 9; SCHRÖDTER, 1985, S. 110 und EHLERS, 1996, S. 53 bzw. S. 98.

Eine weitere Vereinfachung, für die klimatischen Verhältnisse in Mitteleuropa aber befriedigende Ergebnisse liefernde Berechnungsmethode, stellt die Formel von HAUDE dar (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 46), die in Kapitel 2.4.2 detailliert erläutert wird.

Für Mitteleuropa geben VAN EIMERN / HÄCKEL für die potenzielle Evapotranspiration Jahressummen von 500 – 750 mm an, während bei der tatsächlichen Verdunstung Jahressummen von 400 – 550 mm erreicht werden. Die Höchstwerte für einzelne Tage liegen an einzelnen warmen Sommertagen bei 6 mm und mehr (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 46).

Klimatische Wasserbilanz (KWB)

Eine Zusammenführung der meteorologischen Größen „Niederschlag“ und „Verdunstung“ findet in der sogenannten Klimatischen Wasserbilanz (KWB) statt.



Die KWB berechnet sich nach folgender Formel:

$$KWB = \text{Niederschlag} - \text{potenzielle Evapotranspiration}$$

Diese Größe ist besser dazu geeignet, den Grad der Trockenheit eines Standortes zu beschreiben als die Niederschlagsmenge allein (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 46). Man spricht von einer positiven KWB eines Standortes, wenn die Summe der Niederschläge die Summe der potenziellen Verdunstung übersteigt. Im umgekehrten Fall spricht man von einer negativen KWB (HÄCKEL, 2005, S. 155).

Wirkung des Wassers auf die Pflanze

Ein großer Teil des Wassers, den die Pflanze aufnimmt, wird direkt über Wurzel und Spross zu den Blättern weitergeleitet. Dort wird er zu Wasserdampf umgewandelt und diffundiert durch geöffnete Stomata zur Blattaußenseite und wird von dort an die Atmosphäre abgegeben (EHLERS, 1997, S. 98).

Als mathematische Größe zur Beschreibung des Verhältnisses von transpiriertem Wasser zu produzierter Trockenmasse wird der sogenannte Transpirationskoeffizient (TK) verwendet (EHLERS, 1997, S. 98). Er gibt an, wie viel Kilogramm Wasser benötigt werden, um 1 Kilogramm Trockenmasse zu erzeugen. Sein Kehrwert, die Produktivität der Transpiration, beziffert die pro Kilogramm Wasser erzielte Menge Trockenmasse in Gramm (EHLERS, 1996, S. 142).

Wird in die Berechnung des Koeffizienten auch die Evaporation des Bodens als Wasserverlustgröße einbezogen, spricht man vom „Evaporationskoeffizienten (ETK)“. Wenn zusätzlich auch noch die Versickerung des Wassers im Boden in Relation zur Trockenmasseerzeugung gesetzt wird, bezeichnet man dies als den Wasserverbrauchskoeffizienten WVK (EHLERS, 1997, S. 19). Nach KLAPP (1962) beeinflussen folgende Faktoren den Transpirationskoeffizienten: Niederschlag, Dampfhunger der Luft, Grundwasserlage und Düngung. Es wird deutlich, dass der Transpirationskoeffizient keine konstante Größe darstellt. Dementsprechend zeigt die folgende Übersicht eine große Spannweite an Transpirationskoeffizienten.



Frucht	TK ¹⁾ 1 kg ⁻¹	Jahr der Untersuchung	Autor	TK 1 kg ⁻¹
Millet (C ₄)	296			
Sorghum (C ₄)	308	1966/67	HANKS et al. 1968	333
Mais (C ₄)	351	1978-81	ROTH/GÜNTHER 1988	214 ²⁾
Weizen (C ₃)	488	1971	EHLERS 1976	388 ²⁾
		1983	ROTH/GÜNTHER 1988	301 ²⁾
		1975-92 (6 Jahre)	GALL et al. 1994	359 ²⁾
Gerste (C ₃)	529	1983	ROTH/GÜNTHER 1988	224 ²⁾
		1992	GALL et al. 1994	312 ²⁾
Hafer (C ₃)	562	1976/77	EHLERS 1989	243
		1982/83		
Zuckerrübe (C ₃)	394	1971	EHLERS 1976	210 ²⁾
		1984	ROTH/GÜNTHER 1988	188 ²⁾
Kartoffel (C ₃)	624	1986	ROTH/GÜNTHER 1988	185 ²⁾
		1974-92 (6 Jahre)	GALL et al. 1994	199 ²⁾
Luzerne (C ₃)	832			

¹⁾Tk-Werte gemessen von BRIGGS und SHANTZ aus den Jahren 1911-1913 (BRIGGS / SHANITZ, 1913a/b)

²⁾ ETK

Tabelle 4: Transpirationskoeffizienten verschiedener Kulturpflanzen (EHLERS, 1996, S. 147)

Weil sich die Berechnung eines pflanzenspezifischen Transpirationskoeffizienten auf Grund der schwierigen korrekten Erfassung der Wasserhaushaltskomponenten, der notwendigen Ausschaltung der Evaporation sowie der Abhängigkeit von der klimatischen Situation als relativ unsicher erwies, wurde schon früh versucht, die Beziehung zwischen dem Wasserverbrauch der Pflanze, ausgedrückt in der Transpiration und der Trockenmassebildung, präziser zu quantifizieren. ACHTNICH entwickelte eine Methode zur Berechnung des Wasserverbrauches der Pflanzen mit Hilfe der klimatologischen Daten, indem er die von BLANEY und CRIDDLE entwickelte Formel auf metrische Größen umstellte und unter Berücksichtigung des geographischen Breitengrades und einer Summe von Monatsklimafaktoren den pflanzenspezifischen Wasserverbrauch ermittelte (vgl. ACHTNICH, 1980, S. 97-100).

DE WIT (1958) entdeckte 1958 eine streng lineare Abhängigkeit des Trockenmasseertrages von der kumulativen Transpiration, wenn diese auf die potenzielle Evapotranspiration bezogen wird (EHLERS, 1996, S. 145). Die Berücksichtigung des Breitengrades und der Strahlungsbilanz wurden durch die Überlegungen von BIERHUIZEN und SLATYER (1965) überflüssig. Sie wiesen die Kopplung der TK an das Sättigungsdefizit der Luft experimentell und theoretisch nach und entwickelten folgende Formel:



$$P = K * T / \text{delta } e$$

Darin sind:

P	Produktionsrate
K	pflanzenspezifischer Faktor
T	Transpirationsrate
delta e	Wasserdampfsättigungsdefizit

Quelle: EHLERS, 1996, S. 145 – 147

RENGER und STREBEL fanden heraus, dass der TK mit zunehmendem Wasserdampfsättigungsdefizit ansteigt, d.h. es wird vergleichsweise mehr Wasser benötigt, um 1 kg Trockenmasse zu erzeugen (RENGER / STREBEL, 1982, S. 138). Unter Verwendung der obigen Formel von BIERHUIZEN und SLATYER zeigt EHLERS, dass auf Grund des ansteigenden delta e mit zunehmender Kontinentalität der Standorte die Produktivität der Transpiration nachlässt, der Transpirationskoeffizient also ansteigt (EHLERS, 1996, S. 153).

Die Überlegungen von RENGER und STREBEL aufgreifend, formulierten SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL das ackerbauliche Ziel, bei gegebenem Sättigungsdefizit die Transpiration durch Herabsetzung der Bodenwasserspannung zu erhöhen. Denn der Pflanzenertrag ist nicht nur von der Menge des zur Verfügung gestellten Wassers und von klimatischen Einflüssen abhängig, sondern auch von der Wasserspannung, unter der es den Pflanzen angeboten wird (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 203).

Irrtümlicherweise wurde in früheren Forschungsarbeiten angenommen, dass der TK von der Düngung bestimmt wird. So zitiert KLAPP Versuchsergebnisse, bei denen einer Ertragssteigerung von 125 % nur eine Erhöhung des Wasserverbrauchs von 4,4 % gegenübersteht (KLAPP, 1962, S. 1-5). EHLERS vermutet hingegen, dass „Nährstoffmangel die Beziehung zwischen produzierter Trockenmasse und transpiriertem Wasser wahrscheinlich nur unter sehr extremen Bedingungen verändert“ (EHLERS, 1997, S. 106). Den geringeren Anstieg des Wasserverbrauchs im Vergleich zur Steigerung des Ertrages schreibt er nicht einer Verringerung des TK, sondern einer gestiegenen Produktivität der Evapotranspiration oder des Wasserverbrauchs zu (EHLERS, 1996, S. 106).



Ein Mangel des Wachstumsfaktors Wasser bedeutet für die Pflanze Stress, der sich in verschiedenen pflanzenphysiologischen Reaktionen ausdrückt und zumeist in Ertragsdepressionen mündet. Während sich Wassermangel kaum auf die Zellteilung und die Assimilateverlagerung auswirkt, kommt es dagegen zu einer deutlichen Einschränkung der Zellvergrößerung. Auch die Respiration erhöht sich und der BFI verringert sich. Dies alles hat eine Reduzierung der Assimilation zur Folge, die wiederum zu einer Einschränkung der CGR führt und letztendlich in einer geringeren Gesamttrockenmasse resultiert. Auch eine frühere Seneszenz wird durch Wassermangel über einen längeren Zeitraum gefördert. Die negativen Folgen des Wassermangels werden dadurch verstärkt, dass sich der ökonomische Ertrag deutlicher reduziert als der Biomassertrag. Die Höhe des ökonomischen Ertrages hängt u.a. von der Wasserversorgung in bestimmten phänologischen Phasen der jeweiligen Kulturpflanze ab (EHLERS, 1996, S. 165-166). Unabhängig davon, welcher Vegetationsabschnitt der Getreidepflanze von einem Wassermangel betroffen ist, wird die Pflanze nicht mehr den maximal möglichen Biomassertrag erreichen, der bei stets ausreichender Wasserzufuhr hätte erreicht werden können (EHLERS, 1996, S. 171). Auch STOCK et al. kommen bei ihren umfangreichen Bewässerungsversuchen im Getreide zu dem Schluss, dass der höchste Kornertrag bei durchweg feuchten Bodenverhältnissen zu realisieren ist und beziffern den Mehrertrag der immer feuchten Versuchspartellen gegenüber den stets trocken gehaltenen Versuchsfeldern auf 47 % (STOCK et al., 1976, S. 793). Demgegenüber sind bei besagten Versuchsanordnungen als schlechtestes Wasserversorgungsszenario die Zustandsstufen feucht / trocken / trocken ermittelt worden. Hierbei waren nach einer sehr guten Wasserversorgung während des Schossens und folgenden trockenen Zuständen während des Ährenschiebens und der Kornfüllungsphase die Erträge nochmal um 19 % niedriger als in der durchgehend trockenen Versuchsvariante (STOCK et al., 1976, S. 793). Inwieweit eine Pflanze den Wassermangel während einer Vegetationsphase durch das ausreichende Wasserangebot während der darauffolgenden Vegetationsphasen ausgleichen oder gar überkompensieren kann, hängt auch davon ab, ob die Pflanze ein deterministisches oder ein nicht-deterministisches Wachstum aufweist. Beim nicht-deterministischen Wachstum laufen mehrere Wachstumsphasen parallel zueinander ab, und Zeiträume des Wassermangels können besser überstanden werden als bei Pflanzen mit deterministischem Wachstum. Die



Getreidearten inklusive des Maises gehören zur Gruppe der Pflanzen mit deterministischem Wachstum.

Wasseranspruch der Pflanzen in einzelnen Vegetationsabschnitten

Eine ausreichende Wasseraufnahme ist unbedingte Voraussetzung für den Beginn der Keimung des Getreidekorns. Unter normalen Klimabedingungen ist diese in Mitteleuropa zumeist vorhanden. Eine ungleich größere Bedeutung hat die Wasserversorgung während der Jugendphase, der Bestockung. Ein Wassermangel während der Bestockung führt zu einer verstärkten Reduzierung der produktiven Bestockungstriebe durch die Pflanze, was sich unmittelbar in einer Minderung des Ertrages ausdrückt. Eine etwas weniger bedeutsame Auswirkung hat ein Wassermangel während der Differenzierung der Ährchenstufen. Dadurch wird diese Entwicklungsstufe verkürzt und die Anzahl der Ährchen pro Fruchtstand reduziert (GEISLER, 1983, S. 57). Auch ein Wassermangel während des Schossens, der Hauptwachstumsphase, wirkt sich unmittelbar auf den Trockenmasseertrag aus, da die Getreidepflanzen während dieser Vegetationsphase besonders hohe Anforderungen an die Wasserversorgung stellen. Auf einen Mangel der Wasserverfügbarkeit reagiert die Getreidepflanze mit einer deutlichen Reduzierung der fertilen Blüten pro Ährchen (GEISLER, 1983, S. 57). Ein Wassermangel während der Entwicklungs- und Wachstumsphase der Karyopse führt zur Einschränkung mehrerer biologischer Prozesse. Zum einen vermindert sich die photosynthetische Aktivität, wodurch weniger Assimilate für die Translokation zur Verfügung stehen. Zudem unterliegt das photosynthetisch aktive Gewebe einem verstärkten Alterungsprozess. Zum anderen verursacht der Wassermangel eine Verringerung der Translokation, was sich unmittelbar in einer Minderung des Einzelkorngewichtes ausdrückt (GEISLER, 1983, S. 57).

In welchem Ausmaß ein Wassermangel zu Ertragseinbußen führt, hängt von mehreren Bedingungen ab. Den größten Einfluss auf die Quantität der Ertragsverluste nehmen die Intensität und Dauer, aber auch der Zeitpunkt des Wassermangels. Außerdem ist von Bedeutung, ob sich an die Phase des Wassermangels eine Phase der ausreichenden Wasserversorgung anschließt, die Pflanze also u. U. die vorausgegangene Verschlechterung der Ertragsvoraussetzungen wieder ausgleichen oder gar überkompensieren kann (EHLERS, 1996, S. 171).

Zusammenfassend bleibt also festzuhalten, dass in allen Vegetationsabschnitten ein Wassermangel zu Ertragsminderungen führt, die sich im konkreten Fall wie folgt ausdrücken:

Phase des Wassermangels	Ertragsphysiologische Auswirkung
Schossen	Verminderung der Bestandesdichte
Ährenschieben und Blüte	Geringere Kornzahl / Ähre
Kornfüllungsphase	Verringerung des Einzelkorngewichtes

STOCK et al. ermittelten in einem Gefäßversuch mit differenzierter Wasserversorgung die Wirkung auf Ertragskomponenten und Kornertrag anhand des Beispiels Sommerweizen (siehe Tabelle 5).

Bodenfeuchte im Feekes-Stadium			Ähren / Gefäß	Körner / Ähre	TKM 86% TM g	Kornertrag 100% TM g/Gefäß
2...10	10...16	16...18,5				
trocken	trocken	trocken	30	15	29,0	11,4
trocken	trocken	feucht	27	16	34,6	12,6
trocken	feucht	trocken	28	20	25,6	11,8
trocken	feucht	feucht	30	17	28,2	12,0
feucht	trocken	trocken	24	14	30,2	9,2
feucht	trocken	feucht	26	16	33,4	12,5
feucht	feucht	trocken	28	22	23,9	12,7
feucht	feucht	feucht	32	20	28,7	16,7

GD 5 %

Trocken = 30 % WK

Feucht = 65% WK

Tabelle 5: Wirkung von Wassermangel (STOCK et al., 1976, S. 793)

Klar ersichtlich anhand dieser Übersicht ist der deutlich herausragende Ertrag der stets feucht gehaltenen Versuchsvariante und die unmittelbare Auswirkung des Feuchtestatus innerhalb bestimmter Vegetationsabschnitte auf entsprechende Ertragskomponenten (siehe Zeilen 3 und 6 der Tabelle 5).

Ergänzend weist EHLERS darauf hin, dass auch eine Überversorgung mit Wasser sich nachteilig auf das Pflanzenwachstum auswirkt. So können sich unter zu feuchten Bedingungen Schaderreger verstärkt ausbreiten, die Bodenerwärmung kann sich verzögern und durch auftretende Sauerstoffarmut kann das Wurzelwachstum und die N-Mineralisation gehemmt werden. Zudem wird durch eine



übermäßige Wasserversorgung das Sprosswachstum stimuliert und das Korn-Stroh-Verhältnis gesenkt (EHLERS, 1996, S. 178).

2.4 Identifizierung der ertragsbeeinflussenden Wachstumsparameter mit dem größten Einfluss auf den Ertrag

In Anlehnung an das Liebigsche Minimumgesetz, das besagt, dass der pflanzliche Ertrag durch den im Minimum vorliegenden Wachstumsfaktor bestimmt wird, und der Weiterentwicklung des Minimumgesetzes durch Mitscherlichs Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs gilt es, aus der Vielzahl der in den vorausgegangenen Kapiteln dargestellten Wachstumsfaktoren denjenigen zu identifizieren, der durch seine Knappheit und sein heterogenes Vorkommen in der Fläche (siehe Kapitel 3) den Erklärungsansatz für die Ertragsheterogenitäten, die mit Hilfe der Ertragskartierung auf den Versuchsflächen im Rahmen der vorliegenden Arbeit gemessen wurden, liefert.

HARRACH verweist in mehreren Aufsätzen darauf, dass „unter geltenden technischen und wirtschaftlichen Bedingungen, die eine intensive Düngung ermöglichen, der Faktor Wasser am häufigsten das Ertragspotenzial bestimmt“ (HARRACH, 1978, S. 115). Er merkt an anderer Stelle an, dass die Wasserhaltefähigkeit des Bodens – als Parameter zur Abbildung des Wasserbereitstellungsvermögens der Fläche – die wichtigste ertragsbestimmende Bodeneigenschaft sei (bei unterstellten optimalen Nährstoffversorgungszuständen). Des Weiteren bezeichnet er „die Bodeneigenschaften, die bei optimaler Bewirtschaftungsweise einen höheren Ertrag verhindern, also die Minimumfaktoren im Sinne Liebigs darstellen“, als die „begrenzenden Faktoren des Ertragspotenzials“ (HARRACH, 1978, S. 116). Auch KEIL ordnet den Wasserhaushalt als wichtigsten Faktor für den Ertrag einer Pflanzenkultur ein (KEIL, 1991, S. 106).

In der vorliegenden Arbeit wird der Wasserhaushalt der Versuchsflächen anhand eines dreistufigen Aufbaus kleinräumig flächendifferenziert dargestellt. Als Vorlage diente dabei eine Verfahrensweise zur Abbildung des Wasserhaushaltes unter Verwendung eines Modells der klimatischen Wasserbilanz, wie es bereits 1936 von KUHNKE (1936, S. 149) angewandt wurde.

In der ersten Ebene wird das Wasserangebot skizziert, das den Pflanzen zur Verfügung steht. Das Wasserangebot setzt sich zusammen aus den Niederschlägen,

die während der Vegetationsperiode fallen, und dem Wasserhaltevermögen des Bodens, erfasst mit der Messgröße „nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes“ (siehe Kapitel 2.4.1).

Die zweite Ebene des Modells beinhaltet den Wasserverbrauch des Pflanzenbestandes, quantifiziert durch die Messgröße der Evapotranspiration (ETP), also der Verdunstung. Die Zusammenführung dieser beiden Eingangs- und Ausgangsgrößen erfolgt in der dritten Ebene mit dem Instrument der klimatischen Wasserbilanz. Die Tageswerte der klimatischen Wasserbilanz werden nach Penman-Wendling ermittelt und vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellt. Darin wird über die Zeit hinweg während der Vegetationsperiode der Saldo des Wasserhaushaltes abgebildet (siehe Kapitel 2.4.3). In Abbildung 16 ist der Aufbau des Modells graphisch dargestellt.



Abbildung 16: Dreistufiges Modell zur Berechnung der Klimatischen Wasserbilanz eines Pflanzenbestandes (Eigene Darstellung)

2.4.1 Nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes (nFKdB)

Die beiden ertragsbeeinflussenden Parameter Niederschlag und nFK sind in vorhergehenden Kapiteln bereits beschrieben worden (vgl. Kapitel 2.3.4 und 2.2.2). In diesem Abschnitt wird die hervorgehobene Bedeutung der nFK für die Ertragsbildung herausgearbeitet.

Einer der ersten bekannten Hinweise für die enorme Relevanz des Wasserhaltevermögens von Böden findet sich in der wissenschaftlichen Literatur 1931 bei SEKERA in seinem Beitrag „Die Beurteilung der Wasserversorgung der Pflanzen als Standortfaktor“ (SEKERA, 1931). Darin zeigt er auf, in welchem Maße die Pflanze durch „die Größe und Leistungsfähigkeit des Wasserreservoirs im Boden [...] von der Niederschlagsverteilung während der Vegetationszeit abhängig ist“



(SEKERA, 1931, S. 176). Er kommt zudem zu der Erkenntnis, dass die Tiefe des pflanzenverfügbaren Wasserreservoirs durch den Wurzeltiefgang determiniert wird. SEKERA definiert die Menge des Wassers, den ein Boden den Pflanzen zur Verfügung stellen kann, als „Regenkapazität“ und bezeichnet die Summe aus „Regenkapazität“ und „Vegetationsregen“ als „wirksame Regenmenge“ (SEKERA, 1931, S. 176). In einer Versuchsanordnung ermittelt er die nahezu lineare Abhängigkeit des Ertrages von der Regenkapazität (SEKERA, 1931, S. 177). Als Quintessenz seiner gewonnenen Erkenntnisse formuliert er die These: „In einem regenarmen Gebiet ist die Regenkapazitätskarte das Spiegelbild der Ertragskarte, d.h. der Ernteertrag der einzelnen Felder wird vornehmlich durch die Wasserspeicherung im durchwurzelteten Boden bestimmt“ (SEKERA, 1931, S. 181).

Diese These von SEKERA ist der zentrale wissenschaftliche Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit, nachdem fast ein Jahrhundert nach dieser bahnbrechenden Erkenntnis mit der satellitengestützten Ertragskartierung auf Mähdreschern die notwendigen technischen Mittel vorhanden sind, um diese These in sehr kleinräumiger Auflösung für gleichzeitig große Flächenumfänge zu untersuchen.

Bezugnehmend auf die Arbeiten von SEKERA bezeichnet HARRACH die Wasserversorgung als den „am häufigsten das Ertragspotenzial begrenzenden edaphischen Faktor“ (HARRACH, 1978, S. 116). Als Weiterentwicklung des Begriffes „Regenkapazität“ führt HARRACH für das Wasserhaltevermögen eines Bodens die Bezeichnung „Nutzbare Feldkapazität des durchwurzeltbaren Bodenraumes (nFKdB)“ ein.

Er bewertet die nFKdB als „brauchbares Maß für das Ertragspotenzial des Bodens“, weil „eine eindeutige Korrelation zwischen der Nutzwasserkapazität und den Erträgen bei optimaler Bewirtschaftung“ bestehe“ (HARRACH, 1978, S. 117).

Auch KEIL findet bei seinen Untersuchungen eindeutige Beziehungen zwischen der nFK und dem Ertrag (vgl. KEIL, 1991, S. 159 ff.). Er arbeitet zudem den großen Anteil des durchwurzelteten Unterbodens an der Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzenbestände heraus und verweist in einer Kausalkette auf die hohe Gründigkeit der Böden als Ursache für bessere Erträge, da durch die Tiefgründigkeit der Böden die Wurzellänge im Unterboden und damit auch die

pflanzenverfügbare Bodenwassermenge steige (KEIL, 1991, S. 141). Zudem führt er als indirekte Ertragswirkung des hohen Bodenwassergehaltes die gesteigerte Nährstoffbereitstellung an die Pflanze durch einen ausreichenden Feuchtigkeitszustand des Bodens an (KEIL, 1991, S. 161, vgl. auch Kapitel 2.2.3). KEIL weist zusammenfassend nach, dass mit zunehmender Wurzellänge und zunehmender nFK folgende Ertragsparameter signifikant ansteigen: Anzahl Körner / Ähre, Anzahl Ähren / m² und Flächenertrag (KEIL, 1991, S. 144). Zudem bestätigt KEIL die These von SEKERA (siehe oben), dass feuchte Jahre den Einfluss des Wasserhaltevermögens der Böden auf den Ertrag nivellieren, da regelmäßige Niederschlagsereignisse die Notwendigkeit der Wasserspeicherung verringern. Diesen Tatbestand gilt es an späterer Stelle dieser Arbeit anhand der Ertragskarten und den zu erwartenden homogeneren Ertragsverhältnissen in feuchten Jahren zu überprüfen.

2.4.2 Evapotranspiration (ETP)

Die physikalischen Grundlagen des meteorologischen Vorgangs der Evapotranspiration (Verdunstung) sind in Kapitel 2.3.4 dargelegt worden.

Von zahlreichen Autoren ist die Abhängigkeit des Ertrages von dem Verhältnis zwischen Transpiration und Wasserdampfsättigungsdefizit beschrieben worden (EHLERS, 1996; VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984). Aus diesem funktionalen Zusammenhang resultiert die enorme Bedeutung der ETP für die Generierung des Ertrages. KNEIB und SCHRÖDER quantifizieren diesen Zusammenhang, indem sie die Zunahme des Ertrages bei einer Reduzierung des Wasserdampfsättigungsdefizites um 1 mbar auf 5 % des jeweiligen Höchstertrages beziffern (KNEIB / SCHRÖDER, 1984 zitiert in REIMER / LAMP, 2002, S. 99-100).

Zur Bemessung der ETP sind im Laufe der Zeit eine große Anzahl von Verfahren entwickelt worden (vgl. Auflistung bei SCHRÖDTER, 1985, S. 23 ff). Viele dieser Verfahren sind von komplizierter Struktur und verlangen eine hohe Anzahl an Eingangsparametern, deren Erhebung großen Aufwand bedeutet. Aus dem Bedürfnis der Nutzung eines einfachen handhabbaren Verfahrens für praktische Zwecke heraus entwickelte GUSTAV HAUDE 1952 seine Formel zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration.



Die HAUDE-Formel zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration besitzt folgendes Aussehen:

$$ETP = f * (Es14 - e14) \text{ mm/Tag}$$

Darin sind:

ETP	potenzielle Evapotranspiration (Maximaler Höchstwert = 7 mm / Tag)
f	Proportionalitätsfaktor (nach Monat und Anbaukultur differenziert)
Es14	Sättigungsdampfdruck der um 14 Uhr gemessenen Temperatur
e14	Dampfdruck, um 14 Uhr gemessen
(Es14 – e14)	Sättigungsdampfdruckdefizit um 14 Uhr

Bei der HAUDE-Formel sind die Ansprüche an die Anzahl der Eingangsparameter gering. Nach Erkenntnissen von HAUDE erhöht sich die Genauigkeit der Formel nicht, wenn weitere meteorologische Faktoren zur Berechnung herangezogen werden (HAUDE, 1954, S. 8/14-8/15).

Ein weiterer großer Vorteil dieser Formel liegt darin, dass die benötigten Eingangsparameter auf relativ einfache Weise erhoben werden können. Anhand der Tabelle 6 kann der um 14 Uhr gemessenen Temperatur der jeweilige Sättigungsdampfdruck zugeordnet werden.



Sättigungsdampfdruck E_s in mbar bzw. mm Hg in Abhängigkeit von der Temperatur T in °C

T °C	$E_s \frac{\text{mbar}}{\text{mm}}$						
0,0	6,11 4,58	10,0	12,27 9,20	20,0	23,37 17,53	30,0	42,43 31,83
1,0	6,57 4,93	11,0	13,12 9,84	21,0	24,86 18,65	31,0	44,93 33,70
2,0	7,05 5,29	12,0	14,02 10,52	22,0	26,43 19,82	32,0	47,55 35,67
3,0	7,58 5,69	13,0	14,97 11,23	23,0	28,09 21,07	33,0	50,31 37,74
4,0	8,13 6,10	14,0	15,98 11,99	24,0	29,83 22,37	34,0	53,20 39,90
5,0	8,72 6,54	15,0	17,04 12,78	25,0	31,67 23,75	35,0	56,24 42,18
6,0	9,35 7,01	16,0	18,17 13,63	26,0	33,61 25,21	36,0	59,42 44,57
7,0	10,01 7,51	17,0	19,37 14,53	27,0	35,65 26,74	37,0	62,76 47,07
8,0	10,72 8,04	18,0	20,63 15,47	28,0	37,80 28,35	38,0	66,26 49,70
9,0	11,47 8,60	19,0	21,96 16,47	29,0	40,06 30,05	39,0	69,93 52,45

Umrechnung von mm Hg in mbar: $1 \text{ mm Hg} = 1,33322 \text{ mbar}$

Tabelle 6: Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit der Temperatur (SCHRÖDTER, 1985, Hilfstafel 5, S.177)

Wenn anstatt des Dampfdruckes um 14 Uhr nur die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur eben jener Uhrzeit vorliegen, lässt sich über folgende Formel das Sättigungsdefizit direkt berechnen:

$$(ES_{14} - e) = E_s(1 - RH/100)$$

Darin sind:

- Es Sättigungsdampfdruck, berechnet mit Hilfe von Tabelle 6
- e Dampfdruck, in diesem Fall nicht bekannt
- RH Relative Luftfeuchtigkeit



Bei der Verwendung der Proportionalitätsfaktoren haben sich die von VAN EIMERN und HÄCKEL 1984 eingeführten Zahlenwerte als anerkannte Größe durchgesetzt (siehe Tabelle 7)

	a Gras kurz gehalten	b Wiese	c Mais	d Zuckerrübe	e Winterweizen
April	0,24	0,29	-	0,15	0,26
Mai	0,29	0,29	-	0,23	0,34
Juni	0,29	0,28	0,26	0,30	0,34
Juli	0,28	0,26	0,25	0,36	0,34
August	0,26	0,25	0,25	0,32	-
September	0,23	0,23	-	0,26	-
Oktober	0,20	0,22	-	-	-

Tabelle 7: Proportionalitätsfaktoren zur Verwendung in der HAUDE-Formel (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 249)

Die HAUDE-Formel hat sich seit ihrer Festlegung in der vorliegenden Form in den zurückliegenden Jahren bewährt (siehe auch HAUDE, 1955; SCHRÖDTER, 1985; VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984; HÄCKEL, 2005) und sich als meist verwendete Formel auf diesem Gebiet etabliert (SCHRÖDTER, 1985, S. 94-95). Zudem verweist SCHRÖDTER darauf, dass die HAUDE-Formel bei der Berechnung der KWB der vergleichsweise kompliziert aufgebauten Formel von THORNTHWAITE überlegen ist (SCHRÖDTER, 1985, S. 96).

Die häufigsten Kritikpunkte am Aufbau der HAUDE-Formel sind folgende:

- a) Vernachlässigung der Windgeschwindigkeit
- b) Mögliche Divergenz zur aktuellen Evapotranspiration
- c) Eingangsdatenerhebung zu nur einem Tageszeitpunkt

Zu a): HAUDE selbst erachtet den Einfluss der Windgeschwindigkeit als unbedeutend und stellte fest: „Die verschiedenen Windstärken haben bei längerer Andauer anscheinend nur bei voll benetzten Flächen wie bei einer Ackerfläche sofort nach Regen, aber nicht bei der Wasserabgabe aus den Kapillaren mit ihrem verzögernden Nachschub einen größeren Einfluss auf die Verdunstung“ (HAUDE, 1954, S. 8/15).

Zu b): HÄCKEL begründet den Einsatz der HAUDE-Formel u. a. damit, dass in unseren Breiten die aktuelle Verdunstung oft gleich der potenziellen Verdunstung sei (HÄCKEL, 2005, S. 38). HAUDE verweist darauf, dass die aktuelle ETP gleich der potenziellen ETP sei, „bis über eine Reihe von Tagen seine Regenkapazität [des Bodens] erschöpft ist“ (HAUDE, 1954, S. 8/18).

RENGER et al. zeigen in einer Studie, dass in einem Bereich von 50 – 100 % der nFK die aktuelle ETP der potenziellen ETP entspricht (vgl. RENGER et al., 1974, S. 155).

Zu c): Die Fokussierung der Eingangsdatenerhebung auf einen einzigen Zeitpunkt im Tagesverlauf erweist sich v. a. dann als Schwachpunkt der HAUDE-Formel, wenn das Wettergeschehen um 14 Uhr deutlich von den meteorologischen Bedingungen am Rest des Tages abweicht, z.B. durch einen Regenschauer oder eine kurzzeitige Bewölkung. Auf diese Schwäche verweist KORTE und benennt zugleich eine Lösungsmöglichkeit, indem er anmerkt, dass das HAUDE-Verfahren zwar keine brauchbaren Tageswerte, dafür aber gute Werte auf Monatsbasis liefert (KORTE, 1961, S. 9 ff.).

2.4.3 Klimatische Wasserbilanz (KWB)

Der grundlegende Aufbau der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) ist bereits in Kapitel 2.3.4 skizziert worden. Nach VAN EIMERN / HÄCKEL ist die KWB das am besten geeignete Instrument, um den Trockenheitsstatus eines Standortes zu beschreiben (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 46). Eingang in die wissenschaftliche Welt fand der Begriff der KWB durch KUHNKE (1936), der dadurch die Möglichkeit schuf, das Wettergeschehen in einer Zahl zusammenzufassen (KORTE, 1961, S. 9 ff.). Mitteleuropa ist als Gebiet mit einer negativen KWB anzusehen, in dem im Winter die Feldkapazitäten durch hohe Niederschläge wieder aufgefüllt werden (HARRACH, 1978, S. 116-117). Daraus resultiert auch die hohe Abhängigkeit des Pflanzenwachstums von der nFK in großen Teilen Deutschlands. Auch für die Flächen des Lehr- und Versuchsbetriebes Marienborn-Heldenbergen lässt sich anhand der Tabelle 8 erkennen, dass in den Monaten Mai bis September im Durchschnitt der Jahre 1961 – 1990 ein Wasserbilanzdefizit herrscht.



	Niederschlag	Temperatur	Verdunstung	Wasserbilanz
Summe / Ø	761	9,0	604	157
Januar	55	0,1	15	40
Februar	48	1,2	20	28
März	56	4,6	37	19
April	58	8,4	58	0
Mai	67	13,0	84	-17
Juni	80	16,2	92	-12
Juli	72	17,9	97	-25
August	71	17,3	85	-14
September	54	13,9	57	-3
Oktober	58	9,6	33	25
November	68	4,4	15	53
Dezember	74	1,2	11	63

Tabelle 8: Klimadaten Marienborn 1961 – 1990 (Eigene Darstellung)

Wasserbilanzdefizite können über einen bestimmten Zeitraum durch das von der nFK gehaltene Bodenwasser ausgeglichen werden. Ertragseinbußen treten im Allgemeinen erst dann auf, wenn der Wassergehalt des Bodens 50 % der nFK unterschreitet. Die Höhe der Ertragseinbußen hängt von der zeitlichen Länge des Unterschreitens der 50 % - nFK - Grenze ab (RENGER et al., 1974, S. 149). Als graphisches Instrument zur Abbildung des zeitlichen Verlaufes der KWB bietet sich die so genannte Wasserhaushaltskurve an, wie sie in Abbildung 17 exemplarisch am Beispiel eines Beregnungsversuchs dargestellt ist.

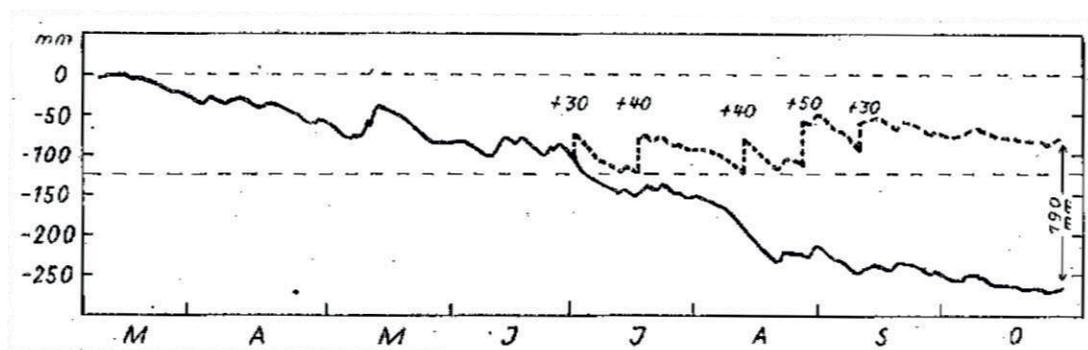


Abbildung 17: Wasserhaushaltskurve (HAUDE, 1954, S. 8/18)



In einer Wasserhaushaltskurve wird das Wasserangebot ins Verhältnis gesetzt zum Wasserverbrauch und fortlaufend in den gewünschten Zeitabständen (Tage, Pentaden, Dekaden, Monate) in die Übersicht eingetragen.

Um die Auswirkungen und den Erklärungsbeitrag des jahreszeitlichen Verlaufes der KWB auf die Ertragsvoraussetzungen der jeweiligen mit einem bestimmten nFK-Wert belegten Teilflächen abzubilden, werden mit Hilfe einer Wasserhaushaltskurve die wesentlichen meteorologischen Parameter der KWB eingetragen. Der Aufbau und die Restriktionen des Modelles zur Abbildung der KWB erfolgen in Anlehnung an bereits in der Vergangenheit durchgeführten Aufzeichnungen der Klimatischen Wasserbilanzen (vgl. KUHNKE, 1936; HAUDE, 1954; SCHRÖDTER 1985; RENGER / STREBEL, 1982). Daraus abgeleitet gelten für das KWB-Modell auf den Versuchsflächen in Marienborn-Heldenbergen folgende Vorgaben:

1. Rechenzeitraum ist vom 1. April bis 31. Juli des Jahres
2. Berechnungsunterteilung ist die Dekade
3. Ermittlung der Niederschläge durch hofeigene Wetterstation und Deutschen Wetterdienst (DWD)
4. Ermittlung der Klimatischen Wasserbilanz direkt durch Daten des DWD
5. Es wird eine restlos aufgefüllte nFK am 1. April angenommen
6. Ausgangspunkt ist der Nullpunkt, d.h. die kumulierte KWB wird schnell negativ
7. Negative Auswirkungen auf den Ertrag werden ab einem Unterschreiten von 50 % der nFK unterstellt
8. Die KWB-Berechnung erfolgt für jeden einzelnen Bodenbohrpunkt unter Berücksichtigung der dort festgestellten nFK



3 Kleinräumige Wachstumsfaktoren

3.1 Der Begriff Heterogenität

Die zentrale und unabdingbare Voraussetzung für den Einsatz und die Durchführung der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung ist eine vorhandene Heterogenität der den Ertrag beeinflussenden räumlich vorliegenden Wachstumsparameter. So ist nach LAMP et al. der Einsatz der Technik zur „teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion nur dann sinnvoll und ökonomisch akzeptabel, wenn innerhalb großer Ackerschläge eine hinreichend hohe Heterogenität der Böden und Pflanzenbestände vorhanden ist“ (LAMP et al., 1998, S. 7).

Dieser Tatbestand ist häufig gegeben, da die Bodendecke auf Grund ihrer Entstehungsgeschichte oftmals eine hohe Variabilität der Böden und Bodeneigenschaften aufweist (RICHTER et al., 2007, S. 16). Um einen ökonomischen Vorteil aus einer Heterogenität erzielen zu können, ist die möglichst genaue Kenntnis über die räumliche Verteilung der pflanzenbaulich bedeutsamen Einflussparameter grundlegende Voraussetzung (LUDOWICY et al., 2002, S. 29).

3.1.1 Ursachen und Formen der Heterogenität

Die Ursachen für Boden- und Bestandesheterogenität in der Fläche sind vielfältig und beeinflussen in großem Maße die Dauerhaftigkeit der kleinräumigen Boden- und Bestandesunterschiede. Man differenziert die folgenden Ursachen für Heterogenität, die hier nach abnehmender Dauerhaftigkeit geordnet aufgeführt werden:

- a) Relief und damit verbundene Einflüsse des Mikroklimas
- b) Bodenmerkmale, wie Bodenart und nutzbare Feldkapazität
- c) Landtechnisch bedingte Heterogenitäten, durch Bearbeitungsvorgänge im Zuge der Landbewirtschaftung verursacht
- d) Externe Faktoren, wie Windschatten oder Schädlinge, die sporadisch oder dauerhaft auftreten können
- e) Durch Nutzungsart und Fruchtfolge verursachte, mittelfristig veränderbare Nährstoffvorräte
- f) Kurzfristig schwankende mobile Nährstoffe, die in Abhängigkeit des Wärme- und Wasserhaushaltes zu Heterogenitäten des Pflanzenbestandes führen (LAMP et al., 1998, S. 9).



Die Ausgestaltung der kleinräumigen Unterschiede zeigt sich in drei Formen:

- A) Heterogenität der Bodenfruchtbarkeit
- B) Heterogenität der Kulturpflanzen
- C) Heterogenität von Schadorganismen

Die größte Bedeutung besitzt hierbei die Heterogenität der Bodenfruchtbarkeit. Sie ist mit der größten Dauerhaftigkeit ausgestattet und ist kurz- bis mittelfristig kaum beeinflussbar. Innerhalb der Bodenheterogenität unterscheidet man drei Antriebskräfte der räumlichen Unterschiede. Geogen bedingte Heterogenitäten äußern sich in einer hohen „Lithovarianz“. Das räumlich variable Auftreten der Transportkräfte Wasser, Wind, Eis und Hangrutschen führten und führen noch zu differenziert geschichteten Lockersedimenten. Auch anstehendes oder bedecktes Festgestein kann sich in einer geogen bedingten Heterogenität der Bodenfruchtbarkeit äußern (LAMP et al., 1998, S. 9).

Ein weiterer Auslöser für kleinräumige Heterogenitäten sind pedogene Kräfte mit verschiedenen Prozessen der Bodenbildung. Durch Pflanzen und Tiere verursachte Bioturbationen, Wechselfeuchte, die zu sehr kleinräumigen Hydroturbationen führt oder auch durch Wasserfluss erzeugte hohe Topovarianz resultieren in einer Heterogenität der Bodenfruchtbarkeit. Zudem sorgt der anthropogene Einfluss in Form von Arasion (Transport durch Pflugarbeit) oder Wind- oder Wassererosion für eine Umlagerung der Ackerkrume (LAMP et al., 1998, S. 9-10). Die hier aufgeführten Ursachen sind zum großen Teil für die Heterogenität eines Pflanzenbestandes verantwortlich. Der Einfluss der Heterogenität der Bodenfruchtbarkeit zeigt sich in einer Differenzierung der Entwicklung der Kulturpflanzen, des Wachstums der Pflanzen und in einer räumlichen Heterogenität der Qualitätsmerkmale des Ernteproduktes, wie z.B. Eiweiß- und Stärkegehalt bei Getreide (LAMP et al., 1998, S. 10).

Als Folge und in Kombination der beiden genannten Formen der Heterogenität resultiert die Heterogenität von Schadorganismen, die in Gestalt von Unkräutern, Schädlingen und Krankheiten flächendifferenziert auftreten können (LAMP et al., 1998, S. 10). Mit Hilfe geostatistischer Methoden (siehe Kapitel 3.1.2) kann eine Unterteilung von Schlägen hinsichtlich ihrer vorhandenen Heterogenität im Hinblick auf ihre Tauglichkeit für die Anforderungen der teilflächenspezifischen



Landbewirtschaftung vorgenommen werden. Man unterscheidet hierbei drei Formen schlaginterner Varianz:

- a) Homogene (zu wenig heterogene) Schläge sind durch niedrige maximale Semivarianzen und/oder sehr weite mediane Distanzen im Bereich der Schlaggröße gekennzeichnet. Diese Schläge sind für Precision Farming ungeeignet.
- b) Schläge mit viel regelbarer Heterogenität: In diesen Schlägen liegen die medianen Distanzen eindeutig oberhalb der Pedozellen (= kleinste ansteuerbare Regeleinheit im Precision Farming mit ca. 20 x 20 m Größe), aber unterhalb der Schlaggröße, und die Maximalvarianz liegt weit oberhalb des Nuggeteffektes. Diese Schläge sind sehr gut geeignet für Precision Farming.
- c) Schläge mit zu kleinräumiger Heterogenität: Diese Schläge weisen mediane Distanzen auf, die unterhalb oder im Bereich der Pedozellengröße liegen und deshalb nicht mehr ansteuerbare Heterogenitäten besitzen und daher nicht für Precision Farming geeignet sind (HERBST / REIMER, 2004, Kap. 3, S. 22-23).

3.1.2 Maße zur Heterogenitätsberechnung

Zur Quantifizierung der vorhandenen Heterogenitäten einer landwirtschaftlichen Nutzfläche bzw. eines Pflanzenbestandes müssen Methoden und Instrumente gefunden werden, die eine Einstufung des Schlages bzw. des Pflanzenbestandes hinsichtlich der Eignung für den teilflächenspezifischen Pflanzenbau erlauben. Hierzu merkt HERBST an: „Die Anwendung von geostatistischen Methoden zur Beschreibung und Analyse räumlich korrelierter Daten ist besonders geeignet, um aus Variogrammfunktionen Kennwerte über vorhandene Heterogenitäten zu erhalten, mit denen sowohl die Eignung eines Schlages für ortsspezifische Maßnahmen bewertet als auch eine effiziente Bodenbeprobung geplant werden kann“ (HERBST, 2005, Kap. 3, S. 22). „Die Geostatistik ist die Wissenschaft von der Beschreibung und Analyse räumlich korrelierter Massendaten“ (LAMP et al., 1998, S. 12) und bietet entsprechende Werkzeuge und Methoden an, um räumliche Heterogenitäten zu beschreiben und zu quantifizieren. Das gebräuchlichste und zentrale Mittel der Geostatistik zur Beschreibung räumlicher Heterogenitäten ist das Variogramm (AKIN / SIEMES, 1988, S. 30).

Mit Hilfe einer Variogrammanalyse lässt sich ermitteln, bis zu welcher Entfernung die Merkmalsausprägungen im Raum verteilter Parameter in einem erkennbaren räumlichen Zusammenhang stehen. Hierbei gibt das Semivariogramm die mittlere Streuung der Differenzen von Werten eines Merkmals an, die in einem bestimmten, zuvor definierten, räumlichen Abstand voneinander entfernt liegen (LUDOWICY et al., 2002, S. 37). Die Enge der Korrelation wird durch die Semivarianz wiedergegeben. Als Semivarianz bezeichnet man die auf die halbe Stichprobenanzahl normierte Summe der Abweichungsquadrate aller Werte innerhalb eines Distanzbereiches (LAMP et al., 1998, S. 13). Die Semivarianz berechnet sich wie folgt:

$$\gamma_h = \sum_i^{n-h} (X_i - X_{i+h})^2 / 2n$$

Darin sind:

γ_h	Semivarianz
X_i	Merkmalswert am Standort x_i
X_{i+h}	Merkmalswert am Standort, der um h von X_i entfernt liegt

Diese ermittelten Werte der Semivarianz werden gegen die räumliche Entfernung der Merkmalsstandorte abgetragen (LAMP et al., 1998, S. 13 ff.) und in der in Abbildung 18 aufgeführten Art und Weise in einem Variogramm dargestellt.

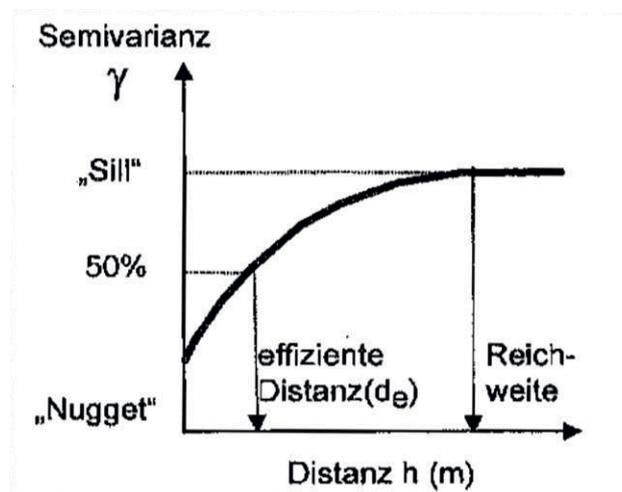


Abbildung 18: Kennwerte der Variogramme (LAMP et al., 1998, S. 14)



In der Abbildung 18 sind noch weitere Kennwerte von Variogrammen aufgeführt, die für die Analyse der Bodenheterogenität von Bedeutung sind.

Schwellenwert

Dieser Wert gibt die maximale Semivarianz an (falls diese nicht stetig ansteigt).

Reichweite

Die Reichweite ist der auf der x-Achse abgetragene Betrag des Schnittpunktes des Schwellenwertes mit der Funktion des Variogrammes.

Effiziente Distanz

Die effiziente Distanz (auch mediane Distanz genannt) ist der auf der x-Achse abgetragene Wert des Schnittpunktes der Hälfte der relevanten Semivarianz (Schwellenwert Nugget) mit der Funktion des Variogrammes.

Nugget

Der Nugget, auch als Kerneffekt bezeichnet, gibt die unvermeidbare Restvarianz (Fehler) bei sehr geringen Punktabständen an (LAMP et al., 1998, S. 13 ff.).

Mit Hilfe dieser Kenngrößen lässt sich eine fundierte Beschreibung und Analyse räumlicher Heterogenitäten vornehmen. Bei der Interpretation eines Variogrammes deuten hohe Semivarianzen auf stark abweichende Merkmalswerte innerhalb des gewählten räumlichen Abstandes und damit einen geringen Zusammenhang der Merkmalswerte hin. Ein starker räumlicher Zusammenhang äußert sich demzufolge in ähnlichen Merkmalswerten und einer geringen Semivarianz. Die Semivarianz steigt also mit abnehmendem Zusammenhang zweier Merkmalsausprägungen mit deren zunehmender räumlicher Entfernung, bis sie ihren Schwellenwert erreicht. Die diesem Schwellenwert graphisch zugeordnete räumliche Entfernung – die Aussageweite – gilt als die Entfernung, ab der man von einer Unbeeinflussung zweier Merkmalsgrößen voneinander ausgehen kann.

Besondere Bedeutung besitzen die distanzabhängigen Semivarianzen bei der Schätzung der Flächenheterogenität durch Interpolation, wie z.B. beim Interpolationsverfahren „Kriging“, dem standardmäßigen Interpolationsverfahren bei der Ertragskartenerstellung (siehe Kapitel 8.1).

3.1.3 Heterogenitäten ausgewählter Boden- und Bodennährstoffparameter

In zwei Studien zur Abschätzung der Boden – und Bodennährstoffheterogenität wurde bundesweit eine Quantifizierung ausgesuchter pflanzenwachstumsrelevanter bodenbürtiger Parameter vorgenommen.

Die erste Studie zielte auf das standörtlich-strukturelle Akzeptanzpotenzial für den präzisen Landbau ab, indem anhand der gegebenen Bodenheterogenität eine Eignung bestimmter Regionen für den Einsatz der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung ermittelt wurde. Die Bodenheterogenität wurde hierbei aus der Bodenübersichtskarte BÜK 1000 im Maßstab 1 : 1.000.000 abgeleitet. Unterstützend wurde die lokale Bodenheterogenität durch eine gezielte Umfrage an den Geologischen Landesämtern Deutschlands eruiert (HERBST / LAMP, 1998, S. 33). Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 19 dargestellt.

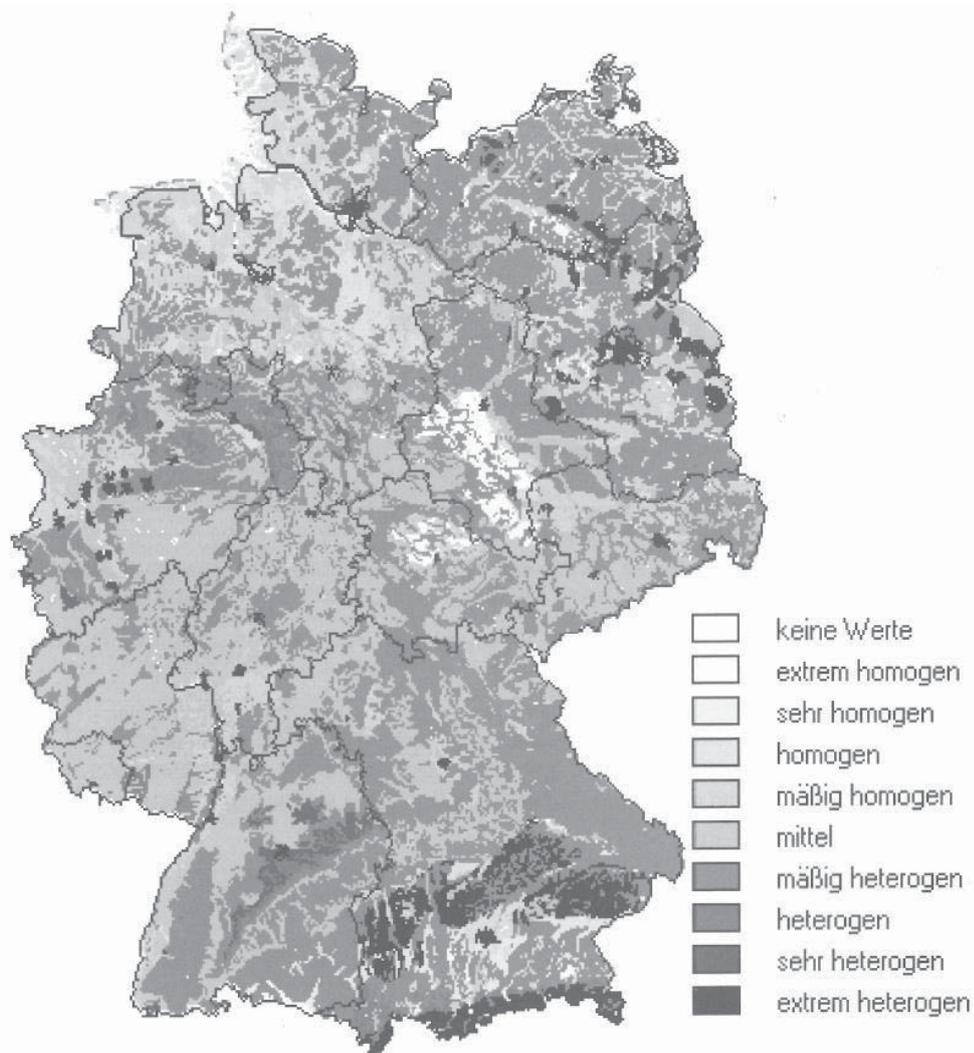


Abbildung 19: Heterogenität in Einheiten der BÜK 1000 (HERBST / LAMP, 1998, S. 37)



Zur Klassifizierung der bundesweiten Heterogenitätszustände wurde eine Heterogenitätszahl gebildet, deren Skala von 1 (=extrem homogen) über 5 (= mittel) bis 9 (= extrem heterogen) reicht. Aufbauend auf dieser Skala wurde eine Aufteilung der vorhandenen Heterogenitäten in vier Fallgruppen vorgenommen:

1. Homogene Gebiete mit sehr weiträumigem Bodenwechsel von mehr als 500 m (Heterogenitätszahl (HZ) = 1 - 3)
 - 3 % der gesamten Bodenfläche
 - Marschlandschaften, Magdeburger und Soester Börde
 - für Precision Farming wenig geeignet
 - 100 m – Rasterbeprobung ist als zu eng anzusehen
2. Mäßig heterogene Gebiete mit weiträumigem Bodenwechsel (200 - 500 m) (HZ = 4 - 6)
 - 44 % der gesamten Bodenfläche
 - Bodenregionen des wellig-hügeligen Flachlandes
 - Precision Farming lohnt sich nur bei großen Schlägen
 - 100 m – Rasterbeprobung ist angebracht
3. Heterogene Gebiete mit kleinräumigem Bodenwechsel im Bereich 50 - 200 m (HZ 4 - 6)
 - 44 % der gesamten Bodenfläche
 - Jungmoränenlandschaften in Ostholstein, Mecklenburg-Vorpommern, Alpenvorland
 - generell geeignet für Precision Farming
 - 50 m – Rasterbeprobung ist angebracht
4. Sehr heterogene Gebiete mit sehr kleinräumigem Bodenwechsel von weniger als 50 m (HZ 7 - 9)
 - 9 % der gesamten Bodenfläche
 - vorwiegend in den Alpen, der Fränkischen und Schwäbischen Alb
 - Precision Farming sehr lohnend oder sogar überfordert
 - Probenahmeraster ist sehr intensiv (20 bis 30 m – Raster)

Eine weitergehende Quantifizierung der vorhandenen Heterogenitäten gestatten die Ergebnisse der zweiten vorgestellten Studie. Im Rahmen des bundesweiten



Forschungsverbundes preagro I wurde zur Abschätzung des Heterogenitätspotenzials der Ackerflächen der über das gesamte Bundesgebiet verstreuten Projektbetriebe eine kleinräumige Erhebung und Analyse der Boden- und Pflanzenbestandesparameter vorgenommen. Für fünf Standorte, die exemplarisch für häufig in der BRD vorkommende Bodenlandschaften stehen, wird die Heterogenität ausgewählter Parameter anhand von Variogramm-Kenngrößen dargestellt. Die Ergebnisse sind aus Tabelle 9 und Abbildung 20 ersichtlich. Erläuternd sind die fünf erwähnten Standorte mit ihren zugehörigen Bodenlandschaften aufgeführt.

Gebiet*	Meßgröße	Tiefe in cm	Reichweite (m) Max.Var. (MV)	Relativ. Nugget (%)MV	Med. Dist. (De) bei 50% Sill	Bev. Dist.(Db) bei 30% Sill	Form
Bec4	Ton	0-30	170	11	140	120	Gaussisch
Gtw7	Ton	0-30	200	20	90	60	Sphärisch
Ksg3	Ton	0-30	85	40	50	30	Expon.
Thy7	Ton	0-30	81	40	25	15	Sphärisch
Wul5	Ton	0-30	210	7	150	100	Gaussisch
Bec4	Sand	0-30	170	8	125	75	Gaussisch
Gtw7	Sand	0-30	2	24	Trend***	Trend	Power
Ksg3	Sand	0-30	76	50	25	14	Sphärisch
Thy7	Sand	0-30	80	40	35	20	Sphärisch
Wul5	Sand	0-30	262	0	100	70	Sphärisch
Bec4	nFK	We**	k.S.****	100	k.S.	k.S.	Linear
Gtw7	nFK	We	60	30	20	12	Sphärisch
Ksg3	nFK	We	n.v.	100	k.S	k.S.	Linear
Thy7	nFK	We	77	41	25	14	Sphärisch
Wul5	nFK	We	93	30	40	24	Sphärisch
Bec4	KAK	We	150	16	110	90	Gaussisch
Gtw7	KAK	We	110	15	60	40	Expon.
Ksg3	KAK	We	110	44	40	24	Sphärisch
Thy7	KAK	We	90	45	35	20	Sphärisch
Wul5	KAK	We	190	2	150	120	Gaussisch

*) Bec4=Beckum-Tühlig, Gtw7=Twülpstedt-Langer Berg, Ksg3=Kassow 111_1, Thy7=Thumby Moritzfeld Wul5=Wulfen Kiesberg **) We = effektive Durchwurzelungstiefe ***) Trend: intrinsische Hypothese verletzt, Messwert hängt von der geograph. Lage ab (Universal Kriging!) ****) k.S.: keine Struktur

Tabelle 9: Variogramm-Kenngrößen von Bodenparametern (HERBST / REIMER, 2004, Kap. 3, S. 20)

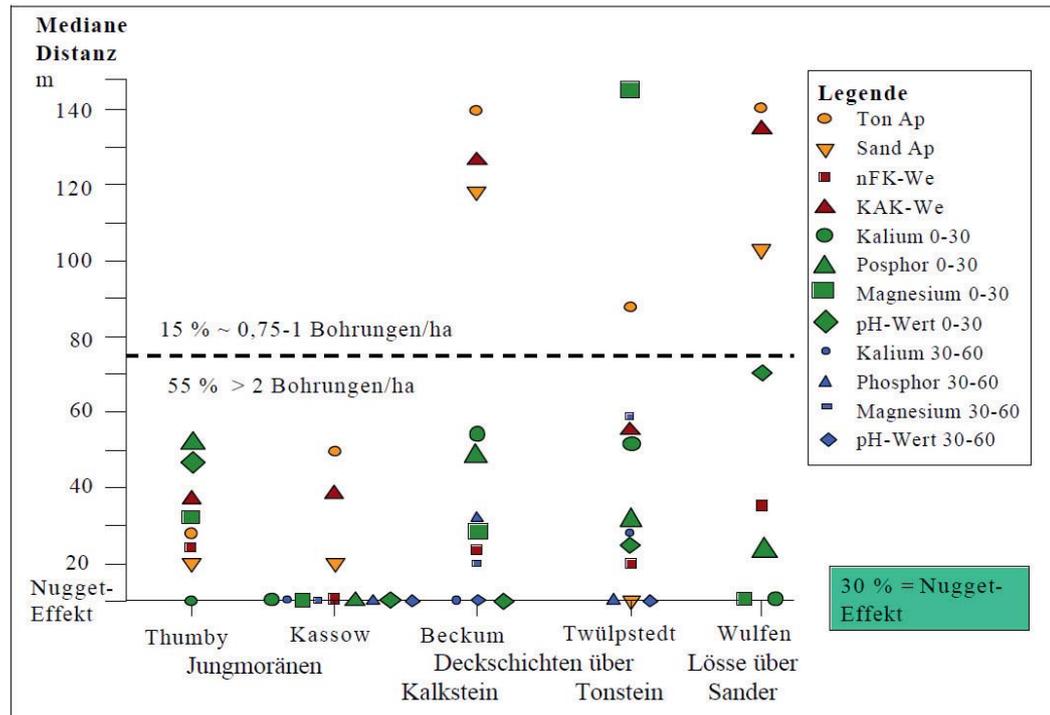


Abbildung 20: Mediane Variogramm-Distanzen von Landschaften und Betrieben des preagro-Projektes (HERBST / REIMER, 2004, Kap. 3, S. 23).

Beckum (Westfalen): Deckschichten aus Lehm und Löss über mesozöischem Kalkstein; Leitböden sind Rendzinen und Para/Braunerden

Groß-Twülpstedt (Niedersachsen): Verwitterungs- und Glazialdecken über Jura-Tonstein und Altmoränensedimenten; Leitböden sind Pelosole und Pseudogley

Kassow (Mecklenburg-Vorpommern): Grundmoränengebiet mit weit verbreiteten Para/Braunerden

Thumby (Schleswig-Holstein): Endmoränenlandschaft, Leitboden ist der Pseudogley

Wulfen (Sachsen-Anhalt): Lössböden; Leitboden ist der Tschernosem (HERBST / REIMER, 2004, Kap. 3, S. 6).

Aus den medianen Distanzen der Tabelle 9 lässt sich erkennen, dass die nFK und die KAK viel kleinräumiger variieren als der Sand- und Tongehalt des Oberbodens. Eine Erklärung hierfür ist die Homogenisierung des Ap-Horizontes durch Pflugarbeit (HERBST / REIMER, 2004, Kap. 3, S. 20). Dieser Effekt lässt sich auch bei den Nährstoffparametern in der Abbildung 20 ablesen. Die Nährstoffe im Unterboden variieren sehr viel kleinräumiger als die Nährstoffe im Oberboden.



3.2 Räumliche Variabilität der Wachstumsfaktoren

Unter dem Gesichtspunkt der Anwendung der Methoden der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung und der räumlich differenzierten Reaktion auf pflanzenbaulich relevante Wachstumsfaktoren interessiert den Landwirt v.a. die räumliche Variation, die Ortstreue der Variation über die Zeit und die mengenmäßige Variabilität eben jener Wachstumsfaktoren. Von höchster praktischer Relevanz ist hierbei zudem, inwieweit der Landwirt auf die Wachstumsparameter beeinflussend einwirken kann. In der Tabelle 10 wird eine Einordnung der wichtigsten ertragsrelevanten Wachstumsfaktoren in dieser Fragestellung gegeben.



Wachstumsfaktor	Räumliche Variabilität innerhalb eines Schlages in einem Jahr	Räumliche Variabilität innerhalb eines Schlages im Zeitablauf über mehrere Jahre	Mengenmäßige Variabilität im Zeitablauf	Beeinflussbarkeit im Hinblick auf räumliche Variabilität	Beeinflussbarkeit im Hinblick auf mengenmäßige Variabilität
Niederschlag	n. g.	n. g.	g.	n. g.	n. g.
Strahlung	n. g.	n. g.	g.	n. g.	n. g.
Temperatur	n. g.	n. g.	g.	n. g.	n. g.
Verdunstung	n. g.	n. g.	g.	n. g.	n. g.
Applizierte Düngung	n. g.	n. g.	g.	g.	g.
Ausgebrachtes Saatgut	n. g.	n. g.	g.	g.	g.
Pflanzengenetik	n. g.	n. g.	g.	g.	g.
Geologie	g.	n. g.	n. g.	n. g.	n. g.
Bodenart	g.	n. g.	n. g.	n. g.	n. g.
nFK	g.	n. g.	n. g.	n. g.	n. g.
Relief	g.	n. g.	n. g.	n. g.	n. g.
Bodenwasser	g.	g.	g.	n. g.	n. g.
N-Verfügbarkeit	g.	g.	g.	n. g.	g.
Grundnährstoffverfügbarkeit	g.	g.	g.	n. g.	g.

n. g. = nicht gegeben; g. = gegeben

Tabelle 10: Heterogenität der Wachstumsfaktoren (Eigene Darstellung)



Die qualitativen Einstufungen der Wachstumsparameter gehen vom allgemeinen Fall eines ebenen, nicht berechnungsfähigen Ackerschlag aus. Einige der Beispiele bedürfen der näheren Erläuterung, was in den anschließenden Unterkapiteln erfolgen wird. Dabei wird die Untergliederung nach dem Qualitätsmerkmal „Räumliche Variabilität innerhalb des Schlags“ vorgenommen.

3.2.1 Flächenhomogene Wachstumsfaktoren

Die flächenhomogenen Wachstumsparameter umfassen lediglich klimatische Parameter sowie Bewirtschaftungsmaßnahmen des Landwirts.

3.2.1.1 Klima

Die Betrachtungsgröße zur Beschreibung der Klimaverhältnisse eines Ackerschlag fällt in das Klimascale des Mikroklimas, dessen räumliche Ausdehnung von HÄCKEL mit einer Spanne von 1 m² bis 1 km² (= 100 ha) angegeben wird (HÄCKEL, 2005, S. 320). Zur präzisen Einordnung der Klimaverhältnisse innerhalb eines Ackerschlag verweist HÄCKEL auf das Klimascale „Klima im Pflanzenbestand“, das aber „je nach Zusammensetzung äußerst unterschiedliche und inhomogene Strukturen“ aufweise und es von daher schwierig erscheine, „das Phänomen Bestandesklima pauschaliert zu beschreiben“ (HÄCKEL, 2005, S. 357). Aus diesem Grund wurden an dieser Stelle Vereinfachungen hinsichtlich der räumlichen Verteilung der klimatischen Einflussfaktoren innerhalb der Fläche angenommen. Im Falle der räumlichen Ertragsanalyse eines Einzelschlag werden aber die spezifischen, klimatischen Verhältnisse des Bestandes als Erklärungsbeitrag für Ertragsheterogenitäten herangezogen.

3.2.1.1.1 Niederschlag

Der Niederschlag wird als räumlich homogen, ortstreu¹, mengenmäßig variabel und völlig unbeeinflussbar angenommen. Nicht berücksichtigt werden an dieser Stelle flächenheterogene Niederschlagsverteilungen wie örtlicher Platzregen, starke Winde, Regenschatten von Randstreifen des Schlags durch angrenzenden Wald oder Gehölze.

¹ Der Begriff „ortstreu“ meint in diesem Zusammenhang die stetige Wiederholung der räumlichen Verteilung eines Merkmals von Jahr zu Jahr.



3.2.1.1.2 Strahlung

Die Strahlung unterliegt der gleichen Klassifikation wie die Niederschläge. Es wird von einer räumlich gleichmäßigen Versorgung der Photosyntheseaktivitäten des Pflanzenbestandes ausgegangen und eventuelle Abschattungseffekte durch Wald, Gehölze oder Relief bleiben unberücksichtigt.

3.2.1.1.3 Temperatur

Die Annahme einer räumlich homogenen Verteilung der Temperatur geht von einer ebenen Fläche des Schlags aus. Ein vorhandenes Relief im Schlag führt zu einer Ungleichverteilung der Sonneneinstrahlung im Tagesgang und damit zu einer Temperaturheterogenität innerhalb des Schlages. Über das Ausmaß der Temperaturunterschiede entscheidet die Exposition des Reliefs im Gelände. Auch Abschattungen durch angrenzende Bäume oder Gehölze und eine damit verbundene Minderung der Sonneneinstrahlung kann im konkreten Fall zu einer Heterogenität der angebotenen Temperatursumme führen. Durch Bewirtschaftungsmaßnahmen, wie das Verlegen von Verfrühungsfolien im Kartoffel- und Sonderkulturanbau, kann eine räumliche Temperaturdifferenzierung gewollt herbeiführen.

3.2.1.1.4 Verdunstung

Die Verdunstung ist abhängig von der Menge des verdunstungsfähigen Wassers, der vorhandenen Energie, der Größe des Sättigungsdefizits der Luft und der Höhe der Windgeschwindigkeit (HÄCKEL, 2005, S. 97; vgl. auch Kapitel 2.4.2). Bei der Einklassifizierung in einen homogenen oder heterogenen ertragsbeeinflussenden Wachstumsparameter muss zwischen potenzieller und aktueller Verdunstung (Evapotranspiration) unterschieden werden. Die potenzielle Verdunstung setzt das unbegrenzte Vorhandensein von Wasser voraus und ist damit nur von Energie, Sättigungsdefizit der Luft und der Windgeschwindigkeit abhängig.

Bei der Unterstellung eines ebenen Schlages ohne störende Einflüsse von angrenzenden Flächen kann man von einer räumlich homogenen Verfügbarkeit der drei letztgenannten Einflussfaktoren ausgehen. An dieser Stelle sei verdeutlicht, dass das Vorhandensein von Relief auf angrenzenden Nachbarschlägen Auswirkungen auf den Wärmehaushalt und die Windbedingungen auf den betrachteten Schlag haben kann, z. B. Frostgefährdung in Tallagen. Im Gegensatz zur potenziellen Verdunstung geht die aktuelle Verdunstung von der zu einem definierten

Zeitpunkt an einer bestimmten Stelle tatsächlich stattfindenden Evapotranspiration aus, die von der Wasserverfügbarkeit an diesem Standort abhängig ist. Diese Wasserverfügbarkeit für die Pflanze wird entscheidend determiniert durch die Fähigkeit des Bodens, am betrachteten Standort Wasser nachzuliefern, was wiederum vom Wasserleitungsvermögen und der Wasserhaltefähigkeit des Bodens abhängt. Diese Bodeneigenschaften werden durch die Bodenparameter Bodenart und nutzbare Feldkapazität (nFK) beschrieben. Die Bodenart und die nFK existieren in der Fläche zumeist heterogen, was in den folgenden Kapiteln näher erläutert wird. Aus diesem Grund verhält sich die aktuelle Verdunstung räumlich variabel im Schlag. Sie ist ortstreu, in ihrem Niveau von Jahr zu Jahr variabel und ist zwar nicht in ihrer räumlichen Variabilität, aber dafür in ihrer mengenmäßigen Variabilität durch geeignete Bodenbearbeitungsmaßnahmen beeinflussbar. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die räumliche Variabilität der aktuellen Evapotranspiration einen wichtigen Ansatz zur Erklärung der räumlichen Ertragsheterogenitäten liefert.

3.2.1.2 Applizierte Düngung

Es wird hier von einer schlageinheitlichen Düngung ausgegangen, die jeder Stelle des Schlages die gleiche Menge an mineralischen Nährstoffen zukommen lässt. Wohlwissend, dass viele Landwirte auch ohne den Einsatz von Komponenten der Precision Farming-Technologie auf ihnen durch Erfahrung bekannte Ertragspotenzialheterogenitäten im Schlag durch Anpassung der Düngemenge reagieren, wird hier noch von einer „konventionellen“ schlaghomogenen Düngungsweise ausgegangen.

3.2.1.3 Saatgut

Analog zur Annahme der schlageinheitlichen Düngung wird hier an dieser Stelle von einer schlaghomogenen Aussaat ausgegangen. In der landwirtschaftlichen Praxis kommt es bereits zu schlaginternen Variationen der Aussaat in quantitativer und qualitativer Hinsicht. Eine quantitative Variation ergibt sich durch eine mengenmäßige, räumliche Variation der Aussaatmenge. Eine qualitative Variation des Saatguts ist durch die Verwendung verschiedener Sorten gegeben.

Bei den beiden schlageinheitlich applizierten Betriebsmitteln ist allerdings zu erwarten, dass sie zwar schlaghomogen ausgebracht wurden, aber in Abhängigkeit der räumlichen Heterogenität vor allem der bodenbürtigen Standortvoraussetz-



ungen nach einer gewissen Zeitspanne räumlich heterogen vorliegen. Hauptsächlich die Bodenfeuchte führt zu einer unterschiedlichen Nährstoffverfügbarkeit und zu einer heterogenen Feldaufgangsrates innerhalb des Schlages.

3.2.1.4 Pflanzengenetik

Im Sortenschutzgesetz vom 19. Dezember 1997, Abschnitt 1 „Voraussetzungen und Inhalt des Sortenschutzes“ ist bezüglich der Einheitlichkeit einer Sorte in §4 „Homogenität“ festgelegt: „Eine Sorte ist homogen, wenn sie abgesehen von Abweichungen auf Grund der Besonderheiten ihrer Vermehrung in der Ausprägung der für die Unterscheidbarkeit maßgebenden Merkmale kennzeichnend einheitlich ist“ (Sortenschutzgesetz vom 19. Dezember 1997). Die hohe Sortenreinheit und die Homogenität einer Sorte werden durch Verwendung von Z-Saatgut garantiert. So ist in den Qualitätsanforderungen an Z-Saatgut festgelegt, dass maximal ein Fremdbesatz von 15 Pflanzen, die nicht hinreichend sortenecht sind, pro 150 m² Ackerfläche zugelassen ist (SORTG, 2012). Mit dieser Annahme kann unterstellt werden, dass räumliche Variationen der Pflanzendichte auf kleinräumige Heterogenitäten der klimatischen und bodenbürtigen ertragsrelevanten Wachstumsfaktoren zurückzuführen sind.

3.2.2 Flächenheterogene Wachstumsfaktoren

3.2.2.1 Flächenheterogene Wachstumsfaktoren mit mengenmäßiger Stabilität

„Die Heterogenität von Böden und Pflanzen tritt prinzipiell makro- bis mikroskalig in sehr unterschiedlichen Größenordnungen (global, zonal, regional bis lokal) auf“ (LAMP et al., 1998, S. 10).

3.2.2.1.1 Geologie

Im Laufe der Erdgeschichte sind durch die Wirkung endogener geologischer Kräfte wie Magmatismus, Metamorphose der Gesteine und Tektonik die heutigen Landschaftsformen in ihrer Vielfalt entstanden (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 29 ff.). Unterstützt durch die Einflüsse der exogenen geologischen Kräfte, vor allem der klimatischen Parameter Temperatur, Wasser und Wind, entwickelte sich eine mehr oder weniger heterogene geologische Struktur des Landschaftsbildes (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 79 ff.).

Das Ausgangsgestein beeinflusst die Textur des Bodens und damit das Vorkommen und die räumliche Verteilung der Bodenarten. In Abbildung 21 sind die Ergebnisse einer Untersuchung innerhalb des preagro-Projektes an 1262 Bodenprofilen hinsichtlich des Substrat- oder Horizontwechsels dargestellt.

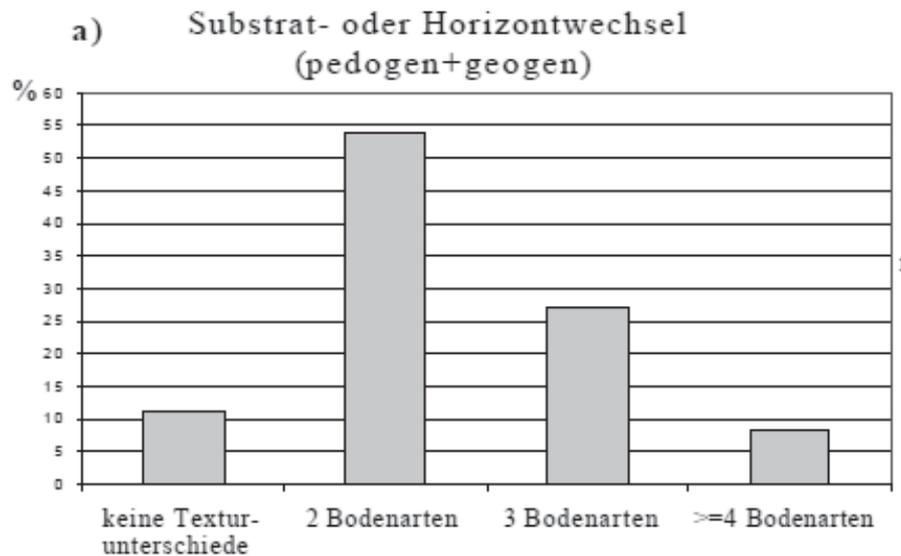


Abbildung 21: Häufigkeiten der Substratwechsel (HERBST / REIMER, 2004, Kap. 3, S. 18)

Es ist deutlich ersichtlich, dass zwei- und dreischichtige Bodenprofile überwiegen. Die Heterogenität der sich aus den geologischen Gegebenheiten ergebenden Bodeneigenschaften und -funktionen ist so ausgeprägt, dass diese nicht mit praxisrelevantem Aufwand durch Interpolation punktueller Werte zu erfassen ist (HERBST / REIMER, 2004, Kap. 3, S. 32).

3.2.2.1.2 Bodenarten

Der Boden wird durch äußere Kräfte in den meisten Fällen aus festem Gestein oder Lockergestein geformt. Deutlich seltener kommt es vor, dass ein Boden aus Verwitterungsmasse entsteht (MÜCKENHAUSEN, 1962, S. 8). In Abhängigkeit der Art des Ausgangsgesteins, der Qualität und Zeitdauer des Bodenbildungsprozesses sowie der Art der dominierenden Einflussfaktoren des Bodenentwicklungsprozesses entsteht eine bestimmte Bodenart. Auf Grund ihrer Entwicklungsgeschichte weist die Bodendecke eine hohe Variabilität der Bodeneigenschaften und Böden auf (RICHTER et al., 2007, S. 16). Auffallend hierbei ist die extrem



hohe Heterogenität in der Leitboden / Begleitbodentypengruppe Braunerde / Parabraunerde / Pararendzina.

Die starke Abhängigkeit des entstehenden Bodens vom vorherrschenden Gestein impliziert, dass die Heterogenität der Bodenart mindestens so groß ist wie die Heterogenität des Ausgangsgesteins.

Im Rahmen einer Umfrage zu den Bodenheterogenitäten in der BRD wurden für die maßgeblichen Leit- und Begleittypen der Einheiten der BÜK 1000 die Heterogenitäten mit Hilfe von Heterogenitätszahlen ermittelt. Die Spanne der Skala der Heterogenitätszahlen reichte von 1 (extrem homogen) bis 9 (extrem heterogen). Die Ergebnisse der Umfrage, ausgedrückt in einem Durchschnitt und einer Spanne der Heterogenitätszahlen, sind in Tabelle 11 dargestellt.

Nr.	Leit- und Begleit-Bodentypen der Einheiten BÜK 1000 (BE: Braunerde; - : Übergangstyp; / : und,neben	Fläche		HZ- Mittel	HZ- Spanne
		km ²	%		
42	Parabraunerde/Pseudogley/Fahlerde	26.580	7,59	5,7	2
61	Podsolige Braunerde	19.001	5,42	4,9	2
59	Braunerde/Podsol-Braunerde	16.856	4,81	4,9	2
31	Braunerde-Podsol/Podsol-Braunerde	15.399	4,39	4,4	5
17	Podsol/Braunerde-Podsol	14.704	4,20	6,0	4
49	Rendzina/BE-(Para)Rendzina w.m. Terra fusca-(Para)BE	13.937	3,98	4,8	1
19	Parabraunerde/Fahlerde/Pseudogley-Parabraunerde	13.526	3,86	6,4	3
6	Niedermoorboden	12.705	3,63	3,2	5
55	Braunerde	11.625	3,32	6,0	5
51	Pelosol-Braunerde/Pelosol-Pseudogley	11.521	3,29	6,0	0
8	Auenboden/Gley	10.933	3,12	4,6	2
26	Fahlerde/Bänder-Parabraunerde/Braunerde	8.017	2,29	6,3	2
50	Braunerde/Terra fusca und Rendzina	7.694	2,20	6,0	2
18	Braunerde/Parabraunerde/Pararendzina	7.519	2,15	9,0	0

Tabelle 11: Bewertung der Heterogenität in den am häufigsten vorkommenden Bodeneinheiten der BÜK 1000 (HERBST / LAMP, 1998, S. 36)

Im Zusammenhang mit dem Teilprojekt „Digitale Hof-Bodenkarten“ innerhalb des preagro I-Projektes wurden geostatistische Untersuchungen über die räumliche Heterogenität von Bodenparametern auf den Projektversuchsflächen angestellt. Als Ergebnis wurden sehr große Unterschiede bei den medianen Distanzen der Messgrößen Ton bzw. Sand zwischen den einzelnen Untersuchungsflächen festgehalten. Während die Versuchsstandorte in den nord- / nordwest-



deutschen Jungmoränenlandschaften von geringen medianen Distanzen von 25 – 50 m, mithin also großen Heterogenitäten geprägt waren, dominierten in den ostdeutschen Lössbördeböden und den westfälischen Berg- und Hügelländern größere mediane Distanzen von 100 – 150 m (HERBST, 2002, S. 89).

3.2.2.1.3 Nutzbare Feldkapazität

Die nFK ist nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL von den Faktoren Gleichgewichtszustand des Wassers, Profiltiefe, Körnung, Gehalt an organischer Substanz und Horizontabfolge abhängig (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989). Bedingt durch die große Abhängigkeit der nFK von diesen aufgeführten Bodenparametern und die in den zwei vorhergehenden Kapiteln aufgezeigte räumliche Heterogenität dieser Größen, liegt auch die nFK zumeist räumlich heterogen in der Fläche vor. Bezugnehmend auf die weiter oben bereits zitierte Untersuchung des preagro I-Projektes zeigt sich, dass die nFK noch deutlich kleinräumiger variiert als die Bodenbestandteile Ton und Sand (HERBST, 2002, S. 89). Auffallend ist hierbei, dass vor allem die Lössbödenflächen eine deutliche Verringerung der medianen Distanz – also eine Zunahme der kleinräumigen Heterogenität – zu den Ergebnissen der Ton- und Sandklassifizierung aufwiesen. HERBST und LAMP verweisen in ihrem Beitrag darauf, dass die nFK 2,5-mal kleinräumiger vorliegt als die durchschnittliche Flächengröße der Klassenpolygone der Reichsbodenschätzung (HERBST / LAMP, 2002, S. 95).

Die Heterogenität der nutzbaren Feldkapazitäten der Versuchsflächen des Lehr- und Versuchsbetriebes Marienborn-Heldenbergen wird für ausgewählte Schläge in Kapitel 7.4.3 detailliert beschrieben.

3.2.2.1.4 Relief

Der vierte der hier aufgezählten Wachstumsfaktoren, der räumlich variabel und ortstreu vorliegt und mengenmäßige Stabilität aufweist, ist das Relief. Unter Relief versteht man die zusammenfassende Bezeichnung für die Höhenverhältnisse an der Erdoberfläche (KUNTZE et al., 1994, S. 307). Entstanden ist das Relief durch tektonische Vorgänge im Verlauf der Erdgeschichte. Die Entwicklung des Reliefs ist allerdings noch nicht abgeschlossen. Das Makrorelief kann in hängigen Lagen durch hangabwärts fließendes Wasser zur Verlagerung des Oberbodens an Ober- und Mittelhang führen (KUNTZE et al., 1994, S. 307). Von daher ist die Ortstreue des Reliefs aus kurzfristiger Sicht zu verstehen. Das Relief seinerseits



greift in Gestalt der Höhenlage, Geländeform und Exposition modifizierend in die Bodenentwicklung ein, indem es die Wirkung von Schwerkraft, Klima, Gestein, Wasser, Lebewelt und letztlich auch die des Menschen beeinflusst und damit die bodenbürtige Heterogenität verstärkt (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 305). Die Wassererosion als eine Form der Bodenerosion hat sich durch die Ausdehnung des Ackerbaus seit der Jungsteinzeit verstärkt und führte (und führt noch heute) zu gekappten Bodenprofilen an Ober- und Mittelhang und zu Kolluvien an den Unterhängen (KUNTZE et al., 1994, S. 307-308).

3.2.2.2 Flächenheterogene Wachstumsfaktoren mit mengenmäßiger Variabilität

3.2.2.2.1 Bodenwasser

Unter dem Begriff Bodenwasser wird hier die Wasserverfügbarkeit der Pflanze an einem bestimmten Standort innerhalb eines Schlags verstanden. Das Wasserhaltepotenzial eines Standortes wird durch die zeitstabile Messgröße der nFK beschrieben. Die aktuelle Wasserverfügbarkeit wird durch die dynamische Komponente der Wasserhaushaltsgleichung determiniert und dadurch von der statischen Messgröße der nFK abgegrenzt. Nach Maßgabe der Ein- und Ausgabe Größen der Wasserhaushaltsgleichung ist die Wasserverfügbarkeit sowohl von räumlich homogenen Faktoren abhängig (Niederschlag) als auch von räumlich heterogenen Faktoren wie der Bodenart, die das Sickerwasserverhalten mitbestimmt und dem Relief, das großen Einfluss auf den Oberflächenabfluss ausübt.

Die in dieser Arbeit angewandte Methode zur Berechnung der Wasserversorgungsverhältnisse der klimatischen Wasserbilanz (KWB) ist die einer statischen Betrachtungsweise. Nach EHLERS gibt es keine physikalisch begründbare, qualitative Abgrenzung verschiedener Formen des Bodenwassers (EHLERS, 1996, S. 40). So komme man, so EHLERS, bei der dynamischen Betrachtungsweise zu dem Schluss, „dass eine Wasserbewegung im Boden die Regel ist“ (EHLERS, 1996, S. 40). Durch die ungleichen Gesamtwasserpotenziale in einem Bodenprofil wird ein Wasserfluss ausgelöst, der von Orten höheren Potentials zu Orten niedrigeren Potentials gerichtet ist (EHLERS, 1996, S. 40-41). All diese Einflussfaktoren führen zu einer zeitlichen Variabilität der pflanzenverfügbaren Bodenwassermengen.



3.2.2.2 Stickstoffverfügbarkeit

Die N-Verfügbarkeit eines Schlages unterliegt neben der räumlichen Heterogenität auch einer Variabilität der räumlichen Verteilung über die Zeit als auch einer Variabilität der Mengen. Stickstoff gilt als extrem beweglicher Bodennährstoff und unterliegt vielfältigen Umwandlungsprozessen im Boden. Daraus ergibt sich, dass z. B. N_{\min} -Werte oft sehr kleinräumig vorliegen (KERSEBAUM, 2004, S. 3.2-67). Im Einzelnen ist die Nährstoffverfügbarkeit eines Standortes von folgenden Faktoren abhängig, deren natürliches Vorkommen hinsichtlich der räumlichen Auflösung mit angegeben wird (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 230):

- Klima (homogen)
- Nährstoffgehalt im Wurzelraum (heterogen)
- Durchwurzelungstiefe/-intensität (heterogen)
- Wasser- und Lufthaushalt (heterogen)
- Tiefe der Ackerkrume (vom Bearbeiter abhängig)

Einige der hier aufgeführten Einflussfaktoren, wie die Durchwurzelungstiefe/-intensität sowie der Wasser- und Lufthaushalt, sind wiederum von der Körnung bzw. der Bodenart abhängig, die räumlich variabel vorliegen. Bereits in Kapitel 2.2.3 wurde die zentrale Bedeutung der Bodenart zur räumlichen Abschätzung des Nährstoffbereitstellungsvermögens herausgestellt und in der Tabelle 2 der Nährstoffausnutzung verschiedener Bodenarten aufgezeigt. Die im Vergleich zu den anderen dort aufgeführten Nährstoffen P, K, Mg herausgehobene Stellung des N hinsichtlich seiner räumlichen Heterogenität zeigt sich darin, dass die Spanne bei den Nährstoffausnutzungskoeffizienten über alle Bodenarten hinweg mit dem absoluten Wert 20 größer ist als bei K und Mg (Wert 15) und P (Wert 5). In relativen Prozentzahlen zeigt sich dieser Effekt noch deutlicher.

Zusätzlich zur Variabilität der Nährstoffverfügbarkeit im horizontalen Raum ergibt sich eine vertikale Nährstoffkonzentrationsvariabilität im Bodenhorizont, die durch Verlagerungsprozesse unter dem Einfluss des Sicker- und Grundwassers sowie der Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen hervorgerufen wird (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 224-225).



3.2.2.2.3 Grundnährstoffverfügbarkeit

Bei den Grundnährstoffen gelten für ihre räumliche Variabilität die gleichen physikalischen und chemischen Grundlagen wie für den Stickstoff. Allerdings ist die Mobilität der Grundnährstoffe deutlich geringer als die des Stickstoffs. Demzufolge ist hinsichtlich des räumlich-zeitlichen Verhaltens der Grundnährstoffe auch von einer räumlichen Variabilität und einer Variabilität der Menge der Nährstoffe auszugehen.

Im Rahmen des preagro I-Projektes wurden geostatistische Untersuchungen zur räumlichen Verteilung der Grundnährstoffe durchgeführt. Dabei konnte über alle untersuchten Nährstoffe (K, P, Mg und pH-Wert) eine durchschnittliche mediane Distanz von 55 m festgestellt werden. Detaillierte Ergebnisse finden sich bei HERBST (2002, S. 91). Auffällig bei dieser Untersuchung war, dass die räumliche Variabilität der Nährstoffe im Unterboden deutlich kleinräumiger war als im Oberboden. Erklärt wird dies mit einer Vermischung des Oberbodens durch die Bodenbearbeitung des Landwirtes und einer daraus resultierenden Homogenisierung (HERBST, 2002, S. 90).

Auch GEBBERS (2004, S. 3.2-65) verweist auf die mitunter wirtschaftlich nicht mehr feststellbare, kleinräumige Variabilität der Grundnährstoffe und die Überprägung der natürlichen Nährstoffverteilung durch Bewirtschaftungs- oder Meliorationsmaßnahmen.

3.3 Möglichkeiten der Erfassung der kleinräumigen Wachstumsfaktoren

3.3.1 Übersicht über die Erfassungsmethoden

Die Erfassung der kleinräumigen Heterogenität kann unter drei Gesichtspunkten als zentrale Voraussetzung für die teilflächenspezifische Pflanzenproduktion angesehen werden:

- a) landtechnischer Aspekt
- b) ökonomischer Aspekt
- c) ökologischer Aspekt

Der Boden beinhaltet die Parameter für eine optimale Bearbeitung (zu a), beherbergt die Umsetzungs- und Verlagerungsprozesse, die Ertrag und Qualität



der Feldfrüchte bestimmen (zu b) und entscheidet über die Auswirkungen der landwirtschaftlichen Produktion auf die Umwelt (zu c) (LAMP et al., 1998, S. 17).

Die zu erhebenden Boden- und Bestandesparameter lassen sich nach der Fristigkeit ihrer Gültigkeitsdauer einteilen. Die Basisdaten wie Bodenart, nFK oder Relief werden langfristig, d. h. für einen längeren Zeitraum einmalig, erhoben. Zu den mittelfristig feststellbaren Parametern, die alle drei bis vier Jahre erhoben werden, gehören die fruchtfolgespezifischen Parameter, wie z. B. die Grundnährstoffversorgung. Einige Boden- und Pflanzenparameter, wie z. B. die aktuelle Wasser- und Stickstoffversorgungszustände, schwanken saisonal so stark, dass sie nur kurzfristig, mitunter nur in Echtzeit während der Befahrung erfasst werden können (LAMP et al., 1998, S. 11).

Abgeleitet aus der Fristigkeit der Boden- und Bestandesparameter lassen sich die Erfassungsverfahren in drei Gruppen unterteilen:

- Offline-Verfahren
- Online-Verfahren
- Map-Overlay-Verfahren

Beim Offline-Verfahren geschieht die Erhebung, Analyse der Boden- und Bestandesparameter und die Übersetzung in teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen in zeitlich und räumlich getrennten Schritten. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass keine zeitliche Begrenzung für die Ausarbeitung der komplexen Analysealgorithmen besteht und der Landwirt die Erstellung der Maßnahmekarten besser kontrollieren kann. Bei sich schnell ändernden Bestandesparametern stoßen Offline-Verfahren aber schnell an ihre Wirkungsgrenzen (HERBST, 2004, S. 3.2-13).

Im Gegensatz dazu erfolgt beim Online-Verfahren die Erhebung von Boden- und Bestandesmerkmalen und die Übersetzung in teilflächenspezifische Maßnahmen in Echtzeit (HERBST, 2004, S. 3.2-13). Der große Vorteil der Online-Verfahren – die unmittelbare Reaktion auf die sich unter Umständen schnell ändernden Boden- oder Bestandesparameter – ist auch zugleich der größte Nachteil. Die Sensoren, die die Erfassung übernehmen, liefern zwar einen bestimmten Wert der Zustandsstufen der Parameter, aber keine Hilfe zur Interpretation des Tatbestan-



des. So lässt eine Messung des N-Gehaltes ohne gleichzeitige Ermittlung des Bodenfeuchtwertes keine genaue Aussage darüber zu, ob die Pflanzen unter N-Mangel leiden (HERBST, 2004, S. 3.2-14).

Es wird zunehmend versucht, die Schwächen der beiden Verfahrensmethoden durch eine Kombination der Vorteile zu eliminieren. Im sogenannten Map-Overlay-Verfahren werden bei einer Online-Überfahrt zuvor gewonnene Karten anderer Boden- und Bestandesparameter hinterlegt, sodass die unmittelbar erfolgende teilflächenspezifische Applikation unter Zuhilfenahme weiterer Informationen erfolgen kann.

Die nachfolgend aufgeführten Erfassungsmethoden werden vor allem hinsichtlich der Kriterien Kosten, räumliche Auflösung und Zeitaufwand der Anwendung bewertet. In Tabelle 12 sind die wichtigsten Erfassungsmethoden für die aus Tabelle 10 bekannten Wachstumsparameter aufgeführt.



Verfahren zur Erfassung der kleinräumigen Heterogenität	Zielgröße der Erfassung	Räumliche Auflösung	Kosten
Bodenkarten	Geographische Lage, Topographie	DGK 5: 1:5000	Grundpreis 1,30 € je ha
Reichsbodenschätzung	Bodenart, Bodentextur, Bodenzahl, Ackerzahl, u. U. nFK	Übliches Probemuster 50 m x 50 m (4 Bohrpunkte je ha)	6,50 € je ha
Digitale Hof-Bodenkarten	Geographische Lage, Bodenart, nFK	Von verwendeten Datengrundlagen abhängig	Von verwendeten Datengrundlagen abhängig
Digitales Geländemodell	Relief	2 – 10 m in der Fläche, + / – 0,1 m in der Höhenbemessung	7 – 9 € je ha
Leitfähigkeitsmessung	Tongehalt, Bodenfeuchte, Bodenhorizont	5 – 25 m ²	6 – 8 € je ha
Durchdringungswiderstand	Bodenverdichtungen, Aufbau des Bodenprofils	5 m ² in der Fläche, alle 2 cm in der Tiefe	Gerätekosten 15.000 – 20.000 €
Georadar	Aufbau des Bodenprofils, Bodenfeuchte	Im cm-Bereich in der Tiefe	Gerätekosten 15.000 – 20.000 €
Grundnährstoffkartierung	Versorgungszustand des Bodens mit Grundnährstoffen, pH-Wert	Empfohlen: eine Probe pro 0,25 – 0,5 ha	7 € je ha und Jahr
N _{min} -Messung	N-Vorrat des Bodens	Empfohlen: 10 Proben pro ha	6 – 12 € je ha und Jahr
FE 1: Hochgenaue digitale Luftbilder	Biomasse, Bodenoberfläche	5 m ² pro Pixel	1,50 – 2,00 € je ha
FE2: Nahinfrarotaufnahmen	Biomasse, Bodenoberfläche	1 – 4 m ² pro Pixel	5 € je ha
FE 3: Multispektralanalyse von Luftbildaufnahmen	Biomasse, Wasserversorgung	3 – 10 m ² pro Pixel	20 – 100 € je ha
YARA-N-Sensor	N-Versorgungszustand	Fahrgassenbreite	Passiv: 26.100 € Aktiv: 39.750 €
Pendelsensor	Biomasse	Abtastbreite: 1 m	11.000 – 15.000 €
Ertragskartierung	Pflanzlicher Ertrag	9 – 50 m ² , abhängig von Fahrgeschwindigkeit, Schneidwerksbreite, Messintervall	1,20 – 1,50 je ha und Jahr
Erfahrungswissen des Landwirtes	Alles	Was mit dem menschlichen Auge erfassbar ist	Arbeitszeit

Tabelle 12: Verfahren zur Erfassung der kleinräumigen Heterogenität (Eigene Darstellung in Anlehnung an HUFNAGEL et al., 2004)



3.3.2 Bodenkarten

Diese Karten dienen als geographische Grundlage und als digitale Basis für die Erfassung der bestandesbeeinflussenden Wachstumsparameter auf kleinräumiger Ebene. Waren im analogen Zeitalter die Deutsche Grundkarte 1:5000 (DGK 5) und die Topographische Karte die vorherrschenden kartographischen Grundlagen für grundstücksbezogene Maßnahmen, so ist heutzutage mit immer weiter voranschreitender Digitalisierung der kartographischen Grundlagen die Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) als Basis der Grundstücksverwaltung anzusehen. Die ALK-Karten besitzen die größte Genauigkeit aller verfügbaren Flurkarten und kosten in der digitalen und vektorisierten Form 750 € pro Flur (FOY, 2004, S. 3.2-6 ff.). Dem gegenüber betragen die Bezugskosten für die analoge DGK 5 (Flächeninhalt einer Karte 400 ha) auf 7 – 8 € pro Karte und für die topographischen Karten in den Maßstäben 1:10.000, 1:25.000 und 1:50.000 auf jeweils 5 € pro Karte mit den entsprechenden Inhalten 625 ha, 10.000 ha und 40.000 ha (FOY, 2004, S. 3.2-7; 3.2-9). Zur digitalen Verwaltung der Bodenkarten sind die ALK-Daten am besten geeignet, da sie sich problemlos in ein Geographisches Informationssystem (GIS) integrieren lassen.

Alternativ kann der Landwirt eigenhändig mit einem GPS-Gerät einen Schlagumriss durchführen, um damit eine digitale Schlagbasis zu schaffen.

3.3.3 Reichsbodenschätzung

Die Daten der Reichsbodenschätzung (RBS) sind die umfangreichste Informationsquelle über Aufbau, Struktur und Ertragswert der Böden in der BRD, die flächendeckend vorliegt. Mit der Erlassung des Gesetzes für die Schätzung des Kulturbodens vom 16.10.1934 wurde eine einheitliche Schätzung aller Böden in den damaligen Staatsgrenzen Deutschlands vorgenommen. Die Ergebnisse der RBS werden über laufende Nachschätzungen den aktuellen Erkenntnissen der Bodenschätzung angepasst.

Die Bewertung des Ackerlandes erfolgt anhand des Ackerschätzungsrahmens (siehe Abbildung 41). Dieser legt fest, dass die Böden hinsichtlich ihrer Bodenart, ihrer Entstehung und ihrer Zustandsstufe klassifiziert werden. Zur weiteren Unterteilung in den einzelnen Bodenklassen wurden relative Wertzahlen



eingeführt, die sogenannten Bodenzahlen, wobei die Zahl 100 das Maximum darstellt.

Tieferegehende Informationen finden sich in Kapitel 7.2 dieser Arbeit, wo die RBS als zentrale Erfassungsmethode der kleinräumigen Bodenheterogenität der Versuchsflächen detailliert vorgestellt wird.

Im Hinblick auf die Eignung der RBS für die kleinräumige Erfassung der Bodenparameter urteilt BOESS: „Von den bislang genutzten Quellen² entsprach die Bodenschätzung, deren Daten auf einer 50 m-Rasterkartierung beruhen, am ehesten den Anforderungen für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung, insbesondere wenn die Angaben der bestimmenden Grablöcher ausgewertet werden“ (BOESS, 2004, S. 38). Im Gegensatz dazu stellt LAMP die Eignung der RBS für die Belange des Precision Farming in Zweifel, indem er als Kritikpunkte die mitunter zeitlich weit zurückliegende Durchführung der Bodenschätzung, die thematisch ungenügende Berücksichtigung der Wasserversorgung und die starke Orientierung an Grundstücksgrenzen anführt (LAMP, 1998, S. 20).

Als Kosten für die Information der RBS sind 6,50 € je ha zu veranschlagen, die allerdings nur einmalig anfallen.

3.3.4 Digitale Hof-Bodenkarten

Die digitalen Hof-Bodenkarten basieren auf den Ergebnissen der herkömmlichen Bodenschätzung. Mittels geostatistischer Analysen der Grablochdaten und mit Unterstützung weiterer Erfassungsmethoden, wie der geoelektrischen Kartierung und Fernerkundungsaufnahmen, wird zumeist eine höhere räumliche Auflösung als mit den Klassenpolygonen der klassischen Bodenschätzung erreicht. Die geostatistische Analyse der Ergebnisse der RBS im Rahmen des preagro I-Projektes ergab, dass die medianen Reichweiten wichtiger Bodenparameter die Größe der Klassenpolygone der RBS teilweise deutlich unterschritten (HERBST / REIMER, 2004, Kap. 3. S. 19 ff.).

Eine Weiterentwicklung stellt die nFK-optimierte Hof-Bodenkarte dar. Die nFK als zentrale Größe zur Differenzierung des Ertragspotenzials wird dabei in den Mittelpunkt des Datenerhebungsvorgangs gestellt. Als Informationsquellen für die

² Die Aussage von BOESS bezieht sich auf die Zeit vor der Einführung der satelliten- und sensorgestützten Datenerhebung.



nFK-optimierte Hof-Bodenkarte wurden hierbei Daten der bereits vorhandenen Bodenschätzung, zusätzlich gesetzte Bohr- und Grablochpunkte in der Methodik der RBS, Leitfähigkeitsmessungen, Infrarotluftbilder und Ertragskarten verwendet (LAMP, 2005, S. 63).

Der zeitliche Aufwand für eine solche grundlegende Bodeninventur wird für einen Flächenumfang von 100 ha auf 96 Stunden beziffert, der sich auf 60 Stunden Erfassungszeit im Feld und 36 Stunden Nachbearbeitung am PC aufteilt, sodass sich ungefähr ein Zeitbedarf von einer Stunde je ha ergibt (SCHRÖDER, 1998, S. 50).

3.3.5 Digitale Geländemodelle

Digitale Geländemodelle (DGM) dienen der Abbildung des Reliefs. Das Relief nimmt über die Lenkung der oberirdischen und oberflächennahen Ab- und Zuflüsse Einfluss auf die Bodengese, den Wassertransport und das Mikroklima im Gelände (SCHMIDT, 2005, Kap. 3, S. 105). Ein DGM erlaubt die Abschätzung der Ab- und Zuflussmengen und die daraus resultierende Bodenfeuchteverteilung in einem reliefierten Gelände, in dem es die sogenannten primären Reliefparameter Geländeneigung, Exposition und Wölbung darstellt (SCHMIDT, 2005, Kap. 3, S. 83).

Ein DGM besteht im Wesentlichen aus drei Bestandteilen (BILL, 1996, S. 123):

- a) Dreidimensionale Koordinaten
- b) Anweisungen zur Strukturierung der Daten
- c) Interpolationsalgorithmen

Um ein qualitativ hochwertiges DGM zu generieren, ist eine hochpräzise Erfassung der Geländeformen fundamentale Voraussetzung. Es wird dabei eine Höhengenaugigkeit von $\pm 0,1$ m angestrebt. Diese Genauigkeit wird nur von zwei Messverfahren erreicht: Der Messung mit RTK (real time kinematic)-GPS und der Aufnahme der Daten im Laserscanning-Verfahren während einer Befliegung (SCHMIDT, 2005, Kap. 3, S. 79). Herkömmliche Höhendaten der Landesvermessungsämter bieten diese Genauigkeit zumeist noch nicht. Dementsprechend differieren auch die Kosten für die Datenbereitstellung zur Reliefabbildung. Die Höheninformationen der Landesvermessungsämter bewegen sich in einem

Kostenrahmen von 0,30 – 0,50 € je ha, während sich die Kosten für die Neuerstellung eines DGM auf ca. 7 – 9 € je ha belaufen, wobei diese Summe stark vom Umfang der untersuchten Fläche abhängt.

Der größte Vorteil eines DGM in der landwirtschaftlichen Nutzung besteht darin, dass Reliefextrema für den Pflanzenbau abgegrenzt und entsprechend teilflächenspezifisch bearbeitet werden können. Auch unterstützen die Ergebnisse der DGM bei der Interpretation der Karten der Leitfähigkeitsmessungen (SCHMIDT, 2005, Kap. 3, S. 79).

Ein Nachteil des DGM ergibt sich dadurch, dass eine direkte Interpretation der Reliefformen zur Darstellung der Bodenfeuchtemuster nur bei Aufnahmen, die wenige Tage nach starken Niederschlägen entstanden sind, sinnvoll ist (SCHMIDT, 2004, S. 3.2-44).

3.3.6 Leitfähigkeitsmessung

Die Methode der Messung der elektrischen Leitfähigkeit (EC = electrical conductivity) wird seit über 100 Jahren angewendet, um Veränderungen geologischer Strukturen bis in eine Tiefe von mehreren Dekametern festzustellen (DOMSCH, 2004, S. 13). Die elektrische Leitfähigkeit ist korreliert mit den Parametern Tongehalt, Bodenfeuchte und Salzgehalt der Bodenlösung. Das Verfahren dient zur Erhebung des mittleren Tongehaltes und der Lokalisierung von Grundwasser- und Stauwasserstandorten (HERBST, 2004, S. 3.2.3-37).

Mit Hilfe der EC-Werte lassen sich Teilflächen abgrenzen, ohne dass hierbei die Bodenarten identifiziert werden (DOMSCH, 2004, S. 19).

Die Erfassung der elektrischen Leitfähigkeit beruht auf dem geoelektrischen Messprinzip. Hierbei wird über ein Elektrodenpaar ein gleich- oder niederfrequenter Strom in den Boden eingeleitet und mittels eines zweiten Elektrodenpaares gemessen. Das Verhältnis dieser Spannung zum eingeleiteten Strom ist proportional zum scheinbaren elektrischen Bodenwiderstand, der reziproken Größe der scheinbaren elektrischen Bodenleitfähigkeit (LÜCK et al., 2000 in DOMSCH, 2004, S. 13). Graphisch dargestellt ist das Messprinzip in Abbildung 22.

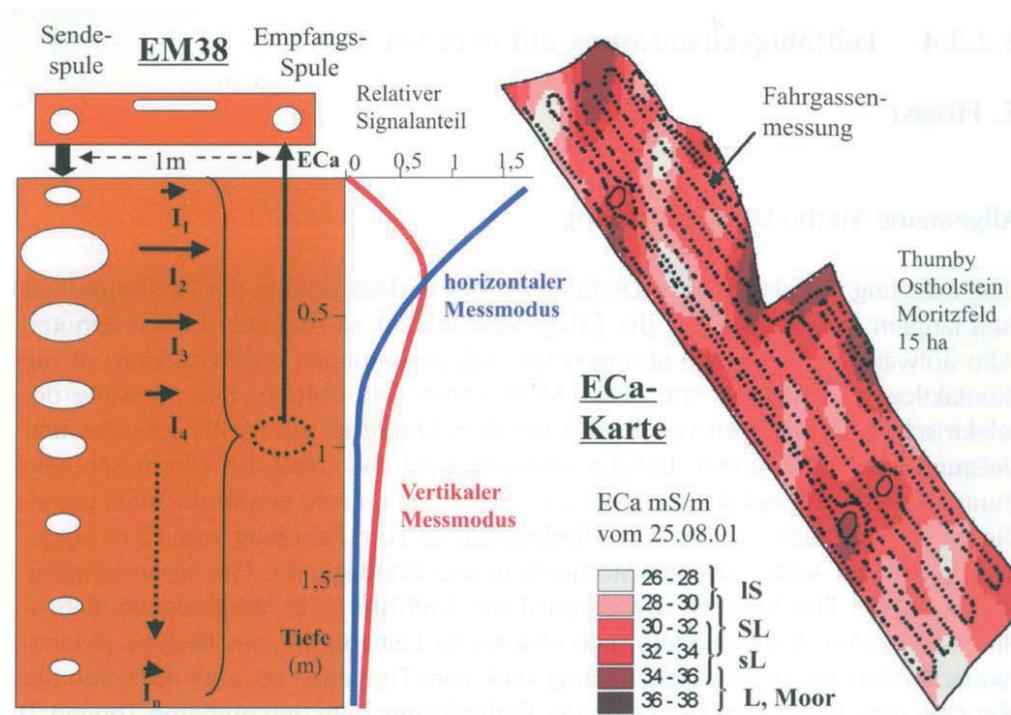


Abbildung 22: Leitfähigkeitsmessverfahren mit EM 38 (HERBST, 2004, S. 3.2-38)

Marktführer im Bereich der elektrischen Leitfähigkeitsmessungen ist das Gerät EM 38 der US-amerikanischen Firma Geonics, das sich als Standardgerät etabliert hat. Unter Nutzung des elektromagnetischen Messprinzips ist mit diesem Gerät eine berührungslose kontinuierliche Messung der elektrischen Bodenleitfähigkeit möglich (DOMSCH, 2004, S. 13).

Die Kosten der Erstellung einer Karte der elektrischen Leitfähigkeit als Dienstleistung liegen im Rahmen von 6 – 8 € je ha. Diese Kosten lassen sich über mehrere Jahre verteilen, da die Karten zeitstabil über die Jahre sind (HERBST, 2004, S. 3.2-38).

Die Messverfahren zur Bestimmung der elektrischen Bodenleitfähigkeit besitzen einige grundlegende Vorteile, die sie für den Einsatz in der Praxis attraktiv machen. Die große Flächenleistung von bis zu 150 – 250 ha pro Tag, verbunden mit einer hohen Messpunktdichte, reduziert den Zeitaufwand auf ein vertretbares Maß. Die hohe räumliche Auflösung von bis zu einem Messpunkt / 5 m² (HERBST, 2004, S. 3.2-39) und die einfachen Rahmenbedingungen haben mit dazu geführt, dass die EC-Messung mit dem EM 38-Gerät „das im Precision Farming am häufigsten eingesetzte nicht-invasive Verfahren“ darstellt (WEHRHAN et al., 2008, S. 89).

Die Nachteile bestehen vor allem darin, dass mit diesem Verfahren nur ein in der Tiefe nicht-differenziertes Mischsignal ermittelt wird. Zudem stellt der EC-Wert keine direkt bestimmte Bodenfruchtbarkeitskennziffer, sondern lediglich eine Beobachtung von statistischen Zusammenhängen zwischen geoelektrischen Größen dar, wie der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit und anderen interessierenden Bodeneigenschaften (GEBBERS, 2004a, S. 3.2.3-113).

In einem breit angelegten Vergleichstest verschiedener, teilweise noch nicht in der Praxis verbreiteter, geophysikalischer Messverfahren im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie konnte das Verfahren der Geoelektrik die besten Prüfergebnisse vorweisen und lag qualitativ deutlich vor dem Georadar. Vielversprechende neuartige geophysikalische Messverfahren stellten die Methoden der Kernspinresonanz und der Induzierten Polarisation dar (vgl. MÜLLER et al., 2008, S. 53).

3.3.7 Messung des Durchdringungswiderstandes

Bei der Ermittlung des Durchdringungswiderstandes lassen sich Hinweise auf Bodenverdichtung und Erkenntnisse über den Aufbau des Bodenprofils gewinnen. Der Durchdringungswiderstand wird mit Hilfe eines Penetrometers digital aufgezeichnet und ins Verhältnis zur Tiefe gesetzt (GEBBERS / LÜCK, 2004, S. 3.2.3-98). Der Durchdringungswiderstand ist abhängig von den Einflussfaktoren Lagerungsdichte, Textur und Bodenfeuchte.

Eine Erweiterung des klassischen Penetrometers stellt das Gerät VERIS Profiler 3000 dar. Er verknüpft die Messung des Durchdringungswiderstandes mit der Feststellung der elektrischen Leitfähigkeit. Die auf diese Weise gewonnenen Erkenntnisse über die Textur können bei der Bestimmung des Durchdringungswiderstandes herausgerechnet werden (GEBBERS / LÜCK, 2004, S. 3.2.3-97).

Die Kosten für das Gerät betragen 15.000 – 20.000 €.

Kritisch äußerten sich ROGASIK et al., die feststellten, dass der Durchdringungswiderstand und der EC-Wert unterschiedliche Angaben zum Substrat, zur Substratabfolge und zur morphologischen Gefügeausprägung liefern (ROGASIK et al., 2011).



3.3.8 Georadar

Das Georadar, oder auch Bodenradar genannt, entspricht vom Prinzip her dem seismischen Reflexionsverfahren und dem Echolot. Von einer Quelle werden kurze elektromagnetische Impulse in den Untergrund abgestrahlt. Ein Teil dieser Strahlen kehrt durch Reflexion an die Oberfläche zurück und wird dort aufgezeichnet. Diese Reflexion geschieht nur, wenn ein ausreichender Unterschied in den elektrischen Eigenschaften zwischen den einzelnen Materialien vorliegt (ZIEKUR / SCHURICHT, 2004, S. 23). Bereiche mit starker Reflektivität weisen auf sandige Substrate, Bereiche mit geringerer Reflexion deuten auf schwereres Substrat hin. Einen deutlichen Einfluss auf das Messergebnis hat die Bodenfeuchte, denn mit zunehmender Austrocknung breiten sich die Radarsignale schneller aus.

Auf Grund der großen Ähnlichkeit mit dem bereits beschriebenen EM 38-Verfahren wird an dieser Stelle auf eine gesonderte Darstellung der Kosten sowie der Vor- und Nachteile des Georadarverfahrens verzichtet.

3.3.9 Grundnährstoffkartierung

Die Grundnährstoffkartierung dient der Ermittlung der für die Pflanze leicht verfügbaren Nährstoffe und des pH-Wertes auf möglichst kleinräumiger Basis. Dabei untergliedert sich die Grundnährstoffkartierung in folgende Einzelschritte: Probenahmeplanung, Probengewinnung, Laboranalyse und Erstellung von Karten (GEBBERS, 2004a, S. 3.2-61). Bei der Probenahme werden Mischproben im Rasterverfahren gezogen, um die Mikroheterogenität der Nährstoffverteilung auszugleichen.

Der Kostenaufwand beträgt 22 € für drei Jahre, also ca. 7 € pro Jahr (GEBBERS, 2004a, S. 3.2-62). Die Probenahme erfolgt im Herbst, zeitnah vor der Grundnährstoffgabe innerhalb der Fruchtfolge vor der anspruchsvollsten Anbaukultur.

Im Gegensatz zu den anderen Erhebungsverfahren, die von den Landwirten auf freiwilliger Basis durchgeführt werden, unterliegt die Ausgestaltung der Grundnährstoffkartierung für P, K, pH-Wert und N_{\min} -Messung einigen gesetzlichen Vorgaben, die die Maximalgröße der Erhebungsflächen regeln. Aus ökonomischer Sicht besteht das Risiko einer zu geringen oder zu hohen Intensität der Boden-



untersuchung, sodass die Wahl des angemessenen Beprobungsrasters und Beprobungszeitpunktes über den Nutzen der Grundnährstoffkartierung entscheidet.

3.3.10 N_{\min} -Messung

Die N_{\min} -Messung wird dazu verwendet, um den N-Vorrat bei Vegetationsbeginn in Form des mineralischen Stickstoffs (=Nitrat-N + Ammonium-N) zu ermitteln. Nach den gesetzlichen Vorgaben der Düngeverordnung muss die N_{\min} -Methode jährlich und einzelschlagbezogen durchgeführt werden (KERSEBAUM, 2004, S. 3.2-67). Die Probenahme sollte ca. 10 Tage vor der N-Düngung zu Vegetationsbeginn erfolgen.

Die Kosten der N_{\min} -Methode belaufen sich auf 6 – 12 € je ha, wobei der Preis von der Anzahl der abgegebenen Mischproben abhängt (KERSEBAUM, 2004, S. 3.2-68).

Den größten praktischen Nutzen besitzt die N_{\min} -Methode in der Düngeplanung der ersten Wachstumsstadien und sie gibt an Standorten, an denen ein großer N-Speichervorrat erwartet wird, einen groben Anhaltspunkt über die absolute Höhe. Die starke Mobilität des Stickstoffs macht eine kleinräumige Erhebung des N_{\min} -Gehaltes sehr schwierig, was sich als größter Nachteil dieses Verfahrens erweist. Mit der N_{\min} -Methode ist aus diesem Grund auch keine für die Anforderungen des Precision Farmings so wichtige Abgrenzung von Teilflächen möglich (KERSEBAUM, 2004, S. 3.2-70).

3.3.11 Fernerkundung

Im Bereich der Fernerkundung (FE) werden in der Praxis mehrere Varianten der Datenerhebung genutzt. An dieser Stelle sollen vier Methoden kurz dargestellt werden. Es handelt sich dabei um

- a) Hochgenaue digitale Luftbilder
- b) Nahinfrarotaufnahmen
- c) Multispektralanalysen von FE-Aufnahmen
- d) LAI und CAI Modellierungen



Hochgenaue digitale Luftbilder

Mit Hilfe der hochgenauen digitalen Luftbilder lassen sich pflanzenbauliche Parameter wie die Biomasse ermitteln. Die Aufnahmen der flugzeug- oder satellitengestützten Kameras zeichnen ein Abbild der Bestandesheterogenität. Der praktische Nutzen der Aufnahmen ist nur gegeben, wenn die Daten über eine hohe räumliche Auflösung verfügen (kleiner als 1 m) und die Ergebnisse georeferenziert aufbereitet werden (GRENZDÖRFFER, 2004, S. 3.2-45).

Eine entscheidende Bedeutung für die Qualität und Aussagekraft der FE-Daten hat der Aufnahmezeitpunkt. In Abbildung 23 sind Zeiträume und Anwendungsmöglichkeiten für FE-Daten aufgeführt.

Frühjahr		Frühsommer		Sommer		Herbst		
März	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Oktober	Nov.
Substratwechsel								
Bodenwassergehalt								
Wassererosion								
Bodenbearbeitung/-bewirtschaftung								
Auswinterungsschäden								
Trockenheit								
Düngung und PSM								
Verunkrautung								
Wildschäden/Krankheits- und Schädlingsbefall								

Abbildung 23: Aufnahmezeiträume und Anwendungsmöglichkeiten für Fernerkundungsdaten (GRENZDÖRFFER, 1998, S. 94)

Den größten Erkenntnisgewinn bieten FE-Aufnahmen beim Getreide während der Bestandesdifferenzierung in der Entwicklungsphase EC 30-37 bis zum Reihenschluss und in der Phase der Ertragsdifferenzierung im Entwicklungsstadium der EC 75-85, der Abreifephase (GRENZDÖRFFER, 2004, S. 3.2-47).

Die Kosten belaufen sich auf 1,50 -2,00 € je ha für die Erstellung der Luftbildaufnahmen. Für weitere Verarbeitungsschritte, wie z. B. eine Biomasseindexberechnung oder eine luftbildgestützte Schlagvermessung sind nochmals jeweils 0,30 € je ha anzusetzen (GRENZDÖRFFER, 2004, S. 3.2-47).



Die großen Vorzüge der FE-Aufnahmen bestehen in der Möglichkeit, die Bestände aus der Vogelperspektive betrachten zu können und so einen guten Überblick über die Bestandesheterogenität zu erlangen. Bezüglich der Flächenleistung sind FE-Aufnahmen unübertroffen und stellen einen „intuitiven, einfachen und sehr preiswerten Einstieg in Precision Farming dar“ (GRENZDÖRFFER, 2004, S. 3.2-45). Vor allem Abreifeaufnahmen aus trockenen Jahren sind hochkorreliert mit der räumlichen Ertragsheterogenität. Der Nachteil der FE-Aufnahmen besteht in der großen Abhängigkeit von den äußeren Rahmenbedingungen, insbesondere den Witterungsverhältnissen. Ein wolkenloser Himmel ist absolute Voraussetzung für eine gute Qualität der FE-Aufnahmen. Diese Bedingung kollidiert oftmals mit den phänologisch günstigen Zeiträumen für eine Bestandesaufnahme, und mit jeder witterungsbedingten Verzögerung von FE-Erhebungen sinkt die pflanzenbauliche Aussagekraft der FE.

Nahinfrarotaufnahmen (NIR-Aufnahmen)

NIR-Aufnahmen liefern Hinweise auf Bestandes- und Ertragsheterogenitäten. Das Messprinzip beruht auf der pflanzenphysiologischen Tatsache, dass photosynthetisch aktive Pflanzen eine signifikant höhere Reflexion aufweisen als die Bodenoberfläche oder trockene Biomasse (DOHMEN, 2004, S. 3.2-51). Zur Zeit der Abreife fällt die NIR-Reflexion drastisch ab, sodass NIR-Aufnahmen ca. vier Wochen vor der Ernte Teilbereiche des Bestandes anzeigen, in denen eine vorzeitige Abreife sichtbar ist. Diese Teilflächen sind als Bereiche zu interpretieren, die unter Wasser- und/oder Nährstoffmangel leiden (DOHMEN, 2004, S. 3.2-51). Dementsprechend verfügen NIR-Aufnahmen vor allem in niederschlagslimitierten Regionen mit Jahresniederschlägen von weniger als 550 mm über eine große Aussagekraft. Abreifeaufnahmen zeigen hierbei eine Korrelation zu den Ertragsergebnissen von $r^2 > 0,6$ (DOHMEN, 2004, S. 3.2-53).

Die Kosten belaufen sich für dieses Verfahren auf 5 € je Hektar, wobei die Daten über eine 10-jährige Nutzungsdauer verfügen.

Multispektralanalyse von Luftbildaufnahmen

Die Multispektralanalyse der Luftbildaufnahmen gibt Hinweise auf das pflanzenverfügbare Wasserpotenzial von Flächen. Mittels eines speziell entwickelten Boden-Pflanze-Spektralmodelles wird aus den Sensordaten die pflanzenverfügbare



bare Wassermenge berechnet. Diese Methode ist deshalb besonders gut für Feldfrüchte geeignet, die hohe Ansprüche an die Durchwurzelbarkeit und den Wasser- und Wärmehaushalt stellen (SELIGE, 2004, S. 3.2-55). Die Multispektralanalyse von FE-Aufnahmen besitzt in Regionen ihre Stärke, die unter Wasserknappheit leiden.

Der Kostenrahmen für dieses Verfahren liegt bei 20 – 100 € je Hektar (SELIGE, 2004, S. 3.2-56). Mit Hilfe dieser Methode lässt sich eine zentrale Steuerungsgröße für das Precision Farming, die pflanzenverfügbare Wassermenge, abbilden.

LAI- und CAI-Modellierung

Eine weitere neuere Methode der Analyse von FE-Aufnahmen besteht in der Berechnung der pflanzenbaulichen Indizes LAI (Leaf Area Index = Blattflächenindex) und CAI (Chlorophyll-Absorptions-Integral). Der Blattflächenindex setzt die zur Photosynthese befähigte Blattfläche eines Pflanzenbestandes zu seinem Standraum an Bodenfläche in Beziehung und wird zur physiologischen Charakterisierung verschiedener pflanzenbaulicher Parameter, wie z. B. der Blattflächendauer, herangezogen (DIEPENBROCK et al., 1999, S. 39-40). Er ist aus diesem Grund ein geeigneter Indikator der Bestandesdichte einer Pflanzenkultur.

Das CAI wird aus den Hyperspektraldaten der Fernerkundung berechnet. Es parametrisiert das Integral über den Spektralbereich der Chlorophyll-Absorption und des red edge bis hin zum nahen Infrarot. Die Werte des CAI sind umso höher, je ausgeprägter sich die Chlorophyll-Absorption im Rot und die Reflexion vitaler Zellstrukturen im nahen Infrarot darstellen. Der CAI fungiert als Maß für die Vitalität eines Pflanzenbestandes (BACH / BEGIEBING, 2008, S. 103).

Die Erhebung kann sowohl flugzeug- als auch satellitengestützt erfolgen. Als aussagekräftiger Zeitraum hat sich beim Weizen die Phase der Milchreife erwiesen, in der deutliche räumliche Unterschiede in der standortbedingten Abreifegeschwindigkeit sichtbar sind (BACH / BEGIEBING, 2008, S. 103).

3.3.12 YARA-N-Sensor

Der YARA-N-Sensor misst während der Überfahrt die Reflexion des Tageslichtes am Pflanzenbestand. Die gemessenen Reflexionswerte werden online zum N-Ernährungszustand der Pflanzen in Beziehung gesetzt. Anhand einer sorten- und

standortspezifischen Kalibrierung wird eine situationsangepasste N-Menge berechnet und direkt appliziert (SCHWAIBERGER, 2004, S. 3.2-91). Dabei wird ein jeweils drei Meter breiter Bereich zu beiden Seiten der Fahrspur des mit dem YARA-N-Sensor ausgestatteten Schleppers erfasst. Die Messgeometrie des YARA-N-Sensors ist in Abbildung 24 dargestellt.

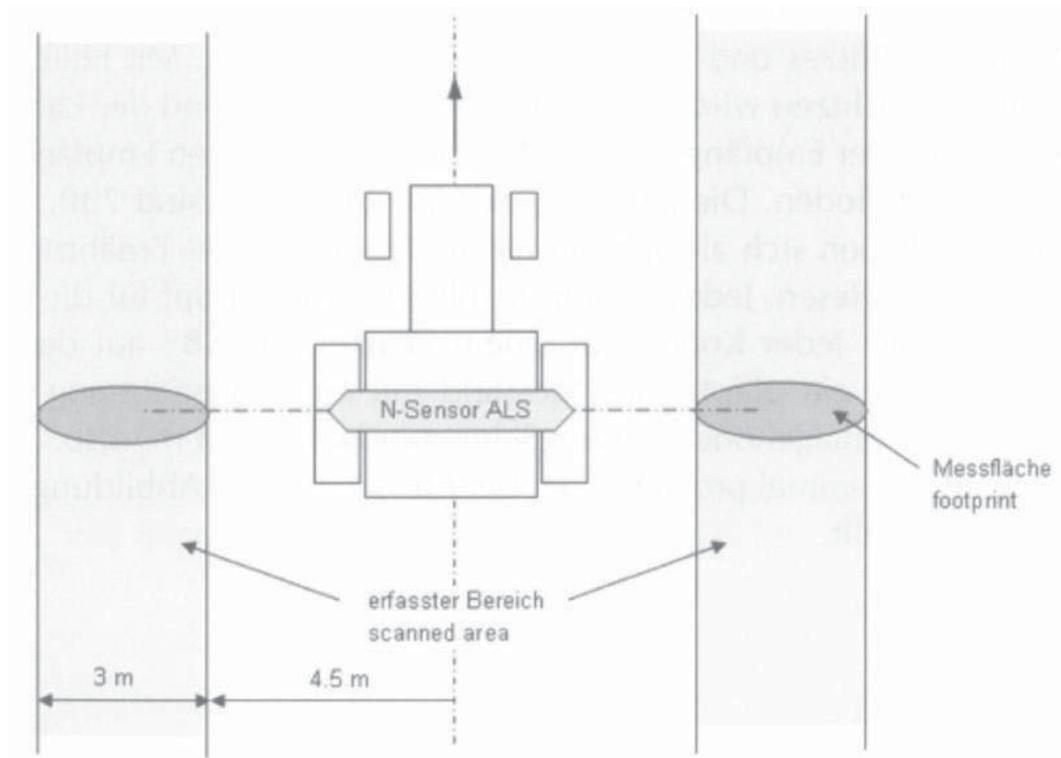


Abbildung 24: Messgeometrie des YARA-N-Sensors (REUSCH, 2006)

Um die Datenbasis neben den sich schnell ändernden online erfassten Informationen um dauerhaftere Daten, wie verschiedene Bodenparameter, zu erweitern, kann der YARA-N-Sensor auch im Map-Overlay-Modus betrieben werden. Durch die Option der Ausstattung des YARA-N-Sensors mit einer aktiven Lichtquelle wurde das Verfahren 2005 tageslichtunabhängig, womit einer der größten Mängel beseitigt wurde. Der YARA-N-Sensor wird von der Firma Agricon vertrieben und kostet in der Anschaffung als Komplettpreis inklusive des Agronomischen Terminals mit PF-Box und dem YARA-N-Tester in der Variante ohne eigene Lichtquelle 26.100 €. Das als N-Sensor ALS bezeichnete System mit eigener Lichtquelle wird auf der Firmenhomepage von Agricon mit einem Listenpreis von 39.750 € angeboten (AGRICON, 2012).



SCHWAIBERGER nennt als Vorteile des YARA-N-Sensors den durchschnittlich um 3 % höheren Ertrag, die Verringerung des Lagerrisikos, eine verbesserte Druschfähigkeit und in der Folge davon eine homogenere Qualität des Ernteproduktes (SCHWAIBERGER, 2004, S. 3.2-91). Die Nachteile des Systems werden in den externen Störquellen gesehen, die das Messergebnis des N-Sensors deutlich verfälschen können. Dabei verweist Reusch auf die Sonneneinstrahlung, die Bewölkung und die Bodenfarbe (REUSCH, 1998, S. 113). Zwei der drei genannten Störfaktoren können allerdings durch die N-Sensorvariante mit eigener Lichtquelle ausgeschaltet werden.

3.3.13 Pendelsensor (CROP-Meter)

Der Pendelsensor ist ein Verfahren zur Erfassung der Pflanzenmasse. Das physikalische Funktionsprinzip beruht darauf, dass ein in konstanter Höhe pendelnd aufgehängter, zylinderförmiger Körper quer durch einen Pflanzenbestand bewegt wird. Die von ihm berührten Pflanzen üben eine Kraftwirkung aus, die ein Auslenken des Pendels aus seiner Ruhestellung bewirkt. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die Höhe der Kraftwirkung im Wesentlichen von der Masse und der Anzahl der Einzelpflanzen und somit von der auf die Fläche bezogene Pflanzenmasse bestimmt wird (EHLERT, 2004, S. 3.2-95). Das Messprinzip der Pendelbewegung ist in Abbildung 25 dargestellt.

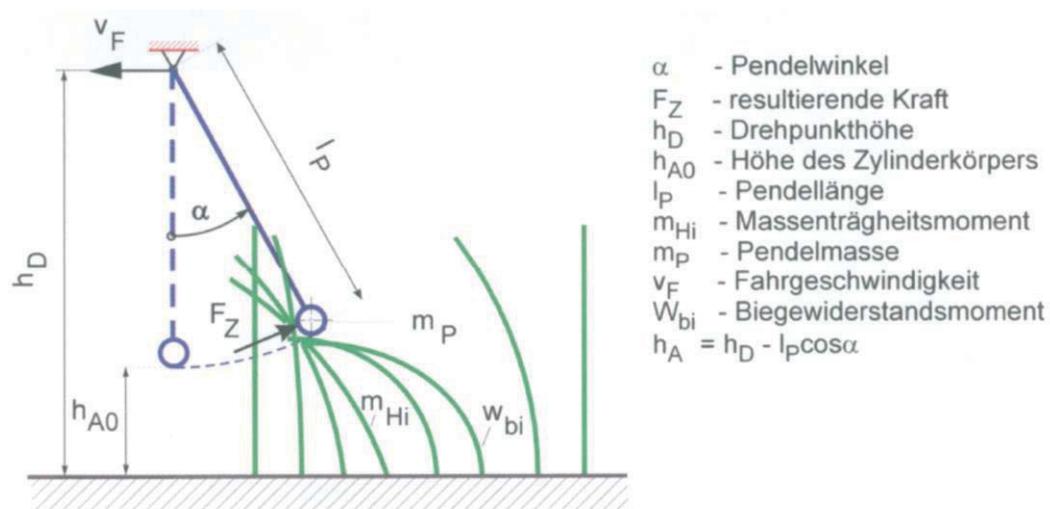


Abbildung 25: Messprinzip der Pendelbewegung (EHLERT, 2004, S. 3.2.4-5)

Der Erhebungszeitraum für den Pendelsensor reicht von der Vegetationsphase EC 35 bis zum Abreifen des Bestandes, wobei bei der Einstellung des Pendelsensors



besonders auf die Drehpunkthöhe und die Pendellänge im Verhältnis zur Pflanzhöhe geachtet werden muss.

Die Kosten für den Pendelsensor belaufen sich auf 11.000 – 15.000 € in Abhängigkeit der technischen Ausstattung (KTBL, 2005, S. 184).

Der Vorteil des Pendelsensors liegt in der Erfassung der Bestandesdichte in einer direkten physikalischen Beziehung. Er erreicht nach Untersuchungen von EHLERT Bestimmtheitsmaße von $r^2 = 0,90$ zur Pflanzenmasse (EHLERT, 1998, S. 66). Zudem ist die Bedienung unkompliziert und störungsfrei, was durch eigene Untersuchungen bei der praktischen Anwendung festgestellt wurde. Der Nachteil des Pendelsensors besteht darin, dass nur ein Meter in der Breite innerhalb der Fahrspur abgetastet wird, d. h., dass bei einer Arbeitsbreite von 24 m nur ca. 5 % der applizierten Fläche untersucht wird und für den Rest in der Breite homogene Bedingungen unterstellt werden müssen. Des Weiteren besitzt das Messprinzip nach eigenen Untersuchungen Schwächen bei Messungen im hängigen Gelände.

3.3.14 Ertragskartierung

An dieser Stelle wird nur auf die Rolle der Ertragskartierung als Datenerfassungsinstrument eingegangen. Die technische Funktionsweise der Ertragskartierung kommt in Kapitel 4.2.2 zur Sprache und die Bedeutung der Ertragskartierung als Methode der Erntekontrolle wird in Kapitel 8.1 detailliert behandelt.

Die Ertragskartierung dient zur Abbildung der häufig beträchtlichen Ertragsunterschiede innerhalb eines Schlages. Vor allem die Erfassung der Erträge über mehrere Jahre hinweg kann es dem Bewirtschafter ermöglichen, Hoch- und Niedrigertragszonen voneinander abzugrenzen (NOACK, 2007, S. 5). Die Ertragsfassung unterscheidet sich von den anderen zuvor gezeigten Datenerfassungsmethoden dadurch, dass hier nicht die ertragsbeeinflussenden Wachstumsparameter, sondern das Resultat des Zusammenwirkens der einzelnen Wachstumsfaktoren, der Ertrag selbst, aufgezeichnet wird.

Bei der Ertragskartierung wird durch eine Verknüpfung der durch eine satellitengestützte Ortung des Mähdreschers erhobenen Positionsdaten mit den fortlaufend aufgezeichneten Daten der Ertragsmessung eine kleinräumig aufgelöste Übersicht über die Ertragsverhältnisse innerhalb eines Schlages gewonnen. Die



Genauigkeit der räumlichen Auflösung der Ertragserfassung hängt zum einen von der Schneidwerksbreite des Mähdreschers und zum anderen von der Fahrgeschwindigkeit der Erntemaschine beziehungsweise des zeitlichen Intervalls der maschineninternen Ertragsmessung ab.

Die gespeicherten Daten der Ertragskartierung bieten eine Reihe von Möglichkeiten der Nutzung (NOACK, 2007, S. 6):

- Erfolgskontrolle für die pflanzenbaulichen Maßnahmen
- Identifikation von Problembereichen
- Auswertung von eigenen Feldversuchen
- Ableitung von Bewirtschaftungsstrategien
- Betriebswirtschaftliche Auswertungen

Die Kosten der Ertragskartierung sind im Verhältnis zu den Kosten der anderen Datenerhebungsmethoden eher gering, wobei aber zu berücksichtigen ist, dass die Ertragskarte eine jährlich wiederkehrende Ausgabe darstellt, wenn sie als Dienstleistung eingekauft wird. Die Preise für die Erstellung einer Ertragskarte durch einen Dienstleister belaufen sich in Abhängigkeit des Flächenumfangs auf eine Spanne von 1,20 – 1,50 € je ha (NOACK, 2007, S. 31). Der Kaufpreis eines Ertragskartierungssystems schwankt von Hersteller zu Hersteller und unterscheidet sich auch im Lieferumfang (Qualität des GPS-Signals, Software, Schulungen vor Ort), sodass die Preise nicht exakt miteinander vergleichbar sind. Die von NOACK aufgeführten Listenpreise für das Ertragskartierungssystem CEBIS der Firma Claas von 10.700 € decken sich mit den Erfahrungen des Autors dieser Arbeit beim Kauf eines gleichnamigen Ertragskartierungssystems zur Durchführung der Ertragserfassung auf den Versuchsflächen.

Der Vorteil der Ertragskartierung liegt in dem umfangreichen Erkenntnisgewinn über die tatsächlichen Ertragsverhältnisse in hoher räumlicher Auflösung innerhalb eines Schlages. Der Nachteil dieser Erfassungsmethode besteht darin, dass die Ertragskartierung keine Hinweise darauf liefert, was die Ursachen für die entstehenden Ertragsvariabilitäten sind. Dies bedeutet, dass der Erkenntnisgewinn einer Ertragskartierung stark von den Fähigkeiten des Bewirtschafters bei der Datenerhebung und –interpretation sowie dem ihm zur Verfügung stehenden Boden- und Pflanzenbestandesinformationen abhängt.



3.3.15 Erfahrungswissen des Landwirts

Als sehr wichtige Größe bei der Erklärung von Boden- und vor allem Bestandesheterogenitäten sind die Erfahrungswerte des Landwirts zu nennen. Viele Bestandesphänomene kurzfristiger Art lassen sich durch Bewirtschaftungsmaßnahmen oder auch –fehler des Landwirts erklären. Von noch größerer Bedeutung ist das historische Erfahrungswissen des Landwirts über die Schlageigenschaften, wenn sich die Fläche bereits seit längerem in seiner Bewirtschaftung befindet. Viele durch die zuvor aufgeführten Erfassungsmethoden festgestellten Besonderheiten in der Boden- und Bestandesheterogenität lassen sich mit Hilfe von langjährigen Beobachtungserfahrungen des Bewirtschafters mühelos erklären. Aber auch diese Landwirte sind oftmals von den Ergebnissen der Ertragskartierung in ihrer quantitativen Ausprägung überrascht (WERNER, 2004, S. 1-3).

Nach der zu Beginn des Kapitels 3 erfolgten Definition handelt es sich bei dem Landwirt um ein Online-Verfahren mit Map-Overlay.

3.3.16 Vergleich einiger Erfassungsmethoden

Im Rahmen einer Untersuchung zur Quantifizierung des Erklärungsbeitrags einiger ausgewählter Datenerfassungsmethoden ermittelte das Niedersächsische Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie die Genauigkeit der Datenquellen Bodenschätzung, Geologie und Luftbildaufnahmen sowie die Kombination dieser Verfahren in Bezug auf die Erfassung kleinräumiger Heterogenitäten. Als Referenzgröße diente die Hof-Bodenkarte (HBK). Als zu erfassender Bodenparameter wurde die nFKWe auf Grund ihrer Bedeutung für das Pflanzenwachstum ausgewählt. Nacheinander wurden die einzelnen Datenquellen mit der HBK verschnitten und die Abweichungen ausgewertet (LÖSEL et al., 2004, S. 49-50).

Zur Bemessung des Fehlers wurden die beiden Maße Wurzel der mittleren quadrierten Differenz (WMQD) und der Anteil der Flächen mit weniger als 20 % Abweichung im Vergleich zur HBK herangezogen (LÖSEL et al., 2004, S. 51-52).

Im Ergebnis zeigte sich, dass die Bodenschätzung ca. 60 % der untersuchten Flächen zufriedenstellend, d. h. mit weniger als 20 % Abweichung, kartierte und die Hinzunahme geologischer Karten keine Verbesserung erbrachte. Die Variante Bodenschätzung und Luftbildaufnahmen ergab eine Erhöhung des Anteils zufriedenstellend kartierter Flächen auf ca. 80 %, der auch hier durch die Hinzunahme



nahme geologischer Karten nicht verbessert werden konnte (LÖSEL et al., 2004, S. 52). Im Einzelfall einer relativ homogenen Gemarkung veränderte sich das Resultat der Untersuchung prozentual nach oben, indem die Bodenschätzung allein bereits 81,8 % der Flächen zufriedenstellend kartierte und der Wert sich durch Hinzunahme geologischer Karten und Luftbilder auf 89,6 % bzw. 95,4 % steigerte (LÖSEL et al., 2004, S. 54).

Bei Berücksichtigung der Kosten der jeweiligen Datenquelle ergab sich das in Abbildung 26 dargestellte Verhältnis.

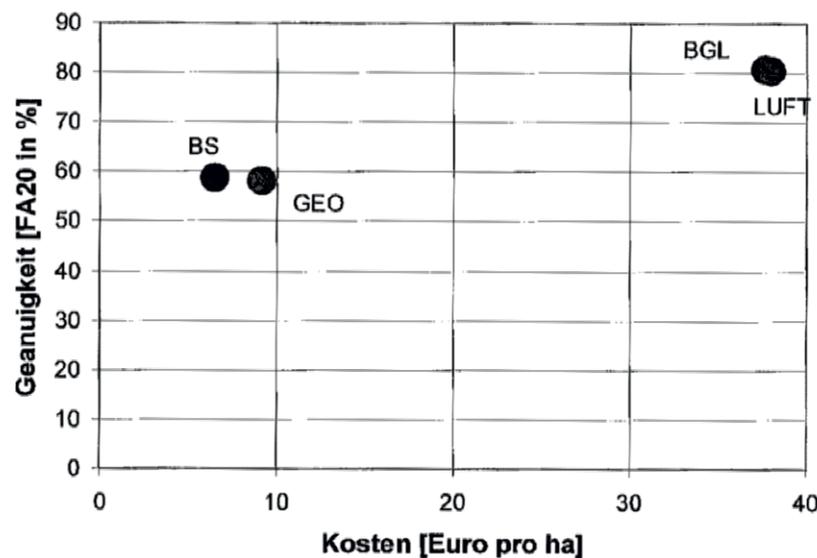


Abbildung 26: Ergebnisse der Genauigkeits- und Kostenanalyse (LÖSEL et al., 2004, S. 62)

Demnach bestehen die beiden Alternativen, entweder 60 % der Flächen zufriedenstellend kartiert für 6,50 € je ha zu erwerben oder für annähernd 40 € je ha 80 % der Flächen in einem zufriedenstellenden Maß kartiert zu erhalten.

3.4 Herleitung der geeigneten Wachstumsparameter und Erfassungsmethoden für die Fragestellung dieser Arbeit

In Anlehnung an das in Abbildung 1 dargestellte Wachstumsdreieck von v. BOGUSLAWSKI, das besagt, dass der pflanzliche Ertrag von den drei Produktivkräften Pflanze, Klima und Boden und den zwischen ihnen bestehenden Interdependenzen abhängt und den in Kapitel 2.4 herausgearbeiteten Wachstumsfaktoren mit dem größten Erklärungsbeitrag zur räumlichen Variabilität des Ertrages



wird in diesem Kapitel hergeleitet, warum der Boden der zentrale Wachstumsparameter der Untersuchungen und die RBS sowie die Ertragskartierung die dazugehörigen geeigneten Datenerfassungsmethoden darstellen. Die Tabelle 13 bietet einen Überblick über die Bestimmungsfaktoren, die zur Auswahl der genannten Wachstumsparameter und Erfassungsmethoden führten.

Wachstumsfaktor	Einwirkungsmöglichkeit	Räumliche Variabilität ³	Geeignete Erfassungsmethode
Pflanzengenetik	Geeignete Sortenwahl	Nicht vorhanden	Ertragskartierung
Klima	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	Wetterstationen
Boden (mit Bestandesführung)	Bestandesführung	Vorhanden	RBS

Tabelle 13: Auswahl der zentralen Wachstumsparameter und der dazugehörigen Erfassungsmethoden (Eigene Darstellung)

Anhand der Darstellung in Tabelle 13 lässt sich erkennen, dass der Wachstumsfaktor Boden der einzige der drei Produktivkräfte ist, der räumlich variabel vorliegt. Auftretende räumliche Variabilitäten des Pflanzenbestandes und der klimatischen Bedingungen lassen sich wiederum auf räumlich variabel auftretende Bodeneigenschaften wie Bodenwasserhaltevermögen oder Relief zurückführen. Es ist klar ersichtlich, dass deshalb der Boden den relativ vorzüglichen Wachstumsfaktor darstellt, räumliche Ertragsvariabilitäten zu erklären.

Auf Grundlage der Ergebnisse der jährlichen Bodennährstoffuntersuchungen auf dem Versuchsbetrieb kann von einer ausreichenden Nährstoffversorgung der Nutzflächen ausgegangen werden. Dies gilt im Besonderen für die um die Hofstelle arrondierten Flächen, die aus Transportkostengründen bevorzugt begüht wurden.

Als geeignete Erfassungsmethode zur dauerhaften Kartierung des Bodens erweist sich die RBS. Nach BOESS reiche zwar die RBS als alleinige Informationsgrundlage nicht aus, aber sie liefere im Ansatz „Hinweise auf die zu erwartende Heterogenität, insbesondere wenn eine spezifische Auswertung der Daten vorgenommen werde (z. B. nFKWe)“ (BOESS, 2004, S. 43). Des Weiteren verweist er darauf, dass zusätzliche wichtige Hinweise auf vorhandene Bodenheterogenitäten aus den Ernteertragsdaten gewonnen werden können, was aber nur durch eine

³ Zur differenzierten Diskussion der Fragestellung der räumlichen Variabilität der Wachstumsfaktoren sei auf das Kapitel 3.2 verwiesen.



sorgfältige Interpretation der Ernteertragsdaten bei guter Betriebskenntnis möglich sei (BOESS, 2004, S. 43).

Auch LÖSEL et al. (2004, S. 52), PFINGSTEN (1963, S. 24) oder REIMER / LAMP (2002, S. 99-100) kommen zu der Erkenntnis, dass die RBS eine gute Grundlage zu ersten Abschätzungen von Ertragsheterogenitäten darstellt, aber durch eine modifizierte Durchführung der RBS oder durch Heranziehung weiterer Erfassungsmethoden in der Datenbasis erweitert werden müsste. So sprechen sich BOESS et al. (2002, S. 97-98) für die Hinzunahme weiterer Erfassungsmethoden wie der Luftbildauswertung und geoelektrischer Verfahren aus, während HARRACH darauf verweist, dass die Klassen der nutzbaren Wurzelraumkapazität die Ertragsfähigkeit des Bodens besser abbilden als die Wertzahlen der RBS (HARRACH, 1970, S. 66).



4 Inhaltliche, technologische und ökonomische Rahmenbedingungen des Precision Farmings

4.1 Idee des Precision Farmings und historische Entwicklung

4.1.1 Inhalt und Aufbau des Precision Farmings

Zu dem Begriff „Precision Farming (PF)“ existiert eine Vielzahl von Definitionen. Eine sehr allgemeine Beschreibung stammt von WERNER: „Unter dem Begriff Precision Farming werden alle diejenigen Techniken und Verfahren im Pflanzenbau zusammengefasst, mit denen es möglich ist, die pflanzenbaulichen Maßnahmen auf Acker- oder Grünland genauer – also präziser – als bisher durchzuführen“ (WERNER, 2004, S. 1-1). Eine spezifischere Definition liefert EHLERT: „Unter teilflächenspezifischer Bewirtschaftung versteht man ein Managementsystem zur Produktion von pflanzlichen Erzeugnissen unter Berücksichtigung kleinräumig vorhandener Heterogenitäten bei Boden- und Pflanzenparametern“ (EHLERT, 1994 nach EHLERT et al., 2004, S. 23).

Die positiven Effekte des Einsatzes der Precision Farming-Technologie werden von WAGNER hervorgehoben: „Precision Farming verspricht eine erheblich verbesserte Effizienz des Ressourceneinsatzes und reduziert die Verschwendung von Produktionsfaktoren“ (WAGNER, 1999, S. 39).

Anhand der Abbildung 27 sind die positiven Effekte der Berücksichtigung heterogener Strukturen innerhalb eines Schlates, also die Anwendung einer teilschlag-spezifischen Bewirtschaftung, dargestellt. Bei einer schlageinheitlichen Bestandesführung kommt es in dem gezeigten Beispiel zum einen zu einer Verschwendung von Ertragspotenzial, in dem bei einer homogenen Düngung ein möglicher Mehrertrag nicht realisiert wird (linke Hälfte der Darstellung). Zum anderen führt hier die schlaghomogene Düngung zu einer Verschwendung von Mineraldünger, da auf den Teilflächen des Schlates mit unterdurchschnittlichem Ertragspotenzial der ausgebrachte Dünger nicht vollständig in Ertrag umgesetzt werden kann und unter Umständen durch Auswaschung ökologisch unerwünschte Auswirkungen verursacht.

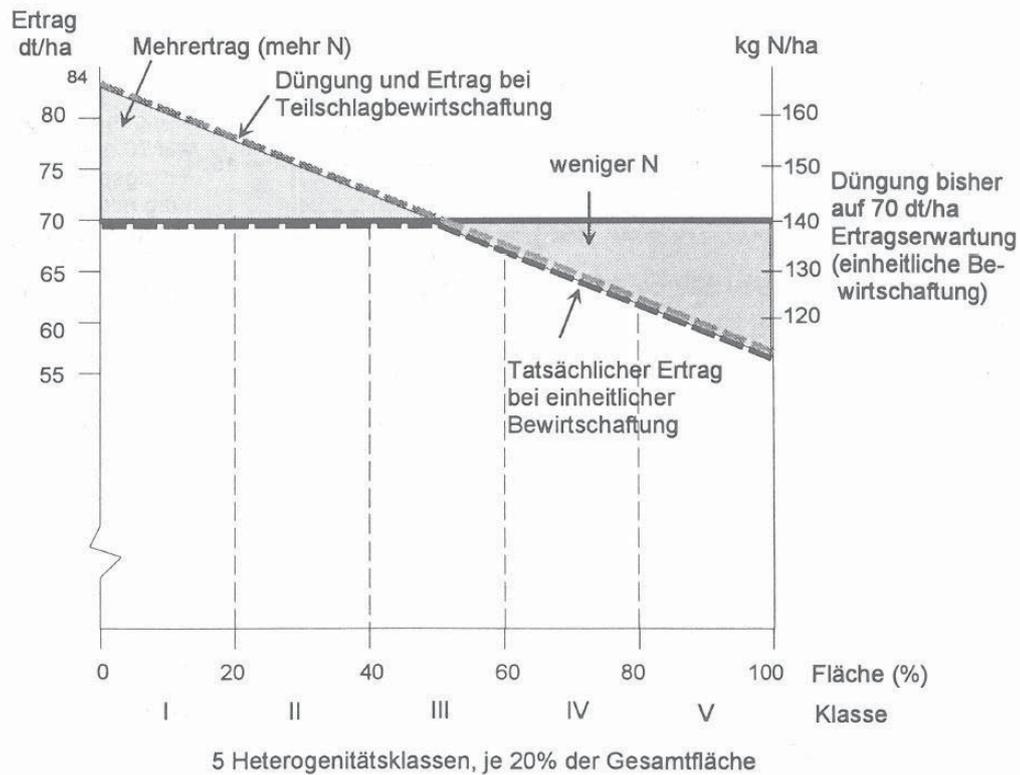


Abbildung 27: Mögliche Effekte teilschlagbezogener Bewirtschaftung auf einem heterogenen Standort (WAGNER, 1999, S. 50)

Anhand der Abbildung ist klar ersichtlich, dass die möglichen positiven Effekte der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung mit zunehmender Heterogenität des Standortes ansteigen.

Für den Begriff „Precision Farming“ existieren sowohl im englischsprachigen Raum mit „Precision Agriculture“ oder „Site-Specific Farming“ als auch im deutschen Sprachraum mit „teilflächenspezifischer Bewirtschaftung“, „kleinräumige Bestandesführung“, „Präzisionspflanzenbau“ oder „ortsspezifische Bewirtschaftung“ weitere Synonyme, die alle zum großen Teil deckungsgleich sind und deswegen in der vorliegenden Arbeit auch für den Begriff „Precision Farming“ ersatzweise verwendet werden.

Die Grundidee des Precision Farmings der Reaktion auf Heterogenitäten der Produktionsgrundlagen findet zunehmend Eingang in weiteren Bereichen der Land- und Forstwirtschaft (WERNER, 2004, S. 1-1/1-2):

- Precision Livestock Farming (Tierhaltung)
- Precision Horticulture (Obst- und Gartenbau)

- Precision Viticulture (Weinbau)
- Precision Forestry (Waldwirtschaft)

Das Spektrum des Precision Farmings umfasst mehrere Teilbereiche, die in Abbildung 28 aufgezeigt werden. Demnach besteht Precision Farming aus vier Managementbereichen:

Dem Betriebs-, dem Bestandes-, dem Maschinen- und dem Arbeitsmanagement. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich vor allem mit dem Kernbereich des Precision Farmings, dem Bestandesmanagement, nicht ohne auch vereinzelte Aspekte der anderen Teilbereiche aufzugreifen.

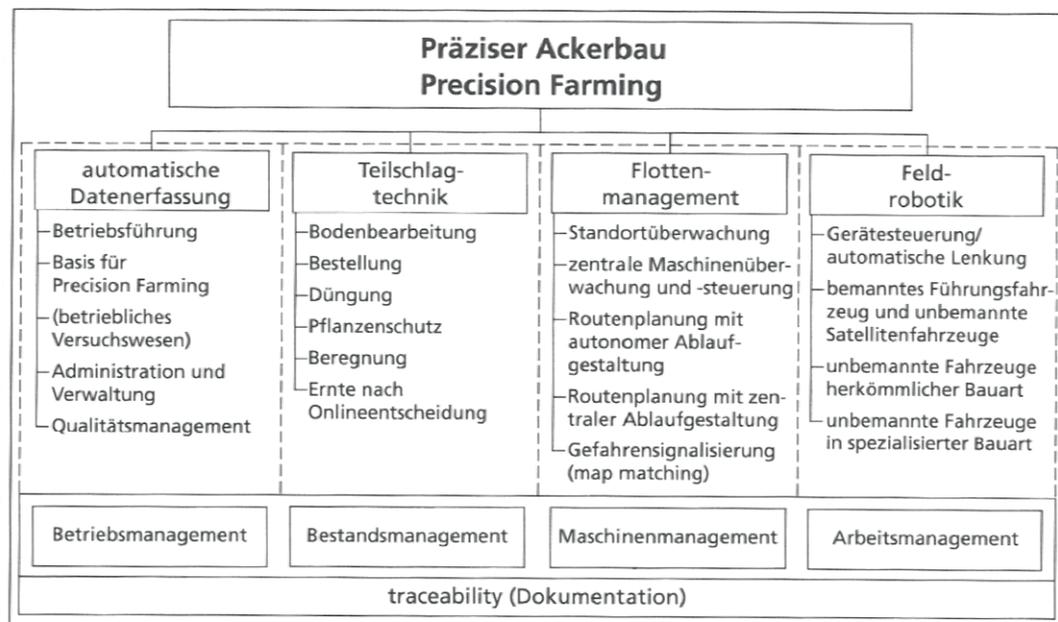


Abbildung 28: Teilbereiche des präzisen Ackerbaus (RÖSCH et al., 2005, S. 31)

4.1.2 Historische Entwicklung des Precision Farmings

Eine teilflächenspezifische Landwirtschaft, das heißt, eine Bewirtschaftung mit Berücksichtigung der standörtlichen Unterschiede, ist keine Erfindung der jüngeren, „modernen“ Landwirtschaft, sondern eine Wirtschaftsweise, die seit den frühen Tagen des sesshaften Ackerbaus betrieben wird. Die Bauern legten ihre Felder so an, dass eine möglichst homogene Fläche entstand, die für sie einfacher zu bewirtschaften war (OLIVER, 2010, S. 3). Erst die Einführung landtechnischer Hilfsmittel und mit ihr die Möglichkeit der Schlagvergrößerung ließ den Aspekt der Schlaghomogenität ins Hintertreffen geraten. Ein Beispiel dafür ist das

Phänomen der Wölbäcker im Mittelalter, die dadurch entstanden, dass beim Pflügen von außen zur Mitte hin gewirtschaftet wurde. Dadurch entstanden zwischen den einzelnen Beeten grabenartige Vertiefungen, die zu einer erheblichen Heterogenität der Bodenqualität und der Wasserverhältnisse innerhalb eines Schlages führten (GEISLER, 1988, S. 19).

Der entscheidende Schub zur Entstehung der heutigen Form einer satellitengestützten, informationselektronisch gesteuerten teilschlagspezifischen Landbewirtschaftung kam durch die großen technischen Fortschritte im Bereich der Mikroprozessortechnologie, die es ermöglichte, Landmaschinen mit Informationselektronik auszustatten (OLIVER, 2010, S. 4). Die Meilensteine in der Geschichte der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung sind in Tabelle 14 aufgeführt.

Jahr	Ereignis
1911	Erste teilflächenspezifische Versuche (Mercer/Hall)
1922	Erste Ertragskarte (Eden/Maskell)
1929	Erste teilflächenspezifische Ausbringung von Kalk (Linsley/Bauer)
1934	Gesetz zur allgemeinen Bodenschätzung (Reichsbodenschätzung)
1977	Erste Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten
1982	Erste Ertragsmessungen auf MF Mähdrescher (noch ohne GPS-Ortung)
1985	Erstmaliger Einsatz eines teilflächenspezifischen Düngerstreuers (CENEX)
1988	Erste Präsentation einer teilflächenspezifischen Düngung in Deutschland auf den DLG-Felddagen auf Gut Schwarzenraben
1989	Erste Anwendung der Ertragskartierung in Deutschland
1991	GPS auf Traktoren verfügbar
1995	DGPS verfügbar
1998	Zu diesem Zeitpunkt sind 70 Ertragsmesssysteme in Deutschland im Einsatz
2000	Abschaltung der „Selective Availability“ durch US-Militär

Tabelle 14: Meilensteine der Entwicklung des Precision Farmings (Eigene Darstellung nach SRINIVASAN (2006), OLIVER (2010) und HOLTMANN (1998))

Die jüngere Entwicklung in diesem Bereich ist durch stetige Weiterentwicklungen und Verbesserungen der bestehenden Technologien geprägt. Dies drückt sich in einer fortschreitenden Durchdringung der praktischen Landwirtschaft aus, auf die im Kapitel 4.6 detailliert eingegangen wird.

AUERNHAMMER gibt eine weitere, etwas kompaktere Übersicht über die Entwicklung der Informationstechnologie, die sich in ihrer zeitlichen Unterteilung an den Dekaden orientiert (AUERNHAMMER, 2000, S. 6):

- 70er Jahre: spezifische Anwendungen in der Spritztechnik, den Mähdreschern und der Traktordreipunkthydraulik
- 80er Jahre: universelle mobile Agrarcomputer
- 90er Jahre: teilflächenspezifische Messwerterfassung und Applikation
- ab 2000: Entwicklung in sich geschlossener und betriebsübergreifender Informationssysteme und deren komplexe Vernetzung

4.1.3 Precision Farming aus systemtheoretischer Sichtweise

WERNER verweist darauf, dass die Technologie der Teilflächenwirtschaft auf den Grundsätzen des Konzeptes des „Integrierten Landbaus“ basiert. Nach diesem von HEYLAND im Jahr 1990 beschriebenen Konzept orientieren sich die pflanzenbaulichen Maßnahmen an dem mengenmäßigen und zeitlichen Bedarf der Bestände und werden demnach standortspezifisch durchgeführt (WERNER, 2004, S. 1-4).

HEYLAND identifiziert den Prozess der Pflanzenproduktion als ein System, indem er darauf verweist, dass es sich dabei um eine „Vielzahl von ineinandergreifender Faktoren und Prozessen“ handle, „deren Summe der Einzelwirkungen nicht gleich der Wirkung des Ganzen“ sei (HEYLAND, 1991, S. 14).

Nach BERG und KUHLMANN versteht man unter einem System „eine Anzahl von Objekten bzw. Elementen, zwischen denen bestimmte Beziehungen bestehen oder zumindest hergestellt werden können. Systeme bestehen aus Beständen und Strömen an Materie, Energie und Informationen“ (BERG / KUHLMANN, 1993, S. 2). Als Merkmale eines dynamischen Systems – zu denen das System der pflanzlichen Produktion gehört – definieren sie den Prozess der Transformation kontrollierbarer und nicht-kontrollierbarer Inputs unter dem Einfluss von Systemparametern zu Zustandsgrößen und Systemoutputs (BERG / KUHLMANN, 1993, S. 4-5). HEYLAND beschreibt das Gesamtsystem „Integrierte Pflanzenproduktion“ als ein Gebilde, in dessen Mittelpunkt das Untersystem „Kulturpflanze“ steht, das von zahlreichen Untersystemen beeinflusst wird, die sich in die Ebenen „Rahmenbedingungen“, „Einflusssysteme“ und „Produktionssysteme“ untergliedern (HEYLAND, 1991, S. 14-15).

Bei OSTHEIM wird eine Systemanalyse der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung gegeben, die auf einem allgemeinen Modell rechnergestützter landwirtschaftlicher Produktionssysteme aufbaut (OSTHEIM, 2000, S. 41 ff.). Er verweist darauf, dass sich der Systemaufbau einer GPS-gestützten teilflächenspezifischen Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen auf zwei Arten charakterisieren lässt. Zum einen kann man sich an der von Stafford vorgenommenen Einteilung des Systems im Rahmen einer chronologischen Vorgehensweise orientieren (STAFFORD, 1996, S. 100). Zum anderen lässt sich eine Unterteilung der Teilflächenbewirtschaftung in die drei Subsysteme produktionstechnischer, wissensbasierter und organisatorisch-technischer Bereich vornehmen (OSTHEIM, 2000, S. 42-43). Eine Übersicht über den technischen und den wissensbasierten Bereich mit den dazugehörigen Systemelementen ist in Abbildung 29 dargestellt.

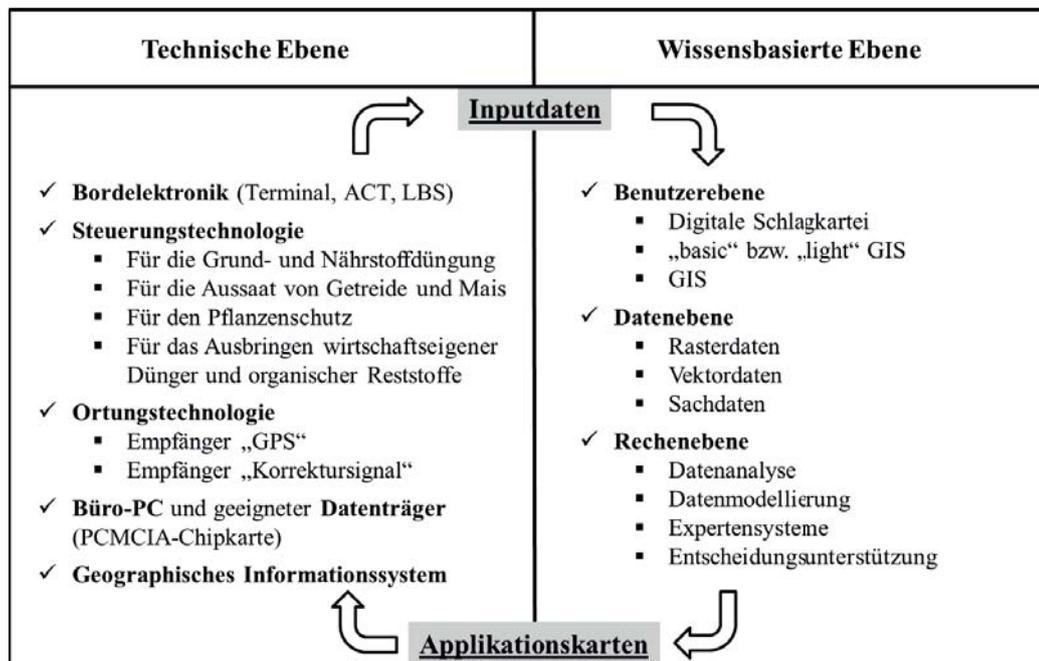


Abbildung 29: Darstellung der technischen und wissensbasierten Bereiche einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung (OSTHEIM, 2000, S. 44)

4.2 Technische Komponenten des Precision Farmings

Die einzelnen technischen Komponenten des Precision Farmings (Satellitennavigation, Ertragskartierung, Geographische Informationssysteme und ISOBUS) sind in Abbildung 30 aufgeführt und werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

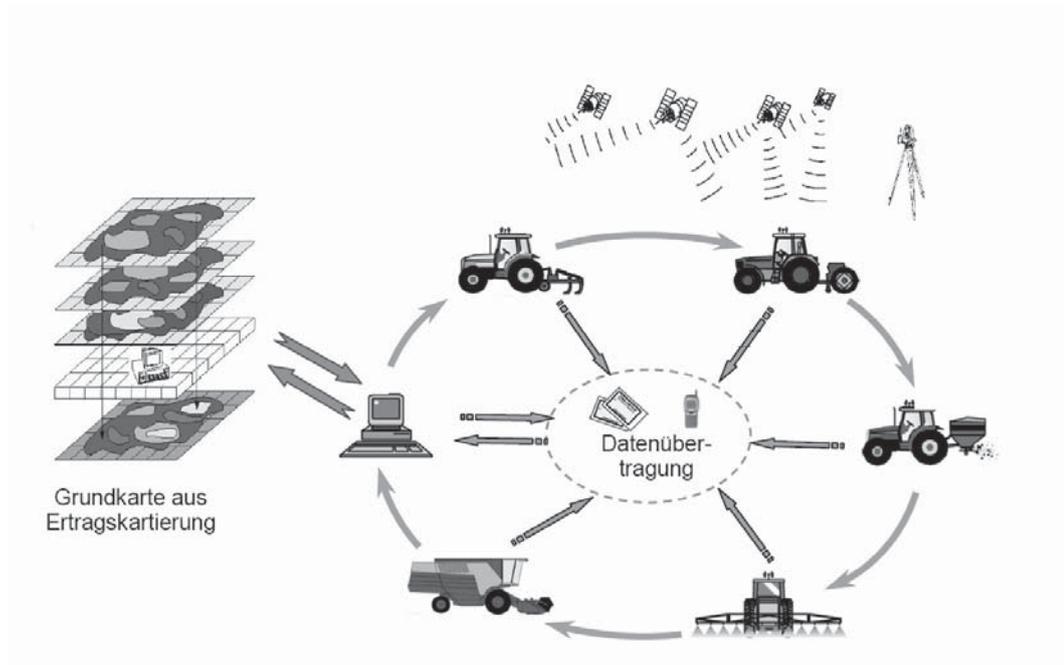


Abbildung 30: Precision Farming-Zyklus (STEMPFHUBER, 2012)

4.2.1 Satellitennavigation

Innerhalb des Precision Farmings nimmt die Positionsbestimmung mit Hilfe eines globalen Satellitennavigationssystems (GNSS) einen zentralen Platz ein (KLOEPFER, 2004, S. 3.1-1).

4.2.1.1 Aufbau und Bestandteile eines GNSS

Die vorrangige Aufgabe eines GNSS besteht darin, seinen Nutzern genaue Informationen über ihre dreidimensionale Position, ihre Geschwindigkeit und die Zeit überall auf der Erde oder in der Nähe der Erde zur Verfügung zu stellen. Diese Informationen sollen ständig und unabhängig von den Wetterbedingungen und der Tatsache, ob der Nutzer in Ruhe oder in Bewegung ist, gewährleistet sein (BAUER, 2011, S. 165).

Ein GNSS beinhaltet drei Systemkomponenten:

- Weltraumsegment
- Bodensegment
- Nutzersegment

Das Weltraumsegment besteht aus den Satelliten, von denen zur exakten Positionsbestimmung in Echtzeit mindestens vier gleichzeitig verfügbar sein

müssen (BAUER, 2011, S. 165). Das Global Positioning System (GPS) besteht aus einer Flotte von 24 Satelliten, die auf sechs Bahnen die Erde umkreisen.

Die Energieversorgung der Satelliten wird durch Sonnenpaddel sichergestellt, die sich automatisch in Richtung Sonne drehen. Das wichtigste technische Element an Bord eines Satelliten ist die Atomuhr, die für die exakte Zeitbestimmung sorgt, die wiederum bei der Positionsberechnung des Empfängers eine bedeutsame Rolle spielt. Aus diesem Grund sind immer mehrere Atomuhren an Bord der Satelliten (BAUER, 2011, S. 166). Die Aufgabe des Bodensegmentes besteht darin, die Satelliten zu überwachen und die für die Echtzeitnavigation benötigten Navigationsdaten zu erzeugen. Das Nutzersegment wird von den zivilen und militärischen GNSS-Nutzern gebildet (BAUER, 2011, S. 170).

4.2.1.2 Funktionsweise eines Satellitennavigationssystems

Die Ortung eines GNSS-Nutzers erfolgt durch den Empfang eines Satellitensignals, das genaue Informationen über die Position des Satelliten und die Uhrzeit bei der Abgabe des Signals enthält, der sogenannten Navigationsnachricht. Aus der Messung der Laufzeiten der Signale verschiedener Satelliten zum GNSS-Empfänger wird die Position des Empfängergerätes abgeleitet, wobei sich die Entfernung zwischen Satellit und Empfänger über die Gleichung: *Geschwindigkeit des Satellitensignals* \times *benötigte Zeit* = *Entfernung* berechnet (LUDOWICY et al., 2002, S. 14). Mit zunehmender Anzahl an empfangbaren Satelliten verbessert sich die Genauigkeit der Ortung auf der Erdoberfläche.

Die Satellitensignale im Bereich des GPS werden als geographische Koordinaten auf der Grundlage des Ellipsoids WGS 84 dargestellt. Das World Geodetic System 84 (WGS 84) ist ein dreidimensionales Koordinatensystem mit dem Erdschwerpunkt als Zentrum. Innerhalb des WGS 84 kann jeder Punkt des Ellipsoids durch die drei Koordinaten X, Y, Z beschrieben werden. Die Angaben beziehen sich hierbei auf die Breite (Latitude), die Länge (Longitude) und die Höhe (Altitude) (LUDOWICY et al., 2002, S. 23-25).

Neben den erdumspannenden Koordinatensystemen, wie dem WGS 84, existiert eine Vielzahl nationaler Koordinatensysteme. In Deutschland ist hierfür das Gauß-Krüger-Koordinatensystem, bezogen auf das Bessel-Ellipsoid, gebräuchlich. Das Gauß-Krüger-Koordinatensystem besitzt rechtwinklige Koordinaten. Die

Werte der x-Achse werden als Hochwerte bezeichnet und geben die Entfernung vom Äquator in Metern an, während die Werte der y-Achse als Rechtswerte deklariert werden und die Entfernung zum Hauptmeridian angeben (LUDOWICY et al., 2002, S. 27-28).

4.2.1.3 Global Positioning System (GPS)

Das GPS wurde ursprünglich für militärische Zwecke der US-Streitkräfte entwickelt. Der 17. April 1973 gilt als Geburtsstunde des GPS, das damals als **Navigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System** (NAVSTAR-GPS) bezeichnet wurde. Am 27. Juni 1977 wurde der erste zum NAVSTAR-GPS-Programm gehörende Satellit ins All geschossen. In den darauffolgenden Jahren wurden Weltraum- und Bodensegment kontinuierlich ausgebaut, bis 1995 der endgültige Umfang erreicht wurde (BAUER, 2011, S. 227).

Das GPS verfügt in seiner Endausbaustufe über eine Gesamtzahl von 24 Satelliten, die auf sechs Bahnen in einer Erdumlaufbahn auf einer mittleren Bahnhöhe von 20.200 km die Erde umkreisen. Die Satelliten werden aus Gründen des technischen Fortschritts fortlaufend ausgetauscht. Unter dem Eindruck der Verschiebung der Nutzermehrheit in Richtung ziviler Verwendung und daraus entstehender veränderter Nutzeransprüche beschloss die US-Regierung 1998, GPS zu modernisieren, was sich seither in neuen Satellitenbaureihen, der Errichtung zusätzlicher Bodenstationen und einer Aktualisierung der Software zur Erzeugung der Navigationsnachrichten ausdrückte.

Ab dem 1. Januar 1994 nahm das US-Militär eine Einschränkung des Systems vor, um im militärischen Ernstfall einen Nutzungsvorsprung gegenüber dem militärischen Gegner zu besitzen. Die Einschränkung wurde durch die beiden Maßnahmen „Anti-Spoofing (AS)“ und „Selective-Availability (SA)“ erzeugt. Mit Anti-Spoofing wird verhindert, dass ein anderer Nutzer Zugang zu dem eigenen Satellitensystem hat, was sich auf die Genauigkeit der Satellitensignale nicht auswirkt. Im Gegensatz dazu führt die Selective-Availability zu einer künstlichen Verfälschung des Satellitensignals. Im Falle der GPS-Ortung verschlechterte sich die Navigationsgenauigkeit von 10 m (ohne SA) auf über 100 m (mit SA). Am 2. Mai 2000 verfügte die US-Regierung, dass die SA abgeschaltet wird (BAUER, 2011, S. 242).



4.2.1.4 GPS-Korrekturdienste

Die mit einem unverfälschten GPS-Signal realisierbare Genauigkeit in der Größenordnung von +/- 10 m ist für viele Anwendungen im Precision Farming nicht ausreichend. Zur Erhöhung der Ortungsgenauigkeit können Korrekturdienste herangezogen werden. Durch eine solche relative GNSS-Positionierung können Störfaktoren wie z. B. Satellitenuhrfehler eliminiert oder zumindest deutlich verringert werden (BAUER, 2011, S. 206). Die drei gebräuchlichsten Verfahren der relativen GNSS-Positionierung im GPS-Bereich sind:

- Differenzielles GPS (DGPS)
- Real-Time-Kinematic-GPS (RTK-GPS)
- Relative GPS-Positionierung im Postprocessing

Beim DGPS werden mit Hilfe einer auf der Erdoberfläche fest installierten Referenzstation Korrektursignale genutzt, um eine Eliminierung der Satellitenuhrfehler und eine Verringerung von ionosphärischen Laufzeitfehlern zu erreichen. Dadurch ist eine Verbesserung der Ortungsgenauigkeit auf bis zu 1 m möglich (BAUER, 2011, S. 208). Die DGPS-Methode, die vor allem als Reaktion auf die SA des GPS-Signals entstand, ist das mit großem Abstand am weitesten verbreitete GPS-Korrekturverfahren. In Abbildung 31 ist das Grundprinzip der DGPS-Messung dargestellt.

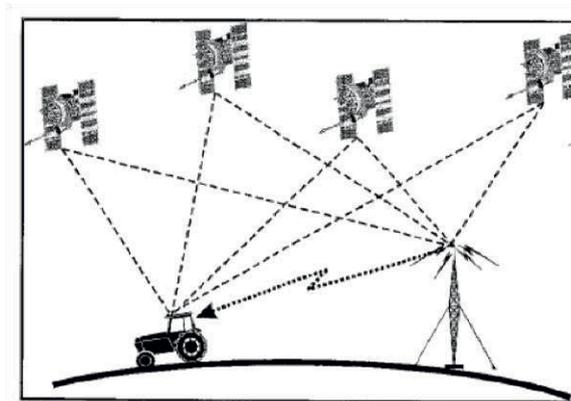


Abbildung 31: Prinzipieller Aufbau des differenziellen GPS (OSTHEIM, 2000, S. 24)

Die gebräuchlichsten Korrektursignale in der Landwirtschaft in Deutschland sind das kostenfreie EGNOS-Signal der ESA, das Küstenfunksignal sowie die Omnistar- und Starfire-Signale. Im Rahmen der Pflanzenbestandesführung sind die mit dem Korrektursignal L1 erzielbaren Genauigkeiten ausreichend für



Grundbodenbearbeitung oder Ertragskartierung. Für die Präzisionsansprüche der Aussaat von Kulturen im Reihenanbau und vor allem für die Lenkung von Maschinen zu Pflanz- und Pflégetätigkeiten im Bereich der Sonderkulturen sollte auf Dienste zurückgegriffen werden, die zusätzlich über das Korrektursignal L2 verfügen (z. B. RTK-GPS). In Tabelle 15 ist eine Übersicht über die gängigen Korrekturdatendienste gegeben.

Korrekturdatendienst	Korrektursignal L1	Korrektursignal L2	Genauigkeit Spur zu Spur
EGNOS	+	–	10 – 30 cm
Beacon (Küstenfunk)	+	–	15 – 30 cm
Starfire 1 (John Deere)	+	–	15 – 30 cm
Omnistar VB5	+	–	15 – 30 cm
Omnistar HP/XP	+	+	5 – 10 cm
Starfire 2 (John Deere)	+	+	5 – 10 cm
RTK-GPS	+	+	2 – 5 cm

Tabelle 15: Übersicht gängiger Korrekturdatendienste (GEO-KONZEPT, 2013)

Bei der RTK-GPS-Methode kann durch die Echtzeitpositionierung eine Genauigkeit von bis zu 2 cm erreicht werden. Zumeist werden als Referenzstationen nutzereigene Geräte verwendet, die in der Nähe des zu bearbeitenden Feldes aufgestellt werden. Es gibt aber auch kommerzielle Anbieter, die über Referenzstationen an strategisch günstigen Orten die gewünschten Korrektursignale zur Verfügung stellen (BAUER, 2011, S. 209). RTK-GPS hat einen deutlich geringeren Verbreitungsgrad in der praktischen Landwirtschaft als DGPS, da die Anschaffungskosten der RTK-Referenzstationen deutlich höher liegen als die Kosten für den Kauf eines DGPS-Empfängers. Eine Möglichkeit der Kostenreduktion bei der Anwendung der RTK-GPS-Technologie liegt in der Nutzung eines RTK-Netzwerkes. Diese RTK-Netzwerke bestehen aus mehreren Referenzstationen, deren Daten über das Internet an einen zentralen Rechner übertragen werden.

Das relative GPS-Positionierungsverfahren durch eine Korrektur in Post-processing wird nur dort angewendet, wo Genauigkeiten im Millimeterbereich erforderlich sind, was in der praktischen Landwirtschaft eher selten vorkommt und



dann zumeist mit laser- oder kameragestützten Erkennungssystemen realisiert wird.

4.2.1.5 Galileo

Die Europäische Union (EU) sah die Notwendigkeit, in einer für die Sicherheit der Bevölkerung und für die wirtschaftliche Entwicklung bedeutsamen Technologie wie der Satellitennavigation auch von Bündnispartnern wie den USA unabhängig zu sein. Sie beschloss daher 1999, ein eigenes GNSS mit dem Namen Galileo aufzubauen (BAUER, 2011, S. 289). Im Gegensatz zum GPS ist Galileo rein für zivile Nutzungszwecke konzipiert worden.

Die Entwicklungsphase des europäischen Satellitensystems wurde durch zahlreiche zeitliche Rückschläge und Unstimmigkeiten in Finanzierungsfragen geprägt. Ursprünglich war geplant, Galileo über ein Private-Public-Partnership (PPP) zu finanzieren, was aber nicht realisiert werden konnte. Ein wesentlicher Teil der benötigten finanziellen Mittel stammte schließlich aus eingesparten Ausgaben des EU-Agrarhaushaltes.

Galileo soll aus insgesamt 30 Satelliten bestehen, die in einer Höhe von 23.200 km die Erde umkreisen. Die Aufnahme einer vorläufigen Betriebsphase ist für 2014/15 geplant (BAUER, 2011, S. 290-291). Die deutsche Beteiligung am europäischen Satellitensystem gestaltet sich umfangreich. So werden die ersten 14 Satelliten von der deutschen Firma OHB Technology AG geliefert. Von Darmstadt aus, dem Sitz des Europäischen Raumflugkontrollzentrums ESOC, werden die ESA-Satelliten überwacht. Zudem befindet sich eines der beiden Galileo-Kontrollzentren im oberbayerischen Oberpfaffenhofen bei München.

4.2.2 Ertragskartierung

Die Ertragskartierung ist die in der landwirtschaftlichen Praxis bisher am weitesten verbreitete GPS-Anwendung. Das System der Ertragskartierung besteht aus zwei räumlich voneinander getrennten Blöcken: zum einen aus der Ertragserfassung auf dem Mähdrescher während der Ernte, und zum anderen aus der nachträglichen Ertragsdatenverarbeitung am PC.

Bei der eigentlichen Erfassung der Ertragsdaten werden Erntedaten wie die Position des Mähdreschers, die Erntemenge und die Kornfeuchte von GPS-Empfäng-

ern und Sensoren in zeitlich regelmäßigen Abständen ermittelt und an ein Terminal weitergeleitet und dort aufgezeichnet. Mit Hilfe einer Ertragskartierungssoftware werden schließlich am PC aus den Ertragspunktdaten flächenhafte Ertragskarten generiert. In Abbildung 32 sind die Komponenten für die lokale Ertragsermittlung und der Weg der Datenübermittlung im Mähdrescher dargestellt.

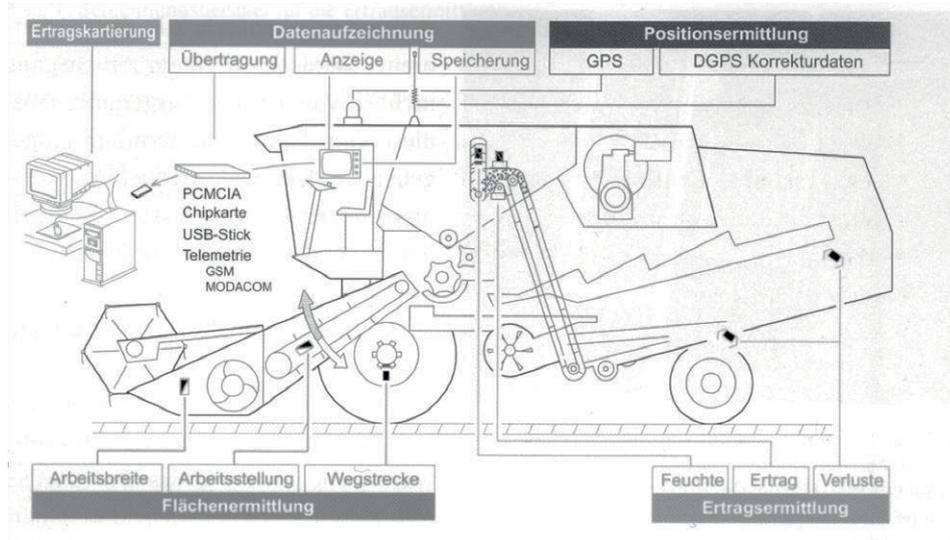


Abbildung 32: Komponenten der Ertragskartierung (DEMMELE et al., 1992 In: Noack, 2007, S. 7)

In Anlehnung an die obige Abbildung lässt sich der Prozess der Ertragskartierung in fünf Einzelschritte unterteilen (NOACK, 2007, S. 7 ff.).

1) Ertragsermittlung

Die eigentliche Erfassung des Ertrages erfolgt durch Korndurchsatzsensoren, die den Getreidestrom im oder am Kopf des Körnerelators messen. Hierbei haben sich folgende drei Ertragsmesssysteme in der landwirtschaftlichen Praxis etabliert:

- a) Volumetrische Messung mit Lichtschranke
- b) Kraft- oder Impulsmessung mit Prallplatte
- c) Messung mit Strahlungsquelle und –detektor

Um die Erträge auf der Grundlage einer gemeinsamen Basisfeuchte (z. B. 15 % bei Getreide oder 9 % bei Raps) oder der Kalibrierung auf eine Standardtrockenmasse miteinander vergleichbar zu machen, wird der Feuchtegehalt des Getreidestroms kontinuierlich mit einem Kornfeuchtesensor gemessen. Die physikalische Erfassung der Kornfeuchte erfolgt hierbei über die Messung der elektrischen Leitfähigkeit.



2) Flächenermittlung

Zur Berechnung des Flächenertrages wird die Größe der abgeernteten Fläche benötigt. Die technische Durchführung der Flächenermittlung kann auf drei verschiedenen Wegen erfolgen:

- a) Impulsgeber an den Rädern des Mähdreschers
- b) Radarsensor
- c) GPS-Empfänger

Die Berechnung der abgeernteten Fläche erfolgt über die Multiplikation der Geschwindigkeit der Erntemaschine mit dem Messintervall des Geschwindigkeitssensors und der Schnittbreite des Mähdreschers. Da es bei einer nur teilweisen Ausnutzung der Schnittbreite zu Fehlberechnungen kommen würde, verfügen manche Erntesysteme über einen Schnittbreitensensor. Dieser erfasst automatisch den Ausnutzungsgrad des Schneidwerkes, damit dieser bei der Flächenberechnung berücksichtigt werden kann. Die beiden Mähdrescher, die bei der Ertragskartenerstellung im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wurden, verfügten über manuell einstellbare Teilbreitenschaltungen der Schneidwerksbreite.

3) Positionsermittlung

Die Position des Mähdreschers wird kontinuierlich über ein Satellitennavigationssystem geortet. Eine sehr hohe Genauigkeit erzielen hierbei Erntemaschinen mit GPS-gestützter Lenkautomatik, die auf Exaktheiten von bis zu 2 cm erreichen.

4) Datenaufzeichnung

Die Datenaufzeichnung und Zusammenführung aller zuvor erfassten Ernteergebnisse geschieht in einem mähdrescherinternen Ertragsmonitor. Er dient dazu, die Fläche zu berechnen, die seit der letzten Durchsatzmessung beerntet wurde, wobei bei der Berechnung des lokalen Flächenertrages der aktuelle Durchsatzmesswert auf die gesamte beerntete Fläche bezogen wird.

5) Ertragskartierung

Der zeitliche Ablauf der Verarbeitung der Ertragsdaten beginnt mit dem Übertragen der Erntedaten auf einen Wechseldatenspeicher, der danach auf dem Hof-PC ausgelesen wird. Die Ertragsdaten werden in eine spezielle Ertragskartie-

rungssoftware überführt, wo dann nach mehreren Verarbeitungsschritten aus den Ertragspunktdaten eine flächenhafte Ertragskarte erstellt wird.

Zur detaillierten Beschreibung der Ertragsdatenverarbeitung und –analyse sei auf das Kapitel 8.3 verwiesen.

4.2.3 Geographische Informationssysteme (GIS)

GIS nehmen innerhalb der PF-Zyklen eine zentrale Position ein. Die mit Hilfe der Satellitennavigation und der Ertragskartierung erhobenen Daten werden im GIS zusammengeführt, einer Bearbeitung unterzogen und dann als konkrete Handlungsanweisungen im Rahmen der teilflächenspezifischen Bestandesführung anhand der ISOBUS-Technologie an die Bearbeitungsgeräte ausgegeben. GIS gelten daher als bedeutendstes Werkzeug zur Verarbeitung georeferenzierter Daten im Bereich des PF (LUDOWICY et al., 2002, S. 81) und gewinnen innerhalb der Landwirtschaft als Bestandteil der informationsgeleiteten Pflanzenproduktion zunehmend an Bedeutung.

Eine detaillierte Übersicht über Aufbau, Aufgaben und Verwendungszwecke von GIS innerhalb der Landwirtschaft findet sich in Kapitel 5 dieser Arbeit.

4.2.4 LBS / ISOBUS

Als letztes Glied in der Kette des Informationsflusses im PF Zyklus über die satellitengestützte Datenerhebung, der Bearbeitung und Aufbereitung der Daten in einem GIS bis zur ortsspezifischen Umsetzung auf dem Feld, fehlt noch die Übermittlung der Informationen aus dem GIS an die Arbeitsmaschine. Dies wird durch den ISOBUS-Standard (vorher LBS) geregelt.

Funktionierende Datenkommunikation zwischen einzelnen Bausteinen der PF-Technologie, wie z. B. Betriebs-PC, GPS-Empfänger und Bordcomputer, ist elementare Grundvoraussetzung für eine ortsspezifische Flächenbewirtschaftung. Hierbei entwickelten die Landmaschinenhersteller betriebseigene Standards der Datenübermittlung, so dass es bei der Kombination von Arbeitsgeräten verschiedener Fabrikate zu Datenkommunikationsschwierigkeiten kam (LUDOWICY et al., 2002, S. 101). So gilt die mangelnde Kompatibilität zwischen einzelnen PF-Bausteinen als eines der größten Hemmnisse einer schnelleren Verbreitung der

teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung in der landwirtschaftlichen Praxis (REICHARDT / JÜRGENS, 2008, S. 589 u. 594).

Aus diesem Grund wurde bereits in den 80er Jahren mit der Entwicklung herstellerübergreifender Kommunikationswege zwischen elektronischen Komponenten begonnen, die schließlich 1997 in den Vereinbarungen des LBS (Landwirtschaftliches BUS-System) mündeten. Festgehalten wurden diese Vereinbarungen in der DIN 9684 (LUDOWICY et al., 2002, S. 101).

Das LBS stellt ein Netzwerk für die elektronische Kommunikation zwischen Traktor, Gerät, Fahrer und Betriebsführung dar (AUERNHAMMER, 2000, S. 6). Dieses Zusammenspiel der elektronischen Komponenten zwischen Traktor und Geräten und der Festlegung einer Schnittstelle zum Betriebsrechner beruht auf der Basis eines seriellen Datenaustausches über einfache Zweidraht-Leitungen (KLOEPFER, 2004, S. 3.1-7). Eine schematische Darstellung der Komponenten eines BUS-Systems gibt Abbildung 33.

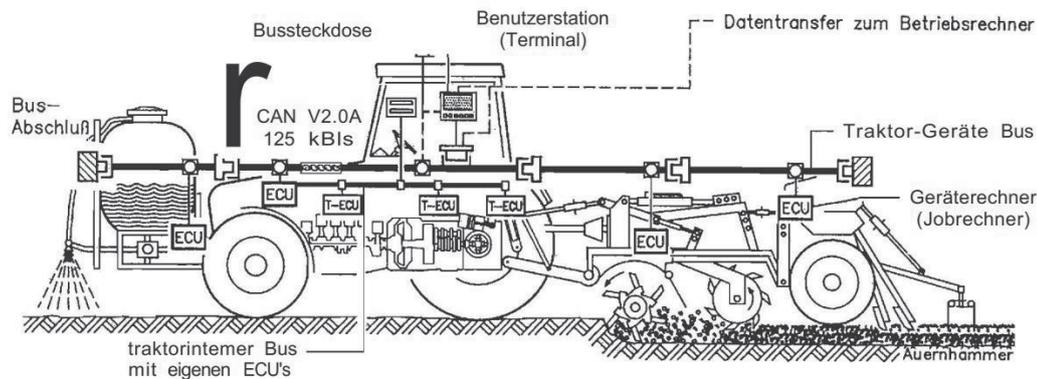


Abbildung 33: Landwirtschaftliches BUS-System (LBS) (AUERNHAMMER, 2000, S. 7)

„Ein BUS-System (BUS: **B**inary **U**nit **S**ystem) ist definiert als ein Sammelleitungssystem, bei dem der Austausch von Daten (Nachrichten) sequentiell, also nacheinander, erfolgt“ (SCHMIDT, 1999, S. 4). Es besteht aus einer Benutzerstation (Terminal), die über Datenflussleitungen mit Bussteckdosen mit Anbaugeräten verbunden ist, die wiederum über geräteeigene Jobrechner verfügen.

Die arbeits- und betriebswirtschaftlichen Vorteile des LBS liegen in einem geringeren Verkabelungsaufwand, der sich in niedrigeren Montagekosten äußert, sowie einer Steigerung der Systemzuverlässigkeit und der Reduzierung des Aufwandes für die Konfiguration des Systems (LUDOWICY et al., 2002, S. 102). Auch die

Lokalisierung von Fehlerquellen vereinfacht sich, wodurch sich Inbetriebnahme- und Stillstandszeiten verkürzen (SCHMIDT, 1999, S. 3).

Um die Vereinbarungen der DIN 9684 auch auf internationaler Ebene zu kommunizieren, mündeten ihre Inhalte in die ISO 11783 „Tractors and Machinery for Agriculture and Forestry – Serial Control and Communication Data Network“. Die Zielsetzung des ISOBUS ist dabei die gleiche wie bei der LBS-Norm: die Kompatibilität beim elektronischen Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Komponenten des Traktors, der Anbaugeräte und auch des Betriebsmanagements. Auch die Norm des ISOBUS spezifiziert ein serielles Datennetzwerk für Steuerung und Kommunikation, wobei das Format der Daten und die Methoden der Datenübertragung zwischen Sensoren, Aktoren, Steuerelementen, Informationsspeicher sowie Anzeige- und Bedieneinheiten festgelegt werden (ROTHMUND / WODOK, 2010, S. 163). Die ISOBUS-Steckdose gehört heute zur Standardausrüstung von Traktoren.

4.3 Precision Farming-Anwendungen

Nach der Erhebung der standortspezifischen Boden- und Bestandesdaten und der Planung entsprechender ackerbaulicher Maßnahmen mit Hilfe der GPS- und GIS-Technologie fehlt zum Schließen des PF-Zyklus (siehe Abbildung 30) noch die Durchführung teilflächenspezifischer Maßnahmen. Es wird in diesem Kapitel nun auf die pflanzenbaulichen Tätigkeitsfelder Bezug genommen, die eine auf den Standort abgestimmte Variation der ackerbaulichen Intensität und der Betriebsmittelapplikationen beinhalten. Gemeinhin handelt es sich um die PF-Anwendungen, die in Abbildung 28 unter „Teilschlagtechnik“ zu finden sind.

4.3.1 PF-Bodenbearbeitung

Eine teilflächenspezifische Bodenbearbeitung zielt auf eine dem jeweiligen Standort angepasste Bearbeitungstiefe bzw. –intensität ab. Die ortsspezifische Bearbeitungstiefe bei der Grundbodenbearbeitung verfolgt dabei den Anspruch, dem Erosionsschutz zu dienen und den angebauten Kulturpflanzen ideale Durchwurzelungsbedingungen zu bieten. Mit der kleinräumigen Anpassung der Bearbeitungsintensität bei der Saatbettbereitung sollen optimale Aufgangsbedingungen für die Saatkörner geschaffen werden. Das vorrangige ökonomische Ziel stellt die Reduzierung des Energieverbrauchs in Form einer Deseleinsparung



durch eine teilflächenspezifische Verringerung der Arbeitstiefe dar (RÖSCH et al., 2005, S. 57).

Die Einstellung der Bearbeitungstiefe erfolgt nach Maßgabe mehrerer Standortfaktoren. Dazu zählen die Bodenart, die Bodenfeuchte, der Verdichtungszustand, die Menge der in den Boden einzuarbeitenden Ernterückstände, die Ansprüche der entsprechenden Kulturart sowie vorhandene Unebenheiten, wie Spurtiefen (RÖSCH et al., 2005, S. 58).

Räumlich variabel in der Fläche liegen von den genannten Einflussfaktoren auf die Bearbeitungstiefe vor allem die Bodenart und – damit zusammenhängend – die Bodenfeuchte vor. Von daher ist es zweckmäßig, zur Planung der ortsspezifischen Grundbodenbearbeitung einen Offline-Ansatz zu wählen, dessen Karte auf Grundlage der Ergebnisse der Reichsbodenschätzung, Karten der elektrischen Leitfähigkeit oder eines digitalen Geländemodelles erstellt wird.

Eine Berücksichtigung der schlaginternen Heterogenität der Zerfallsbereitschaft des Bodens durch eine ortsspezifische Anpassung der Zapfwelldrehzahl, z. B. der Kreiselegge, erweist sich als sehr schwierig, so dass die teilflächenspezifische Saatbettbereitung kaum Verbreitung in der landwirtschaftlichen Praxis findet (RÖSCH et al., 2005, S. 59).

Im Rahmen des preagro I-Projektes wurde ein Algorithmus für die ortsspezifische Bodenbearbeitung entwickelt, der als Entscheidungsparameter den Tongehalt, hydromorphe Merkmale, den Humuszustand und die Erosionsgefährdung des Standortes berücksichtigt (VOßHENRICH, 2004, Kap. 4, S. 130). Daraus abgeleitet wurden zwei den jeweiligen Teilflächen angepasste Bearbeitungstiefen festgelegt (tiefe und flache Grundbodenbearbeitung).

Auf Versuchsschlägen konnte dabei der Dieserverbrauch mehr als halbiert und die Arbeitsgeschwindigkeit um 20 %, bzw. 50 % gesteigert werden (VOßHENRICH, 2004, Kap. 4, S. 142). Es ist klar ersichtlich, dass die Kraftstoffersparnis unmittelbar vom Umfang der flach zu bearbeitenden Teilflächen abhängt.

4.3.2 PF-Aussaat

Der Landwirt verfügt bei der Aussaat über zwei pflanzenbauliche Stellgrößen, über die er bei einer teilflächenspezifischen Aussaat auf standörtliche Heterogeni-

täten innerhalb eines Schlages reagieren kann: die Ablagetiefe des Saatkorns zur Beeinflussung des Feldaufgangs und die Saatstärke zur Regulierung der Bestandesdichte (RÖSCH et al., 2005, S. 59). Die ideale Ablagetiefe, die neben einem kulturartspezifischen Optimum auch von den räumlich variabel vorliegenden Größen Bodenart und –feuchte abhängt, lässt sich während der Überfahrt nur sehr schwer exakt ermitteln, so dass die praktische Bedeutung der räumlich variablen Ablagetiefe sehr gering ist (RÖSCH et al., 2005, S. 60).

Forschungsaktivitäten und praktische Anwendung im Bereich der teilflächenspezifischen Aussaat konzentrieren sich von daher auf die Variation der Saatstärke. Die optimale Saatstärke zur Etablierung einer gewünschten Bestandesdichte hängt von den Faktoren Sorteneigenschaften, Boden, Witterung, Vorfrucht, Saattermin und Saatbettqualität ab (ROTH, 2004, S. 4.2-13). Von den genannten Einflussfaktoren liegen nur die Bodeneigenschaften räumlich variabel vor, so dass die Bestimmung einer räumlich differenzierten Aussaatkarte auf die Eingangsgrößen Bodeneigenschaften und – mit ihr korrespondierend – Wasserhaltevermögen und Relief abzielt. Aus diesem Grund gelten die Karten der RBS, topographische Karten und als pragmatische Lösung mehrjährige Ertragskarten als mögliche Informationsquellen zur Erstellung einer Aussaatsollwertkarte (JÄGER / MERKEL, 2003, S. 83-86).

Der mehrstufige Algorithmus zur Generierung einer Sollwertkarte zur ortsspezifischen Aussaat von Winterweizen (REINING et al., 2004, Kap. 4, S. 103-104) setzt eine Ertragspotenzialschätzung auf Basis der RBS und des Jahresniederschlages an den Anfang des Prozesses. Dieses Ertragspotenzial wird unter Berücksichtigung des Sortenziels und des Saattermins bereits räumlich differenziert an das reale Ertragsziel angepasst. Diese Saatmasse wird nochmals um sortenspezifische Parameter wie TKG, Keimfähigkeit und Beährungsindex korrigiert und dann in Aussaatkarten dargestellt.

Die technische Umsetzung der ortsspezifischen Aussaat geschieht durch eine Verknüpfung der Aussaatsollmengen mit den Standortkoordinaten in einem GIS und der anschließenden Übertragung auf eine Chipkarte, die dann der Bordcomputer der Drillmaschine einliest (JÄGER / MERKEL, 2003, S. 86).



Die beiden letztgenannten Autoren ermittelten bei ihren Aussaatversuchen in Winterweizen Saatguteinsparungen von 23 kg pro Hektar bei einem Mehrertrag von 4 dt pro Hektar, bzw. in Wintergerste von 20 kg pro Hektar bei einem Mehrertrag von 4 dt pro Hektar. Diese Zahlen sind im Vergleich zu einer betriebsüblichen flächenhomogenen Aussaat mit Aussaatmengen von 170 kg pro Hektar bei Winterweizen und 140 kg bei Wintergerste zu sehen (JÄGER / MERKEL, 2003, S. 80).

4.3.3 PF-Grunddüngung

Als Grunddüngung bezeichnet man die Kalkdüngung zur Erreichung eines optimalen pH-Wertes sowie die Düngung mit den Makronährstoffen Phosphor, Kalium und Magnesium. In der landwirtschaftlichen Praxis wird sie oft in Form einer Vorratsdüngung für eine komplette Fruchtfolge angewendet. Im Bereich des Präzisionsackerbaus sollte auf die Vorratsdüngerausbringung verzichtet werden, da sie einige Vorteile der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung zunichte machen würde, wie die jährliche räumlich-zeitliche Anpassung der Düngermenge an die Nährstoffbedürfnisse des Standortes (GEBBERS, 2004b, S. 4.2-5).

Die teilflächenspezifische Grunddüngung berücksichtigt bei der Kalkulation und der Ausbringung der Düngermengen die Unterschiede von Teilflächen eines Schlates hinsichtlich der Bodenart, der Nährstoffgehaltsklasse und des Ertragspotenzials (ALBERT et al., 2003, S. 69). Eine schlageinheitliche Düngung führt auf einem ertragsheterogenen Schlag tendenziell zu Nährstoffunterversorgung auf ertragsstarken Teilflächen und Nährstoffübersversorgung auf ertragsschwachen Teilflächen (ALBERT et al., 2003, S. 65). Aus dieser Tatsache leitet sich ab, dass der Effekt der teilflächenspezifischen (Grund-)Düngung auf der räumlich differenzierten Ertragsfähigkeit beruht. Die an die ortsspezifische Grunddüngung gestellten Erwartungen und Zielsetzungen formulieren sich dementsprechend in einer Einsparung an Betriebsmitteln, hier also Ca-, P-, K-, Mg-Dünger, einer verringerten Gefahr der Nährstoffauswaschung und einer möglichen Ertragssteigerung (RÖSCH et al., 2005, S. 62).

Die grundlegende Formel zur Berechnung der Düngermenge bei der Grunddüngung besitzt folgendes Aussehen:

$$N_{bed.} = E * N_{geh.}$$

Darin sind:

$N_{bed.}$ Nährstoffbedarf der Pflanzen in kg pro Hektar

E Ertrag in dt pro Hektar

$N_{geh.}$ Nährstoffgehalt in Haupt- und Nebenprodukten in kg pro dt

Im Präzisionspflanzenbau gilt diese Formel analog mit dem Unterschied, dass die Formel für jede Teilfläche explizit angewendet wird. Die Größe der gewählten Teilflächen, „Management Units“ genannt, ist abhängig von der räumlichen Auflösung der Eingangsdaten und der Arbeitsbreite der eingesetzten Applikationstechnik (GEBBERS, 2004b, S. 4.2-10). Da die einzelnen Nährstoffe oftmals eine voneinander abweichende Verteilung aufweisen, sollte bei der teilflächenspezifischen Grunddüngung ein Mehrkammerdüngerstreuer eingesetzt werden, um nährstoffelementspezifisch standortangepasst die bedarfsgerechte Düngermenge ausbringen zu können (GEBBERS, 2004b, S. 4.2-8).

Über die pflanzenbaulichen und ökonomischen Effekte einer teilflächenspezifischen Grunddüngung im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Grunddüngung finden sich in der Literatur unterschiedliche Aussagen. BROZIO und GEBBERS verweisen darauf, dass die Ertragswirkung von P, K, Mg und Ca häufig nur bei sehr geringen Bodennährstoffgehalten und nach mehrjähriger Auswertung statistisch festzustellen sei (BROZIO / GEBBERS, 2004, Kap. 4, S. 177). JARFE dagegen berichtet von Mehrerträgen von 1,4 % und 2,6 % der variablen Grunddüngung im Vergleich zur konstanten Grunddüngung (JARFE, 2004, Kap. 2, S. 62). Insgesamt finden sich in der wissenschaftlichen Literatur nur wenige Aussagen zu den praktischen Auswirkungen der ortsspezifischen Grunddüngung.

4.3.4 PF-Stickstoffdüngung

Die Stickstoffdüngung nimmt innerhalb der Nährstoffversorgung von Pflanzenbeständen eine herausragende Stellung ein (siehe Kapitel 2.2.3). Auf Grund seines unmittelbaren Einflusses auf die Ertragsbildung und seiner hohen Mobilität im Boden ist der Stickstoff (N) ein interessanter Ansatzpunkt für die Ziele der orts-

spezifischen Bestandesführung. So ist es nicht verwunderlich, dass die teilflächen-spezifische N-Düngung das am meisten in der Praxis angewandte teilflächen-spezifische Applikationsverfahren darstellt (REICHARDT / JÜRGENS, 2008, S. 588). Absolut gesehen bleibt die Verbreitung der PF-N-Düngung hinter den Erwartungen zurück, was laut SCHNEIDER zum einen an der Komplexität der Zusammenhänge zwischen kleinräumigen Einflussfaktoren und pflanzlichem Ertrag und der Aufteilung der N-Düngung auf mehrere Gaben und zum anderen an der fehlenden Nutzung von ökonomischen Kriterien bei der N-Düngungsbemessung liegt (SCHNEIDER, 2011, S. 72). Auch RECKLEBEN et al. (2007, S. 46) und BROZIO und GEBBERS (2004, Kap. 4, S. 151) mahnen den Mangel an für Praktiker leicht nachvollziehbaren und verständlichen Entscheidungsregeln für die PF-N-Düngung an. Während SCHNEIDER (2011, S. 72) die Notwendigkeit von ökonomisch optimierten Entscheidungsregeln der zweiten Generation hervorhebt (siehe dazu auch WAGNER et al., 2005, S. 77), entwickelten BROZIO und GEBBERS ein Modul für die PF-N-Düngung (BROZIO / GEBBERS, 2004, Kap. 4, S. 151 ff.). Nachfolgend ist das dem Modul zugrunde liegende Ablaufdiagramm mit den zu berücksichtigenden Einflussparametern abgebildet.

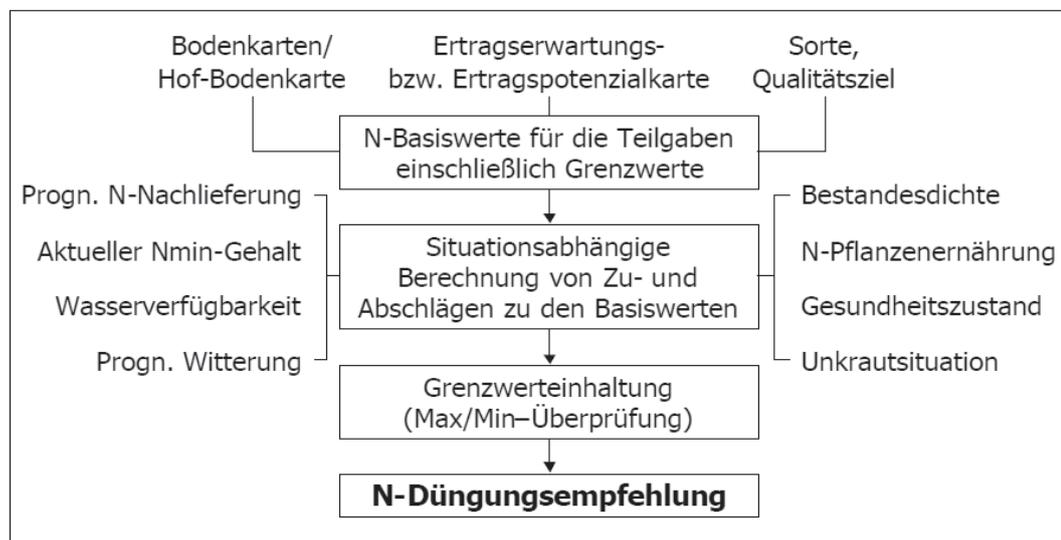


Abbildung 34: Ablaufdiagramm des Moduls preagro-N-WW (BROZIO / GEBBERS, 2004, Kap. 4, S. 156)

Neben einer kleinräumigen Abschätzung des Ertragspotenzials, die sich auf Informationen wie den Niederschlag, Daten der RBS oder Geländeinformationen stützt, besitzt die möglichst hochaufgelöste Erfassung der Bodennährstoffgehalte eine große Bedeutung, da man nicht von einem räumlich homogenen Versorgungszustand des Bodens ausgehen kann.

Zur Umsetzung der Entscheidungsregeln kann auf verschiedene technische Verfahren zurückgegriffen werden, die sich in eine der drei folgenden Methoden einordnen lassen:

- a) Offline-Verfahren (z. B. Düngung nach Ertragskarten)
- b) Online-Verfahren (z. B. CROP-Meter)
- c) Online mit Map-Overlay-Verfahren (z. B. YARA-N-Sensor mit hinterlegter Bodenkarte)

In Abhängigkeit von der verwendeten Methodik ergeben sich unterschiedliche Auswirkungen auf die räumliche Variabilität des Ertrages. Der Einsatz eines reinen Online-Verfahrens mit unmittelbarer N-Gabe führt zu einer Homogenisierung des Bestandes mit daraus resultierenden Ernteerleichterungen, wie LUDOWICY et al. berichten (LUDOWICY et al., 2002, S. 125). Ein reiner Offline-Ansatz oder auch ein Online-Ansatz mit Map-Overlay führt zu einer stärkeren Differenzierung des Bestandes, da durch Einbeziehung von standortspezifischem Kartenmaterial kleinräumige Ertragspotenzialunterschiede berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund ist die Grundbedingung für den Einsatz von sensorbasierten Online-Systemen zu verstehen, die das Vorhandensein eines gesunden Bestandes und ausreichenden Verfügbarkeiten weiterer Wachstumsparameter wie Wasser und Grundnährstoffen voraussetzt (RÖSCH et al., 2005, S. 65).

Die Tabelle 16 gibt einen Überblick über die gegenwärtig in der Praxis verfügbaren Systeme zur teilflächenspezifischen Ausbringung von N-Dünger.



	CROP-Meter	Agro-Sat	Kemira Loris Maps	Vista	YARA-N-Sensor	Isaria	Greenseeker	OptRx
Methodik	Online und Map-Overlay	Offline	Offline	Offline	Online und Map-Overlay	Online und Map-Overlay	Online und Map-Overlay	Online
Messprinzip	Mechanisch (Widerstand)	Optisch (Reflexion)	Optisch (Reflexion)	Optisch (Reflexion)	Optisch (Reflexion)	Optisch (Laserinduzierte Fluoreszenz)	Optisch (Reflexion)	Optisch (Reflexion)
Messgröße	Biegewiderstand	Chlorophyllkonzentration	Chlorophyllkonzentration	Chlorophyllkonzentration	Chlorophyllkonzentration	Chlorophyllkonzentration	Chlorophyllkonzentration	Chlorophyllkonzentration
Zielgröße	Biomassedichte	N-Versorgung	Biomasse	N-Versorgung	N-Versorgung	N-Versorgung	N-Versorgung	N-Versorgung
Position des Messgerätes	Frontanbau Traktor	Flugzeug	Flugzeug	Satellit oder Flugzeug	Traktordach	Frontanbau Traktor	Frontanbau Traktor	Frontanbau Traktor

Tabelle 16: Praxisverfügbare Systeme der teilflächenspezifischen N-Düngung (Eigene Darstellung nach RECKLEBEN et al., 2007, S. 20 ff. und BÖHRNSEN, 2012, S. 10 ff.)

In der Literatur lassen sich zahlreiche Ergebnisse zu Versuchen mit einer teilflächenspezifischen N-Düngung finden. Diese Angaben unterscheiden sich sowohl in der Art der Untersuchung als auch durch die eingesetzte Applikationstechnik und die verwendeten Entscheidungsregeln. Die meisten Ergebnisse weisen auf eine substanzielle N-Einsparung bei gleichzeitiger Beibehaltung des Ertragsniveaus oder sogar leichte Ertragssteigerungen hin.

Zudem sei noch auf drei Versuchsergebnisse hingewiesen, die spezifische Fragestellungen der N-Düngung behandeln. BROZIO und GEBBERS konnten im Rahmen der Konzipierung des preagro-N-Moduls von einer Steigerung der N-Effizienz bei ihrer auf Hof-Bodenkarten basierenden PF-N-Düngung im Vergleich zur schlag-einheitlichen N-Düngung berichten (BROZIO / GEBBERS, 2004, Kap. 4, S. 162). WAGNER et al. verglichen in einer Testreihe die pflanzenbaulichen Effekte der N-Düngungsvarianten „schlag-einheitlich“, „Offline-System“, „YARA-N-Sensor“ und „künstliche neuronale Netze“ und kamen zu einer ökonomischen Überlegenheit der Variante „künstliche neuronale Netze“ gegenüber den anderen N-Düngungsvarianten (WAGNER et al., 2005, S. 62). GANDORFER untersuchte neben den ökonomischen Effekten des Offline-Ansatzes (– 10 € / ha bis + 11 € / ha) und des Online-Ansatzes mit Map-Overlay (+ 2 € / ha bis + 32 € / ha) als Ergebnisse von Feldversuchen eine mögliche Steigerung der N-kostenfreien Leistungen mit Hilfe der Analyse einer teilflächenspezifischen Produktionsfunktion. Er ermittelte hierbei Werte in Höhe von 0 bis + 62 € / ha (GANDORFER, 2006, S. 139-140).

4.3.5 PF-Pflanzenschutz

Der Pflanzenschutz besitzt auf Grund seines finanziellen Umfangs innerhalb der ackerbaulichen Produktionskosten und der möglichen Umweltwirkungen ein großes Potenzial für den Ansatz des Precision Farmings. Das Wirkungsspektrum des Pflanzenschutzes erstreckt sich von der Bekämpfung von Unkräutern (Herbizide) über die Behandlung pilzlicher Infektionen (Fungizide) bis zur Vermeidung zu umfangreicher Schadinsektenpopulationen (Insektizide).

Insektizide

Insektizide spielen im Bereich des teilflächenspezifischen Pflanzenschutzes keine große praxisrelevante Rolle, da die Erfassung der Populationen und vor allem der Ausbreitungsdynamik technisch (noch) nicht praktikabel durchführbar ist (SCHNEIDER, 2011, S. 86).



Herbizide

Unkräuter sind in landwirtschaftlichen Kulturbeständen oftmals nicht gleichmäßig über die Fläche verteilt, sondern konzentrieren sich nesterartig an bestimmten, zumeist über die Jahre ortstreuen Positionen des Schlages (RÖSCH et al., 2005, S. 68). Auf solchen Flächen, auf denen der Unkrautbesatz auf einem großen Teil des Schlages unterhalb der festgelegten ökonomischen Schadensschwelle liegt, bietet sich eine teilflächenspezifische Herbizidausbringung nach Maßgabe einer zuvor erstellten Unkrautverteilungskarte an, die sich auf die Applikation an den Standorten der Unkrautnester beschränkt.

Eine weitere Schwierigkeit besteht in der korrekten Erfassung der Unkrautverteilung. Bisherige praxistaugliche Unkrautdetektoren erfassen nur die Unkräuter innerhalb der Fahrspur, was keine zuverlässige Aussage über die Verteilung des Unkrautbesatzes über die Breite der Pflanzenschutzmittelapplikation erlaubt. Die Mengendifferenzierung des Pflanzenschutzmittels nach ökonomischen Schadensschwellen wird aus diesem Grund zwar grundsätzlich proportional zum Sensorsignal gestaltet, appliziert aber als Minimalwert immer noch 50 % des Maximalwertes (DAMMER, 2004a, S. 4.2-35). Dementsprechend leitet sich das Einsparpotenzial des Herbizideinsatzes von den beiden Faktoren Heterogenität der Unkrautverteilung auf dem Schlag und festgelegte ökonomische Schadensschwelle ab (DAMMER, 2004a, S. 4.2-36).

Bei der technischen Umsetzung der Herbizidapplikation konzentriert sich die Forschung und Entwicklung auf die Bereiche Unkrauterfassung und Ausbringung mehrerer Wirkstoffe in einer Überfahrt. Auf Grund der hohen Kosten einer manuellen Unkrautbonitur ist die Entwicklung automatischer sensorbasierter Unkrautdetektionsverfahren notwendig. Die Entwicklung der letzten Jahre fokussierte sich hierbei auf optoelektronische Anwendungen, Verfahren der digitalen Bildanalyse sowie auf Methoden der Fernerkundung. Die Notwendigkeit, bei der artenspezifischen Erfassung der Unkräuter mehrere Wirkstoffe teilflächenspezifisch in Echtzeit zu applizieren, führte zur Entwicklung einer Mehrkammerspritze mit mehreren getrennten Flüssigkeitskreisläufen (GERHARDS / KÜHBAUCH, 2004, S. 4.2-40).

In zahlreichen Studien wird von mehr oder weniger großen Pflanzenschutzmitteleinsparungen bei einer teilschlagspezifischen Herbizidapplikation berichtet.

Einzelbetriebliche Versuchsergebnisse ergaben Herbizidreduktionen von 12,7 % bei gleichzeitiger Ertragssteigerung von 3 % (DAMMER / DEGLER, 2004, Kap. 4, S. 288).

Fungizide

Ähnlich wie bei der Erfassung der räumlichen Unkrautverteilung bestehen technische Schwierigkeiten bei der Detektion von pilzlichen Schaderregern zur Vorbereitung einer teilflächenspezifischen Fungizidapplikation. Zwar nennen RÖSCH et al. mit der Ermittlung der durch pilzliche Pathogene verursachten Änderung der Fluoreszenz, der visuellen Erkennung pilzlicher Schaderreger durch die Analyse von Multispektralbildern und der Messung der Blattoberflächentemperatur, die sich durch Pilzbefall und einer damit verbundenen Änderung der Verdunstung von Wasser ebenfalls ändert, drei Methoden der sensortechnischen Erfassung befallener Pflanzen, aber jede dieser Methoden besitzt Schwächen in der praktischen Umsetzbarkeit (RÖSCH et al., 2005, S. 72). Aus diesem Mangel an praxisreifen Verfahren der Erfassung pilzlicher Erreger heraus wurde am ATB Potsdam-Bornim der Pendelsensor (siehe Kapitel 3.3.13) entwickelt, der die Bestandesdichte als Indikator für die Pflanzenoberfläche eines Bestandes ermittelt. Mit dem hinterlegten Algorithmus, dass die Fungizidspritzbrühe gleichmäßig auf die Pflanzenoberfläche ausgebracht werden soll, gelingt mit dem gemessenen Auslenkwinkel des Pendels, der stark mit dem Blattflächenindex korreliert (BFI), eine standortangepasste, bedarfsgerechte Fungizidapplikation (DAMMER et al., 2008, S. 261).

Analog zur Problematik der Unkrauterfassung wird auch beim Einsatz des Pendelsensors die Bestandesdichte nur in der Fahrspur ermittelt und es existieren keine Informationen über die räumliche Verteilung der Pflanzenmasse über die komplette Breite der Fungizidausbringung. Deshalb gilt auch hier die Empfehlung, die Reduzierung der Aufwandmenge auf 50 % des Maximalwertes zu begrenzen. Das Einsparpotenzial der teilflächenspezifischen Fungizidausbringung ist unmittelbar abhängig von der Heterogenität des Pflanzenbestandes und der festgelegten minimalen Applikationsmenge (DAMMER, 2004b, S. 4.2-48). Zur Ermittlung der Einsparpotenziale bei einer teilflächenspezifischen Fungizidapplikation wurden mehrere Versuche unter Verwendung des Pendelsensors durchgeführt. DAMMER und EHLERT berichten von durchschnittlich 22 % Fungizideinspa-

rungen im Vergleich zur schlageinheitlichen Ausbringung über mehrere Jahre hinweg (DAMMER / EHLERT, 2006, S. 137-148). Eine deutliche Verbesserung der Einsparpotenziale des Fungizideinsatzes erreichten DAMMER et al., indem sie den Pendelsensor mit einem pflanzenphysiologischen Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) kombinierten, das anhand von Witterungsdaten und schlag-spezifischen Informationen das Infektionsrisiko durch pilzliche Pathogene abschätzen kann. Mit der Kombination des CROP-Meters und des EUS Proplant „expert.classic“ zu einem hybriden System gelang eine Reduzierung der Fungizid-aufwandmenge im Vergleich zur flächeneinheitlichen Applikation von 32,6 % (DAMMER et al., 2008, S. 283).

4.3.6 PF-Wachstumsreglerapplikation

Die Applikation von Wachstumsreglern auf Chlor-Mequat (CCC)-Basis verursacht zwei pflanzenphysiologische Reaktionen. Zum einen führt CCC zu einer Hemmung des Wachstumshormons Gibberelin und zum anderen zur Anregung der Bildung von Cytokinin, was die Zellteilung fördert und die Alterung der Pflanze verzögert. In Abhängigkeit des Anwendungstermins verfolgt eine CCC-Gabe zwei Ziele im Rahmen der Pflanzenbestandesführung: Eine frühe CCC-Gabe soll die Pflanze zur verstärkten Ausbildung von Nebentrieben anregen, wohingegen eine Wachstumsregleranwendung nach dem Schossbeginn eine Internodienstauchung und damit eine Halmverkürzung induziert (DAMMER, 2004a, S. 4.2-27), die verhindern soll, dass das Getreide ins Lager geht. Unter der pflanzenbaulichen Regel, dass wüchsige Bestände eine größere Menge an Wirkstoffen beanspruchen als dünnere Bestände ist die Ausbringung von Wachstumsreglern für die Methodik der ortsspezifischen Bestandesführung prädestiniert. Für eine frühe CCC-Anwendung ist das Offline-Verfahren mit der Erstellung einer Applikationskarte nach Maßgabe der die Lagerneigung beeinflussenden Parameter Boden, Wetter, pflanzenbauliche Maßnahmen und Standfestigkeit der Sorte geeignet.

Bei einer entsprechenden Aufwuchshöhe des Bestandes ist die Erfassung der Bestandesdichte mit dem Pendelsensor möglich, dessen Pendelauslenkwinkel in angepasste Applikationsmengen umgerechnet werden (DAMMER / BEGLER, 2004, Kap. 4, S. 285). Auf eine weitere Variante der Wachstumsreglerapplikation verweist SCHNEIDER mit der CCC-Ausbringung mit Unterstützung des YARA-N-

Sensors. Für dieses Verfahren sind die positiven Effekte der Homogenisierung der Bestände, einer Wirkstoffeinsparung von 10 – 15 % der flächeneinheitlichen Aufwandmenge sowie leichte Ertragssteigerungen dokumentiert (SCHNEIDER, 2011, S. 90).

DAMMER und DEGLER berichten bei ihren Versuchen des teilflächenspezifischen Wachstumsreglereinsatzes, dessen Algorithmus auf den Parametern Schätzertrag, sortenspezifische Standfestigkeit und der Bestandesentwicklung im Frühjahr beruht, von Wirkstoffeinsparungen und gleichzeitiger Vermeidung von Lager im Getreide (DAMMER / DEGLER, 2004, Kap. 4, S. 306).

4.3.7 PF-Berechnung

In Kapitel 3.4 der vorliegenden Arbeit wurde die herausragende Bedeutung der Wasserverfügbarkeit für das Pflanzenwachstum unter den natürlichen Bedingungen in Deutschland hergeleitet. In Verbindung mit der oftmals vorliegenden Variabilität der nutzbaren Feldkapazitäten erschließt sich schnell das Potenzial der teilflächenspezifischen Bewässerung. Ökonomische Ziele einer standortangepassten Berechnung sind die Verringerung der eingesetzten Wasser- und Energiemenge bei der sehr kostenintensiven künstlichen Bewässerung.

SOURELL nennt als Eingangsparameter für die Erstellung des Applikationsalgorithmus die Bodenart, den Bodentyp, die Humusversorgung, Erosionsgefährdung, die Hangneigung und Höhenlinien (SOURELL, 2004, S. 4.2-57). Er plädiert für eine Festlegung der Monitoringpunkte, an denen die Feldkapazität und der Welkepunkt punktuell bestimmt werden, auf der Grundlage von Hof-Bodenkarten und Karten der elektrischen Leitfähigkeit. Mit Hilfe dieser Monitoringpunkte wird eine Kartierung der Bodenwasserspeicherfähigkeit generiert (SOURELL, 2004, S. 4.2-58). KING et al. dagegen ermitteln die kleinräumige Verteilung der Wasserverfügbarkeiten über Bodenfeuchtesensoren. Mit Hilfe eines Prognosemodells versuchen sie die zu erwartende Evapotranspiration vorauszusagen, um daraus diejenige Wassermenge kleinräumig zu applizieren, die garantiert, dass der Boden bis zur nächsten geplanten Bewässerung eine mindestens 65 %-ige Wassersättigung aufweist (KING et al., 2004, S. 808-818).

In der landwirtschaftlichen Praxis werden zwei Verfahren der künstlichen Bewässerung angewendet. Bei den mobilen Berechnungsmaschinen wird die räumlich

variable Wasserausbringung über differenzierte Einzugseschwindigkeiten der Beregnungskanone garantiert, während bei Kreisberegnungsmaschinen über eine variable Ansteuerung einzelner Düsen für eine standortangepasste Bewässerung gesorgt wird (SOURELL, 2004, S. 4.2-61/62).

KING et al. berichten bei ihren Versuchen zur teilflächenspezifischen Beregnung in Kartoffeln von leicht gesteigerten Erträgen und verbesserten Qualitäten (KING et al., 2004, S. 808-818). Quantitative Aussagen zu seinen Versuchen zur teilflächenspezifischen Bewässerung mit einer Kreisberegnungsanlage kann AL-KARADSHEH vorlegen. Er nennt eine Investitionssumme von 442 €/ha zur Nachrüstung der 50 ha-Beregnungsanlage auf kleinräumige Ansprüche und verbucht unter Leistungen eine im Vergleich zur flächeneinheitlichen Bewässerung 7,4 %-ige Reduzierung der Wasser- und Energiemenge, was sich in 63 m³ Wasser / ha und 39,52 KWh / ha ausdrückt (AL-KARADSHEH, 2003).

4.4 Ökonomie des Precision Farmings

Die herausragende Bedeutung der Ökonomie für die Einführung der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung lässt sich daran ablesen, dass die bisher noch nicht eindeutig nachgewiesene gesamtbetriebliche Rentabilität der PF-Technologie als einer der Hauptgründe für die zögerliche Praxiseinführung von befragten Landwirten genannt wird (siehe Kapitel 4.6.1). Auch WAGNER verweist darauf, dass „breite Akzeptanz von PF nur dann zu erwarten“ sei, „wenn damit ein direkter einzelbetrieblicher Vorteil verbunden ist“ (WAGNER, 1999, S. 46). Als konkrete ökonomische Bedingung formulieren KILIAN und VOGEL, dass sich der Einsatz der PF-Technologie nur lohnt, wenn die durch die teilflächenspezifische Bewirtschaftung erzielten höheren Deckungsbeiträge auch die aus den Investitionskosten abgeleiteten jährlichen Fixkosten übersteigen (KILIAN / VOGEL, 2004, Kap. 5, S. 47).

Als wesentliche Kriterien zur Beurteilung der ökonomischen Situation des PF wird nachfolgend auf verschiedene Bewertungsansätze, Einflussfaktoren der Wirtschaftlichkeit des PF, ökonomische Kennwerte einzelner PF-Verfahren und die Verwendung von Produktionsfunktionen zur Herleitung des ökonomischen Potenzials des PF-Einsatzes eingegangen.



4.4.1 Grundlagen der Ökonomie des Precision Farmings

SCHNEIDER und WAGNER verweisen auf den Kern der Idee des PF: „Das Ziel des PF ist das Management von Heterogenitäten“ (SCHNEIDER / WAGNER, 2008, S. 409). Nach SCHNEIDER mündet das Wissen über die Heterogenitätsindikatoren und die Werkzeuge zur Interpretation der Daten in die sogenannten Entscheidungsregeln, in denen das Know-how des PF steckt (SCHEIDER, 2011, S. 8). Er definiert hierzu drei Generationen von Entscheidungsregeln, die sich hinsichtlich der Einbeziehung von Entscheidungskriterien unterscheiden. Während die Entscheidungsregeln erster Generation ausschließlich pflanzenbauliche Kriterien berücksichtigen, finden in den Entscheidungsregeln zweiter Generation ökonomische Sachverhalte, wie der Aufbau der teilschlagspezifischen Produktionsfunktionen oder Faktor- / Produktpreisrelationen Zugang. Eine noch bessere Anpassung an die Ziele des Anwenders wird mit den Entscheidungsregeln der dritten Generation erreicht. In diesen werden zusätzlich Risikoaspekte berücksichtigt, indem über Verteilungsfunktionen und Erwartungswerte der nicht beeinflussbaren Einwirkungsfaktoren wie Witterungsbedingungen sowie Faktor- und Produktpreise Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Kosten- und Leistungsszenarien ermittelt werden, die als Grundlage für Managemententscheidungen des PF-Anwenders dienen können (SCHNEIDER, 2011, S. 10-11).

In der ökonomischen Beurteilung der Rentabilität von PF-Maßnahmen lassen sich die dafür notwendigen Investitionen nach WAGNER in drei Arten unterteilen (WAGNER, 1999, S. 46-47):

1. Investitionen für die Datengewinnung (Ertragskartierung, DGPS-Positionierungssystem)
2. Investitionen für die Datenverarbeitung (Hardware, Software)
3. Investitionen für die Ausbringung von Produktionsfaktoren (Computergesteuerte Sämaschinen, Düngestreuer und Pflanzenschutzspritzen)

Zur Erzielung eines positiven wirtschaftlichen Ergebnisses müssen diese Investitionen langfristig durch zwei Positionen abgedeckt werden, nämlich durch höhere Erträge und/oder geringere Betriebsmittelaufwendungen (WAGNER, 1999, S. 48). An gleicher Stelle gelangt WAGNER zu der Einschätzung, dass die ökonomischen Auswirkungen der standortspezifischen Landbewirtschaftung vor allem in der Einsparung und der besseren Effizienz der eingesetzten Produktionsfaktoren



liegen dürfte denn in einer nennenswerten Ertragssteigerung (WAGNER, 1999, S. 52). Dies ist die ökonomische Konsequenz aus der Tatsache, dass sich eine gewisse Überdüngung bei den herrschenden Faktor-/Produktpreisrelationen weniger wirtschaftlich nachteilig auswirkt als die Nichtausnutzung von Ertragspotenzial (KUHLMANN, 1997, S. 4).

4.4.2 Methoden der Precision Farming-Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im Zusammenhang mit den oftmals nur schwer quantifizierbaren Wirkungen des PF verweist SCHNEIDER auf die Bedeutung der Auswahl der geeigneten Bewertungsmethode für die Effekte der standortspezifischen Landbewirtschaftung (SCHNEIDER, 2011, S. 129).

LOWENBERG-DEBOER und SWINTON geben 1997 ein dreistufiges Verfahren zur Überprüfung der Rentabilität von teilflächenspezifischen Maßnahmen vor. Demnach gilt es zunächst herauszufinden, ob durch PF ein zusätzlicher Deckungsbeitrag (DB) im Vergleich zur flächeneinheitlichen Bewirtschaftung realisiert werden kann. Daran schließt sich eine Überprüfung dergestalt an, ob der realisierte Mehrerlös auch die durch PF notwendigen Investitionen abdecken kann. Das Verfahren schließt mit einer Risikoanalyse ab, in der die Auswirkungen des PF-Einsatzes auf Ertragsschwankungen abgeschätzt werden (LOWENBERG-DEBOER / SWINTON, 1997).

SCHNEIDER und WAGNER verwenden in ihrer Untersuchung der ökonomischen Effekte der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung auf betrieblicher Ebene vier Methoden der Rentabilitätsbetrachtung. Zur Gewinnung aussagekräftiger pflanzenbaulicher Potenziale auf den untersuchten Flächen führen sie sogenannte On-Farm-Research-Versuchsanstellungen durch. Sie werten diese aus, indem sie die um die Kosten des teilflächenspezifisch variierten Faktors reduzierte Marktleistung berechnen (SCHNEIDER / WAGNER, 2008, S. 415). Mit Hilfe einer Break-Even-Analyse werden in einem nächsten Schritt die für eine Abdeckung der PF-Investitionskosten notwendigen Mindesteinsatzumfänge der einzelnen PF-Technologien ermittelt. Zur Berücksichtigung von Risikoaspekten werden anschließend Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Witterungsbedingungen auf die Ergebnisse der einzelnen PF-Strategien abschätzen zu können. Zusätzlich werden hierbei verschiedene Preisszenarien für

den Produktionsfaktor Stickstoff und den Produktpreis für Weizen durchgespielt, um Eintrittswahrscheinlichkeiten für bestimmte stickstoffkostenfreie Leistungen pro Hektar festzustellen (SCHNEIDER / WAGNER, 2008, S. 415-416). Zur Ermittlung des zusätzlichen Arbeitszeitbedarfs wurden Umfragen unter PF-Anwendern in der Praxis durchgeführt, die detaillierte Erkenntnisse über den Arbeitszeitaufwand bestimmter PF-Tätigkeiten erzielen sollten (SCHNEIDER / WAGNER, 2008, S. 421-422).

Aus der Tatsache heraus, dass auf Grund des hohen Komplexitätsgrades von PF einfache Umsetzungsstrategien häufig scheitern, verwendeten KILIAN und VOGEL drei methodische Ansätze, um die ökonomischen Effekte einer teilflächenspezifischen N-Düngung abzuschätzen. Als betriebswirtschaftliche Messgröße diente hierbei das DB-Steigerungspotenzial der standortspezifischen Düngungsmaßnahmen, die auf dem Mapping-Ansatz von auf der Basis von kleinräumigen Informationen erstellten Teilflächen beruhte. Folgende methodische Ansätze untersuchten KILIAN und VOGEL:

1. Schätzung der teilflächenspezifischen N-Produktionsfunktionen auf der Basis von Schlag- und Standorteigenschaften (Empirischer Ansatz)
2. Teilflächenspezifische Adaption von normativen Produktionsfunktionen auf der Basis von Ertragskarten (Normativer Ansatz)
3. Ökonomische Bewertung durch eine Szenario-Analyse unter Verwendung eines teilflächenspezifischen pflanzenbaulichen Simulationsmodells (Szenario-Analyse) (KILIAN / VOGEL, 2004, Kap. 5, S. 6 ff.)

Sie kommen zu dem Schluss, dass der empirische Ansatz die aussagekräftigsten ökonomischen Ergebnisse liefert, während die Vorzüge der normativ abgeleiteten Produktionsfunktionen in der schnelleren Auswertung und einer möglichen Automatisierung liegen. Die Vorteile des Pflanzenwachstumsmodelles bestehen in der Möglichkeit, ex-ante Analysen und damit Düngeplanungen durchführen zu können (KILIAN / VOGEL, 2004, Kap. 5, S. 46-47).



4.4.3 Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von Precision Farming

Die Rentabilität einer teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung ist von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. WAGNER identifiziert vier Haupteinflussfaktoren:

1. Notwendige Investitionen für PF
2. Heterogenität des Standortes und gegenwärtig praktiziertes Niveau der Düngung
3. Anteil und Umfang der Fruchtarten im Produktionsprogramm
4. Betriebsgröße (WAGNER, 1999, S. 46)

Die Auswirkungen einer Variation der mengenmäßigen Ausprägung der einzelnen Einflussfaktoren werden von WAGNER an gleicher Stelle aufgezeigt (vgl. WAGNER, 1999, S. 46-59). In der vorliegenden Arbeit wird in Kapitel 4.4.4 eine Analyse des Sachverhaltes mit aktuellen Kosten- und Leistungsdaten vorgenommen.

WAGNER erweitert 2004 den Kreis der Einflussfaktoren auf die Rentabilität des PF um die folgenden Größen: Effizienz des PF-Ansatzes, Organisation des Technologieinsatzes (Einzelbetrieblich, Lohnunternehmereinsatz, Gewannebewirtschaftung), Produkt- und Faktorpreisniveau, Subventionen, Ausmaß der Reduktion des Ertragsrisikos und die Managementfähigkeiten (Wissen, Arbeitszeitbedarf) des Bedienpersonals (WAGNER, 2004, S. 6-31). Zu dem letztgenannten Punkt (Arbeitszeitbedarf) gibt es in der wissenschaftlichen Literatur kontroverse Aussagen. SCHMERLER berichtet von einem Bedarf einer zusätzlichen Arbeitskraft durch PF (SCHMERLER, 2001, S. 28), wohingegen LISSO zu dem Schluss kommt, dass sich durch den Einsatz von PF eine Arbeitskraft einsparen lässt (LISSO, 2003, S. 1143). SCHNEIDER ermittelt bei seinen Untersuchungen im Rahmen einer Umfrage zu den Arbeitszeiteffekten des PF-Einsatzes unter erfahrenen PF-Anwendern einen zusätzlichen Arbeitszeitbedarf von im Durchschnitt 4,12 Akmin pro Hektar und Jahr mit einer Schwankungsbreite von 1-12 Akmin pro Hektar und Jahr. Abgeleitet aus der Tatsache, dass diese Tätigkeiten zumeist von hochqualifiziertem Personal ausgeführt werden, kalkuliert SCHNEIDER mit einem Stundenlohn von 35 € pro Stunde und ermittelt so durch PF verursachte Arbeitszeitkosten von durchschnittlich 2,40 € pro Hektar und Jahr (SCHNEIDER, 2011, S. 98-99).

Alle diese Einflussfaktoren werden allerdings durch die Witterungsbedingungen als Einflussgröße überlagert, was verschiedene Risikoanalysen zur Ermittlung der Reihenfolge des Einflusses einzelner Faktoren auf die Rentabilität des PF zeigten (GANDORFER, 2006; KILIAN / VOGEL, 2004; SCHNEIDER / WAGNER, 2008; SCHNEIDER, 2011).

In einem Vergleich der räumlich heterogenen Standortgegebenheiten und dem Zeitablauf variabler Witterungseinflüsse kommt OSTHEIM zu der Erkenntnis, dass „die durch die Varianz der nicht kontrollierbaren Wachstumsfaktoren im Zeitablauf induzierte Variabilität größer ist als die aus den pedologischen Faktoren resultierende“ (OSTHEIM, 2000, S. 210).

4.4.4 Break-Even-Analyse für Precision Farming-Technologie

In diesem Kapitel werden die Effekte der von WAGNER aufgeführten Einflussfaktoren auf die Rentabilität des PF erläutert und abschließend in einer Break-Even-Analyse zusammengeführt.

Investitionskosten des PF

Die durch die Anwendung der standortspezifischen Landbewirtschaftung erhofften Ertragssteigerungen und/oder Betriebsmitteleinsparungen müssen die notwendigen Investitionskosten abdecken, um einen positiven ökonomischen Beitrag zum Betriebsergebnis zu leisten. Es ist unmittelbar ersichtlich, dass die DB-Steigerungen umso höher ausfallen müssen, je höher die abzudeckenden fixen Investitionsausgaben für die PF-Technologie sind. In Tabelle 17 und Tabelle 18 wird ein grober Überblick über die einzelnen Kostenpositionen gegeben.



Investitionsobjekt	Betrag
Schlepperterminal	5.655 €
Ertragsmessung auf Mähdrescher	5.525 €
Ertragskartierung auf Mähdrescher	5.035 €
Ertragskartierungssoftware für PC	1.635 €
Büroausstattung	1.700 €
Nachrüstungen Sämaschine / Düngerstreuer	je 5.100 €
Nachrüstung Pflanzenschutzspritze	5.000 €
Pendelsensor (CROP-Meter)	11.000 €
YARA-N-Sensor	26.100 €
YARA-N-Sensor ALS	39.750 €

Tabelle 17: Kostenpositionen der PF-Technologie (BRÜGEMANN, persönliche Mitteilung, 21.3.2013; KTBL, 2005, S. 184-185; AGRICON, 2012)

PF-Dienstleistung	Kosten / ha*
Ertragskartierung	0 – 13 €
Grunddüngung mit Streukarte	10 – 20 €
N-Sensordüngung	3 – 5 €
Aussaat	8 – 10 €

*Angegebene Preise verstehen sich als zusätzliche Ausgaben zu den Kosten der eigentlichen ackerbaulichen Maßnahmen

Tabelle 18: Kosten von PF-Dienstleistungen (KILIAN / VOGEL, 2004, Kap. 5, S. 50)

Alle diese Angaben sind grobe Anhaltspunkte, die in Abhängigkeit vom Umfang der Inanspruchnahme der technischen Komponenten bzw. der angebotenen Dienstleistungen deutlich schwanken können.

Heterogenität des Standortes

KILIAN und VOGEL gelingt bei ihren Forschungsarbeiten die Herausarbeitung des Variationskoeffizienten des Ertrages als Indikator für das DB-Steigerungspotenzial eines Standortes und bestätigen damit WAGNERS Aussage bezüglich der Heterogenität des Standortes als bedeutenden Einflussfaktor für die Rentabilität des PF. Mit einer Regressionsgleichung zur Abschätzung des quantitativen Zusammenhangs zwischen dem Variationskoeffizienten des Ertrages und dem ökonomischen Potenzial der PF-Anwendung erreichen KILIAN und VOGEL einen Korrelationskoeffizienten r^2 von knapp über 0,9 (KILIAN / VOGEL, 2004, Kap. 5, S. 40).

Zur besonderen Bedeutung der Heterogenität bei der Anwendung der teilschlag-spezifischen Landbewirtschaftung sei auf das Kapitel 3.1 der vorliegenden Arbeit verwiesen.

Produktionsprogramm eines Betriebes

Mit zunehmendem Anteil von Intensivkulturen mit hohen Flächenerlösen und hohen Betriebsmittelaufwendungen wie z. B. den Hackfrüchten Zuckerrübe oder Kartoffel im Anbauprogramm eines landwirtschaftlichen Betriebes wirken sich prozentuale Ertragssteigerungen und Betriebsmitteleinsparungen deutlicher auf das Betriebsergebnis aus. Nachfolgend werden in Tabelle 19 die einzelnen Kosten- und Leistungspositionen der Standarddeckungsbeiträge der Anbaukulturen Winterweizen (WW), Winterraps (WR), Körnermais (KM), Zuckerrüben (ZR) und Kartoffeln (K) aufgezeigt, die im Produktionsprogramm des Beispielbetriebes zur Berechnung der Break-Even-Schwelle vorhanden sein sollen.

Nr.	Kennzahl	Einheit	WW	WR	KM	ZR	K
1	Leistung						
2	Ertrag	dt/ha	70,4	29,2	107,2	628,7	457,6
3	Preis	€/dt	18,57	43,21	19,56	3,7	11,02
4	Leistung	€/ha	1.307	1.262	2.097	2.326	5.043
5	Variable Kosten						
6	Saatgut	€/ha	85	55	186	251	436
7	Handelsdünger	€/ha	216	260	266	297	208
8	darunter N*	€/ha	108	117	173	104	62
9	Pflanzenschutz	€/ha	165	159	86	311	317
10	darunter Herbizide*	€/ha	58	95	86	264	95
11	Sonstiges	€/ha	38	58	271	22	183
12	Summe var. Kosten	€/ha	504	532	809	881	1.144
13	Deckungsbeitrag	€/ha	803	730	1.288	1.445	3.899

*In den Standarddeckungsbeiträgen des KTBL werden die Kosten des N-Düngers innerhalb der Düngungskosten und die Herbizidkosten innerhalb der Gesamtpflanzenschutzkosten nicht ausgewiesen. Aus diesem Grund wurde in den Produktionswirtschaftlichen Kennzahlen der entsprechenden Produktionsverfahren in den Unterlagen der KTBL Betriebsplanung 2012/13 der prozentuale Anteil des N am Gesamtdünger und der Herbizide an den Gesamtpflanzenschutzkosten errechnet und auf obige Kalkulationsdaten übertragen.

Tabelle 19: Standarddeckungsbeiträge ausgewählter Ackerkulturen 2011/2012 (KTBL, 2013; KTBL, 2012; Eigene Berechnungen)

Anhand der Tabelle 19 lässt sich die exponierte Stellung der Sonderkultur Kartoffel hinsichtlich der Leistungen und der Summe der variablen Kosten im Vergleich zu den anderen Anbaukulturen erkennen. Auch die Leistungen und kumulierten



variablen Kosten der Zuckerrübe übersteigen die entsprechenden Positionen des Winterweizens und des Rapses deutlich.

Betriebsgröße

Bei einer Übertragung der Investitionskosten in zeitliche und räumliche Vergleichsgrößen, üblicherweise Jahr und Hektar, sorgen zwei Aspekte für eine ökonomische Vorteilhaftigkeit größerer Betriebseinheiten. Zum einen ist ein Investitionsobjekt – bei identischem Nutzungspotenzial – umso schneller verbraucht, je größer der Betrieb ist, was im Umkehrschluss bedeutet, dass auf einem kleinerem Betrieb das Gebrauchsgut länger verweilt, bis das Nutzungspotenzial aufgebraucht ist. Betriebswirtschaftlich hat dies zur Folge, dass der Zinsanteil an der Annuität mit abnehmender Betriebsgröße ansteigt. Die Annuität stellt die Summe aus Abschreibungen und Zinsen dar. Zum anderen verteilt sich die jährliche Annuität auf größeren Betrieben auf mehr Hektar Einsatzfläche, so dass sich die Jahreskosten pro Hektar verringern. Dieser Effekt tritt besonders bei Gebrauchsgütern zu Tage, die auf Grund eines zu erwartenden technischen Fortschrittes zeitabhängig abgeschrieben werden, da sie nach einer bestimmten Zeitdauer als technisch veraltet gelten und ausgetauscht werden sollten. Bei der von großen, zeitlich dicht aufeinanderfolgenden Innovationsschüben geprägten PF-Technologie wird in der wissenschaftlichen Literatur (vgl. KTBL, 2005, S. 185; KILIAN / VOGEL, 2004, Kap. 5, S. 48; WAGNER, 1999, S. 54) von einer Abschreibungsdauer von 5 Jahren ausgegangen.

Break-Even-Analyse

Zum Nachweis des Effektes der PF-Rentabilitätseinflussfaktoren Betriebsgröße, Anbauprogramm eines Betriebes und Höhe der Investitionsausgaben werden nachfolgend vier Break-Even-Analysen mit der Variation jeweils eines Einflussfaktors durchgeführt (siehe Tabelle 20, Tabelle 21, Tabelle 22 und Tabelle 23).



	Kennzahl	Anbaufläche*****			
		Einheit	100 ha	400 ha	800 ha*
1	Investitionskosten in PF	€ / Jahr	38.347	38.347	51.129
2	Abschreibung [5 Jahre]	€ / Jahr	7.669	7.669	10.226
3	Zins [bei 8%]	€ / Jahr	1.940	1.940	2.586
4	Jahreskosten**	€ / Jahr	9.609	9.609	12.812
5	Jahreskosten / ha	€ / ha	96	24	16
6	Notwendige Erhöhung des Naturalertrags bis Break-Even***	%	9,1	2,3	1,5
7	Notwendige Reduktion einzelner variabler Kostenpositionen bis Break-Even				
8	Saatgut	%	126,2	31,6	21
9	N-Dünger	%	140,8	35,2	23,5
10	Herbizide	%	135,4	33,9	22,6
11	Summe Saatgut, N-Dünger, Herbizide	%	44,6	11,2	7,4

*Höhere Investitionskosten durch zusätzliche Ausstattung eines zweiten Schleppers

**Ohne Reparatur, Wartung und Arbeitskosten

***Bei gleichem Preisgerüst

****Fruchtartenanteil: WW= 67,2 %, WR=16,7 %, KM=8,8 %, ZR=7,3 %

Tabelle 20: Break-Even-Analyse der PF-Technologie für einen extensiven Marktfruchtbetrieb 1999 (WAGNER, 1999, S. 56)

Ausgehend von einer Untersuchung von WAGNER (1999) wurde für die anderen Break-Even-Analysen der methodische Aufbau beibehalten, um eine Vergleichbarkeit der Entwicklung der ökonomischen Rentabilität des PF über die Zeit darstellen zu können.

Der grundlegende methodische Aufbau der Break-Even-Analyse sei anhand der Tabelle 20 erläutert. Alle in der Tabelle aufgeführten Kostenpositionen und notwendigen Naturalsteigerungs- bzw. Betriebsmitteleinsparungsprozentzahlen werden auf die drei Beispielbetriebsgrößen 100 ha, 400 ha und 800 ha umgelegt, um damit die Degressionseffekte einer zunehmenden Betriebsgröße abzubilden. In Zeile 1 werden die Investitionskosten für ein PF-Verfahren auf Basis des Mapping-Ansatzes aufgeführt. Zur näheren Bestimmung der PF-Investitionskosten sei auf Wagner (1999, S. 47) verwiesen. Zur Herausarbeitung der ökonomischen Effekte der aktuellen Faktor- und Produktpreise bzw. der Erhöhung des Anteils der intensiven Ackerkulturen am gesamtbetrieblichen Produktionsprogramm wurden die Investitionskosten der ursprünglichen Datentabelle beibehalten und lediglich auf Euro umgerechnet. Wie oben erläutert, wurde der Abschreibungszeitraum auf 5 Jahre festgelegt. Die Zinskosten – aus Gründen der Ver-

gleichbarkeit wurde der inzwischen zu hohe Zinssatz von 8 % für die Tabelle 21 und Tabelle 22 beibehalten – ergeben sich aus der Differenz zwischen den Jahreskosten (Zeile 4) und der Abschreibungssumme (Zeile 2). Die Jahreskosten werden nach der Annuitätenformel berechnet, indem der Kapitalwert der Investition mit dem sogenannten Wiedergewinnungsfaktor multipliziert wird.

$$RMZ = NBW * (1 + i)^n * i / (1 + i)^n - 1$$

Darin sind

RMZ	Annuität (Jahreskosten)
NBW	Investitionskosten
i	Zins in Prozent dividiert durch 100
n	Nutzungsdauer in Jahren
$(1+i)^n \times i / (1+i)^n - 1$	Wiedergewinnungsfaktor

Quelle: KUHLMANN, 2007, S. 569

Die ermittelten Jahreskosten werden auf die jeweilige Betriebsgröße in Hektar umgelegt, um daraus dann in Zeile 6 die notwendige Erhöhung des Naturalertrages bis zum Break-Even-Point abzuleiten. Da der Break-Even nicht nur durch eine Ertragssteigerung, sondern auch durch eine entsprechende Betriebsmitteleinsparung erreicht werden kann, sind die dafür notwendigen Reduzierungen des Betriebsmitteleinsatzes für Saatgut, N-Dünger und Herbizide jeweils separat in den Zeilen 8-10 abgebildet und für die Summe der Betriebsmitteleinsparungen in Zeile 11 dargestellt.

Eine wesentliche Erkenntnis dieser Übersicht ist der sehr deutliche Effekt, der durch die zunehmende Betriebsgröße verursacht wird. Während eine durch PF induzierte Ertragssteigerung von 9,1 % (bei 100 Hektar Einsatzfläche) kaum möglich erscheint, ist eine bei den größeren Betriebseinheiten notwendige Ertragserhöhung um 2,3 % bzw. 1,6 % durchaus im Bereich des Möglichen. Die angezeigten Betriebsmitteleinsparungen erscheinen für jedes Betriebsmittel separat unerreichbar, wobei dies natürlich auch vom zuvor praktizierten Betriebsmitteleinsatzniveau abhängt. Ähnlich wie bei den Zahlen der notwendigen Ertragssteigerungen erscheinen die für 400 bzw. 800 Hektar Betriebsfläche notwendigen kumulierten Betriebsmitteleinsparungen von 11,2 % bzw. 7,4 %

realisierbar. Wenn man nun noch berücksichtigt, dass bei einer Kombination der beiden Effekte auf der Kosten- und Leistungsseite die notwendigen prozentualen Ertragssteigerungen und Betriebsmittelreduktionen noch geringer ausfallen müssen, erscheint die PF-Nutzung zumindest bei den 800 Hektar Einsatzfläche und mit Abstrichen auch für die 400 Hektar Betriebsumfang ökonomisch sinnvoll zu sein. Hierbei sollte immer die Ausgangshöhe des Ertrags- und Betriebsmitteleinsatzniveaus berücksichtigt werden.

	Kennzahl	Anbaufläche****			
		Einheit	100 ha	400 ha	800 ha*
1	Investitionskosten in PF	€ / Jahr	38.347	38.347	51.129
2	Abschreibung [5 Jahre]	€ / Jahr	7.669	7.669	10.226
3	Zins [bei 8%]	€ / Jahr	1.940	1.940	2.586
4	Jahreskosten**	€ / Jahr	9.609	9.609	12.812
5	Jahreskosten / ha	€ / ha	96,09	24,02	16,02
6	Notwendige Erhöhung des Naturalertrags bis Break-Even***	%	6,7	1,7	1,1
7	Notwendige Reduktion einzelner variabler Kostenpositionen bis Break-Even				
8	Saatgut	%	95,1	23,8	15,9
9	N-Dünger	%	83,6	20,9	11,1
10	Herbizide	%	117,6	29,4	19,6
11	Summe Saatgut, N-Dünger, Herbizide	%	32,3	8,1	5,4

*Höhere Investitionskosten durch zusätzliche Ausstattung eines zweiten Schleppers

**Ohne Reparatur, Wartung und Arbeitskosten

***Bei gleichem Preisgerüst

****Fruchtartenanteil: WW= 67,2 %, WR=16,7 %, KM=8,8 %, ZR=7,3 %

Tabelle 21: Break-Even-Analyse der PF-Technologie für einen extensiven Marktfruchtbetrieb 2013 (Eigene Berechnungen)

In Tabelle 21 wird von den gleichen Investitionskosten, dem gleichen Zinssatz und dem gleichen betrieblichen Anbauprogramm ausgegangen. Lediglich die zugrunde gelegten Erlöse und Betriebsmittelausgaben werden den neuesten Standarddeckungsbeiträgen für Deutschland für das Wirtschaftsjahr 2011/12 entnommen. In diesem Stichpunktvergleich über 14 Jahre lässt sich erkennen, dass sich die Konstellation für die Einsatzwürdigkeit für die PF-Technologie deutlich günstiger gestaltet. Bedingt durch gestiegene Erträge und eine Erhöhung der Produkt- und Betriebsmittelpreise werden die abzudeckenden Summen der Investitionsausgaben für PF durch bereits kleinere prozentuale Veränderungen ausgeglichen. Erstaunlich hierbei ist, dass sich die Veränderungen der zum Break-Even notwendigen Ertragssteigerungen und Betriebsmitteleinsparungen in einer fast

identischen Größenordnung bewegen. Bei beiden Positionen (Zeilen 6 und 11) verringern sich die Prozentzahlen relativ um ca. 27 - 28 %. Vor allem die neu ermittelten Zahlen für 400 und 800 Hektar Einsatzfläche sind sowohl im Ertragssteigerungsbereich mit 1,7 bzw. 1,1 % als auch in den benötigten Betriebsmitteleinsparungen von 8,1 bzw. 5,4 % durchaus realisierbar.

	Kennzahl	Anbaufläche****			
		Einheit	100 ha	400 ha	800 ha*
1	Investitionskosten in PF	€ / Jahr	38.347	38.347	51.129
2	Abschreibung [5 Jahre]	€ / Jahr	7.669	7.669	10.226
3	Zins [bei 8%]	€ / Jahr	1.940	1.940	2.586
4	Jahreskosten**	€ / Jahr	9.609	9.609	12.812
5	Jahreskosten / ha	€ / ha	96,09	24,02	16,02
6	Notwendige Erhöhung des Naturalertrags bis Break-Even***	%	5,3	1,3	0,9
7	Notwendige Reduktion einzelner variabler Kostenpositionen bis Break-Even				
8	Saatgut	%	62,4	15,6	10,4
9	N-Dünger	%	89,2	22,3	14,9
10	Herbizide	%	78,4	19,6	13,1
11	Summe Saatgut, N-Dünger, Herbizide	%	25,0	6,3	4,2

*Höhere Investitionskosten durch zusätzliche Ausstattung eines zweiten Schleppers

**Ohne Reparatur, Wartung und Arbeitskosten

***Bei gleichem Preisgerüst

****Fruchtartenanteil: WW= 57,8 %, WR=3,7 %, KM=4,4 %, ZR=29,2 %, K=4,9 %

Tabelle 22: Break-Even-Analyse der PF-Technologie für einen intensiven Marktfruchtbetrieb 2013 (Eigene Berechnungen)

In Tabelle 22 werden die Auswirkungen einer Erhöhung des Anteils von Intensivkulturen am betrieblichen Produktionsprogramm dargestellt. Der dafür konzipierte intensive Marktfruchtbeispielbetrieb weist im Verhältnis zum Referenzbetrieb in Tabelle 21 einen deutlich höheren Anteil an Zuckerrüben auf, der zu Lasten des Winterweizen- und Winterrapsanbaus geht. Zudem werden Kartoffeln mit ins Produktionsprogramm genommen. Die Ausweitung des Anteils dieser Ackerfrüchte mit hohen Erlösen und hohen Betriebsmittelausgaben am betrieblichen Anbauprogramm sorgt für eine weitere Verringerung der notwendigen prozentualen Ertragssteigerungen bzw. Betriebsmitteleinsparungen zum Erreichen des Break-Even um ca. ein Fünftel im Vergleich zum extensiven Marktfruchtbetrieb in Tabelle 21. Ein Vergleich der beiden im Produktionsprogramm identischen intensiven Marktfruchtbetriebe von 1999 (hier nicht abgebildet) und



2013 (siehe Tabelle 22) ergibt nur eine geringfügige Verbesserung der ökonomischen Konstellation für den PF-Einsatz um ca. ein Zehntel, also deutlich weniger als bei dem Vergleich der beiden extensiven Marktfruchtbetriebe (Verbesserung um ein Viertel). Zu erklären ist dies mit einer Verschlechterung des Zuckerrübenerlöses durch einen deutlich gesunkenen Preis und einer Erhöhung des Erlöses bei Raps, der zu Gunsten der Zuckerrüben im intensiven Marktfruchtbetrieb im Anbauvolumen verringert worden ist.

	Kennzahl	Anbaufläche****			
		Einheit	100 ha	400 ha	800 ha*
1	Investitionskosten in PF	€ / Jahr	29.650	29.650	35.309
2	Abschreibung [5 Jahre]	€ / Jahr	5.930	5.930	7.061
3	Zins [bei 6%]	€ / Jahr	1.112	1.112	1.325
4	Jahreskosten	€ / Jahr	7.042	7.042	8.386
5	Jahreskosten / ha	€ / ha	70,42	17,61	10,48
6	Zusätzliche Arbeitskosten durch PF-Anwendung	€ / ha	2,40	2,40	2,40
7	Jahreskosten / ha inkl. Arbeitskosten	€ / ha	72,82	20,01	12,88
8	Notwendige Erhöhung des Naturalertrages bis Break-Even	%	5,1	1,4	0,9
9	Notwendige Reduktion einzelner variabler Kostenpositionen bis Break-Even				
10	Saatgut	%	72,1	19,8	12,8
11	N-Dünger	%	63,4	17,4	8,9
12	Herbizide	%	89,1	24,5	15,8
13	Summe Saatgut, N-Dünger, Herbizide	%	24,5	6,7	4,3

Neues Preisgerüst für Investitionen in PF-Technologie, aktualisierter Zinssatz von 6 % und Berücksichtigung von durch PF verursachten allgemeinen Arbeitszeitaufwand

*Höhere Investitionskosten durch zusätzliche Ausstattung eines zweiten Schleppers

**Ohne Reparatur, Wartung und Arbeitskosten

***Bei gleichem Preisgerüst

****Fruchtartenanteil: WW= 67,2 %, WR=16,7 %, KM=8,8 %, ZR=7,3 %

Tabelle 23: Break-Even-Analyse der PF-Technologie für einen extensiven Marktfruchtbetrieb 2013 mit verändertem Kostengerüst (Eigene Berechnungen)

In der letzten Übersicht dieser Vergleichsreihe werden nun die zuvor konstant gehaltenen Investitionskosten des PF bei identischem technischem Umfang den aktuellen Kostenstrukturen angepasst. Dabei wird deutlich, dass die von der landwirtschaftlichen Praxis erhoffte deutliche Preissenkung der PF-Technologie (REICHHARDT / JÜRGENS, 2008) bisher in einem Umfang von ca. 22 % erfolgt ist. Zudem wurde in Tabelle 23 der Zinssatz an heutige Finanzmarktgegebenheiten

angenähert. Die dritte Änderung im Vergleich zu den Kostenstrukturen der Ausgangstabelle betrifft die Berücksichtigung von Arbeitskosten, die speziell durch den Einsatz der PF-Technologie entstehen (siehe Kapitel 4.4.3). In diesem Beispiel ist das Anbauprogramm des extensiven Marktfruchtbetriebes aus Tabelle 21 zugrunde gelegt. Bedingt durch die gefallenen PF-Investitionskosten und dem niedrigeren Zins werden die Kostensteigerungseffekte durch die durch PF angesetzten Arbeitskosten mehr als überkompensiert, und die notwendigen prozentualen Ertragssteigerungen verringern sich relativ um ca. 18 % – 24 % und bewegen sich in etwa auf dem Niveau des intensiven Marktfruchtbetriebes mit altem PF-Investitionskostenvolumen.

Zur Verdeutlichung aller Ergebnisse der vier Break-Even-Beispiele wird in Abbildung 35 und Abbildung 36 ein graphischer Vergleich der ermittelten Zahlen gegeben.

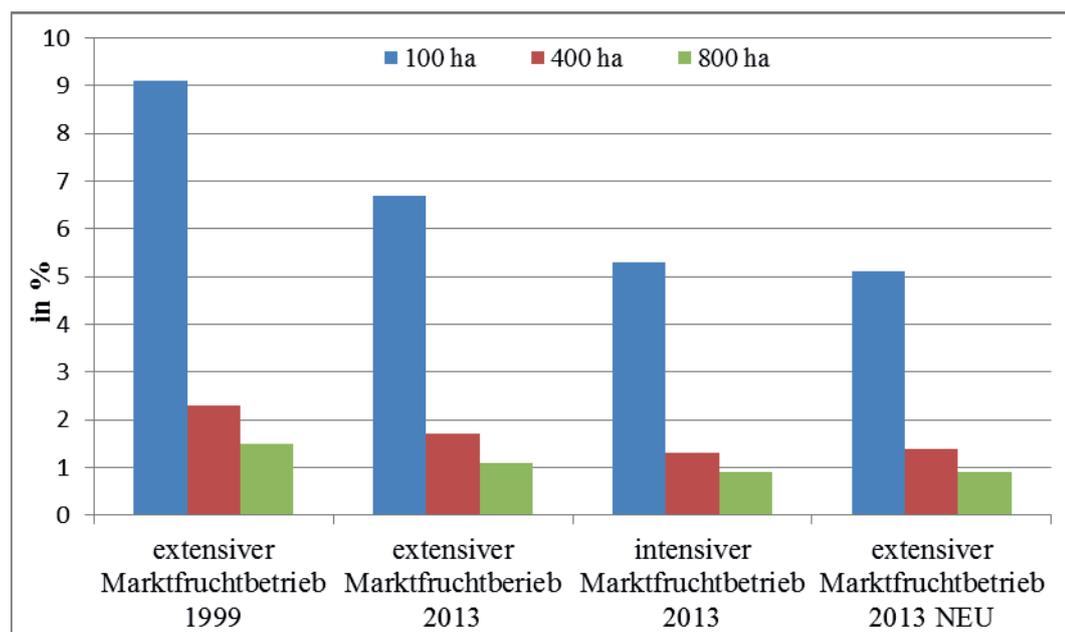


Abbildung 35: Notwendige Erhöhung des Naturalertrages bis Break-Even (WAGNER, 1999, S. 56; Eigene Berechnungen)

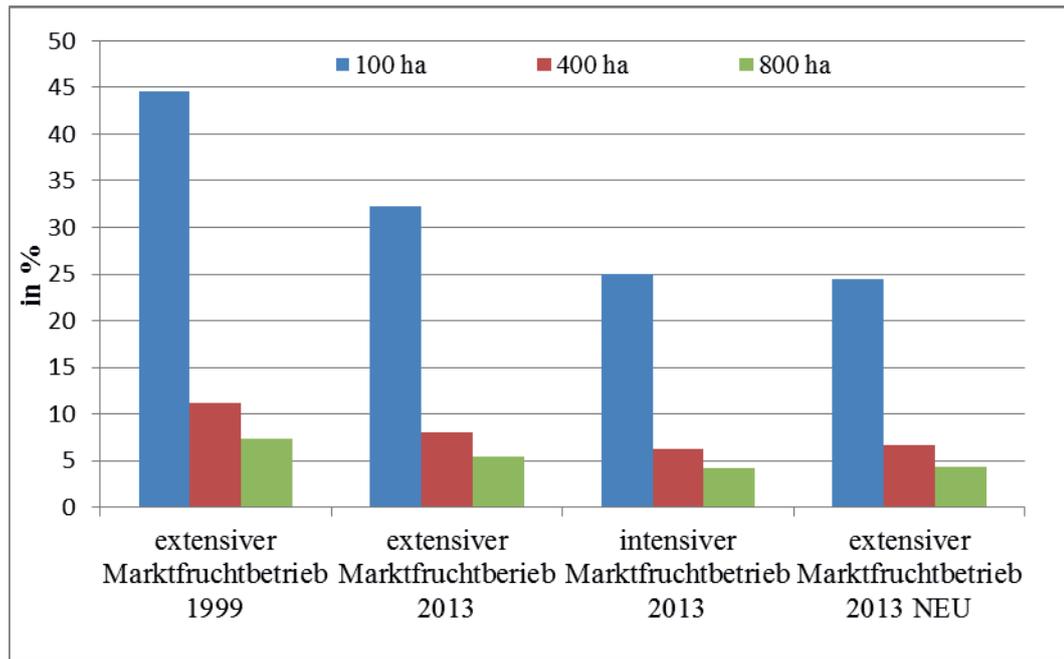


Abbildung 36: Notwendige Reduktion der kumulierten Betriebsmittelkosten bis Break-Even (WAGNER, 1999, S. 56; Eigene Berechnungen)

4.4.5 Rentabilität einzelner Precision Farming-Verfahren

Im Kapitel 4.3 wurden die pflanzenbaulichen Effekte der einzelnen Verfahren des PF vorgestellt. An dieser Stelle sollen nun die ökonomischen Effekte der teilflächenspezifischen Bestandesmaßnahmen beschrieben und diskutiert werden. Aus der Zeit des weltweiten Beginns der PF-Anwendungen um das Jahr 2000 herum wurde eine Vielzahl von Studien zur Untersuchung von ökonomischen Auswirkungen des PF veröffentlicht. Einen Überblick und eine Zusammenfassung darüber geben LAMBERT und LOWENBERG-DEBOER in ihrem Precision Agriculture Profitability Review aus dem Jahre 2000. In dieser Metastudie werden 108 wissenschaftliche Studien zu den ökonomischen Effekten des PF ausgewertet. An 62 dieser 108 Studien waren Ökonomen beteiligt. In 73 % dieser 62 Studien wird von positiven, in 11 % von gemischten und in 16 % von negativen ökonomischen Effekten berichtet (LAMBERT / LOWENBERG-DEBOER, 2000).

Ein weiterer Überblick mit dem Schwerpunkt auf in Deutschland durchgeführten Versuchen gibt WAGNER 2004 (vgl. Tabelle 24).

Autor	Untersuchungsgegenstand	Ergebnis
NORDMEYER et al. (Deutschland, 1997)	Teilflächenspezifischer Pflanzenschutz in Getreide	Bis zu 80 % der Fläche konnte unbehandelt bleiben
GERHARDS (Deutschland, 1997)	Teilflächenspezifischer Pflanzenschutz in Getreide	40-50 % weniger Herbizideinsatz
TIMMERMANN et al. (Deutschland, 2003)	Teilflächenspezifischer Pflanzenschutz in Getreide	29-36 €/ha (50-70 %) weniger Herbizideinsatz
JÄGER / MERKEL (Deutschland, 2003)	Teilflächenspezifische Aussaat zu Weizen und Gerste	13 % weniger Saatgut-aufwand bei Weizen und Gerste, 4 bzw. 2 dt/ha Mehrertrag bei Weizen bzw. Gerste
SWINTON / AHMAD (USA, 1996)	Teilflächenspezifische N-Düngung in Zuckerrüben	74 \$/acre (~185 \$/ha) Ertrags- / Qualitätsvorteile und Einsparpotenziale
ØSTERGAARD (Dänemark, 1997)	Teilflächenspezifische N-, P-, K- und Kalk-Düngung in Getreide	40-50 \$/ha Ertragsvorteile und Einsparpotenziale
SCHMERLER / JÜRSCHIK (Deutschland, 1997b)	Teilflächenspezifische N-Düngung in Getreide	Bis 3,9 dt/ha Mehrertrag und im Durchschnitt 25 kg N/ha weniger bei heterogenen Schlägen
LUDOWICY et al. (Deutschland, 2002)	Teilflächenspezifische N-Düngung in Weizen „Sensor-Ansatz“	Durchschnittlich 1,7 dt/ha (2,2 %) höhere Erträge und 0,14 % mehr Protein
WELSH et al. (England, 2003)	Teilflächenspezifische N-Düngung in Weizen	Keine signifikanten Unterschiede durch „Mapping“-Ansatz
LISSO (Deutschland, 2003)	Teilflächenspezifische Aussaat / Pflanzenschutz / Düngung in Weizen („Mapping“-Ansatz)	6 / 13 / 15 €/ha weniger Kosten für Aussaat / Pflanzenschutz / Düngung bei gleichzeitig ca. 13 €/ha Mehrerlös
SCHMERLER / JÜRSCHIK (Deutschland, 1997a)	Kostenkalkulation für GPS-Einsatz (Technik + Arbeit) für 2.000 ha-Betrieb	Mehrkosten von 35-40 €/ha und Jahr
HARRIS (England, 1997)	Kostenkalkulation für GPS-Einsatz (Technik) für 320 ha-Betrieb	Mehrkosten von ca. 30 €/ha und Jahr

Tabelle 24: Aussagen verschiedener Studien zur Wirtschaftlichkeit von PF (Wagner, 2004, S. 6-36)

Nachfolgend werden detaillierte Ergebnisse aus neueren Untersuchungen zu ökonomischen Effekten des PF vorgestellt.

PF-Aussaat

Im Bereich der teilflächenspezifischen Aussaat gibt es wenige Aussagen zu den ökonomischen Effekten. OSTHEIM bezifferte den wirtschaftlichen Vorteil einer standortoptimierten Aussaat auf 36,00 DM pro Hektar (=18,41 € pro Hektar) (OSTHEIM, 2000). SCHNEIDER dagegen konnte in seinen Versuchen zur teilschlag-spezifischen Aussaat in den Jahren 2006 und 2007 keine signifikanten Ertragsvorteile feststellen, ermittelte hierbei aber einen zusätzlichen Lohnaufwand von 0,82-2,63 € pro Hektar. Die Arbeitserledigungskosten für die teilflächenspezifische Aussaat bezifferte er in Abhängigkeit vom jährlichen Einsatzumfang auf 17,15 € pro Hektar (bei 100 Hektar Einsatzfläche) bis hinunter auf 3,53 € pro Hektar (bei 2.000 Hektar Einsatzfläche) (SCHNEIDER, 2011, S. 101). Diese bei großen Einsatzumfängen geringen Mehrkosten würden schon bei kleinen Saatguteinsparungen von wenigen Prozent abgedeckt (SCHNEIDER, 2011 S. 102). Nach den Ergebnissen von JÄGER und MERKEL sind diese Vorgaben durchaus zu realisieren (JÄGER / MERKEL, 2003, S. 184).

PF-Grunddüngung

SCHNEIDER und WAGNER ermittelten 2008 jährliche Kosten der differenzierten Bodenbeprobung und der Grundnährstoffapplikation in Abhängigkeit der Größe des Beprobungsrasters. Die Ergebnisse sind in Tabelle 25 dargestellt.

	10-ha Raster ^{a)}	5-ha-Raster	3-ha-Raster	1-ha-Raster
Bodenbeprobung ^{b)} (€/ha)	2,60	+ 2,20	+ 3,20	+ 6,90
Nährstoffanalyse ^{b)} (€/ha)	0,75	+ 0,75	+ 1,75	+ 6,75
Differenzierte GD Planung ^{b)} (€/ha)	0	+ 2,00		
Mineraldünger streuen ^{c)} (€/ha)	4,30	+ 12,90		
zusätzliche Kosten, jährlich ^{d)} (€/ha)	0	+ 4,72	+ 5,32	+ 7,95

^{a)} flächeneinheitliche Vergleichsbeprobung
^{b)} nach Angaben von Dienstleistern
^{c)} Annahme: insgesamt viermalige Überfahrt (mit jedem Nährstoff einzeln) bei differenzierter Applikation notwendig; berechnet nach KTBL Faustzahlen Landwirtschaft, S. 110 – 111, „Mineraldünger transportieren, beladen und streuen“
^{d)} jährliche Zusatzkosten der differenzierten Grundnährstoffapplikation, berechnet nach Annuitätenmethode, Abschreibung 4 Jahre, Zinssatz 8 % p.a.

Tabelle 25: Jährliche Kosten der differenzierten Bodenbeprobung und Grundnährstoffapplikation bei einem 4-jährigen Planungszeitraum (SCHNEIDER / WAGNER, 2008, S. 424)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Beprobungsdichte ein entscheidender Kostenfaktor der teilflächenspezifischen Grunddüngung darstellt. Andererseits



steigt mit zunehmender Kleinräumigkeit der Probennahme der Informationsgewinn über die tatsächlich vorliegenden Versorgungszustände mit Grundnährstoffen an (vgl. Kapitel 4.3.3 dieser Arbeit). Die Aussagen zu den Leistungseffekten der teilflächenspezifischen Grunddüngung sind uneinheitlich. Während BROZIO und GEBBERS darüber berichten, dass eine Ertragswirkung nur bei geringen Bodennährstoffgehalten an P, K, Mg und Ca, und dann auch nur in mehrjährigen Feldversuchen nachzuweisen seien (BROZIO / GEBBERS, 2004, Kap. 4, S. 177), ermittelte SCHNEIDER einen Leistungseffekt der teilflächenspezifischen Grunddüngung von 12,70 € pro Hektar (SCHNEIDER, 2011, S. 122). KILIAN und VOGEL nennen sogar ein DB-Steigerungspotenzial für die teilflächenspezifische Grunddüngung von 63 € pro Hektar (KILIAN / VOGEL, 2004, Kap. 5, S. 41).

PF-N-Düngung

Die teilflächenspezifische N-Düngung ist das PF-Verfahren, zu dem die meisten wissenschaftlichen Untersuchungen existieren. Zu dieser Thematik der ökonomischen Effekte der teilschlagspezifischen N-Düngung gibt es zahlreiche Studien, von denen eine kleine Auswahl nachfolgend zitiert werden soll.

Auch zu diesem Teilgebiet des PF gibt es verschiedenartige Aussagen. Während GANDORFER bei seinen Untersuchungen zu der Erkenntnis kommt, dass die teilschlagspezifische N-Düngung nur ein begrenztes ökonomisches Potenzial besitzt und allenfalls nennenswerte Umwelteffekte in Form einer Verringerung des N-Bilanzüberschusses zu erzielen seien (GANDORFER, 2006, S. 139-140), ermittelte SCHNEIDER positive ökonomische Effekte bei der N-Sensoranwendung von 14,64 € pro Hektar bzw. 23,53 € pro Hektar bei der Nutzung künstlicher neuronaler Netze in der N-Düngung (SCHNEIDER, 2011, S. 122). KILIAN und VOGEL berichten gar von einem DB-Steigerungspotenzial von 50 € pro Hektar für die teilflächenspezifische N-Düngung (KILIAN / VOGEL, 2004, Kap. 5, S. 46).

PF-Pflanzenschutz

Es gab bereits Ende der 90-er Jahre Versuchsergebnisse zum teilflächenspezifischen Pflanzenschutz, die von pflanzenbaulichen Effekten des 40-80 %-igen Einsparens der Herbizidmengen im Vergleich zur flächeneinheitlichen Ausbringung berichten (NORDMEYER et al., 1997; GERHARDS, 1997). Wissenschaftliche Aussagen zu konkreten ökonomischen Effekten eines teilflächenspezifischen Pflanzenschutzes gibt es nur wenige. TIMMERMANN ermittelt bei seinen Unter-

suchungen ein Potenzial von 8-50 € pro Hektar für die standortspezifische Herbizidausbringung. Die Untersuchungen am ATB Bornin ergaben hingegen nur ein Potenzial von 10-15 € pro Hektar (KILIAN, 2004, S. 6-15). Das Teilgebiet des teilflächenspezifischen Pflanzenschutzes, und hierin besonders die ortsspezifische Ausbringung von Herbiziden und Fungiziden, beinhaltet innerhalb aller teilflächenspezifischen Anwendungen mit das größte ökonomische Potenzial. Allerdings besteht noch großer Forschungsbedarf hinsichtlich der langfristigen Folgen einer verminderten Herbizidausbringung auf die Unkrautpopulation und möglicher Resistenzbildungen sowie bezüglich der präzisen und kostengünstigen Erfassung von Unkraut- und Schaderregerverteilungen.

PF-Gesamtbetrieblich

Es ist zu erwarten, dass sich hinsichtlich der Kosten der einzelnen eingesetzten PF-Technologien Degressionseffekte einstellen, die zu deutlichen Kostenverringern führen, wenn mehr als eine differenzierende Technologie verwendet wird (SCHNEIDER / WAGNER, 2008, S. 428). Bedingt durch die Tatsache, dass eine noch größere Informationsbasis für die Entscheidungen in der kleinräumigen Bestandesführung genutzt wird, erscheint es durchaus möglich, „dass die Gesamteffekte bei Anwendung mehrerer Technologien gleichzeitig nicht aus der Addition der einzelnen Effekte resultieren, sondern multiplikativ miteinander verbunden sind“ (SCHNEIDER / WAGNER, 2008, S. 431).

4.4.6 Fazit zur Ökonomie des Precision Farmings

Der grundlegende Tenor in den wissenschaftlichen Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit des PF ist von positiver Natur, allerdings mit zahlreichen Einschränkungen verbunden. Während HASERT und JÜRSCHIK PF uneingeschränkt zur Einführung in die Praxis empfehlen und ein Potenzial an Gewinnsteigerungen von bis zu 70 € pro Hektar sehen (HASERT / JÜRSCHIK, 2003, S. 147), klingt die diesbezügliche Einschätzung von KILIAN und VOGEL differenzierter. Auch sie halten eine Gewinnsteigerung durch den Einsatz der teilflächenspezifischen Technologie für möglich, geben aber zu bedenken, dass nicht jeder Schlag für PF geeignet sei. Als Indikator zur Bemessung der PF-Tauglichkeit einer Fläche nennen sie den Variationskoeffizienten des Ertrages. Aus ihren Ausführungen ergibt sich die Konsequenz, dass für jeden Einzelfall eine sorgfältige betriebswirtschaftliche Analyse vorzunehmen ist (KILIAN / VOGEL, 2004, Kap. 5, S. 40). Zu

einem ähnlichen Fazit kommt WAGNER 1999, als er ausführt, dass „eine abschließende Aussage über die Vorzüglichkeit des Precision Farming aus ökonomisch-einzelbetrieblicher Sicht [...] auf Basis der vorgestellten Überlegungen (siehe Kapitel 4.4.3) und Untersuchungen nicht getroffen werden kann“ (WAGNER, 1999, S. 61). Als Argumente für die Einführung der PF-Bewirtschaftung führt WAGNER positive Nebeneffekte des PF wie eine Verringerung der Umweltbelastung, ein verbessertes Betriebs- und Flottenmanagement sowie eine erleichterte Dokumentation der Betriebsabläufe an (WAGNER, 1999, S. 62). Einen Blick in die Zukunft werfen SCHNEIDER und WAGNER, indem sie erwarten, dass für die Rentabilität des PF nicht mehr die Kosten der Datenerfassung und der Maßnahmendurchführung, sondern die Existenz und Qualität von standortangepassten Entscheidungsregeln maßgeblich sind (SCHNEIDER / WAGNER, 2008).

Eine deutlich skeptischere Meinung zum Potenzial des PF in der landwirtschaftlichen Praxis lassen KUHLMANN und NEUMANN in ihrer Bewertung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu Getreide erkennen. In ihrer Abhandlung entwickeln sie ein entscheidungstheoretisches Modell, das verschiedene schlag-einheitliche und teilflächenspezifische Bewirtschaftungsvarianten hinsichtlich dreier Entscheidungskriterien – Erwartungswert des DB, Standardabweichung des DB, Erwartungswert des N-Überschusses – miteinander vergleicht. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass „der Spielraum für wirtschaftliche und technische Effizienzsteigerungen der N-Düngung durch eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung im Rahmen von Offline-Düngungsstrategien eng ist“ (KUHLMANN / NEUMANN, 2011, S. 259) und beziffern den Unterschied zwischen der „besten“ schlag-einheitlichen und der „besten“ teilflächenspezifischen Bewirtschaftungsstrategie auf dem skizzierten Beispielschlag auf lediglich 20,55 € pro Hektar, der zudem noch die zusätzlichen Kosten der PF-Technologie abdecken müsse (KUHLMANN / NEUMANN, 2011, S. 260).

Allen Beiträgen ist gemein, dass PF ein gewisses ökonomisches Potenzial zugestanden wird, dass aber noch gewaltige Forschungsanstrengungen vor allem hinsichtlich der zugrundeliegenden Entscheidungsregeln und pflanzenbaulichen Algorithmen unternommen werden müssen, um dieses Potenzial auch ausschöpfen zu können.

4.5 Ökologie des Precision Farmings

Eine nicht standortangepasste Ausbringung von Betriebsmitteln kann zu unerwünschten Auswirkungen auf die Umwelt führen. Als mögliche negative Begleiterscheinungen einer intensiven Landbewirtschaftung werden die Verunreinigung des Grundwassers mit Nitraten und Rückständen von Pflanzenschutzmitteln, die Eutrophierung von Oberflächengewässern und der Rückgang der pflanzlichen und tierischen Artenvielfalt genannt (RÖSCH et al., 2005, S. 129). In diesem Zusammenhang werden große Hoffnungen und Erwartungen an die Technologie der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung geknüpft (WERNER, 2004, S. 1-4). Es zeigt sich aber, dass die Bewertung der durch PF möglicherweise erzielbaren Umweltentlastungseffekte auf größere Schwierigkeiten stößt. So sind einige positive ökologische Auswirkungen stark witterungs- und standortabhängig und lassen sich direkt – wenn überhaupt – erst über einen längeren Zeitraum den teilflächenspezifischen Bewirtschaftungsmaßnahmen zuordnen. Die Höhe der erzielten Effekte ist zudem stark von dem zum Vergleich herangezogenen Referenzsystem abhängig (RÖSCH et al., 2005, S. 130-131).

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird der Frage nachgegangen, inwieweit PF einen ökologischen Beitrag in den Themenfeldern „Differenzierte Landnutzung“, „Nachhaltigkeit“ und „Umweltentlastungspotenzial“ leisten kann.

Differenzierte Landnutzung

Das Konzept der differenzierten Landnutzung wurde in den 1970er Jahren entwickelt und geht auf Wolfgang HABER zurück. Er formulierte dieses Konzept, um den Dualismus zwischen erwünschter Homogenisierung der Flächen der Landbewirtschafteter und naturgegebener oder nutzungsbedingter Heterogenität der standörtlichen Bedingungen aufzulösen (HABER, 2002, S. S 356). HABER unterteilt in seiner Theorie die Umwelt – dabei auf die Ideen von ODUM zurückgreifend – in produktive und protektive Umweltsysteme. Dabei stehen sich produktive, vom Menschen geschaffene und auf maximale Nettoproduktion ausgerichtete Ökosysteme und protektive, naturgeschaffene, sich selbst erhaltende Ökosysteme konkurrierend gegenüber. Zur Lösung dieses Gegensatzes schlägt HABER die differenzierte Landnutzung vor, bei der „die Nutzungen und Bewirtschaftungseingriffe soweit möglich differenziert, das heißt räumlich wie zeitlich auf nicht zu große Einheiten aufgeteilt werden“ (HABER, 2002, S. 359). HABER

erkennt im PF eine Technologie, die „grundsätzlich dieselben Ziele wie die differenzierte Landnutzung“ verfolgt. Mit PF werde erreicht, „dass auf großen Schlägen die Ausbringung von Dünge- und Pflanzenbehandlungsmitteln je nach Boden- und Pflanzenbedarf differenziert und sogar die Bodenbearbeitung jeweils der Bodensituation angepasst werden kann“ (HABER, 2002, S. 361). Aus diesen Gründen befürwortet er die Einführung der standortspezifischen Landbewirtschaftung, denn sie sei einer flächendeckenden Intensivierung vorzuziehen (HABER, 2002, S. 361), was er an anderer Stelle noch deutlicher zum Ausdruck bringt: „Nicht allgemeine Extensivierung, sondern differenzierte Intensivierung heißt der Weg“ (HABER, 1997, S. 24). Er begründet dies damit, dass z. B. Getreide auch aus ökologischen Gründen dort erzeugt werden sollte, wo es standortmäßig am effizientesten möglich sei (HABER, 1997, S. 26). Zur Problematik der großen Schlaggrößen im Konzept der differenzierten Landnutzung sei an dieser Stelle auf die Forschungen von ROTHMUND (ROTHMUND, 2004, S. 4.3-7 ff.) zur virtuellen Gewannebewirtschaftung verwiesen.

Nachhaltigkeit

Seit dem Bericht der Brundtland-Kommission 1986 ist der Begriff „Nachhaltigkeit“ zum politischen Leitbild geworden. Der ursprünglich auf Carl von Carlowitz und sein Werk „Sylvicultura oeconomica“ von 1713 zurückgehende Begriff wurde von HARWOOD für den Bereich der Landwirtschaft so definiert: „Nachhaltige Landwirtschaft ist eine Landwirtschaft, die sich ewig weiterentwickeln kann in Richtung auf die größtmögliche Nutzung für die Menschheit, eine effiziente Nutzung der Ressourcen für ein Gleichgewicht mit der Umwelt zum Nutzen der Menschen und der meisten anderen Spezies“ (CHRISTEN, 1996, S. 73).

Die Grundidee des PF, die Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen noch kleinräumiger an die tatsächlichen Standortvoraussetzungen anzupassen, entspricht genau der Intention des Nachhaltigkeitsgedankens, ein biologisches Produktionssystem nur genau so stark zu nutzen, dass seine Leistungsfähigkeit erhalten bleibt. BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER verweisen in ihrem Aufsatz „Precision Agriculture and Sustainability“ darauf, dass Precision Agriculture ein Teil eines umweltfreundlichen, ökonomisch durchführbaren Systems sein könnte (BONGIOVANNI / LOWENBERG-DEBOER, 2004, S. 383).

Umweltentlastungspotenzial

Untersuchungen zu den ökologischen Effekten des PF sind vor allem im Bereich der Verringerung des Betriebsmitteleinsatzes und der Berücksichtigung ökologisch sensibler Zonen und deren Artenvielfalt durchgeführt worden. JÖRNS et al. konnten im Rahmen des preagro II-Projektes keine statistisch eindeutig nachweisbaren Auswirkungen der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung auf die untersuchten Laufkäferpopulationen und die Segetalvegetation ermitteln, da sich herausstellte, dass den größten Einflussfaktor auf Qualität und Quantität der Artenvielfalt nicht die Bewirtschaftungsweise, sondern die natürlichen Standortunterschiede darstellen (JÖRNS et al., 2008, S. 485). In einer weiteren Versuchsanordnung wurde die Anlage von Defektflächen in einem Weizenbestand und ihre Auswirkung auf die Feldlerchenpopulation untersucht. Es zeigte sich, dass die Feldlerchenpopulation in dem Weizenbestand mit Defektflächen nicht höher war als in der Referenzfläche ohne „Lerchenfenster“. Erklärt wurde dies mit einer geringen Bestandesdichte und breiten Fahrspuren der Versuchsfäche (JÖRNS et al., 2008, S. 485). REICHE und RINKER untersuchten innerhalb des preagro I-Projektes die Auswirkungen einer teilflächenspezifischen N-Düngung auf den Landschafts- und Stoffhaushalt. Sie fanden heraus, dass die N-Effizienz sich bei einer kleinräumigen N-Düngung geringfügig um 2 – 8 kg N pro Hektar verbessert und sich die N-Auswaschung um wenige Prozent verringert. Einen deutlich verbesserten ökologischen Effekt konnten sie bei einer vorangegangenen Reduzierung des N-Düngeniveaus um 25 % und einer danach erfolgten teilflächenspezifischen N-Düngung feststellen. Hierbei verringerten sich die N-Auswaschungsverluste um 14 – 17 % (REICHE / RINKER, 2004, Kap. 5, S. 87).

Innerhalb des PF-Komplexes werden der teilflächenspezifischen Ausbringung von Stickstoff und Pflanzenschutzmitteln die größten ökologischen Potenziale zugeschrieben (RÖSCH et al., 2005, S. 131-135).

4.6 Precision Farming in der landwirtschaftlichen Praxis

4.6.1 Einstiegsmuster und Hemmnisse bei der Praxiseinführung von Precision Farming

Die im Rahmen einer wissenschaftlichen Untersuchung in den Jahren 2001-2007 gewonnenen Umfrageergebnisse auf DLG-Ausstellungen (Agritechnica, DLG-

Feldtage) deuten zwar auf eine leicht steigende Verbreitung der PF-Technologie in der Praxis hin – so stieg der Anteil der PF-Nutzer an der Gesamtheit der bei der Agritechnica interviewten Landwirte von 6,65 % (2001) über 7,37 % (2003) und 7,95 % (2005) auf schließlich 9,33 % (2007) (REICHHARDT / JÜRGENS, 2008, S. 583) – jedoch steht eine Mehrheit der deutschen Landwirte dieser Technik skeptisch gegenüber (REICHHARDT / JÜRGENS, 2008, S. 603). Die Gründe für diese abwartende Haltung sind vielfältig. Die am häufigsten genannten Gründe sind in diesem Zusammenhang der hohe Kostenaufwand der PF-Technologie und die zu geringe Flächengröße des eigenen Betriebes. Des Weiteren werden die Praxis-tauglichkeit und der finanzielle Nutzen der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung angezweifelt. Hinzu kommt die Klage darüber, dass die Technik zu kompliziert in der Handhabung sei (REICHHARDT / JÜRGENS, 2008, S. 590).

Demgegenüber stehen mehrere Motivationsgründe, die Landwirte dazu veranlassen, in die Präzisionslandwirtschaft einzusteigen. Neben dem Wunsch nach einer besseren Kenntnis der kleinräumigen Gegebenheiten der eigenen Flächen sind es vor allem ökonomische Faktoren wie die Erwartung finanzieller Vorteile und hier im Besonderen eine erhoffte Kostenreduzierung, die die interviewten PF-Nutzer in den Umfragen angaben (REICHHARDT / JÜRGENS, 2008, S. 587). Dies deckt sich mit den Angaben von DABERKOW und MCBRIDE, die die Profitabilität der PF-Technologie als wesentlichsten Einstiegsfaktor für Landwirte identifizierten (DABERKOW / MCBRIDE, 2003, S. 174). Auch SWINTON und LOWENBERG-DEBOER heben hervor, dass ein Anstieg der landwirtschaftlichen Faktor- und/oder Produktpreise einen Anreiz zur Einführung der PF-Technologie bietet (SWINTON / LOWENBERG-DEBOER, 2001, S. 560). Auch wenn die beiden Autoren von uneinheitlichen Mustern der Einführung der PF-Maßnahmen sprechen, konnten SCHIMMELPFENNIG und EBEL in ihrer auf Daten des Agricultural Resource Management Survey (ARMS) bestehenden Untersuchungen ein typisches, dreistufiges Einstiegsmuster herausarbeiten, nach dem oftmals die schrittweise Übernahme teilflächenspezifischer Anwendungen in die Betriebsabläufe vollzogen wird (SCHIMMELPFENNIG / EBEL, 2011, S. 8-9):

1. Sammlung von Ertragsinformationen
2. Sammlung von Informationen zu Flächencharakteristika

3. Zusammenführung der Flächen- und Ertragsinformationen zu einer standortspezifischen Applikation

Ein ähnliches Akzeptanzmuster bei der Einstiegsreihenfolge ermittelten auch REICHHARDT und JÜRGENS für die deutsche Landwirtschaft, in der die PF-Historie der einzelnen Betriebe zumeist mit einer GPS-Flächenvermessung und einer Ertragskartierung beginnt, wobei in jüngster Vergangenheit oft ein Parallelfahrssystem den ersten Berührungspunkt mit der GPS-Technologie bildet. Der Ertragskartierung schließt sich häufig keine weitere Verwendung der gesammelten Informationen durch eine teilflächenspezifische Applikation an, weil große Schwierigkeiten bei der Analyse von Informationen, vor allem der Ertragskarten, bestehen (REICHHARDT / JÜRGENS, 2008, S. 587-588).

4.6.2 Verbreitung einzelner Precision Farming-Verfahren

Die oben gemachten Aussagen werden in der Abbildung 37 verdeutlicht, in der die prozentuale Häufigkeit der PF-Methoden dargestellt wird, welche von den interviewten PF-Nutzern der Umfrage eingesetzt werden. Klar zu erkennen ist die Dominanz der erfassenden PF-Methoden, wie GPS-Flächenvermessung und Ertragskartierung, gegenüber den anwendenden PF-Methoden der teilflächenspezifischen Betriebsmittelapplikationen.

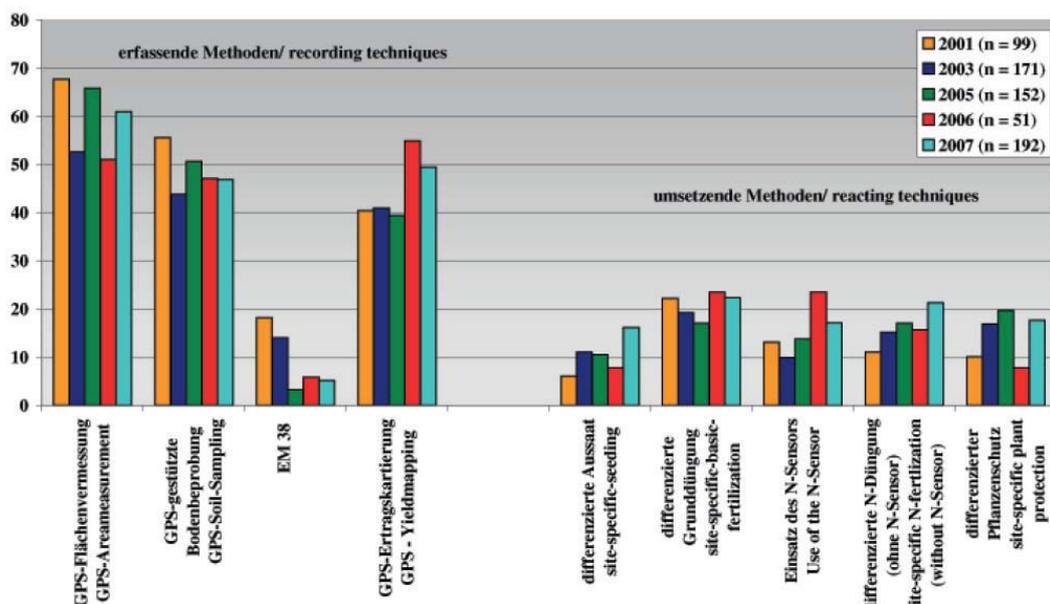


Abbildung 37: Von den PF-Nutzern angewandte PF-Methoden (REICHHARDT / JÜRGENS, 2008, S. 588)



Auf ähnliche Ergebnisse verweist VANACHT in seiner Darstellung (siehe Abbildung 38) der verwendeten PF-Methoden der US-amerikanischen Landwirte, die sich im Unterschied zur Abbildung 37 allerdings auf die Gesamtheit aller Landwirte bezieht. Vor diesem Hintergrund ist auf den hohen Anteil der Verbreitung der PF-Technologie in den USA im Vergleich zur deutschen Landwirtschaft hinzuweisen.

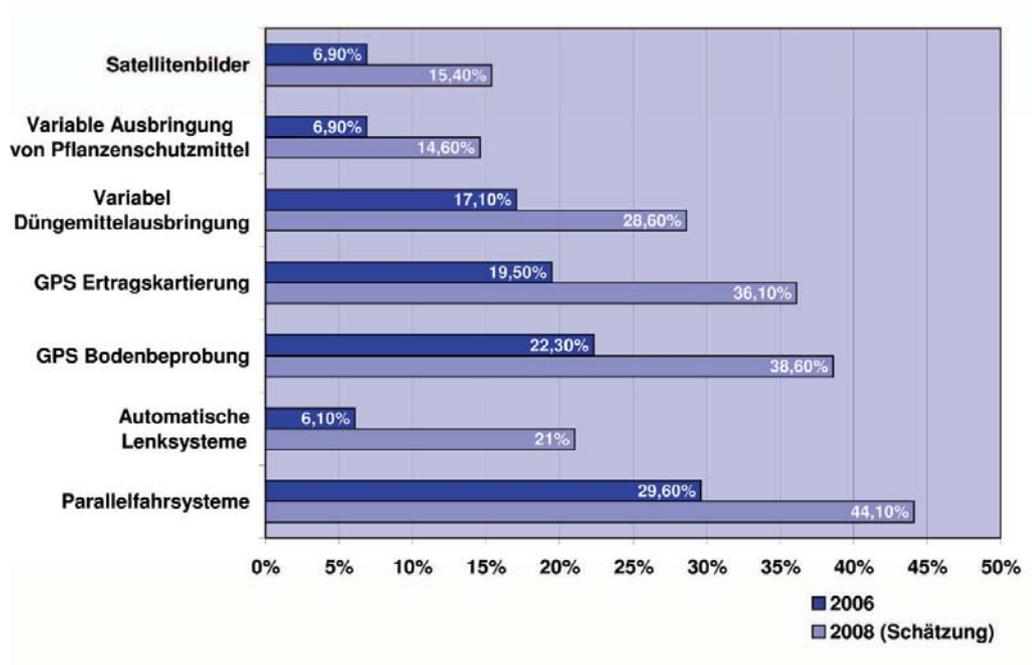


Abbildung 38: Prozentualer Anteil der durch PF abgedeckten Flächen in den USA (REICHHARDT, 2010, S. 38 nach VANACHT, 2008)

Es ist davon auszugehen, dass sich die Zahlen, vor allem im Bereich der Parallelfahrssysteme, bis in die heutige Gegenwart weiter erhöht haben.

Die beiden Übersichten sind nicht direkt vergleichbar, da in Abbildung 38 nicht der Anteil der PF-nutzenden Landwirte, sondern der Anteil der mit PF bearbeiteten Flächen aufgezeigt wird. Der Anteil der PF-nutzenden Landwirte dürfte kleiner als der Flächenanteil sein, da es vor allem die flächenstarken Landwirte sind, die PF einsetzen (REICHHARDT, 2010, S. 37). Dies ist auch der Grund dafür, warum sich in Deutschland der Schwerpunkt der PF-Anwendungen in den neuen Bundesländern befindet. Exemplarisch dargestellt ist dies in Abbildung 39. Dort werden alle Einsatzorte des N-Sensors, der das am weitesten verbreitete teilflächenspezifische Verfahren ist, in Deutschland und Österreich angezeigt.

Deutlich zu erkennen ist die starke Konzentration des N-Sensoreinsatzes in Ostdeutschland.

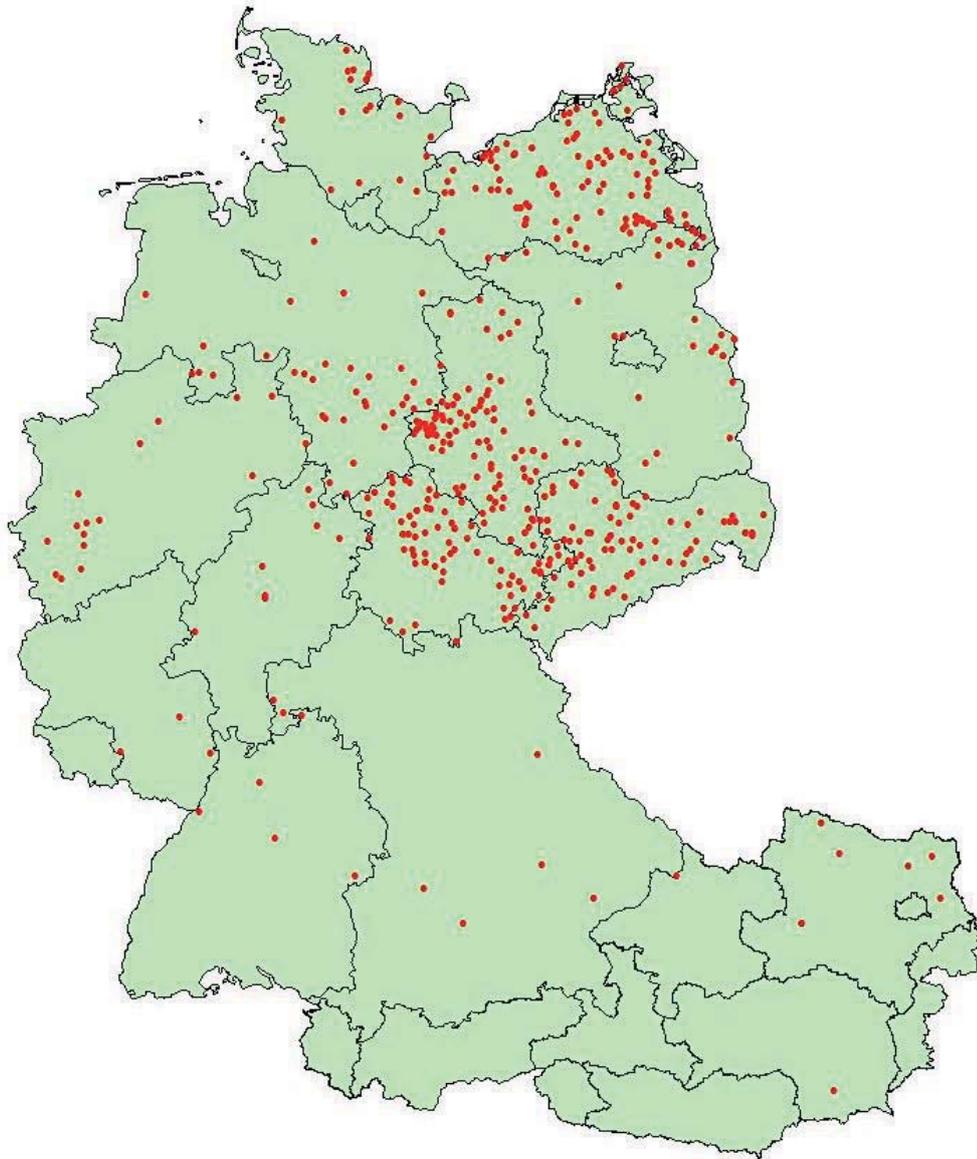


Abbildung 39: Räumliche Verbreitung des N-Sensors in Deutschland und Österreich
(AGRICON, 2012)

4.6.3 Globale und regionale Verbreitung der Precision Farming-Technologie

Leider existieren keine aktuellen, detaillierten Zahlen zur weltweiten oder länderspezifischen Verbreitung der PF-Technologie. Es lassen sich aber zumindest grobe Aussagen zur weltweiten Nutzung der PF-Technologie treffen.

Die räumliche und zeitliche Verbreitung der PF-Technologie variiert weltweit sehr stark (REICHHARDT, 2010, S. 35). SWINTON und LOWENBERG-DEBOER arbeiteten Bestimmungsfaktoren heraus, die als maßgeblich für die PF-Einführung gelten. Demnach setzte sich PF zuerst in jenen Ländern durch, die über eine große Flächenausdehnung und eine gute Kapitalausstattung verfügen und in denen die Arbeitskosten hoch sind, mithin also eine starke Tendenz zur Substitution menschlicher Arbeit durch Kapital (Technik) besteht. Dies trifft für Länder wie die USA, Kanada, Australien sowie Teile Brasiliens und Argentiniens zu (SWINTON / LOWENBERG-DEBOER, 2001, S. 560). Diese Theorie wird durch entsprechende punktuelle Erhebungen bestätigt (zur detaillierten Beschreibung der weltweiten Verbreitung der PF-Technologie sei auf SRINIVASAN (2006, S. 465-656) verwiesen. Demnach ist die Adaption der PF-Technologie in Europa etwas zeitverzögert, da vor allem die erforderliche Flächenausstattung im Vergleich zu den oben aufgeführten Ländern fehlt. Von der Flächenausstattung abgesehen, wird die These von SWINTON und LOWENBERG-DEBOER aber auch innereuropäisch bestätigt, da es vor allem die mit hohen Kosten der menschlichen Arbeit belasteten Länder West- und Mitteleuropas wie England, Dänemark und Schweden waren, in denen PF zuerst eine Rolle spielte (REICHHARDT, 2010, S. 46). In Afrika und Asien besitzt PF mit Ausnahme von Südafrika eine geringe Bedeutung und wird sich auf Grund der ungünstigen kleinräumigen Flächenverhältnisse auch nicht in der gleichen Weise wie auf dem amerikanischen Kontinent entwickeln.

Die Situation in Deutschland ist durch eine langsame, aber stetige Zunahme der Praxiseinführung gekennzeichnet, die begleitet wird von einer besseren Durchdringung der deutschen Landwirtschaft bezüglich der Kenntnisse über PF (REICHHARDT / JÜRGENS, 2008, S. 583). Im Rahmen der Agritechnica-Befragungen wurden auch charakteristische Merkmale von PF-Nutzern ermittelt. Demnach zeichnen sich PF-Nutzer durch folgende Merkmale aus: Sie verfügen über eine überdurchschnittliche Flächenausstattung, sind zwischen 35 und 50 Jahre alt, besitzen häufig einen universitären Abschluss und weisen eine Aufgeschlossenheit gegenüber dem technischen Fortschritt auf (REICHHARDT / JÜRGENS, 2008, S. 583-585). Als hoffnungsvolles Zeichen für die weitere Praxisdurchdringung der PF-Technologie ist zu werten, dass die meisten Landwirte nach der Überwindung von Anfangsschwierigkeiten zufrieden mit der Einführung von PF waren (REICHHARDT / JÜRGENS, 2008, S. 589).

4.6.4 Precision Farming-Forschungsprojekte in Deutschland

In den zurückliegenden Jahren sind in Deutschland mit staatlicher Unterstützung einige Forschungsprojekte zur Verbreiterung der Wissensbasis im Bereich des PF durchgeführt worden. Nachfolgend werden die wichtigsten von ihnen mit verantwortlicher Institution und Projektlaufzeit aufgeführt.

preagro I

Managementsystem für satellitengestützten ortsspezifischen Pflanzenbau zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaft und zur Förderung ihrer Umweltleistungen – ZALF-Verbundprojekt für Forschung, Entwicklung und Umsetzung einer innovativen Produktions- und Umwelttechnologie für die Landwirtschaft in Deutschland, Projektlaufzeit: 1999-2003

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e. V.

preagro II

Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung, Projektlaufzeit: 2004-2008

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e. V.

IKB Dürnast I + II

„Informationssystem kleinräumige Bestandesführung-Dürnast“, Projektlaufzeiten: I: 1998-2001; II: 2002-2005

Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München

SenGIS

Kompetenzzentrum für Sensoren und Geoinformationssysteme, Projektlaufzeit: 1999-2013

Universität Hohenheim



5 Geographisches Informationssystem (GIS)

5.1 Historie und verschiedene Formen des GIS

Die zunehmende Fülle an räumlich gebundenen Daten und Informationen führte 1958 am Massachusetts Institute of Technology (MIT) zur Entwicklung eines ersten digitalen Geländemodelles. Bereits 1962 prägte R. F. Tomlinson den Begriff „Geographisches Informationssystem“ (BILL, 2010, S. 1). Den Durchbruch als praxistaugliches Werkzeug zur Verwaltung und Bearbeitung räumlicher Daten gelang dem GIS in den 80-er Jahren, was sich in Deutschland in der Fertigstellung des Automatisierten Liegenschaftskatasters (ALK) zeigte (BILL, 2010, S. 16). Seit den 90-er Jahren findet das GIS breite Anwendung in den verschiedensten Bereichen des öffentlichen und wirtschaftlichen Lebens und hat eine hohe praktische Bedeutung erlangt, auch in der Landwirtschaft.

Die große Relevanz der GIS hinsichtlich der Verarbeitung räumlicher Daten zeigt sich in der Vielfalt der GIS-Ausprägungen, die sich in den verschiedenen Fachgebieten mit eigenen Begrifflichkeiten etabliert haben.

GIS-Formen	Anwendungsbeispiele
Landinformationssystem	Kommunales Vermessungswesen, Liegenschaftskataster
Rauminformationssystem	Kommunalplanung und -entwicklung (Flächennutzungsplan)
Umweltinformationssystem	Biotopkartierung, Wasserwirtschaft und Hydrologie
Netzinformationssystem	Ver- und Entsorgungsunternehmen
Fachinformationssystem	Verkehrsleittechnik, Fahrzeugnavigation

Tabelle 26: Ausprägungen von GIS mit typischen Anwendungsbeispielen (BILL, 2010, S. 43-52)

Die PF-Anwendungen im landwirtschaftlichen Bereich werden zu den Umweltinformationssystemen gezählt.

5.2 Aufbau und Aufgaben eines GIS

Eine umfassende Definition des Aufbaus und der Aufgaben eines GIS geben BILL und FRITSCH: „Ein Geo-Informationssystem ist ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst und redigiert, gespeichert und reorganisiert,



modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden“ (BILL / FRITSCH, 1994, S. 5).

Der Aufbau eines GIS lässt sich durch das Vier-Säulen-Modell HSDA darstellen. Die vier Buchstaben stehen für die Bestandteile eines GIS: Hardware, Software, Daten und Anwender (BILL / FRITSCH, 1994, S. 33). Von besonderer Bedeutung innerhalb des Vier-Säulen-Modells ist die Komponente „Software“, denn in ihr vereinigen sich die wesentlichen Aufgaben eines GIS. Die Aufgaben eines GIS lassen sich in den vier Arbeitsschritten der Datenbearbeitung ausdrücken: **Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation** von Daten. Man spricht aus diesem Grund auch vom EVAP-Modell eines GIS (KAPPAS, 2012, S. 47).

Die Gesamtheit der in einem GIS verwendeten Daten teilt sich auf zwei Datentypen auf, die Geometriedaten und die Sachdaten. Während die Geometriedaten als räumliche Daten bezeichnet werden, die die Spezifika geographischer Merkmale beschreiben, versteht man unter den Sachdaten oder auch Attributdaten nicht-räumliche Daten, die die Charakteristika geographischer Merkmale abbilden (KAPPAS, 2012, S. 49). Auf das Beispiel der Ertragskartierung übertragen, stellen die Lagekoordinaten des Messpunktes des Ertragskartierungssystems die Geometriedaten dar, und die quantitativen Aussagen zu dem betreffenden Ertragsmesspunkt wie Ertragshöhe oder Feuchtegehalt, stellen die Sachdaten dar.

Bei der Abbildung von Geometriedaten in GIS kann auf zwei verschiedene Datenmodelle zurückgegriffen werden: zum einen auf das Vektordatenmodell und zum anderen auf das Rasterdatenmodell.

Vektordaten beruhen auf Punkt und Linie als graphischen Grundstrukturen und der Fläche als geschlossenen Linienzug. Die linienhafte Betrachtungsweise erfordert bei der Vektorisierung räumlicher Daten einen hohen Zeitaufwand, verursacht aber durch verhältnismäßig geringe Datenmengen nur kurze Rechenzeiten.

Die Rasterdarstellung bezieht sich direkt auf Flächen und besitzt das Pixel als graphische Grundstruktur. Die Pixel sind zeilen- und spaltenweise in einer Matrix gleichförmiger quadratischer oder rechteckiger Elemente angeordnet. Im Gegensatz zu den Vektordaten ist die Datenerfassung einfach und weniger zeitaufwändig. Allerdings beanspruchen Rasterdaten große Speicherressourcen, wodurch



sich die Rechenzeit im Vergleich zu den Vektordaten deutlich erhöht (BILL, 2010, S. 30-32).

Neben den auf ein Datenmodell spezialisierten, also vektor- oder rasterbasierten GIS, existieren auch GIS, die beide Datenmodelle in sich vereinigen können. Diese werden als hybride GIS bezeichnet (BILL / FRITSCH, 1994, S. 33).

5.3 GIS in der Landwirtschaft

In der Landwirtschaft sind GIS im Vergleich zu anderen Branchen zögerlicher und mit mehrjährigem Zeitverzug eingeführt worden. STREIT führt dies neben dem Mangel an fachspezifischen Geodaten und den hohen Investitionskosten auf fehlendes Fachwissen und Reserviertheit der Landwirte zurück (STREIT, 2004, S. 8). Demgegenüber verweisen Pioniere des GIS-Einsatzes in der Landwirtschaft auf die ökonomischen und arbeitswirtschaftlichen Vorteile dieser Technologie und sehen in einem GIS das Kernstück eines modernen Informationsmanagements in der Landwirtschaft (WAGNER, 2004a, S. 81).

WAGNER nennt hierbei für seinen Betrieb drei Einsatzschwerpunkte für GIS. Neben der weiter oben schon beschriebenen Verwendung im Rahmen der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung kommt das GIS auch im Flächenmanagement und beim Antragsverfahren zur EU-Flächenbeihilfe zum Einsatz (WAGNER, 2004a, S. 76). Ein ähnliches Anwendungsspektrum für GIS in der Landwirtschaft beschreibt KÜHLBACH, indem er als Einsatzschwerpunkte die betriebliche, die administrative und die Lieferbeziehungsebene aufführt. Auf der administrativen Ebene gewinnt das GIS-gestützte Antragsverfahren des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS) zunehmend an praktischer Bedeutung. Im Austausch mit Geschäftspartnern wie Lohnunternehmern, Maschinenringen oder Erzeugergemeinschaften erleichtern GIS den notwendigen Datentransfer (KÜHLBACH, 2007, S. 19-20).

STREIT sieht in der breiten Verfügbarkeit von landwirtschaftsspezifischen Geobasisdaten eine entscheidende Voraussetzung für eine Ausweitung des GIS-Einsatzes in der Landwirtschaft. Er zählt folgende Datenquellen auf, die seiner Meinung nach auf Interesse bei Landwirten stoßen: Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK), Automatisiertes Liegenschaftsbuch, Amtliches Topographisch-



Kartographisches Informationssystem (ATKIS), Digitale Höhenmodelle und satellitengestützte Fernerkundungsdaten (STREIT, 2004, S. 13).

5.4 Das Geographische Informationssystem ArcGIS

ArcGIS stellt eine Produktfamilie aus einzelnen, sich ergänzenden GIS-Softwareprodukten dar. Nach dem Ort der Anwendung lassen sich Desktop-GIS, Server-GIS, Online-GIS und Mobile-GIS unterscheiden. Das Desktop-ArcGIS besteht aus einer Reihe von Anwendungen, mit denen sich raumbezogene Daten erfassen, verwalten, analysieren und ausgeben lassen.

ArcInfo bietet das umfassendste Angebot an GIS-Funktionalitäten und wendet sich vor allem an Profianwender. Das GIS ArcEditor ist in seinem Leistungsvermögen zwischen ArcInfo und ArcView angesiedelt und verfügt über den Funktionalitätumfang von ArcView und darüber hinaus über weitere Möglichkeiten zum Management auch komplexer Geodaten.

ArcView ist das mit deutlichem Abstand am weitesten verbreitete und bekannteste GIS-Produkt weltweit und das im Rahmen dieser Arbeit angewandte GIS. Zu allen ArcGIS-Desktop-Produkten gehören die beiden Anwendungen ArcMap und ArcCatalog. Während im ArcCatalog die Datenverwaltung durchgeführt wird, dient ArcMap der Analyse der Datenbestände.

Die drei gebräuchlichsten Datenformate innerhalb der ArcGIS-Produkte sind Coverage, Shapefile und Geodatabase. Besonders das Shapefile hat sich zum Standardformat und klassischem GIS-Austauschformat entwickelt.



6 Datenerhebung auf dem Lehr- und Versuchsbetrieb Marienborn-Heldenbergen der Justus-Liebig-Universität Gießen

6.1 Betriebsvorstellung

Geschichte

Am Standort des Lehr- und Versuchsbetriebes wurde 1274 durch Zisterzienserinnen das Kloster Marienborn gegründet. Nach einer Blütezeit bis zur Reformation wurde das Kloster 1559 aufgelöst und gelangte zurück an den Stifter des Klosters, den Grafen von Ysenburg-Büdingen. Er ließ das Schloss Marienborn erbauen, in das die Klosterkirche integriert wurde. Im Zuge dieser Baumaßnahmen entstand um 1700 die heute noch erhaltene Hofanlage, die als Betriebsstätte des Lehr- und Versuchsbetriebes dient. Die Schlossanlage wurde nach längerem Leerstand 1889 abgerissen, während die Hofanlage und umliegende Ländereien ab 1964 als Hofgut Marienborn in eine Staatsdomäne des Landes Hessen umgewandelt wurden (GRAEF, 2007, S. 118 ff.). Die Justus-Liebig-Universität (JLU) Gießen pachtete 1970 das Hofgut Marienborn als Ersatz für den aufgegebenen Standort Unterer Hardthof als Versuchsbetrieb für die Landwirtschaftliche Betriebslehre.

Forschungsprofil

Der Lehr- und Versuchsbetrieb Marienborn-Heldenbergen dient der agrarökonomischen Forschung und Lehre. Als methodisches Oberziel sind die Entwicklung und der Test von Entscheidungs-Unterstützungs-Modellen zur Struktur- und Prozessoptimierung biologischer Produktionssysteme als informationstechnisch basierte Gestaltungs-, Steuerungs- und Regelungsverfahren für landwirtschaftliche Unternehmen zu nennen. Der Betrieb ist als einer von vier Versuchsbetrieben in die Technische Betriebseinheit der Lehr- und Versuchsbetriebe der JLU Gießen integriert und dient hierbei als Datenquelle für agrarökonomische Lehrveranstaltungen. Auch vor diesem Hintergrund sind die umfangreichen Datenerhebungen im Rahmen der Nachschätzung der landwirtschaftlichen Nutzflächen des Betriebes und der Ertragskartierung zu sehen.

Betriebsspiegel

Der Betrieb Marienborn-Heldenbergen verfügt über eine landwirtschaftliche Nutzfläche von 194 Hektar. Diese teilt sich auf in 172 Hektar Ackerland und 22



Hektar Grünland. In den Betriebszweigen der Tierhaltung werden 85 Milchkühe der Rasse Schwarzbunt Holstein-Frisian in ganzjähriger Stallhaltung gehalten. Zudem verfügt der Betrieb über 1.000 Stallplätze für Mastschweine, die im Rein-Raus-Verfahren gemästet werden.

Das ackerbauliche Produktionsprogramm des Betriebes umfasst neben dem Getreideanbau die Erzeugung von Körner- und Silomais für die betriebseigene Viehhaltung sowie den Anbau von Raps und Zuckerrüben als Marktfrüchte. Die Getreideproduktion teilt sich auf in die beiden Getreidearten Winterweizen und Wintergerste, in seltenen Fällen auch Sommergerste.

Flächenstruktur des Betriebes

Die Betriebsflächen teilen sich auf sechs Gemarkungen auf, die sich in drei Schwerpunkten zusammenfassen lassen. 81,93 Hektar (ca. die Hälfte der Fläche) befinden sich arrondiert um den Betriebsstandort Marienborn, 31,62 Hektar (ca. ein Sechstel der Fläche) sind in der Nachbargemeinde Ronneburg-Altwiedermus zu finden und die restlichen 58,68 Hektar (ca. ein Drittel der Fläche) liegen in der 15 km entfernten Ortschaft Nidderau-Heldenbergen (östliche Wetterau). Die insgesamt 172,23 Hektar Ackerfläche verteilen sich auf 46 Schläge, was eine durchschnittliche Schlaggröße von 3,745 Hektar ergibt. Dabei erstreckt sich die Spanne der Schlaggrößen von 0,15 Hektar bis 30,32 Hektar. Diese extreme Spanne spiegelt sich auch in der Verteilung der Schlaggrößen wider. Während die vier größten Schläge mit jeweils einer Größe von mehr als 10 Hektar zusammen 40 % der Ackerfläche ausmachen, vereinen die 12 kleinsten Schläge, die alle jeweils eine Größe von weniger als 1 Hektar aufweisen, nur 4 % Anteil an der Ackerfläche. Vor allem für die Zwecke des PF sind die Schlaggrößen verhältnismäßig ungünstig und das Hauptaugenmerk richtet sich daher auf die Schläge mit einer Größe von mehr als 5 Hektar.

Geologische Bedingungen

Die Flächen des Betriebs befinden sich – mit Ausnahme der Flächen in Heldenbergen, die zur Wetterau gehören – zum Ronneburger Hügelland, das zusammen mit dem Gelnhäuser Kinzigtal und dem Nordwestlichen Spessartvorland das Büdingen-Meerholzer-Hügelland bildet.



Den geologischen Untergrund stellen die Schichten des Rotliegenden. Es können auf engstem Raum Schichten des Rotliegenden und tertiäre Locker- und Festgesteine nebeneinander auftreten. Auf den Ost- und Nordhängen ist der Löss als eiszeitliches Produkt verbreitet. Auf Grund des geologischen Untergrundes treten starke Hangneigungen auf, sodass manche Flächen zur Erosion neigen. Deshalb gibt es häufig erodierte Parabraunerden, Pararendzinen und Kolluvisole. Weitere typische Böden des Ronneburger Hügellandes sind Lössböden, Braunerden, und auch pseudo-vergleyte Böden kommen vereinzelt vor (VORDERBRÜGGE et al., 2002, S. 113-118).

Klimatische Bedingungen

Der Standort Marienborn verfügt über jährliche Niederschläge von 750 mm, wobei im Versuchszeitraum zwischen 2002 und 2008 Spannen von 499 bis 953 mm auftraten. In Verbindung mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 9,0°C kann es im pflanzenphysiologisch wichtigen Zeitraum von Mai bis September zu einer negativen klimatischen Wasserbilanz kommen. So weisen die langjährigen Wetteraufzeichnungen für den Betriebsstandort eine für die Region typische negative Klimatische Wasserbilanz von durchschnittlich minus 70 mm für den Zeitraum Mai bis September aus.

6.2 Übersicht über durchgeführte Datenerhebungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden mehrere verschiedene Maßnahmen der Datenerhebung von wachstumsrelevanten Ertragsfaktoren auf dem Lehr- und Versuchsbetrieb Marienborn-Heldenbergen durchgeführt. Diese Datenerhebungen dienten der Vorbereitung der beabsichtigten Einführung der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung. In Tabelle 27 sind die entsprechenden Maßnahmen in zeitlicher Abfolge aufgeführt.

Zeitpunkt	Maßnahme
seit 1989	Hofeigene Wetterstation
seit 1997	GPS-Vermessung der Schläge mit eigenem GPS-Gerät
seit 1999	Nutzung von ALK-Karten
2001/2002	Amtliche Nachschätzung der landwirtschaftlichen Nutzflächen
seit 2002	Zusammenfassung in einem GIS
2002	Ausstattung eines Schleppers mit GPS-Antenne
2002-2008	Sieben Jahre Ertragskartierung
2004 – 2006	Einsatz des Pendelsensors (CROP-Meter)
2005	Einsatz des automatischen Lenksystems EYE-DRIVE
2006	Einsatz eines GPS-ansteuerbaren Düngerstreuers mit teilflächenspezifischer Applikation

Tabelle 27: Chronologische Abfolge der Maßnahmen zur Vorbereitung der Einführung der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung (Eigene Darstellung)

Die ersten Maßnahmen wie die Erfassung der Niederschläge und der Temperaturen mittels einer hofeigenen Wetterstation, die satellitengestützte Flächenvermessung mit einem GPS-Gerät sowie die Nutzung von ALK-Daten dienten der Bereitstellung betrieblicher Grunddaten. Mit der Durchführung einer amtlichen Nachschätzung der landwirtschaftlichen Nutzflächen unter Federführung der Oberfinanzdirektion (OFD) Frankfurt am Main beginnt die Datenerhebung auf kleinräumiger Basis zur Vorbereitung einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung. Die gesetzten Bodenbohrpunkte werden per GPS eingemessen und in einem GIS georeferenziert festgehalten. Näheres zur Nachschätzung der Betriebsflächen ist in Kapitel 7.4 dargestellt.

2002 wird ein Schlepper des Versuchsbetriebes mit einer GPS-Antenne ausgestattet, um in den folgenden Jahren teilflächenspezifische Versuchsanstellungen durchführen zu können. Parallel dazu startet 2002 die Ertragskartierung bei Winterweizen, Winter- und Sommergerste, Raps und Körnermais, die in insgesamt sieben Jahren bis 2008 angewendet wird. Zu diesem Zweck wird ein Mähdrescher des mit dem Lohndrusch beauftragten Lohnunternehmers mit einer Er-

tragserfassung und einem ACT-Terminal ausgestattet und für die anschließende Verarbeitung der Ertragsdaten eine Ertragskartierungssoftware gekauft.

Im Rahmen von Auftragsforschungen wurden der Pendelsensor (CROP-Meter) und das automatische Lenksystem EYE-DRIVE der Firma Agrocom (inzwischen umfirmiert zu CLAAS Agrosystems) eingesetzt, getestet und ökonomisch bewertet. Der Pendelsensor wird in den Jahren 2004 bis 2006 zur Erhebung von Bestandesinformationen im Weizenanbau verwendet. Der im Frontanbau des Schleppers montierte CROP-Meter dient der Erfassung von Bestandesheterogenitäten und der darauf basierenden teilflächenspezifischen Applikation von Betriebsmitteln wie Dünger, Fungiziden und Wachstumsreglern (siehe auch Kapitel 3.3.13). In Abbildung 40 ist eine am 12. Mai 2005 mit dem CROP-Meter erhobene Karte der Pendelauslenkwinkel in Wintergerste auf dem Schlag Hofacker dargestellt.

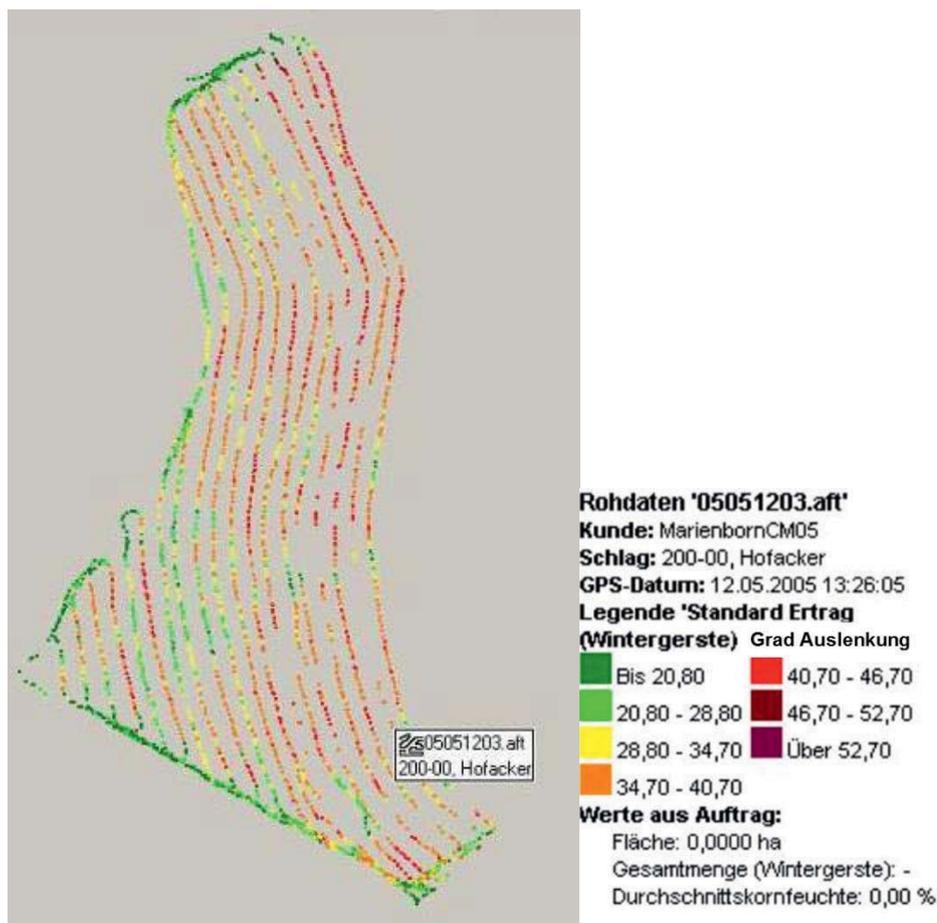


Abbildung 40: CROP-Meter-Karte des Schlags Hofacker aus dem Jahr 2005 (Eigene Darstellung)

Bodenbeschaffenheit und der Geländeform ab. In den Versuchen wurden Geschwindigkeiten zwischen 5 und 10 km/h ausgewählt. Entscheidend ist aber, dass die Geschwindigkeiten konstant eingehalten werden. Der Pendel-Sensor sollte tief genug in den Bestand eintauchen, um vorhandene Heterogenitäten erfassen zu können. Als idealer Zeitpunkt hat sich die Endphase des Schossens, in etwa zum Erscheinen des letzten Blattes, herauskristallisiert. Nicht zuletzt gilt es, die äußeren Bedingungen zu beachten. Es sollte während der Befahrung nicht regnen, der Bestand sollte abgetrocknet sein und vor allem muss Windstille herrschen.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass der Pendelsenor auf ebenen Flächen ein durchaus geeignetes Instrument zur Abbildung der Bestandesheterogenitäten darstellt.

Der Einsatz des automatischen Lenksystems EYE-DRIVE auf Kamerabasis dient der sicheren Führung des Schleppers in Reihenkulturen wie Zuckerrüben oder Mais. Damit können Pflanzenverluste durch Schädigungen beim Überfahren des Bestandes minimiert und Arbeitszeiten durch Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit verringert werden. Im Testlauf funktionierte das Gerät völlig störungsfrei und erlaubte deutliche Steigerungen der Fahrgeschwindigkeiten.

Zu Testzwecken wurde 2006 eine Teilfläche des Weizenschlages Köhlerwald für die dritte N-Gabe mit einem GPS-ansteuerbaren Düngerstreuer eines Lohnunternehmers teilflächenspezifisch in Kombination mit dem Pendelsensor appliziert. Die technische Durchführung funktionierte störungsfrei und es ergab sich eine flächenheterogene Streumenge. Auf Grund von Überschneidungseffekten mit der schlageinheitlichen Düngung der Fläche können keine Rückschlüsse auf das Aussehen der Ertragskarte 2006 des Schlages Köhlerwald gezogen werden.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Nachschätzung der landwirtschaftlichen Nutzflächen des Betriebes nach der RBS und die siebenjährige Ertragskartierung die beiden zentralen Datenerfassungsmaßnahmen im Rahmen der vorliegenden Dissertation darstellen und den Kernpunkt der wissenschaftlichen Untersuchung bilden.



7 Bodenschätzung

7.1 Geschichte der Bodenschätzung in Deutschland

Während sich aus den frühen Hochkulturen Ägypten und Rom bereits aus der Zeit des vorchristlichen Altertums Nachweise über Bodenschätzungen finden lassen (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 538), sind in Deutschland aus dem Mittelalter zum Zwecke der gerechten Gewannaufteilung erste Maßnahmen der Bodenbonitierungen bekannt (ROTHKEGEL, 1950, S. 20). Mit der Entwicklung des Finanzwesens wurde das Instrument der Bodenschätzung zunehmend als staatliche Aufgabe verstanden (ROTHKEGEL, 1950, S. 24). Gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurde im Deutschen Reich zunehmend die Bedeutung des Bodens als Lebens- und Produktionsraum erkannt und es „waren Bestrebungen entstanden, die darauf hinzielten, durch eine vorausschauende Planung die zweckmäßigste Ordnung und Nutzung des deutschen Bodens herbeizuführen“ (ROTHKEGEL, 1950, S. 71). Nachdem es zuvor vielfach vereinzelt Bodenbonitierungen auf Gemarkungsebene gegeben hatte, die zusammenhanglos und uneinheitlich durchgeführt wurden und von daher keine Vergleichbarkeit der Bodenwerte erlaubten, wurde die Bodenbeurteilung mit dem Gesetz über die Schätzung des Kulturbodens (Bodenschätzungsgesetz) am 16. Oktober 1934 auf eine gesetzliche Grundlage gehoben (ROTHKEGEL, 1950, S. 74).

7.2 Inhalt und Aufbau der Reichsbodenschätzung

Der Inhalt und Aufbau der in Deutschland geltenden Regeln zur Durchführung der Bodenschätzung sind im Gesetz über die Schätzung des Kulturbodens (im Weiteren Reichsbodenschätzung (RBS) genannt) dargelegt. In den ersten beiden Paragraphen des Gesetzes werden die Ziele der Bodenschätzung genannt. Unter § 1 „Zweck“ heißt es: „Für den Zweck einer gerechten Verteilung der Steuern, einer planvollen Gestaltung der Bodennutzung und einer Verbesserung der Beleihungsunterlagen wird eine Bodenschätzung für die landwirtschaftlich nutzbaren Flächen des Reichsgebiets durchgeführt“ (RÖSCH / KURANDT, 1991, S. 1).

Neben den steuerlichen Beweggründen steht die Bestandesaufnahme des Bodens im Mittelpunkt der Bodenschätzung. In § 2 „Bestandesaufnahme und Feststellung der Ertragsfähigkeit“ des Bodenschätzungsgesetzes heißt es dazu: „Die Bodenschätzung umfasst: 1. Die genaue Kennzeichnung des Bodens nach seiner



Beschaffenheit (Bestandesaufnahme). Die Bestandesaufnahme wird kartenmäßig festgehalten; 2. Die Feststellung der Ertragsfähigkeit. Bei der Feststellung der Ertragsfähigkeit sind lediglich die Ertragsunterschiede zu berücksichtigen, die auf die natürlichen Ertragsbedingungen (Bodenbeschaffenheit, Geländegestaltung und klimatische Verhältnisse) zurückzuführen sind“ (RÖSCH / KURANDT, 1991, S. 1-2).

Zur Bestandesaufnahme sind Klassen zur einheitlichen Beschreibung und zur Kennzeichnung der Beschaffenheit des Bodens vorgesehen, wobei sich jede Klasse durch genau definierte, typische und vergleichbare Eigenschaften auszeichnet. Zur Abbildung der Ertragsfähigkeit stehen Wertzahlen zur Verfügung, die als Verhältniszahlen die Unterschiede des nachhaltig erzielbaren Reinertrages zum Ausdruck bringen (WILL, 1987, S. 311).

Zur Einordnung der Ergebnisse der Ackerlandschätzung wird das Instrument des Ackerschätzungsrahmens zu Hilfe genommen.

Bodenart	Entstehung	Zustandsstufe						
		1	2	3	4	5	6	7
S	D		41—34	33—27	26—21	20—16	15—12	11—7
	Al		44—37	36—30	29—24	23—19	18—14	13—9
Sl (S/IS)	D		51—43	42—35	34—28	27—22	21—17	16—11
	Al		53—46	45—38	37—31	30—24	23—19	18—13
	V			42—36	35—29	28—23	22—18	17—12
IS	D		59—51	50—44	43—37	36—30	29—23	22—16
	Lö		62—54	53—46	45—39	38—32	31—25	24—18
	Al		62—54	53—46	45—39	38—32	31—25	24—18
	V			50—44	43—37	36—30	29—24	23—17
	Vg				40—34	33—27	26—20	19—12
SL (IS/sL)	D		67—60	59—52	51—45	44—38	37—31	30—23
	Lö		72—64	63—55	54—47	46—40	39—33	32—25
	Al		71—63	62—55	54—47	46—40	39—33	32—25
	V		67—60	59—52	51—44	43—37	36—30	29—22
	Vg				47—40	39—32	31—24	23—16
sL	D	84—76	75—68	67—60	59—53	52—46	45—39	38—30
	Lö	92—83	82—74	73—65	64—56	55—48	47—41	40—32
	Al	90—81	80—72	71—64	63—56	55—48	47—41	40—32
	V		76—68	67—59	58—51	50—44	43—36	35—27
	Vg				54—45	44—36	35—27	26—18
L	D	90—82	81—74	73—66	65—58	57—50	49—43	42—34
	Lö	100—92	91—83	82—74	73—65	64—56	55—46	45—36
	Al	100—90	89—80	79—71	70—62	61—54	53—45	44—35
	V		82—74	73—65	64—56	55—47	46—39	38—30
	Vg				60—51	50—41	40—30	29—19
LT	D		78—70	69—62	61—54	53—46	45—38	37—28
	Al		82—74	73—65	64—57	56—49	48—40	39—29
	V		78—70	69—61	60—52	51—43	42—34	33—24
	Vg				57—48	47—38	37—28	27—17
T	D			63—56	55—48	47—40	39—30	29—18
	Al		74—66	65—58	57—50	49—41	40—31	30—18
	V			62—54	53—45	44—36	35—26	25—14
	Vg				50—42	41—33	32—24	23—14
Mo			45—37	36—29	28—22	21—16	15—10	

Abbildung 41: Ackerschätzungsrahmen (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 539)

Die Einstufung eines Ackerbodens wird anhand von drei Faktoren vorgenommen: Bodenart, Entstehung, Zustandsstufe. Im Ackerschätzungsrahmen existieren neun Bodenarten, die anhand ihrer Korngrößenzusammensetzung unterschieden werden. Maßgeblich ist hierbei der prozentuale Anteil des „Abschlämbbaren“ (der Teilchen mit einem Durchmesser von weniger als 0,01 mm). In Abbildung 42 ist die Einteilung der Bodenarten für die Bodenschätzung dargestellt.

Bodenart	Abkürzung	Teilchen <0,01 mm in %
Sand	S	<10
Anlehmiger Sand	Sl	10-13
Lehmiger Sand	IS	14-18
Stark lehmiger Sand	SL	19-23
Sandiger Lehm	sL	24-29
Lehm	L	30-44
Schwerer Lehm	LT	45-60
Ton	T	>60

Abbildung 42: Einteilung der Bodenarten für die Bodenschätzung (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 540)

Neben der Textur wird die Herkunft des Bodenmaterials für die Wertermittlung herangezogen (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 540). Die Ausgestaltung dieser stark vereinfachten geologischen Differenzierung des Ausgangsgesteins zeigt Tabelle 28

Entstehungsart	Geologische Beschreibung
Diluvium (D)	Eiszeitliches und tertiäres Lockersediment
Löss (Lö)	Lockersediment aus Windablagerung
Alluvium (Al)	Nacheiszeitliche Lockersedimente aus Abschwemm Massen
Verwitterung (V)	Bodenentwicklung aus anstehendem Festgestein
Steinhaltige Verwitterung (Vg)	Stark steinige Verwitterungs- und Gesteinsböden

Tabelle 28: Entstehungsarten der Bodenarten im Ackerschätzungsrahmen (WILL, 1987, S. 313)

Das dritte Differenzierungsmerkmal im Ackerschätzungsrahmen ist die Zustandsstufe. Die Einteilung der durch ihre geologische Herkunft unterschiedenen Bodenarten in sieben Zustandsstufen dient der Erfassung der fruchtbarkeitsbestimmenden Eigenschaften, die nicht mit Bodenart und Entstehung abgebildet werden können (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 541). Dieser Skala liegt das von GÖRTZ entwickelte Konzept der Zustandsstufen zugrunde, das von einer Entwicklungsabfolge des Bodens ausgeht. Demnach entwickelt sich ein Boden aus dem Rohboden (Zustandsstufe 7) durch Bodenbildung und zunehmende Durchwurzelung hin bis zu einem Maximum an Leistungsfähigkeit (Zustandsstufe 1), bevor er durch Versauerung oder Verdichtung degradiert und wieder in schlechtere Zustandsstufen zurückfällt (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 541). Auf die besondere Rolle der Durchwurzelungstiefe bei der Bestimmung der Zustandsstufe weisen KEIL und VORDERBRÜGGE hin. Sie betonen, dass der Ertrag eng mit der Unterboden-



durchwurzelung korreliert und daher die Zustandsstufe einen guten Hinweis auf die Ertragsfähigkeit des Bodens bietet (KEIL / VORDERBRÜGGE, 2012).

Für jede im Ackerschätzungsrahmen mögliche Kombination der drei Faktoren Bodenart, Entstehung und Zustandsstufe wird eine Zahlenspanne der Bodenzahl angegeben, mit der ein Bohrpunkt bewertet werden kann. Die maximal mögliche Bodenzahl ist 100 und bezeichnet Lehm Böden der Entstehungsformen Löss oder Alluvium mit der Zustandsstufe 1. Mit den angegebenen Bodenzahlen des Ackerschätzungsrahmens sind folgende natürliche Bedingungen verknüpft: 600 mm Jahresniederschlag, 8°C mittlere Jahrestemperatur, ebene bis schwach geneigte Geländelage und günstiger Grundwasserstand (MÜCKENHAUSEN, 1993, S. 542). Die Bodenzahl charakterisiert also lediglich die Ertragsfähigkeit des Bodens bei genau definierten klimatischen Bedingungen und Geländeformen. Weichen nun die angeführten Klimafaktoren oder die Geländeform in starkem Maße hiervon ab, so wird aus der Bodenzahl durch entsprechende Zu- oder Abschläge die Ackerzahl. Die Ackerzahl ist somit ein Maßstab für die natürliche Ertragsfähigkeit eines Bodens am jeweiligen Standort (WILL, 1987, S. 314).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Ergebnis der RBS „ein in der Welt einmaliges flächendeckendes engmaschiges Bohrpunktnetz über die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche der BRD“ ist (WILL, 1987, S. 323).

7.3 Praktische Durchführung einer Bodenschätzung

Um den Anspruch der Einheitlichkeit der Bodenschätzung zu gewährleisten, werden ausgewählte Bodenflächen als Musterstücke geschätzt, die auf Bundesebene als rechtsverbindliche Vergleichsobjekte gelten. Dem Musterstück auf Bundesebene entspricht das Vergleichsstück auf Gemeindeebene (WILL, 1987, S. 317).

Während der Feldbegehung werden die Bodenwertzahlen, die abgegrenzten Schätzungsflächen und die Beschreibung der Bodenklassen in der Feldschätzungskarte festgehalten. Im Feldschätzungsbuch wird schließlich die vollständige Beschreibung des Schätzungsergebnisses eingetragen. Dies betrifft neben der ausführlichen Profilbeschreibung des Grabloches und der Wertzahlen auch die Festlegung der Höhe der Zu- und Abrechnungen (WILL, 1987, S. 318-319).

7.4 Bodenschätzung auf dem Lehr- und Versuchsbetrieb Marienborn-Heldenbergen

7.4.1 Praktische Durchführung

In den Jahren 2001 und 2002 wurde eine Nachschätzung der landwirtschaftlichen Nutzflächen in der Gemarkung von Büdingen-Eckartshausen durchgeführt. In dieser Gemarkung befindet sich ein Großteil der Flächen des Lehr- und Versuchsbetriebes Marienborn-Heldenbergen. Die 75,64 Hektar Fläche des Betriebes innerhalb der Gemarkungsgrenzen von Büdingen-Eckartshausen wurden im Zeitraum November 2001 bis April 2002 nachgeschätzt. Eine Übersicht über die Lage der einzelnen Bodenschätzpunkte vor dem Hintergrund einer ALK-Karte gibt Abbildung 43.



Abbildung 43: ALK-Karte von Marienborn mit GPS-ingemessenen Bodenbohrpunkten
(Eigene Darstellung)

Die behördliche Leitung der Nachschätzung besaß die Oberfinanzdirektion Frankfurt am Main, Abteilung Bodenschätzung. An der praktischen Durchführung beteiligt waren das Finanzamt Nidda und ehrenamtliche Bodenschätzer.



Die Nachschätzung der landwirtschaftlichen Nutzflächen des Lehr- und Versuchsbetriebes in der Gemarkung Büdingen-Eckartshausen wurden vor dem Hintergrund einer möglichen Einführung der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung auf dem Betrieb durchgeführt. Demzufolge wurde auf die Anforderungen des PF hinsichtlich der benötigten Datengrundlagen Rücksicht genommen. Dies äußert sich in einigen Besonderheiten der Bodenschätzung in Marienborn, die sich von sonstigen Bodenschätzungsvorgaben unterscheidet:

1. Räumliche Auflösung

Die teilflächenspezifische Landbewirtschaftung verlangt nach möglichst kleinräumig aufgelösten Datengrundlagen. Als Kompromiss zwischen zeitlichem Beprobungsaufwand und Wunsch nach Kleinräumigkeit des Beprobungsrasters wurde die Beprobungsdichte von sonst üblichen 50 x 50 m auf 40 x 40 m erhöht. Die Standorte der Bohrstellen wurden in und zwischen den Ganglinien per Schrittmaß festgelegt. Die nachträgliche Betrachtung der GPS-Messpunkte ergab eine erstaunliche Übereinstimmung mit dem vorgegebenen Beprobungsraster. Die gewählten Bohrpunktabstände ergeben einen Bodenschätzpunkt auf 40 x 40 m = 1.600 m², was in einer Beprobungsdichte von ca. 6 Bohrpunkten pro Hektar resultiert. Die Beprobungsdichten variieren von 6,64 Bohrpunkten pro Hektar (Hofacker) über 6,82 (Köhlerwald) bis hin zu 6,85 Bohrpunkten pro Hektar. Es lässt sich also festhalten, dass die drei Versuchsschläge (siehe Kapitel 9.1) nahezu gleiche Beprobungsdichten aufweisen.

2. Maschinelle Bohrstocksetzung

Um den personellen Mehraufwand für die gesteigerte Beprobungsdichte möglichst gering zu halten, wurde ein Gerät zur maschinellen Setzung und Entnahme des Bohrstocks verwendet. Auf Basis eines John Deere Gators bietet die Firma Nietfeld eine Spezialanfertigung zur automatischen Bodenprobenahme an. An das Gerät ist ein automatischer Bodenprobennehmer angebaut, der bei der Bodenschätzung in Marienborn eine Bodenansprache bis in 1,20 m Tiefe erlaubte. Mit Hilfe dieses schlagenden Systems wird der Bohrstock maschinell in den Boden getrieben und wieder herausgezogen. Auf dem Fahrzeug sind neben dem Fahrer- und Beifahrersitz Sitzgelegenheiten für drei Bodenschätzer vorhanden, sodass die Untersuchung und Bewertung des Bodengutes im Bohrstock an Ort und Stelle vorgenommen werden kann.



3. Einmessung der Bohrpunkte per GPS-Gerät

Zwecks digitaler Weiterverarbeitung und zur Unterstützung der Ortungsgenauigkeit der Bodendaten wurden die Bohrpunkte satellitengestützt festgehalten. Die Messung erfolgte mit einem tragbaren GPS-Gerät der Firma ESYS mit aufgesteckter Trimble-Antenne. Jeder Bohrpunkt wurde in einer zweiminütigen Punktmessung geortet, um die zu Beginn der Messung vorhandenen Koordinatenschwankungen mit zunehmender Zeitdauer auszugleichen. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit konnte das GPS-Gerät ein Korrektursignal des Langwellensenders Mainflingen empfangen. Bis auf gelegentliche kurzzeitige Phasen schlechten Empfangs durch Abschattungseffekte am Waldrand war das Korrektursignal stets verfügbar, sodass alle Bohrpunkte mit ausreichender Genauigkeit eingemessen werden konnten.

4. Nutzbare Feldkapazität

Wie schon in Kapitel 2.4.1 beschrieben, ist die Wasserhaltekapazität des Bodens – ausgedrückt in der bodenkundlichen Kenngröße nFK – in großen Teilen des Ackerbaus in Deutschland der meist ertragsbegrenzende Faktor, der räumlich variabel vorliegt. Die nFK wurde direkt vor Ort anhand der Horizontabfolge und –mächtigkeit im Bohrstock bestimmt. Zwar gibt es auch bodenkundlich abgeleitete Formeln zur Berechnung der nFK, die mit Hilfe von bodenartenabhängigen Faktoren durch eine Multiplikation der Bodenzahl mit dem entsprechenden Faktor (für Lehm Böden z. B. die Zahl 2,89) die nFK ermitteln (HLUG / LGB RLP, 2008, S. 41). Bei der sehr starken Verbreitung der Lehm Böden auf den untersuchten Flächen würde die räumliche Differenzierung der nFK-Werte bei Anwendung dieser Formel allein von der Variation der Bodenzahl abhängen. Zudem ist über eine direkt an der Horizontabfolge im Bohrstock in situ vorgenommene Differenzierung der nFK-Werte von größerem Erkenntnisgewinn als eine auf Durchschnittswerten basierende Universalformel.

Die nFK des durchwurzelbaren Bodenraumes berechnet sich aus der nFK pro Dezimeter der vorherrschenden Bodenart mal der Durchwurzelungstiefe. Da ein Bohrstock mit der Länge von 1,20 m eingesetzt wurde, konnte nur die Durchwurzelungstiefe bis in eine Tiefe von 1,20 m (= maximal 240 mm nFK) festgestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass die Durchwurzelung noch in tiefere Bodenschichten hinabreicht, was zu einer stärkeren Ausdifferenzierung der



räumlichen nFK-Verteilung im Bereich der am höchsten bewerteten Bodenschätzpunkte führen würde.

7.4.2 Allgemeine Beschreibung der Bodenschätzungsergebnisse

Auf den 22 Schlägen des Betriebes in der Gemarkung Eckartshausen wurden insgesamt 542 Bohrpunkte gesetzt, was durchschnittlich 7,17 Bohrpunkte je Hektar ergibt. Einen Eindruck vom Umfang der gewonnenen Informationen gibt Tabelle 29.



lfd.Nr.	Klasse	Zahl	1Schicht			2Schicht			3Schicht			Mächt3	Bodentyp	BA1	BA2	BA3	nFK je dm im Horizont			nFK je Horizont	nFK
			Mächt1	Mächt2	Mächt3	Mächt1	Mächt2	Mächt3	nFK1	nFK2	nFK3										
1	L2Lö	84	Ap	3	M1	4	M2	5	YK	L,fs3	L,fs3	L,fs3	20	20	20	60	80	100	240		
2	L2Lö	85	Ap	3	M1	2	M2	7	YK	L,fs3	L,fs3	L,fs3	20	20	20	60	40	140	240		
3	L2Lö	85	Ap	3	M	9			YK	L,fs3	L,fs3	L,fs3	20	20	20	60	180	0	240		
4	L3Lö	80	Ap	3	M	9			YK	L,fs3	L,fs3	L,fs3	20	20	20	60	180	0	240		
5	L3LöV	76	Ap	3	M1	4	M2	5	YK	L,fs3	L,fs2	L,fs3	20	18	20	60	72	100	232		
6	L3Lö	79	Ap	3	M1	5,5	M2	3,5	YK	L,fs3	L,fs3	L,fs2	20	20	18	60	110	63	233		
7	L2Lö	85	Ap	3	M	9			YK	L,fs3	L,fs3	L,fs3	20	20	20	60	180	0	240		
8	L2Lö	84	Ap	3	M	9			YK	L,fs3	L,fs3	L,fs3	20	20	20	60	180	0	240		
9	L3Lö	78	Ap	3	M1	7	M2	2	YK	L,fs3	L,fs2	L,fs2	20	18	18	60	126	36	222		
10	L3Lö	76	Ap	3	(Sw)M	9			YK	L,fs3	L,fs3	L,fs3	20	20	20	60	180	0	240		

Tabelle 29: Ausschnitt aus der aufbereiteten Bodenschätzungsmatrix der Betriebsflächen (Eigene Darstellung nach KEIL, 2005)

Darin sind am Beispiel des ersten Bohrpunktes:

- Spalte „Klasse“ Bodenklasse nach Bodenart (L), Zustandsstufe (2), Entstehungsart (Lö)
- Spalte „Zahl“ Bodenzahl nach Ackerschätzungsrahmen
- Spalte „1. Schicht“ Oberste Schicht des Bodenhorizontes, Ap = gepflügter Oberbodenhorizont
- Spalte „Mächtigkeit 1“ Mächtigkeit des Ap-Horizontes = 3 dm
- Spalten „2. Schicht bis Mächtigkeit 3“ Jeweilige Schicht des Mineralbodenhorizontes mit korrespondierender Mächtigkeit
- Spalte „Bodentyp“ Angabe des Bodentyps, hier Kolluvisol (YK)
- Spalte „BA1 bis BA3“ Bodenarten der Bodenhorizontabfolge
- Spalte „nFK1 bis nFK3“ nFK pro Dezimeter jeweils vorliegender Bodenart
- Spalte „nFK je Horizont“ Ausmultiplizierte nFK der jeweiligen Bodenhorizonte
- Spalte „nFK“ Addierte Gesamt-nFK der einzelnen Bodenhorizonte

Der enge Zusammenhang zwischen den Bodenzahlen und den festgelegten nFK auf den Schätzungsflächen deutet Abbildung 44 an, in der die Korrelation zwischen den Bodenzahlen und der nFK auf den Schätzungsflächen graphisch dargestellt wird.

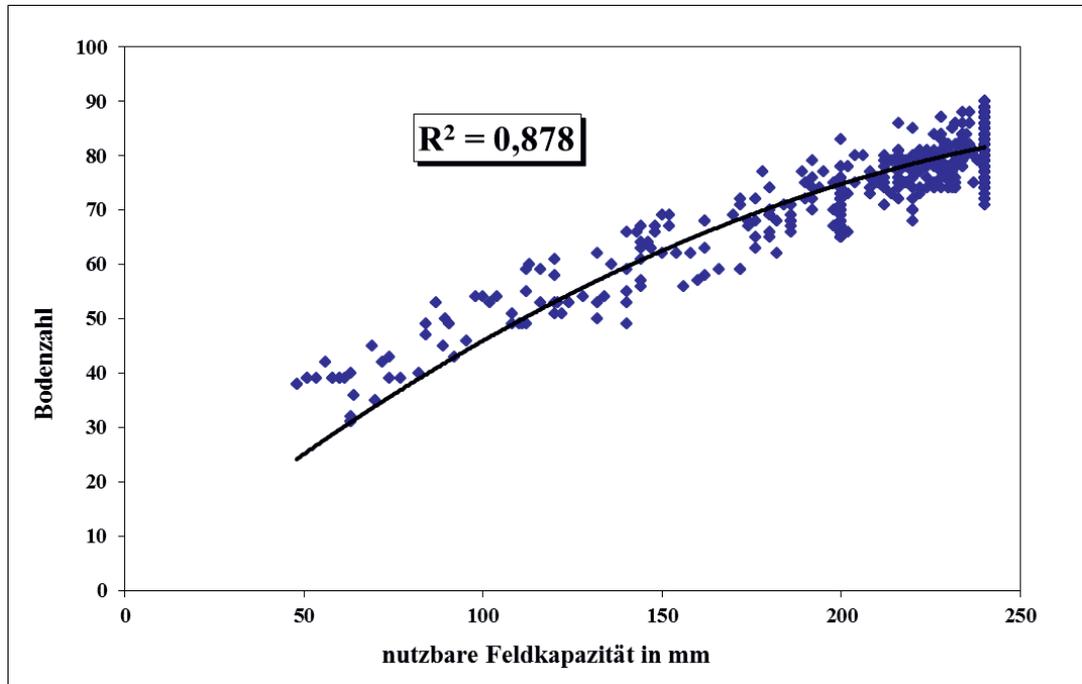


Abbildung 44: Menge an pflanzenverfügbarem Wasser (nFK) und Bodenzahl (KEIL, 2005)

Die fast ausschließlich vorkommende Bodenausprägung auf den Flächen des Betriebes ist der Löss-Boden. Am häufigsten tritt er in den Zustandsstufen 2-4 auf. Die Flächen, die südlich des Hofstandortes liegen, sind durch das Rotliegende als geologischen Untergrund von einer starken Hängigkeit gekennzeichnet. Dadurch sind diese Flächen von Bodenerosion betroffen, und dementsprechend treten erodierte Parabraunerden, Pararendzinen und Kolluvisole auf. Vereinzelt weisen im Unterboden Symptome der Staunässe auf. Da die gefundenen Bodenprofile als charakteristisch für die jeweilige Bodenklasse gelten, wurden für folgende vier Bodenklassen auf den Schlägen Hofacker und Lettkippel Muster- bzw. Vergleichsstücke angelegt: L2Lö 86/91, L3Lö 77/74, L4Lö 67/71 und LT6D 39/36. In den zwischen der Hofstelle und der Landstraße gelegenen Flächen finden sich häufiger Hydromorphie-Merkmale, die als Bodentyp Gley eingestuft wurden und infolgedessen geringere Bodenwertzahlen erhielten. Auffällig ist bei allen Flächen der häufige Wechsel zwischen einzelnen Bodenartenklassen, was sie für die Fragestellungen des PF interessant erscheinen lässt.

7.4.3 Die Ergebnisse der Bodenschätzung der drei Versuchsschläge

Für den Vergleich zwischen den Ertragsdaten und verschiedenen Bodenkennwerten zur Quantifizierung des Erklärungsbeitrages der Bodenparameter der RBS zur räumlichen Variation des Ertrages wurden als Versuchsstandorte die Schläge Hofacker, Lettkippel und Köhlerwald ausgewählt. Alle drei Schläge weisen eine fast gleiche Größe auf und wurden mit einer fast identischen Anzahl an Bohrpunkten beprobt. Alle drei Schläge sind durch hügelige Grundstrukturen mit ausgeprägten Hangfüßen und einem teilweisen Übergang in ein Hochplateau gekennzeichnet. In Tabelle 30 sind verschiedene Kennzahlen der grundlegenden Bodenparameter Bodenzahl (BZ) und Bodendaten der RBS aufgeführt.

Kennzahl	Hofacker	Lettkippel	Köhlerwald
Schlaggröße (ha)	13,1	12,7	12,9
Anzahl Bohrpunkte	87	87	88
Arith. Mittel BZ	75,82	71,77	71,71
Modus BZ	84 und 85	39	78
Median (BZ)	78	77	78
Spannweite BZ	51	53	57
Standardabweichung BZ	11,17	14,32	14,96
Varianz BZ	124,86	205,06	223,80
L2Lö-Punkte	28	23	16
L3Lö-Punkte	38	33	38
L4Lö-Punkte	14	14	17
Rest (BZ<60)	7	17	17

Tabelle 30: Statistische Kennzahlen der Bodenparameter der Versuchsschläge (Eigene Darstellung)

Anhand der Tabelle 30 lässt sich erkennen, dass die Schläge eine ähnliche Struktur hinsichtlich der Bodenkennwerte besitzen. Es sind aber auch erkennbare Unterschiede vor allem in der Verteilung der einzelnen Bodenarten offensichtlich.

Alle drei Schläge weisen eine hohe durchschnittliche Bodenzahl von über 70 auf, wobei sich der Wert des Hofackers etwas von dem der beiden anderen Schläge absetzt. Zudem ist der Hofacker etwas homogener in der Verteilung der Bodenzahlen, was sich in der geringeren Standardabweichung und der kleineren Spannweite ausdrückt. Die größten Unterschiede offenbaren sich bei der Verteilung der Bodenarten im Bereich der Bohrpunkte mit einer Bodenzahl von unter 60. Die absolute Anzahl der Bohrpunkte mit einer Bodenzahl von unter 60 ist bei Lettkippel und Köhlerwald mehr als doppelt so hoch wie beim Schlag Hofacker.



Dieser besitzt dafür entsprechend einen deutlich höheren Anteil an L2Lö-Bohrpunkten, die eine Bodenzahl von über 80 aufweisen.



8 Ertragskartierung in Marienborn

8.1 Theorie der Ertragskartierung

Eine kurze Definition der Ertragskartierung gibt NOACK; „Als Ertragskartierung wird ein Verfahren bezeichnet, bei dem Positionen eines Erntefahrzeugs und die an diesen Positionen mittels Sensoren erfassten Erntemengen in Karten umgesetzt werden, die kleinräumig die Höhe und die Variabilität des Ernteertrages innerhalb eines Schlages abbilden“ (NOACK, 2006, S. 17).

Der Prozess der Ertragskartierung besteht nach NOACK (NOACK, 2007, S. 7 ff.) aus fünf Einzelschritten, die ebenso wie die Theorie der Ertragsdatenerfassung auf dem Mähdrescher in Kapitel 4.2.2 bereits dargestellt worden sind (vgl. Kapitel 4.2.2).

Die Präzision der lokalen Ertragsermittlung ist hierbei nach Steinmayr von mehreren Fehlerquellen bedroht: Verluste von Erntegut am Schneidwerk oder beim Transport zum Sensor, Verstopfungen des Elevators, ungenaue Durchsatzmessung, Fehler bei der Umrechnung auf Flächenertrag, falsche Schätzung oder Schwankungen des Messversatzes sowie Ortungsfehler des DGPS (STEINMAYR, 2002, S. 9). Diese Fehlerpotenziale sollten durch geeignete Korrektur- und Prüfmaßnahmen soweit wie möglich verhindert werden.

Der letzte Einzelprozess der Ertragskartierung, der räumlich von den anderen Einzelschritten getrennt ist, ist die Ertragsdatenbearbeitung auf dem PC. Noack unterscheidet hierbei wiederum fünf Teilschritte, die nacheinander ablaufen: Import der Ertragsdaten, Filterung der Datensätze, chronologische Sortierung der Daten, Koordinatenkonvertierung und räumliche Zuordnung der Daten (NOACK, 2006, S. 28).

Um die Darstellung der Ertragsdatenverteilung einer Ackerfläche zu verbessern, werden die Ertragsdaten klassifiziert. Dies bedeutet, dass die einzelnen Messwerte Ertragsklassen zugeordnet werden, die jeweils entsprechend farblich gekennzeichnet werden. Ein entscheidender Einflussfaktor für die Aussagekraft einer Ertragskarte ist die Festlegung der Klassengrenzen und -breiten, die sich am gewünschten Verwendungszweck der Ertragskarten orientieren sollten (NOACK, 2007, S. 20-21).

Eine räumliche Interpolation der Ertragsmesswerte erlaubt eine bessere Einschätzung des Ertragswertes innerhalb der Fläche, wenn zur Berechnung die Nachbarmesswerte mit hinzugezogen werden. Die Gewichtung einzelner benachbarter Messwerte erfolgt in Abhängigkeit von der räumlichen Entfernung zum Ausgangspunkt (NOACK, 2007, S. 22).

Bei der Interpolation wird ein gleichmäßiges Raster über die ertragskartierte Fläche gelegt und für jeden Rastermittelpunkt unter Berücksichtigung eines festgelegten Suchradius ein Messwert geschätzt. Zu den bekanntesten Interpolationsverfahren im Bereich der Ertragskartierungsprogramme zählen das Inverse Distance-Verfahren und das Kriging-Verfahren (NOACK, 2006, S. 31-32).

8.2 Ertragsdatenerhebung in Marienborn

8.2.1 Technische Ausstattung

Mit Beginn des ersten Ertragskartierungsjahres 2002 wurde ein Mähdrescher des Typs Claas Dominator 108 mit einer Ertragserfassung und einem ACT-Terminal nachgerüstet. Die Mähdrescher der Firma Claas verwenden als System des Korndurchsatzsensors das Konzept der volumetrischen Messung mit Hilfe einer Lichtschranke, siehe Abbildung 45.

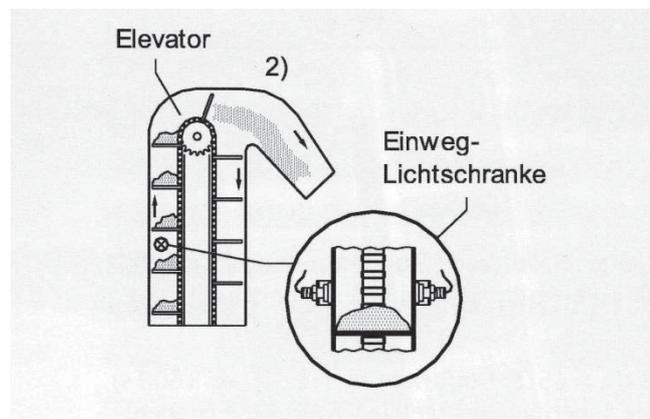


Abbildung 45: Schema der Messung des Korndurchsatzes im Körnerelevator mittels Lichtschranke (DEMMELE, 2001, S. 2)

Hierbei unterbricht das Erntegut in jeder Elevatorzelle eine Lichtschranke. Je länger diese Unterbrechung andauert, desto größer ist der Füllungszustand bzw. das Volumen. Der Ertrag errechnet sich aus dem Volumen des Schüttkegels und der Schütthöhe des Erntegutes, d. h. dem Hektolitergewicht (NOACK, 2007, S. 9).



Der Dominator 108 des mit der Getreideernte beauftragten Lohnunternehmers verfügte über ein Schneidwerk mit der Breite von 5,10 m. Im Jahr 2004 erwarb der Lohnunternehmer einen Mähdrescher der Lexion-Baureihe mit einer Schneidwerksbreite von 6,60 m. In den Jahren 2002 und 2003 wurden alle Flächen mit dem Dominator 108 beerntet. Im Jahr 2004 begann der Übergang zum Lexion-Mähdrescher. Ab 2005 bis 2008 wurden alle Weizen-, Gerste- und Rapsflächen mit der Lexion-Maschine beerntet. Unberührt davon blieb die Körnermaisernte, die in allen Ertragskartierungsjahren mit dem Dominator-Mähdrescher durchgeführt wurde. Durch die größere Schneidwerksbreite und die höhere Fahrgeschwindigkeit des Lexion-Mähdreschers reduzierte sich die Zahl der Ertragsmesspunkte pro Hektar dementsprechend. Die reduzierte Messpunktdichte an Ertragswerten wurde aber durch die verbesserte neuere Technik des Ertragsfassungssystems des Lexion-Mähdreschers kompensiert.

Als Ertragskartierungssoftware wurde das Programm AGRO-MAP der Firma Agrocom (heute CLAAS Agrosystems) der Version 6.5 verwendet. Mit dieser Software wurde die Aufbereitung, Verarbeitung, Analyse und Ausdruck der Ertragsdaten vorgenommen.

8.2.2 Praktische Durchführung der Ertragsdatenerhebung

Alle Ertragsdatenerhebungen wurden wissenschaftlich begleitet, um die optimalen Einstellungen der Ertragsfassungstechnik zu ermitteln und die störungsfreie Funktionsfähigkeit zu gewährleisten, bzw. auf auftretende technische und organisatorische Probleme reagieren zu können. Die einzelnen Maßnahmen der praktischen Durchführung der Ertragsdatenerhebung werden nachfolgend aufgeführt.

Durchführung und Kontrolle der Ertragsdatenerfassung

Die einzelnen Schritte der Ertragsfassung im Rahmen der Ertragskartierung waren:

1. Beschreibung der PCMCIA-Chipkarte mit den Auftragsdaten der jeweiligen Schläge mit dazugehörigen Anbaukulturen.
2. Einlesen der Chipkarte in das ACT-Terminal des Mähdreschers.
3. Erhebung der Ertragsdaten während des Mähdruschs
4. Übertragung der Ertragspunkte auf die Chipkarte



5. Auslesen der Ertragsdaten von der Chipkarte in die Ertragskartierungssoftware AGRO-MAP

Ermittlung des Hektolitergewichtes des Erntegutes

Da die Ertragserfassungssysteme der Claas Mähdrescher mit der volumetrischen Ertragsbestimmung arbeiten, wurde vor jedem Schlag mit Hilfe einer Federwaage das Hektolitergewicht des Erntegutes gemessen und die Einstellung im Mähdrescher bei Bedarf angeglichen.

Kontrollwiegungen

Zur Kalibrierung des Ertragsmesssystems auf dem Mähdrescher wurden für alle Schläge Kontrollwiegungen auf der hofeigenen Waage durchgeführt. Mit den Ergebnissen dieser Kontrollwiegungen wurde das Ertragserfassungssystem des Mähdreschers kalibriert.

Kalibrierung des Feuchtegehaltes des Erntegutes

Die Feuchtemessung auf dem Mähdrescher gestaltete sich nicht zur vollen Zufriedenheit der Beteiligten. Die Kalibrierung des Feuchtesensors des Mähdreschers wurde deshalb, insbesondere bei Druscharbeiten auf großen Schlägen, die sich unter wechselnden Wetterbedingungen oder unter Umständen über mehrere Tage hin vollzogen, mittels der im hofeigenen Labor ermittelten Feuchtwerte durchgeführt.

Protokollierung von Schlagbesonderheiten während der Beerntung

Während des Mähdruschs wurden Auffälligkeiten im Bestand protokolliert. Es handelte sich hierbei z. B. um Unkrautnester, Bereiche mit starkem Ausmaß an Lagergetreide oder Wildschäden.

Kennzeichnung von Druschspuren mit nicht vollständig genutzter Schnittbreite

Es zeigte sich, dass die Ergebnisse der manuellen Teilbreitenschaltung des Schneidwerkes unbefriedigend waren. Vor allem bei in der Breite unregelmäßigen Erntebeeten war es nicht möglich, die tatsächliche Schneidwerksausnutzung über die manuelle Teilbreitenschaltung online zu erfassen. Diese „Problemspuren“ wurden protokolliert und bei der späteren Ertragsdatenbearbeitung eliminiert und die Erträge denen der Nachbarspuren angepasst.

Protokollierung der Fahrgassen

Anfangs bestand die Vermutung, dass durch das Vorhandensein von Fahrgassen in einer Druschspur und der damit verbundenen Verringerung der Bestandesfläche eine Ertragsreduzierung einhergeht. Ein solcher Effekt konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Der Tatbestand der vorhandenen Fahrspur wird wohl dadurch ausgeglichen, dass die Pflanzen direkt an der Fahrspur mehr Licht und mehr Platz zur Verfügung haben und dadurch höhere Beträge realisieren als Pflanzen im dichten Bestand.

8.2.3 Umfang der Ertragsdatenerhebung

Die Ertragskartierung konnte mit der zur Verfügung stehenden Technik bei den im Betrieb angebauten Ackerkulturen Winterweizen, Winter- und Sommergerste, Winterraps und Körnermais durchgeführt werden.

In Abhängigkeit des fruchtfolgebedingten Anbauprogrammes und äußerer ökonomischer Einflüsse variierten die jährlichen Flächen der Ertragskartierung leicht. In Tabelle 31 sind die Umfänge der jährlich ertragskartierten Flächen und, in prozentualem Anteil daran, die erfolgreich durchgeführten Ertragskartierungen aufgezeigt.

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Gesamt
Ackerfläche Betrieb (ha)	172,23	172,23	172,23	172,23	172,23	172,23	172,23	1205,61
Ertragskartierte Fläche (ha)	129,89	125,00	121,72	133,15	136,47	134,28	172,23	952,74
Erfolgreich kartierte Fläche (ha)	117,19	123,03	83,45	133,15	125,97	134,28	168,91	885,98
Erfolgsquote in %	90,22	98,42	68,56	100,00	92,31	100,00	98,07	93,33

Tabelle 31: Anteil der erfolgreich durchgeführten Ertragskartierungen an der gesamten Ertragskartierungsfläche (Eigene Darstellung)

Die Gründe für missglückte Ertragskartierungen lagen in technischen Problemen bei der Ertragserfassung auf dem Mähdrescher und Fehler bei der Datenübertragung vom Mähdrescher auf den PC. Da die größte Fehlerquote in den Anfangsjahren (2002 und 2004) des Einsatzes der beiden verwendeten Mähdrescher liegen, können die entstandenen Datenverluste als Lernkosten eingestuft werden. In der Gesamtbetrachtung über die sieben Jahre der Ertragserfassung sind von ins-

gesamt 952,74 Hektar Ertragskartierung 885,98 Hektar erfolgreich kartiert worden. Dies entspricht einer Quote von 93,33 %.

In Abbildung 46 werden die Anteile der einzelnen Ackerkulturen an der Gesamtfläche der erfolgreich durchgeführten Ertragskartierungen aufgezeigt.

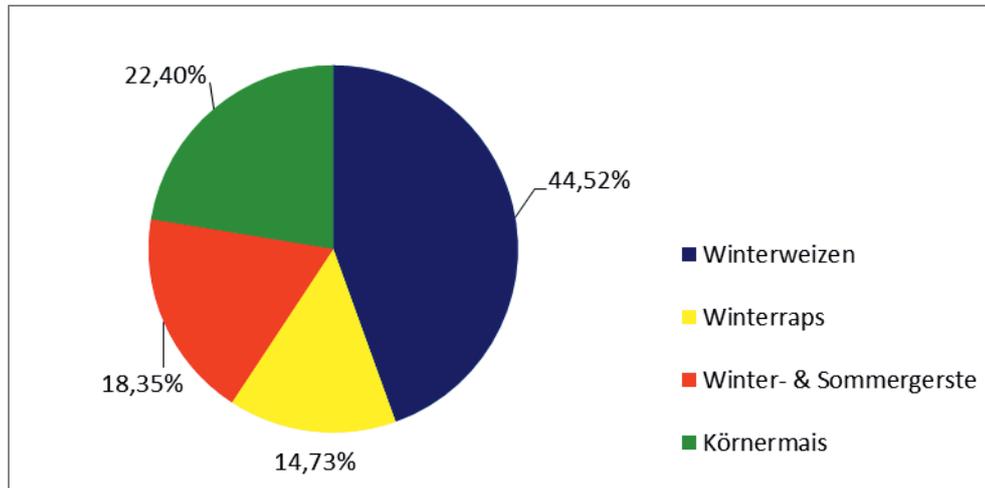


Abbildung 46: Anteile der einzelnen Ackerkulturen an der Gesamtfläche der erfolgreichen Ertragskartierungen (Eigene Darstellung)

8.3 Bearbeitung der Ertragsdaten und Ergebnisse

Der zweite Teil der Ertragskartierung befasst sich mit der Verarbeitung der auf dem PC eingelesenen Ertragsrohdaten. Die einzelnen Schritte der Ertragsdatenbearbeitung richten sich nach dem gewünschten Verwendungszweck der Ertragsdaten. Zur Darstellung der kompletten Kette der Verarbeitungsschritte wird nachfolgend die Erstellung einer fruchtartabhängigen Ertragserwartungskarte zur Abschätzung der erwarteten räumlichen Ertragsverteilung auf einem Schlag für eine festgelegte Anbaukultur aufgezeigt. Es sei darauf hingewiesen, dass diese auf mindestens zwei vorjährigen Ertragskarten aufbauende Ertragserwartungskarte nicht zwingend das Ertragspotenzial abbildet.

1. Ertragsdateneinlesung auf PC

Die Ertragsdaten werden in die Ertragskartierungssoftware eingelesen und dort schlagweise abgespeichert.

2. Erstellung einer Rohdatenertragskarte

Mit den unbearbeiteten Ertragsdaten wird eine Ertragskarte auf Punktbasis erstellt. Die angegebenen Daten beruhen auf den Ergebnissen der Ertrags- und Feuchtemessungen der Sensoren des Mähdreschers. In dieser Rohdatenkarte lassen sich fehlerhafte Messungen (Streifigkeit durch mangelhafte Teilbreitenschaltungen, Vorgewende, fehlende Messpunkte) gut lokalisieren. In Abbildung 47 ist eine solche Rohdatenertragskarte dargestellt. Die angesprochenen Fehlerquellen sind in der Karte deutlich zu erkennen.

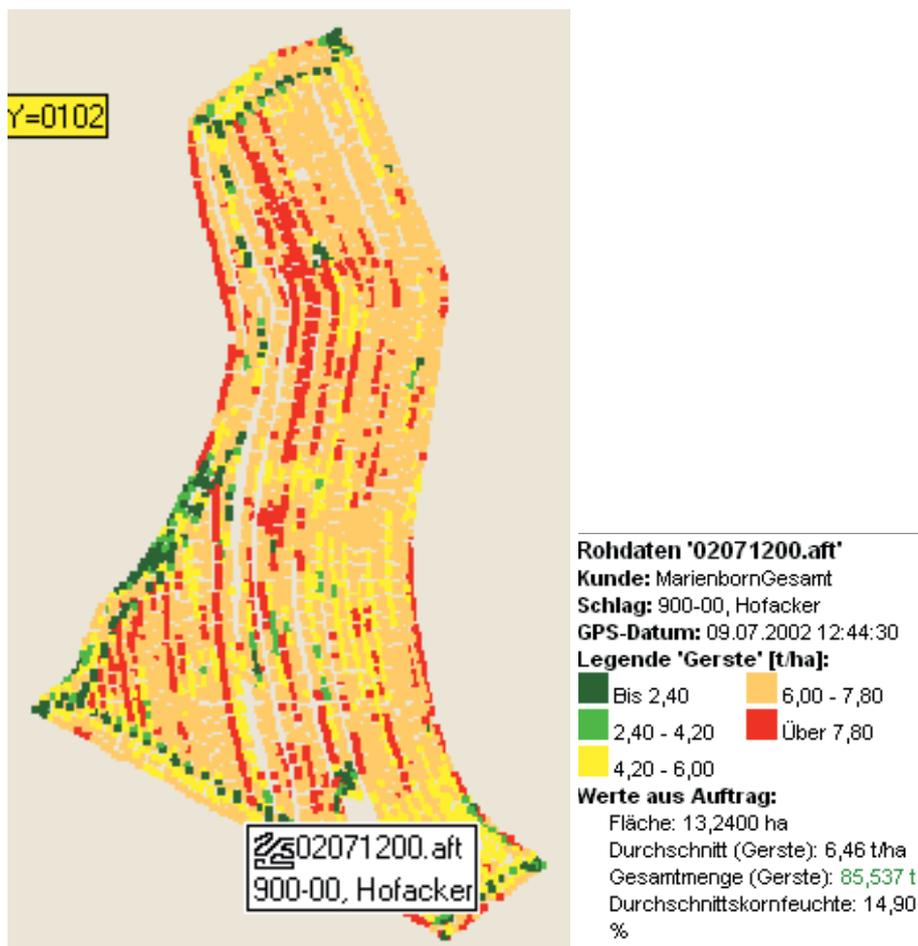


Abbildung 47: Rohdatenertragskarte (Eigene Darstellung)

3. Eliminierung von fehlerhaften Messpunkten

Zusätzlich zu den oben genannten Fehlerquellen werden an dieser Stelle weitere Korrekturen an den Ertragsdaten vorgenommen. So werden unrealistische Messwerte ausgeschlossen. Üblicherweise lässt man durch die Ertragskartierungssoftware alle Werte entfernen, die außerhalb der doppelten Standardabweichung vom



Mittelwert liegen. Auch die in Kapitel 8.2.2 erwähnten protokollierten Auffälligkeiten während des Mähdruschs werden an dieser Stelle bearbeitet.

4. Abgleich der vom Mähdrescher erfassten Erträge mit den Werten der Kontrollwiegung

Nachdem die fehlerhaften Messwerte entfernt worden sind, werden die erfassten Erträge mit dem Ergebnis der Kontrollwiegung auf der Hofwaage abgeglichen. Zur Kalibrierung wird der auf 15 % Feuchte (Weizen, Gerste, Körnermais) bzw. 9 % (Raps) geeichte Ertragswert verwendet.

5. Erstellung der Kartenlegende

An die Korrektur und Kalibrierung der Ertragsdaten schließt sich die Analyse der Ertragspunkte und ihre Aufbereitung für das Layout an. Die Aussagekraft einer Ertragskarte wird entscheidend von der Anzahl und der Breite der Ertragsklassen bestimmt. Hier hat sich die Anzahl von fünf Ertragsklassen in ihren Ausprägungen sehr geringer / geringer / mittlerer / hoher / sehr hoher Ertrag als sinnvoll und praktikabel erwiesen. Die mittlere Ertragsklasse wird so ausgewählt, dass der langjährige Durchschnittsertrag in diese Klasse fällt. Als Klassenbreite bietet sich zur Übersicht über eine einjährige Ertragskarte eine Abstufung in 10 dt- bzw. 5 dt-Schritten in Abhängigkeit der absoluten Ertragshöhe an (bei Weizen eher Klassenbreiten von 10 dt, bei Raps eher von 5 dt). Als Kontrollinstrument der gewählten Klassenbreiten kann das Histogramm der relativen Häufigkeiten der einzelnen Ertragsklassen verwendet werden. Idealerweise bilden sie eine Normalverteilung der Ertragsklassen ab.

6. Interpolation der Ertragspunkte

Zur besseren Übersichtlichkeit der Ertragsergebnisse generiert die Ertragskartierungssoftware nach zuvor festgelegten Parametern ausgewählter Interpolationsverfahren eine flächenhafte Ertragskarte, in der Polygone gleichartiger Erträge farblich voneinander abgestuft werden. Hierbei werden die zuvor festgelegten Klasseneinteilungen der Ertragswerte übernommen. Beispielhaft ist hier die Hofacker-Ertragskarte des Jahres 2005 abgebildet, in der sich eine deutliche Ertragsüberlegenheit der rechten Schlaghälfte abbildet (siehe Abbildung 48).

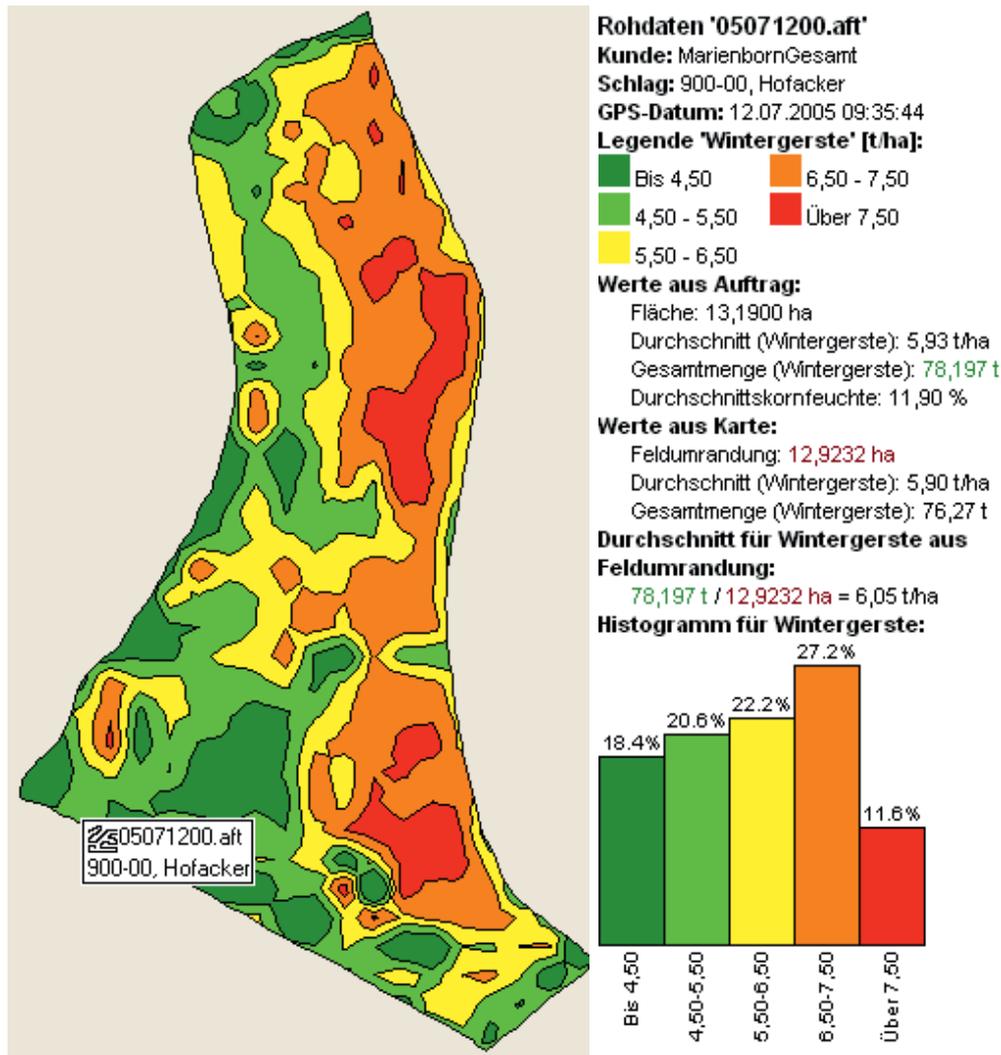


Abbildung 48: Ertragskarte Wintergerste Hofacker 2005 (Eigene Darstellung)

7. Vergleich zweier oder mehrerer Ertragskarten

Welche Probleme bei der automatischen Übernahme einer wie oben beschriebenen Legende für mehrere Erntejahre entstehen können, demonstriert Abbildung 49. Beim Vergleich zweier Ertragskartenjahre eines Schlages mit gleicher Anbaukultur zeigt sich, dass für Jahre mit großen Ertragsunterschieden eine auf dem langjährigen Durchschnittsertrag basierende Ertragsklasseneinteilung nicht adäquat ist. Während sich in der linken Ertragskarte über 90 % der Ertragspunkte in den drei höchsten Ertragsklassen befinden, liegen über 90 % der Ertragspunkte der rechten Ertragskarte in den drei schlechtesten Ertragsklassen.

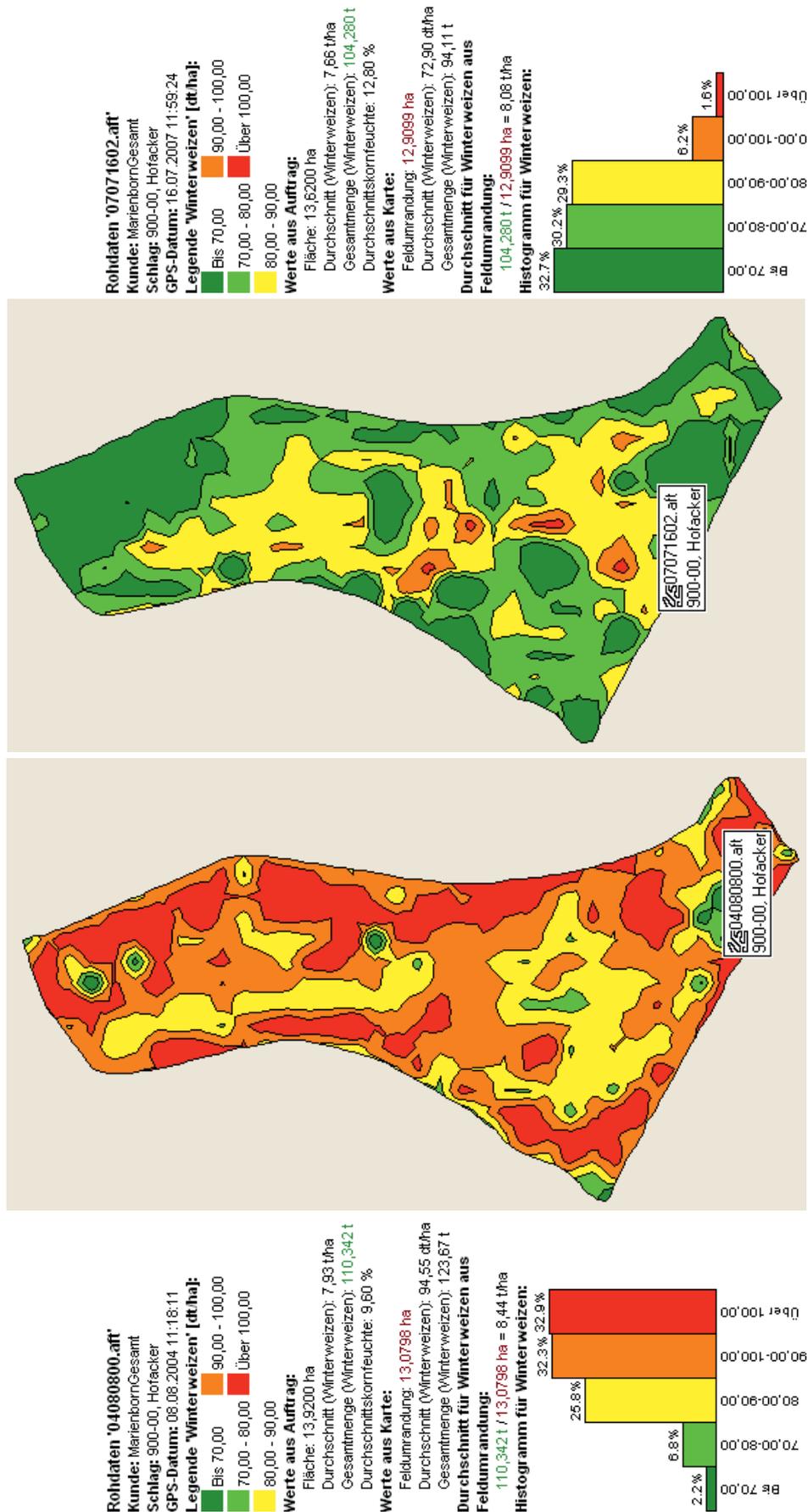


Abbildung 49: Zwei Weizenetragskarten des Schlates Hofacker der Jahre 2004 und 2007 mit gleicher Legende (Eigene Darstellung)



Auf Grund des Aussehens der beiden Ertragskarten scheint der Schlag im Jahr 2004 (linke Karte) nur aus Hohertragszonen und im Jahr 2007 (rechte Karte) nur aus Niedrigertragszonen zu bestehen, was definitiv nicht der Fall ist.

8. Standardisierung der Ertragskarten

Um Ertragskarten eines Schlages aus mehreren Jahren mit gleicher Anbaukultur miteinander vergleichen zu können, werden sie standardisiert. Das heißt, die Einteilung der Klassengrenzen der Ertragswerte orientiert sich nicht mehr an absoluten Zahlen, sondern relativ in prozentualen Schritten zum Durchschnittsertrag. Dabei wurde folgende prozentuale Einteilung gewählt:

weniger als 85 % des Durchschnitts = sehr geringer Ertrag

85-95 % des Durchschnitts = geringer Ertrag

95-105 % des Durchschnitts = mittlerer Ertrag

105-115 % des Durchschnitts = hoher Ertrag

mehr als 115 % des Durchschnitts = sehr hoher Ertrag

Daraufhin lässt sich zwar nicht mehr beim Vergleich zweier Ertragskarten des gleichen Schlages auf den ersten Blick erkennen, in welchem Jahr die höheren Erträge erreicht werden konnten, dafür aber ist der Informationsgehalt bezüglich des eigentlichen Aussageinhaltes einer Ertragskarte, nämlich der Lokalisierung von Hoch- und Niedrigertragszonen, deutlich gestiegen. Mit der Standardisierung der Ertragskarten ist es möglich, rückblickend die Verteilung der Hoch- und Niedrigertragszonen für jedes einzelne Ertragsjahr relativ zum jeweiligen Durchschnittsertrag zu lokalisieren. Um nun Erkenntnisse darüber zu gewinnen, welche Ertragsverteilungen in Zukunft zu erwarten sind, muss noch der letzte Schritt in der Ertragsdatenbearbeitung vollzogen werden.

9. Generierung einer Ertragserwartungskarte

Basierend auf den standardisierten Ertragskarten für eine bestimmte Anbaukultur und unter Angabe eines Zielertrages lässt sich eine Ertragserwartungskarte erstellen. Diese Ertragserwartungskarte fußt lediglich auf den Ertragshöhen und räumlichen Ertragsverteilungen der in die Berechnung einfließenden standardisierten Ertragskarten vorheriger Jahre. In Abbildung 50 ist eine Ertragserwartungskarte des Hofackers für die Anbaukultur Weizen abgebildet.

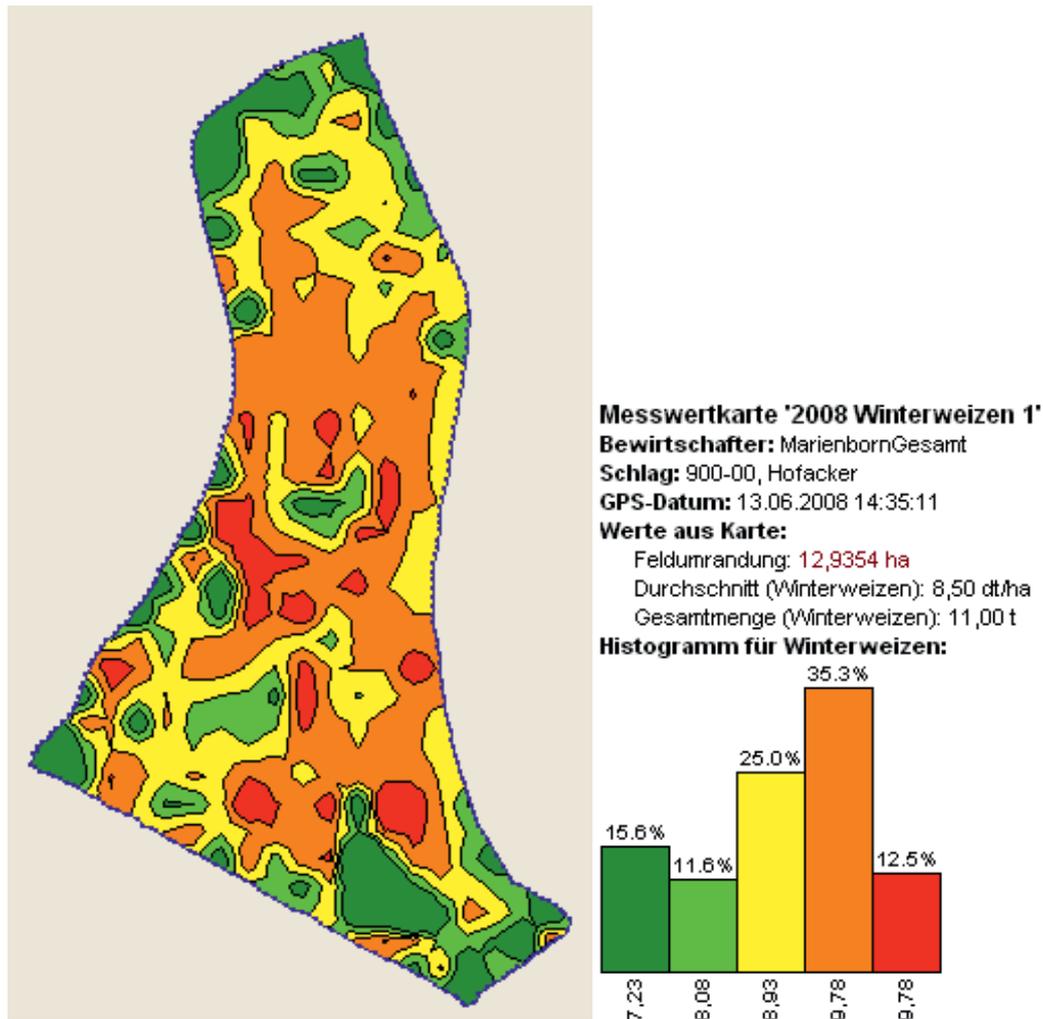


Abbildung 50: Ertragserwartungskarte Weizen für den Schlag Hofacker (Eigene Darstellung)

Deutlich zu erkennen ist die geringe Ertragserwartung an den Rändern des Schlages und im Vorgewende, während sich die Hohertragszonen – sofern man nach nur zwei einfließenden Weizenertragsjahren schon davon sprechen kann – eher im südlichen Teil des Schlages versprengt auf einzelne kleine Teilflächen in Insellage zeigen.

Demgegenüber ergibt die Ertragserwartungskarte des gleichen Schlages für Gerste eine gänzlich andere Gestalt. Hier konzentrieren sich die Ertragsklassen „sehr hohe Erträge“ und „hohe Erträge“ deutlich auf die rechte Hälfte des Schlages (siehe Abbildung 51).

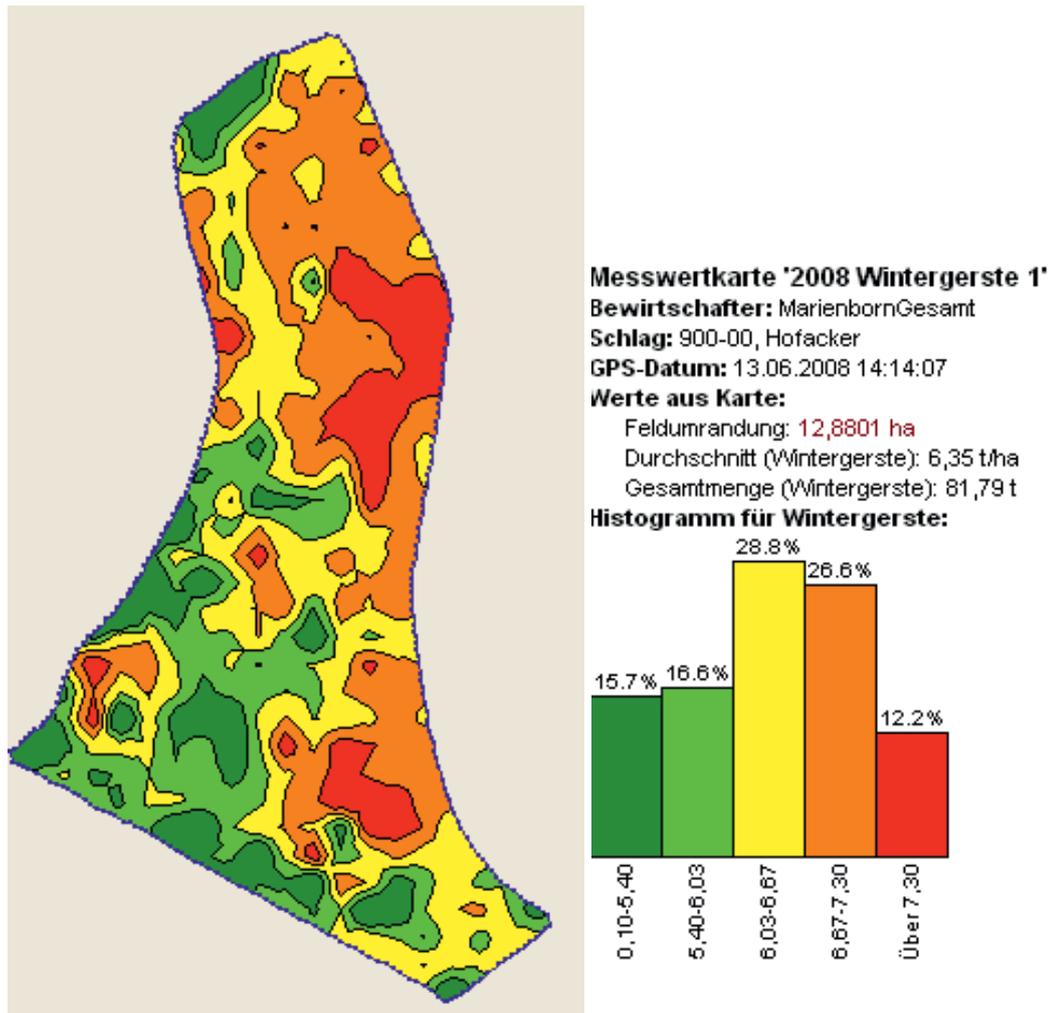


Abbildung 51: Ertragserwartungskarte Gerste für den Schlag Hofacker (Eigene Darstellung)

Die Fragestellung, die sich aus diesen Ertragserwartungskarten ergibt, lautet: Lassen sich die räumlichen Ertragsvariationen auf die Witterungsbedingungen der jeweiligen Ertragskartenjahre und die kulturartspezifischen Ansprüche diesbezüglich zurückführen, oder sind die bodenkundlichen Standortbedingungen ursächlich für die Ertragsvariation in der Fläche?

Der Beantwortung des zweiten Teils der Frage widmet sich Kapitel 9, in dem die Ergebnisse der Ertragskartierung für drei Versuchsschläge mit den Resultaten der RBS verglichen werden.



9 Analyse des Zusammenhangs der Ertragsergebnisse mit den Nachschätzungsdaten der Reichsbodenschätzung

9.1 Auswahl der Versuchsschläge

An die Versuchsschläge werden drei Anforderungen gestellt:

1. Ausreichende Schlaggröße
2. Standort innerhalb der RBS-Nachschätzungsfläche
3. Ausreichende Anzahl an Ertragskartenjahren

Unter Berücksichtigung der drei aufgezählten Anforderungen fiel die Wahl auf die Schläge Hofacker, Lettkippel und Köhlerwald. In Tabelle 32 werden die geforderten Merkmale für jeden der drei Schläge aufgezeigt.

	Hofacker	Lettkippel	Köhlerwald
Schlaggröße	13,1	12,7	12,9
Erfolgte Nachschätzung	Ja	Ja	Ja
Durchgeführte Ertragskartenjahre	7	7	7
Erfasste Ertragskartenjahre	7	6	7
Verwertbare Ertragskartenjahre	5	5	5

Tabelle 32: Kennwerte der Versuchsschläge (Eigene Darstellung)

Die drei ausgewählten Schläge sind die drei größten Schläge des Lehr- und Versuchsbetriebes, die nicht regelmäßig in mehrere Teilschläge unterteilt werden, wie dies beim größten Schlag des Betriebes der Fall ist. Alle drei Schläge befinden sich zudem in der Gemarkung Büdingen-Eckartshausen und sind deswegen auch im Rahmen der RBS-Nachschätzung kartiert worden.

Zwar wurden in allen sieben Jahren Ertragsmessungen auf allen drei Schlägen durchgeführt, aber aus folgenden Gründen mussten jeweils zwei Ertragskartenjahren der einzelnen Schläge verworfen werden:

- Hofacker 2003: Aufteilung des Schlages in Raps und Zuckerrüben
- Hofacker 2008: Aufteilung des Schlages in Winter- und Sommergerste
- Lettkippel 2002: Ausfall der Ertragsmessung auf Grund einer Mähdrescherreparatur
- Lettkippel 2003: Aussaat verschiedener Gerstesorten

- Köhlerwald 2004: Unbrauchbare Ertragskarte auf Grund sehr schlechter Erntebedingungen
- Köhlerwald 2006: Auswirkungen eines teilflächenspezifischen N-Düngungsversuches

9.2 Aufbereitung der Ertragsdaten nach der 10-er Methode

Wie bereits dargelegt, deckt ein Bodenbohrpunkt ein Areal von ca. 1600 m² ab. In Abhängigkeit des eingesetzten Mähreschers mit der dazugehörigen Schneidwerksbreite und der Fahrschwindigkeit befinden sich auf einer Fläche dieser Größe 40-50 Ertragsmesspunkte verteilt über mehrere Fahrspuren mit unterschiedlichen Entfernungen zum Bodenbohrpunkt. Da mit zunehmender Entfernung vom Bohrpunkt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer veränderten Bodenbewertung ansteigt, verringert sich dementsprechend die Wahrscheinlichkeit, dass ein weiter vom Bohrpunkt entfernt liegender Ertragsmesspunkt noch mit dem eigentlich geschätzten Bodenwert verglichen werden kann.

Auf Grund dieser Tatsache wird der Kreis der Ertragsmesspunkte zur Analyse der Zusammenhänge zwischen Bodengegebenheiten und Ertragsausprägung von durchschnittlich 40 - 50 Ertragsmesspunkten pro Bohrpunkt der RBS auf 10 Ertragsmesspunkte pro RBS-Bohrpunkt reduziert.

Diese zehn Ertragsmesspunkte werden nach folgenden Kriterien ausgewählt und gewichtet: Zunächst wird der den Koordinaten des Bodenbohrpunktes räumlich nächstgelegene Ertragsmesspunkt der fehlerkorrigierten und ertragskalibrierten Ertragskarte identifiziert. Der Ertrag dieses „Volltreffers“ wird mit 30 % gewichtet. Die zwei diesem „Volltreffer“ am nächsten gelegenen Ertragspunkte in den beiden benachbarten Druschspuren werden mit jeweils 15 % gewichtet. Die restlichen 40 % zur Berechnung des Vergleichsertragsmesswertes ergeben sich zu gleichen Teilen aus den sieben dann nächstgelegenen Ertragsmesspunkten in den drei betreffenden Druschspuren.

$$Y_{Ges} = 0,3 Y_{VT} + 0,3 \left(\frac{Y_{NN1} + Y_{NN2}}{2} \right) + 0,4 \left(\frac{Y_{WN1} + Y_{WN2} + \dots + Y_{WN7}}{7} \right)$$



Darin sind:

Y_{Ges}	Gewichteter Gesamtertrag des aufbereiteten Ertragspunktes
Y_{VT}	Ertragswert des dem Bodenschätzpunkt am nächsten gelegenen Ertragsmesspunktes („Volltreffer“)
Y_{NNi}	Ertragswerte der beiden dem Bodenschätzpunkt am nächsten gelegenen Ertragsmesspunkte in den beiden Nachbardruschspuren
Y_{WNI}	Ertragswerte der sieben dann dem Bodenschätzpunkt nächstgelegenen Ertragsmesspunkte der drei betroffenen Druschspuren

Diese Methode soll fortan als 10-er Methode bezeichnet werden. Die Prozedur zur Ermittlung dieser Ertragspunkte zum Vergleich mit den Bodenkennwerten der jeweiligen Bodenschätzpunkte wird für jeden Bohrpunkt der RBS und für jedes Ertragskartenjahr durchgeführt.

9.3 Ausgewählte Bodenkennwerte für den Vergleich zwischen RBS und den Ertragswerten

Insgesamt werden die aufbereiteten Ertragswerte nacheinander mit sieben Bodenparametern verglichen. Drei davon sind Kenngrößen der RBS, die direkt bei der Bodenschätzung erhoben werden: Bodenzahl (BZ), Ackerzahl (AZ) und nutzbare Feldkapazität (nFK). Diese drei Größen stehen in einem rechnerischen Zusammenhang zueinander (vgl. Abbildung 44), unterscheiden sich aber in der für die Fragestellung der Arbeit wichtigen Faktoren der Berücksichtigung natürlicher Standortbedingungen (AZ) bzw. der Einbeziehung der Wasserverfügbarkeit (nFK). Ein Bodenkennwert ist abgeleitet (modifizierte Ackerzahl) und drei weitere Parameter beruhen auf der Eliminierung einzelner Bodenschätzpunkte auf Grund vorgegebener Ausschlusskriterien.

9.3.1 Bodenzahl

Die Bodenzahl als Wertzahl zur Bemessung der Ertragsfähigkeit eines Bodens wird direkt aus den Originaldaten der Nachschätzung auf dem Lehr- und Versuchsbetrieb Marienborn-Heldenbergen entnommen.

9.3.2 Ackerzahl

Die Ackerzahl entsteht durch die Verrechnung der Bodenzahl um Zu- oder Abschläge für Geländeform oder klimatische Bedingungen. Die Werte der Ackerzahlen werden der Feldschätzungskarte des zuständigen Finanzamtes entnommen.

9.3.3 Modifizierte Ackerzahl

Bei der Ackerzahl wird für mehrere Bohrpunkte der Wert der Ackerzahl einer Ackerzahlklasse angenommen. Um diese Zu- oder Abschläge von der Fläche der Ackerzahlklasse auf den einzelnen Bohrpunkt herunterzuberechnen, werden für die Ackerzahl des einzelnen Bohrpunktes nicht die Werte der Ackerzahlklasse übernommen, sondern jede Bodenzahl innerhalb der Ackerzahlklasse gesondert mit den Zu- oder Abschlägen verrechnet. Diese Größe soll als modifizierte Ackerzahl bezeichnet werden.

9.3.4 Nutzbare Feldkapazität

Die nFK (vgl. Kapitel 2.4.1) wurde als Wasserhaltekapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes (nFKdB) bis in eine Tiefe von 1,20 m ermittelt. Die Werte der nFK entstammen wie die Bodenzahlen den Originaldaten der Nachschätzung.

9.3.5 Bodenzahl / Ackerzahl mit eliminierten Vorgewendepunkten

Auf Grund der landschaftlichen Gegebenheiten ist an großen Teilen der beiden Versuchsschläge Lettkippel und Köhlerwald kein funktionsfähiger Wirtschaftsweg vorhanden. In Anbetracht dessen werden viele Wende-, Transport- und Abładetätigkeiten auf dem Vorgewende der Schläge vollzogen, was zu Verdichtungserscheinungen und daraus resultierenden Minderertrag führte, sodass eine objektive Vergleichbarkeit der Erträge mit den vorhandenen Bodenwerten nicht möglich ist. Als Konsequenz daraus werden an den entsprechenden Stellen der beiden genannten Schläge einzelne Bodenschätzungspunkte nicht in die Bewertung miteinbezogen.

Der Versuchsschlag Hofacker verfügt an den maßgeblichen Schlagenden über gut ausgebaute Wirtschaftswegen, was der Grund dafür ist, dass keine nennenswerten Ertragsminderungen im Vorgewende festgestellt wurden und auf den Ausschluss von Bodenschätzungspunkten verzichtet werden konnte.

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den Mindererträgen im Vorgewende der beiden betroffenen Schläge nicht um durch Befüll- oder Maschinenentleerzeiten des Ertragsmesssystems induzierte Ertragsverringernngen handelt. Diese Effekte werden im Rahmen der Ertragskartenbereinigenngen berücksichtigt.



9.3.6 Eliminierung der L4Lö-Bodenschätzpunkte

In einem Beitrag über den Kulturzustand des Bodens in der Bodenschätzung am Beispiel der Pararendzina aus Löss verweist HARRACH darauf, dass sich die Regenwurmaktivität und die Bodenstruktur der meisten Ackerböden verbessert hat und dies bei vielen Pararendzinen trotz starker Hangneigung zu einer Eindämmung der Erosion und zur Anhebung der Ertragsfähigkeit geführt hat (HARRACH, 2010). Diesen Gedanken aufnehmend werden in dieser Vergleichsvariante alle mit L4Lö (Lehmböden der Zustandsstufe 4 aus Löss entstanden) geschätzten Bodenbohrpunkte aus der Berechnung herausgenommen, um zu überprüfen, ob der Erklärungsbeitrag der verbleibenden Bodenzahl- oder Ackerzahlverteilungen ansteigt.

9.3.7 Eliminierung der Bodenschätzpunkte mit dem Bodentyp Kolluvisol

In einer weiteren bodenkundlichen Fragestellung soll untersucht werden, inwieweit die oftmals hoch eingeschätzten Standorte des Bodentyps Kolluvisol die hohe Einstufung der Ertragsfähigkeit durch entsprechend hohe Ertragswerte rechtfertigen oder ob die Neigung der Kolluvien zur Vernässung in Jahren mit ausreichenden Niederschlägen zu Mindererträgen führt. Zu diesem Zweck wurden die Bodenschätzungspunkte mit dem Bodentyp Kolluvisol aus den Berechnungen entfernt und die Veränderung des Bestimmtheitsmaßes registriert.

9.3.8 Verwendetes statistisches Verfahren

Als statistisches Verfahren wird die lineare Einfachkorrelation nach PEARSON verwendet, die allgemein dazu dient, die Stärke des Zusammenhangs zwischen Variablen zu messen (BAHRENBERG et al., 1999, S. 147). Zur Abbildung der Stärke des Zusammenhangs zwischen aufbereitetem Ertragspunkt und jeweiligem Bodenparameter wird der Korrelationskoeffizient r berechnet. Durch Quadratur dieses Wertes und Multiplikation mit 100 wird das prozentuale Bestimmtheitsmaß B ermittelt, das an dieser Stelle angibt, in welchem Ausmaß die Variation der pflanzlichen Erträge in der Fläche von der Variation der jeweiligen Bodenparameter in der Fläche abhängt, also wieviel Prozent der Ertragsvariation durch den jeweiligen Bodenparameter erklärt werden kann.

9.4 Darstellung und Beschreibung der Ergebnisse

9.4.1 Hofacker

In Tabelle 33 werden die berechneten Bestimmtheitsmaße des Vergleichs zwischen aufbereiteten Ertragswerten und verschiedenen Bodenkennwerten der Reichsbodenschätzung für den Schlag Hofacker aufgezeigt.

Bodenkennwerte	Wintergerste 2002	Winterweizen 2004	Wintergerste 2005	Winterraps 2006	Winterweizen 2007	Gesamt 2002-2007
Bodenzahl	8,15	12,97	22,55	11,03	1,36	25,41
Ackerzahl	7,52	16,01	19,95	9,91	1,92	24,50
Ackerzahl modifiziert	8,44	15,62	18,25	10,00	2,47	25,02
nFK	8,07	9,27	25,71	16,18	4,53	31,25
Bodenzahl ohne L4Lö	11,12	11,46	30,37	21,24	5,34	39,58
Bodenzahl ohne Kolluvien	11,99	6,13	20,18	16,81	20,68	25,34

Tabelle 33: Bestimmtheitsmaß zwischen Ertrag und ausgewählten Bodenkennwerten für den Schlag Hofacker in % (Eigene Darstellung)

Alle dargestellten Bodenkennwerte zeigen in jedem Erntejahr eine positive Korrelation zu den Ertragswerten. Mit Ausnahme des Jahres 2007 bewegen sich die Bestimmtheitsmaße in einer Spanne von 6 % - 30 %. In der kumulierten Betrachtungsweise der einzelnen Bodenkennwerte pendeln sich die Werte bis auf eine Ausnahme in einem engen Zahlenraum zwischen 24,50 % und 31,25 % ein. Die Ausnahme bildet der Vergleich der Erträge mit den Bodenzahlen ohne die mit L4Lö geschätzten Bohrpunkte, dessen Bestimmtheitsmaß fast 40 % erreicht.

Im zeitlichen Vergleich sticht das Jahr 2005 mit den deutlich höchsten Werten in allen Vergleichskategorien heraus. Wertmäßig am nächsten kommen diesem Ertragskartenjahren die Ergebnisse der Erntejahre 2004 und 2006, in denen zumeist noch zweistellige Prozentzahlen des Bestimmtheitsmaßes realisiert werden können. Einen äußerst geringen Erklärungsbeitrag liefert das Jahr 2007, in dem aber das Bestimmtheitsmaß der Vergleichsvariante „Bodenzahl ohne Kolluvien“ mit über 20 % deutlich hervorsteicht. In Abbildung 52 werden die Ergebnisse des Schlages Hofacker graphisch präsentiert.

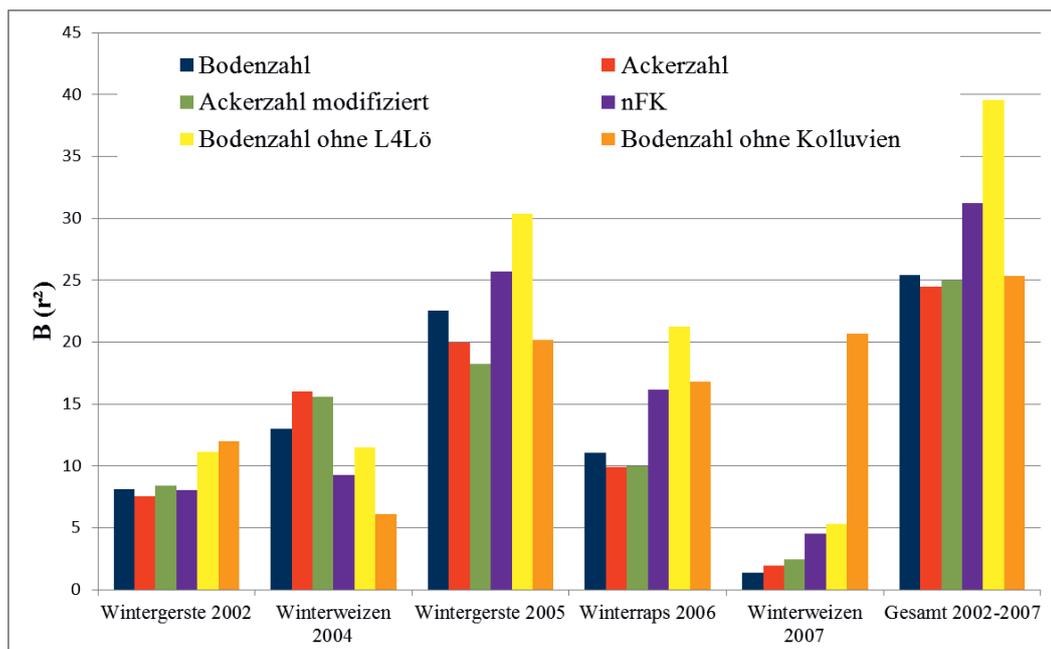


Abbildung 52: Graphische Darstellung der Bestimmtheitsmaße zwischen Ertrag und ausgewählten Bodenkennzahlen des Schlates Hofacker (Eigene Darstellung)

Beim Vergleich des Erklärungsbeitrages der einzelnen Bodenkennwerte zur räumlichen Ertragsvariabilität ragt das Ergebnis der Variante „Bodenzahl ohne L4Lö“ heraus. Dieses Ergebnis deutet sich bei der Abbildung der Durchschnittserträge der einzelnen Bodenklassen an (siehe Tabelle 34 und Abbildung 53).

Bodenklassen	WG 2002	WW 2004	WG 2005	WR 2006	WW 2007
L2Lö	66,47	94,82	66,35	46,66	70,53
L3Lö	64,28	90,72	63,20	45,23	72,20
L4Lö	65,81	86,81	60,68	48,81	77,74
Rest	56,56	83,72	47,07	34,65	61,54
Durchschnitt	64,61	90,85	62,51	45,42	71,73

Tabelle 34: Durchschnittserträge der einzelnen Bodenklassen des Schlates Hofacker in dt/ha (Eigene Darstellung)

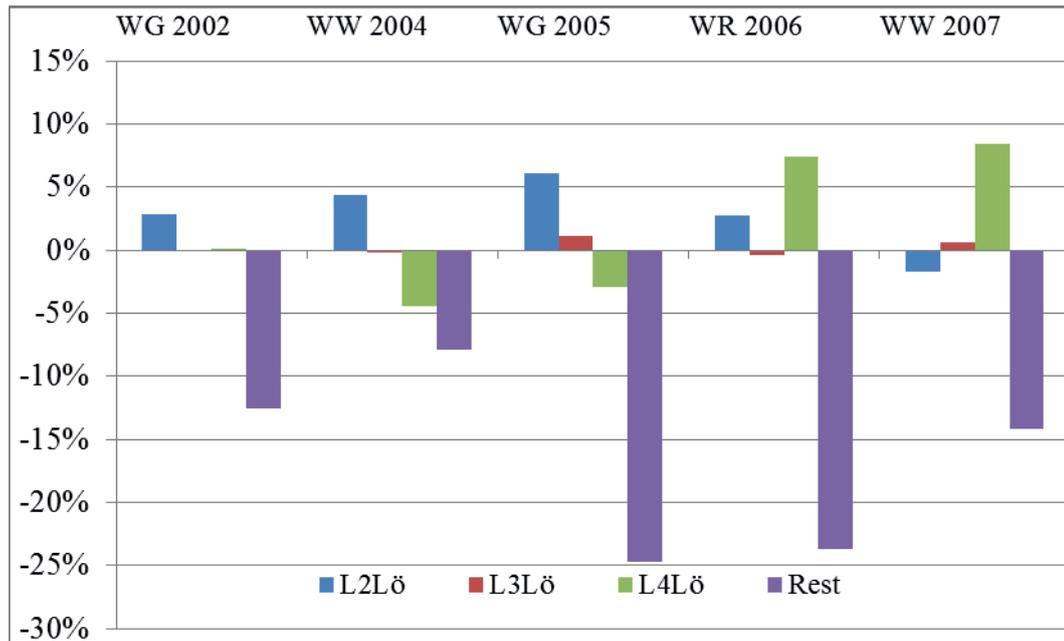


Abbildung 53: Prozentuale Abweichungen der Erträge der einzelnen Bodenklassen vom Durchschnitt der ausgewählten Ertragspunkte des Schlags Hofacker (Eigene Darstellung)

Die in der potenziellen Ertragsfähigkeit eigentlich niedriger eingestuften L4Lö-Bohrpunkte zeigen sich in den Jahren 2002, 2006 und 2007 den L3Lö- und in den Jahren 2006 und 2007 sogar den L2Lö-Bodenschätzpunkten durchschnittlich im Ertrag überlegen. Daraus resultiert die in diesen Jahren deutliche relative Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes gegenüber der Erklärungsvariante Bodenzahl. Zahlenmäßig reiht sich hinter der „Bodenzahl ohne L4Lö“-Variante das Bestimmtheitsmaß der nFK ein, die sich wiederum um absolut 6 - 7 % von den anderen Bodenparametern abhebt. Die Bestimmtheitsmaße der Bodenkennzahlen Bodenzahl, Ackerzahl und modifizierte Ackerzahl liegen für den Zeitraum der fünf Ertragskartenjahre auf einem annähernd gleichen Niveau von 24,50 % bis 25,41 %.

9.4.2 Lettkippel

In Tabelle 35 werden die berechneten Bestimmtheitsmaße des Vergleichs zwischen aufbereiteten Ertragswerten und verschiedenen Bodenkennwerten der Reichsbodenschätzung für den Schlag Lettkippel aufgezeigt.

Bodenkennwerte	Winterraps 2004	Winterweizen 2005	Wintergerste 2006	Winterraps 2007	Wintergerste 2008	Gesamt 2004-2008
Bodenzahl (BZ)	2,85	9,23	12,00	17,71	10,48	22,55
BZ ohne Vorge- wende (VG)	6,98	34,34	24,81	19,74	23,45	31,07
Ackerzahl ohne VG	8,15	38,80	27,90	25,02	29,94	37,13
Modifizierte Ackerzahl ohne VG	7,86	38,96	27,28	24,47	30,04	36,57
nFK ohne VG	11,47	39,88	29,34	30,12	22,45	40,63
Ackerzahl ohne VG und ohne L4Lö	8,95	44,74	29,35	34,02	34,67	43,53
Ackerzahl ohne VG und ohne Kolluvien	11,56	52,86	31,30	24,98	38,80	42,45

Tabelle 35: Bestimmtheitsmaß zwischen Ertrag und ausgewählten Bodenkennwerten für den Schlag Lettkippel in % (Eigene Darstellung)

Auf dem Schlag Lettkippel können die räumlichen Ertragsvariabilitäten durch die ausgewählten Bodenparameter der RBS deutlich besser erklärt werden als auf dem Schlag Hofacker. Die Werte liegen ca. absolut 10 % über den Werten des Hofackers.



Im zeitlichen Vergleich ragt auch auf dem Schlag Lettkippel das Jahr 2005 mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß heraus. Der Wert von 52,86 % in der Vergleichsvariante „Ackerzahl ohne Kolluvien“ im Jahr 2005 ist der höchste Einzelwert in allen 15 ausgewählten Ertragskarten und damit die einzige Vergleichsvariante, in der mehr als die Hälfte der Ertragsvariabilität durch den betreffenden Bodenkennwert erklärt werden kann.

Wenn man die aus oben genannten Gründen nicht verwertbaren Zahlen des Vorgewendes unberücksichtigt lässt, erklärt jeder der Bodenparameter im Jahr 2005 mehr als ein Drittel der räumlichen Ertragsvariabilität. Die Ergebnisse der Jahre 2006-2008 bewegen sich auf einem untereinander sehr ähnlichen Niveau, das aber deutlich unter den Höchstwerten des Jahres 2005 liegt. Gegenüber den anderen vier Ertragskartenjahren fallen die Ergebnisse des Jahres 2004 deutlich ab und liegen zum größten Teil im einstelligen Bereich.

Die bei diesem Schlag vorgenommene Bereinigung der Punktemengen um die im Vorgewende liegenden Bodenschätzungspunkte erbringt eine sehr starke Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes bei dem Bodenkennwert Bodenzahl, so z. B. von 9,23 % auf 34,34 % im Jahr 2005 oder von 10,85 % auf 23,45 % im Jahr 2008. Im Gegensatz zum Hofacker kann sich auf diesem Schlag der Wert des Erklärungsbeitrages der Ackerzahl deutlich von dem der Bodenzahl abheben, wobei sich das Bestimmtheitsmaß der modifizierten Ackerzahl in etwa auf dem Niveau des Bestimmtheitsmaßes der herkömmlichen Ackerzahl bewegt. Eine nochmalige Erhöhung des Erklärungsbeitrages auf über 40 % ergibt sich bei der Zusammenhangsanalyse zwischen Ertrag und nFK. Da auf dem Schlag Lettkippel die Ertragsvariabilitäten offensichtlich von der Ackerzahl besser als von der Bodenzahl abgebildet werden, wurde als Grundlage für die Vergleichsvariante mit der Eliminierung der L4Lö- bzw. Kolluvisol-Punkte die Ackerzahl verwendet. Auch bei diesem Schlag erhöht sich durch die jeweilige Nicht-Berücksichtigung der L4Lö- bzw. Kolluvisol-Punkte das Bestimmtheitsmaß. Dies spiegelt sich in Tabelle 36 und in Abbildung 54 wieder, in der die Ertragsüberlegenheit der L4Lö-Punkte gegenüber den L3Lö-Punkten in zweien der fünf Jahre zu erkennen ist.

Bodenklassen	WR 2004	WW 2005	WG 2006	WR 2007	WG 2008
L2Lö	28,19	100,35	72,00	29,31	68,90
L3Lö	25,97	99,18	63,77	23,64	67,37
L4Lö	27,11	96,83	62,52	28,00	66,44
Rest	20,05	68,87	44,54	13,06	53,35
Durchschnitt	25,33	92,40	60,93	23,25	64,45

Tabelle 36: Durchschnittserträge der einzelnen Bodenklassen des Schlags Lettkippel in dt/ha (Eigene Darstellung)

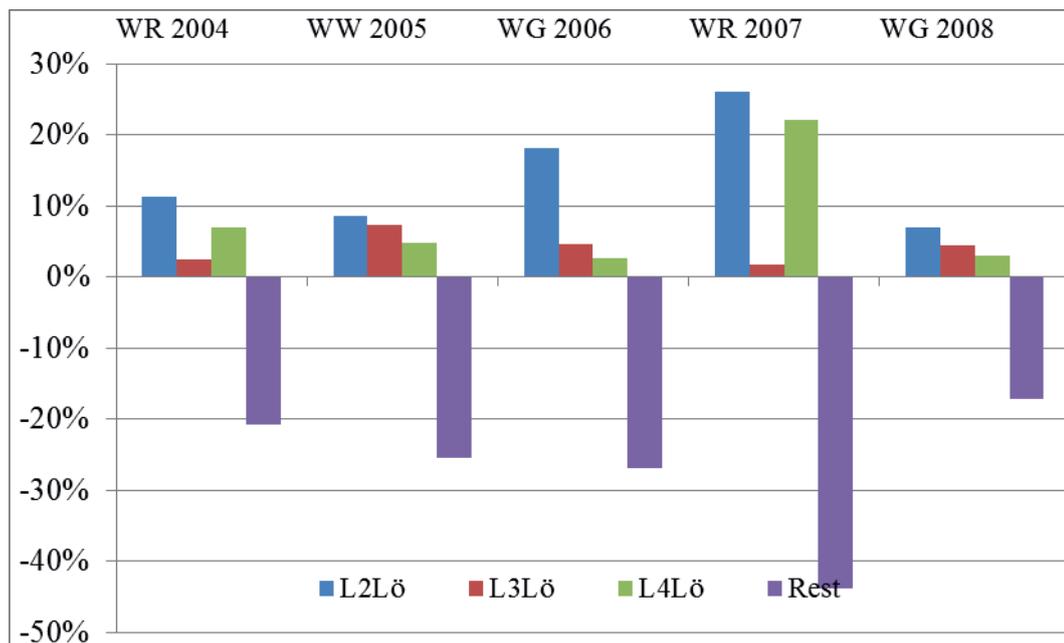


Abbildung 54: Prozentuale Abweichungen der Erträge der einzelnen Bodenklassen vom Durchschnitt der ausgewählten Ertragspunkte des Schlags Lettkippel (Eigene Darstellung)

9.4.3 Köhlerwald

Der Schlag Köhlerwald beinhaltet die niedrigsten Erklärungsbeiträge der drei Versuchsschläge. Mit dem Ertragskartenjahr 2002 besitzt dieser Schlag auch das Jahr, das mit Abstand die niedrigsten Erklärungsbeiträge aller 15 untersuchten Ertragskarten aufweist. Bei einigen Bodenkennwerten dieses Jahres befindet sich die Korrelation nur hauchdünn im positiven Bereich mit Werten des Bestimmtheitsmaßes von unter einem Prozent. Auch das Jahr 2008 ist geprägt von Werten des Bestimmtheitsmaßes im einstelligen Bereich. Die beiden Jahre mit dem höchsten Erklärungsbeitrag sind – wieder – das Jahr 2005 und das Jahr 2007, die mit einer Ausnahme auf zweistellige Bestimmtheitsmaße verweisen können.

Bodenkennwerte	Winterraps 2002	Winterweizen 2003	Winterraps 2005	Wintergerste 2007	Winterraps 2008	Gesamt 2002-2008
Bodenzahl (BZ)	0,12	2,72	7,49	12,08	2,98	7,33
BZ ohne Vorge- wende (VG)	0,36	7,29	20,70	18,00	7,49	17,36
Ackerzahl ohne VG	0,07	5,96	17,12	22,99	6,84	15,10
Modifizierte Ackerzahl ohne VG	0,17	7,01	16,95	19,44	7,66	16,40
nFK ohne VG	1,28	7,03	25,03	15,20	8,53	19,66
Ackerzahl ohne VG und ohne L4Lö	0,15	10,20	20,28	21,91	7,81	17,67
Ackerzahl ohne VG und ohne Kolluvien	4,53	10,78	24,11	15,97	7,30	22,76

Tabelle 37: Bestimmtheitsmaß zwischen Ertrag und ausgewählten Bodenkennwerten für den Schlag Köhlerwald in % (Eigene Darstellung)

In Tabelle 37 sind die Ergebnisse der Bestimmtheitsmaße für den Schlag Köhlerwald dargestellt. In der kumulierten Auswertung aller fünf Ertragskarten bewegen sich die Erklärungsbeiträge zur räumlichen Ertragsvariation unter Vernachlässigung der Variante mit der Einbeziehung der fehlerhaften Vorgewendepunkte in einer Spanne von 15,10 % bis 22,36 %.

Auch auf diesem Schlag ergibt die Bereinigung der Gesamtheit der Bodenschätzungspunkte um diejenigen, die im Vorgewende des Ackers liegen, einen deutlichen Effekt der Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes. Auf dem Schlag Köhlerwald übertrifft das Bestimmtheitsmaß der Bodenzahl – über den gesamten Zeitraum 2002-2008 gesehen – wertmäßig das der Ackerzahl und der modifizierten Ackerzahl leicht, weswegen die Vergleichsvarianten mit dem Ausschluss der L4Lö-Punkte bzw. der Kolluvisol-Punkte auf die Bodenzahl bezogen werden.

Im Gegensatz zu den anderen beiden Schlägen ist der Effekt der Eliminierung der mit L4Lö-geschätzten Punkte nur minimal. Schon der Blick auf die nach Bodenklassen aufgeschlüsselten Erträge in den einzelnen Jahren lässt keine Rückschlüsse auf einen Zusammenhang zwischen Bodenklassen und Erträgen zu (vgl. Tabelle 38 und Abbildung 55). So sind die Ertragswerte der L4Lö-Punkte in zwei von fünf Jahren die höchsten aller Bodenklassen, in zwei von fünf Jahren aber auch die niedrigsten aller Vergleichsgruppen.

Bodenklassen	WR 2002	WW 2003	WR 2005	WG 2007	WR 2008
L2Lö	26,20	75,90	36,98	47,97	37,92
L3Lö	30,99	75,89	37,29	44,17	36,94
L4Lö	25,60	77,60	31,44	50,66	37,66
Rest	27,76	73,40	32,13	38,59	34,13
Durchschnitt	28,88	75,42	35,42	44,13	36,50

Tabelle 38: Durchschnittserträge der einzelnen Bodenklassen des Schlages Köhlerwald in dt/ha (Eigene Darstellung)

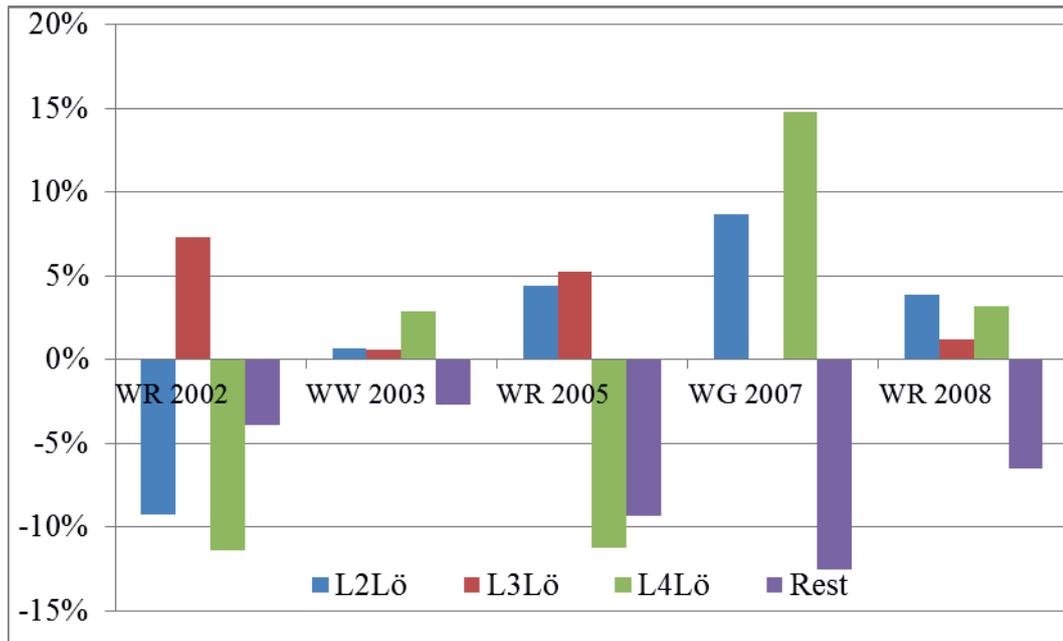


Abbildung 55: Prozentuale Abweichungen der Erträge der einzelnen Bodenklassen vom Durchschnitt der ausgewählten Ertragspunkte des Schlags Köhlerwald (Eigene Darstellung)

Die Nicht-Berücksichtigung der Bohrpunkte mit dem Bodentyp Kolluvisol ergibt dagegen einen deutlichen Effekt und resultiert in einem für diesen Schlag geltenden Höchstwert des Bestimmtheitsmaßes von 22,76 %. Von den direkt aus der RBS entnommenen Bodenkennwerten weist wieder die nFK den höchsten Erklärungsbeitrag auf, allerdings auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau von nicht einmal 20 %.

9.5 Analyse der Ergebnisse

An dieser Stelle werden mehrere Ansätze vorgestellt, um die beschriebenen Ergebnisse zu strukturieren und zu analysieren. Außerdem wird im Folgenden die Bedeutung der einzelnen Bodenparameter für die Erklärung der räumlichen Ertragsvariabilitäten herausgearbeitet.

9.5.1 Rangfolge der Bodenkennwerte auf Grundlage der ermittelten Bestimmtheitsmaße

Die Reihenfolge der untersuchten Bodenkennwerte hinsichtlich ihres Erklärungsbeitrages zur räumlichen Ertragsvariation ist von Schlag zu Schlag und von Jahr zu Jahr verschieden, wenngleich sich gewisse Grundtendenzen auf den ersten Blick erkennen lassen. Um diese erste vage Einschätzung auf eine breitere empirische Basis zu stellen, wird eine Methode angewendet, die sich am Ranking der Bodenparameter in den einzelnen Jahren orientiert. Zunächst wird für jede der

15 Ertragskarten ein Ranking der Bodenparameter auf Grundlage der prozentualen Bestimmtheitsmaße vorgenommen.

Hofacker	WG 2002	WW 2004	WG 2005	WR 2006	WW 2007
BZ	4	3	3	4	6
AZ	6	1	5	6	5
AZ modifiziert	3	2	6	5	4
nFK	5	5	2	3	3
BZ / AZ ohne L4Lö	2	4	1	1	2
BZ / AZ ohne Kolluvien	1	6	4	2	1
Lettkippel	WR 2004	WW 2005	WG 2006	WR 2007	WG 2008
BZ	6	6	6	6	5
AZ	4	5	4	3	4
AZ modifiziert	5	4	5	5	3
nFK	2	3	3	2	6
BZ / AZ ohne L4Lö	3	2	2	1	2
BZ / AZ ohne Kolluvien	1	1	1	4	1
Köhlerwald	WR 2002	WW 2003	WR 2005	WG 2007	WR 2008
BZ	3	3	3	4	4
AZ	6	6	5	1	6
AZ modifiziert	4	5	6	3	3
nFK	2	4	1	6	1
BZ / AZ ohne L4Lö	5	2	4	2	2
BZ / AZ ohne Kolluvien	1	1	2	5	5

Tabelle 39: Rangfolge der Bodenkennwerte für die einzelnen Ertragskartenjahre (Eigene Darstellung)

Anschließend werden die Absolutwerte der Rankingzahlen addiert und durch die Anzahl der Ertragskartenjahre geteilt. Anhand der ermittelten durchschnittlichen Rankingzahl wird die abschließende Rangordnung der Bodenparameter vorgenommen. Es sei darauf hingewiesen, dass die Bodenzahl des Hofackers gleichgestellt ist mit der um die Vorgewendepunkte bereinigte Bodenzahl des Lettkippels und des Köhlerwaldes.

In Tabelle 40 ist das abschließende Ergebnis des Rankings dargestellt, das Aufschluss darüber gibt, welche Bodenparameter den höchsten Erklärungsbeitrag liefern. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse wird die durchschnittliche Platzierung der jeweiligen Bodenkennzahl angegeben.



Platzierung	Bodenkennwert	Ø-Rankingzahl
1	BZ / AZ ohne L4Lö	2,33
2	BZ / AZ ohne Kolluvien	2,40
3	nFK	3,20
4	AZ modifiziert	4,20
5	BZ	4,40
6	AZ	4,47

Tabelle 40: Rangfolge der Bodenparameter mit dem höchsten Erklärungsbeitrag (Eigene Darstellung)

Demnach liefert die Vergleichsvariante mit der Eliminierung der als L4Lö geschätzten Bohrpunkte über alle drei Versuchsschläge und fünf Ertragskartenjahren hinweg den höchsten Erklärungsbeitrag zur räumlichen Ertragsvariation unter den sechs untersuchten Bodenparametern. Dicht auf folgt der Bodenkennwert der Boden- bzw. Ackerzahl, um die Bohrpunkte mit dem Bodentyp Kolluvisol bereinigt. Als bester Bodenkennwert, der direkt aus der RBS übernommen werden kann, belegt die nFK den dritten Platz, bevor die drei restlichen Bodenparameter auf nahezu gleichem Rankingniveau folgen. Anhand der durchschnittlichen Rankingzahl lässt sich erkennen, dass die Abstände zwischen einzelnen Bodenkennwerten sehr gering sind. Trotz der geringen Abstände zueinander können die durchschnittlichen Rankingzahlen der sechs Bodenkennwerte in drei Gruppen zusammengefasst werden: Position 1+2 (mit den Werten 2,33 und 2,40), Position 3 (3,20) und Position 4+5+6 (4,20, 4,40 und 4,47).

Der aus den Daten der RBS abgeleitete Bodenparameter modifizierte Ackerzahl generiert keinen höheren Erklärungsbeitrag als die herkömmliche Ackerzahl. Die Bestimmtheitsmaße der beiden Bodenparameter bewegen sich im Durchschnitt auf nahezu identischem Niveau. In acht Ertragskartenanalysen erreicht die modifizierte Ackerzahl, in sieben Ertragskartenanalysen die herkömmliche Ackerzahl den größeren Erklärungsbeitrag.

9.5.2 Rangfolge der Ertragskartenjahren einzelner Schläge auf Grundlage der ermittelten Bestimmtheitsmaße

Nach der gleichen Vorgehensweise wie unter Kapitel 9.5.1 werden Rankings der einzelnen Ertragskartenjahren vorgenommen. Dies geschieht für jeden Schlag getrennt, da sich die kleinräumigen Standortbedingungen der Schläge und die entsprechenden daraus resultierenden Erklärungsbeiträge nicht miteinander vergleichen lassen.

chen lassen. Auffällig ist, dass nach dieser Reihungsmethode auf allen drei Versuchsschlägen das Jahr 2005 die höchsten Bestimmtheitsmaße im Vergleich zu den anderen Ertragskartenjahren aufweist. Da diese Vorrangstellung von den natürlichen Standortbedingungen der Schläge unabhängig ist, ist zu vermuten, dass es sich um jahresbedingte Einflüsse und hier im Besonderen um die klimatischen Bedingungen handeln dürfte. Eine Analyse der klimatischen Bedingungen des Jahres 2005 ergab keine stichhaltigen Hinweise auf zu berücksichtigende Besonderheiten. Tendenziell werden in den Jahren 2006 und 2008 höhere Bestimmtheitsmaße erreicht, während die Jahre 2002 und 2004 eher durch geringere Erklärungsbeiträge zu den räumlichen Ertragsvariationen jener Jahre auffallen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass keine grundsätzliche Rangfolge der einzelnen Jahre – mit Ausnahme des Jahres 2005 – getroffen werden kann.

9.5.3 Einfluss des Klimas

Das Jahr 2005 weist auf allen drei Versuchsschlägen die höchsten Bestimmtheitsmaße für die einzelnen Bodenparameter auf. Es liegt die Vermutung nahe, dass dies durch klimatische Einflüsse bedingt ist. Als Bodenparameter zum Vergleich mit den Klimadaten wird die nFK herangezogen, die einen unmittelbaren Bezug zu den Witterungsbedingungen durch den Auffüllungsgrad der Wasserhaltekapazität eines Standortes enthält. Der Theorie folgend, müsste in Jahren mit einer guten Abbildung der räumlichen Ertragsheterogenitäten durch die nFK das Wasser der ertragslimitierende Faktor sein. Ein erster Blick auf die Jahresniederschlagssummen des Untersuchungszeitraumes 2002 – 2008 (Tabelle 41) scheint diese Vermutung zu bestätigen.

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Gesamt
2002	47	147	43	52	79	33	113	58	63	147	120	52	954
2003	85	8	30	22	76	44	53	14	32	37	54	46	501
2004	69	32	37	23	79	68	113	106	61	54	66	22	730
2005	66	27	32	105	75	39	66	72	62	44	55	43	686
2006	25	49	45	56	106	36	107	112	6	97	52	28	719
2007	56	84	58	0	110	60	98	108	50	78	73	59	834
2008	47	62	78	78	17	56	66	89	76	96	33	80	778

Tabelle 41: Monatliche Niederschläge für den Zeitraum 2002-2008 am Standort Marienborn (Hofeigene Wetterstation, DWD, 2013a)

Mit 686 mm ist das Jahr 2005 das Jahr mit den zweitniedrigsten Niederschlägen im Betrachtungszeitraum. Wenn man aber den für das Wachstum der

Getreidepflanzen relevanten Zeitraum April – Juli betrachtet, stellt sich das Ergebnis komplett anders dar. Dieser Zeitraum ist im Jahr 2005 im Vergleich der Jahre 2002 – 2008 derjenige mit den zweithöchsten Niederschlägen (siehe Tabelle 42).

	April	Mai	Juni	Juli	Gesamt
2002	52	79	33	113	277
2003	22	76	44	53	195
2004	23	79	68	113	283
2005	105	75	39	66	285
2006	56	106	36	107	305
2007	0	110	60	98	268
2008	78	17	56	66	217

Tabelle 42: Monatliche Niederschläge für den Zeitraum April bis Juli der Jahre 2002-2008 am Standort Marienborn (Hofeigene Wetterstation, DWD, 2013a, Eigene Berechnungen)

Nach Aussage von VAN EIMERN / HÄCKEL lässt sich der Trockenheitsstatus eines Standortes am besten mit der klimatischen Wasserbilanz (KWB) beschreiben (VAN EIMERN / HÄCKEL, 1984, S. 46, vgl. Kapitel 2.4.3).

In Tabelle 43 sind die Werte der KWB für den Zeitraum 1. April – 31. Juli für die Jahre 2002 – 2008 in Monatsschritten aufgeführt. Die Daten entstammen der den Versuchsflächen nächstgelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes, die über entsprechende Datenerfassungen verfügt und wurden nach der Penman-Wendling-Methode berechnet. Die Übersicht offenbart für das Jahr 2005 eine Besonderheit. Dieses Jahr ist das einzige im Beobachtungszeitraum, das vom 1. April an bis zur 2. Maidekade eine positive KWB aufweist, bevor diese für den Rest des Betrachtungszeitraums ebenfalls negativ wird.

	April	Mai	Juni	Juli	Gesamt
2002	-28	6	-103	14	-111
2003	-73	-30	-115	-91	-309
2004	-62	-27	-68	-15	-172
2005	35	-10	-77	-77	-129
2006	-35	4	-106	-81	-218
2007	-109	-26	64	-40	-111
2008	6	-87	-67	-70	-218

Tabelle 43: Monatliche Werte der Klimatischen Wasserbilanz der Jahre 2002-2008 am Standort Marienborn (DWD, 2013a, Eigene Berechnungen)

Eine größere Aussagekraft für den Zusammenhang zwischen der KWB und der nFK besitzt die Darstellung des zeitlichen Verlaufes der KWB in einer Wasserhaushaltskurve. Die Abbildung 56 zeigt die Wasserhaushaltskurve für den Standort Eckartshausen für die Jahre 2004 und 2005. Das Jahr 2004 dient dabei als Beispiel für ein Jahr mit relativ niedrigen Erklärungsbeiträgen der nFK zu den räumlichen Ertragsheterogenitäten (siehe Tabelle 33 und Tabelle 35). Es wird von einer aufgefüllten nFK am 1. April ausgegangen und die Werte der KWB als kumulierte Werte fortgeschrieben, wobei der Wert der kumulierten KWB nie den Wert Null überschreiten kann, da kein Wasser über eine aufgefüllte nFK hinaus im Boden gespeichert werden kann. Auf der Ordinate werden als Kardinalpunkte des Wasserhaushaltes die Werte eingezeichnet, die dem halben Wert der nFK der einzelnen Bodenklassen entsprechen und bei deren Unterschreitung deutliche Ertragseinbußen zu erwarten sind. Als konkrete Werte werden hierbei ausgewiesen: L2Lö: 120 mm; L3Lö: 110 mm; L4Lö: 90 mm und Rest: 40 mm (jeweils die Hälfte der durchschnittlichen nFK der einzelnen Bodenklassen).

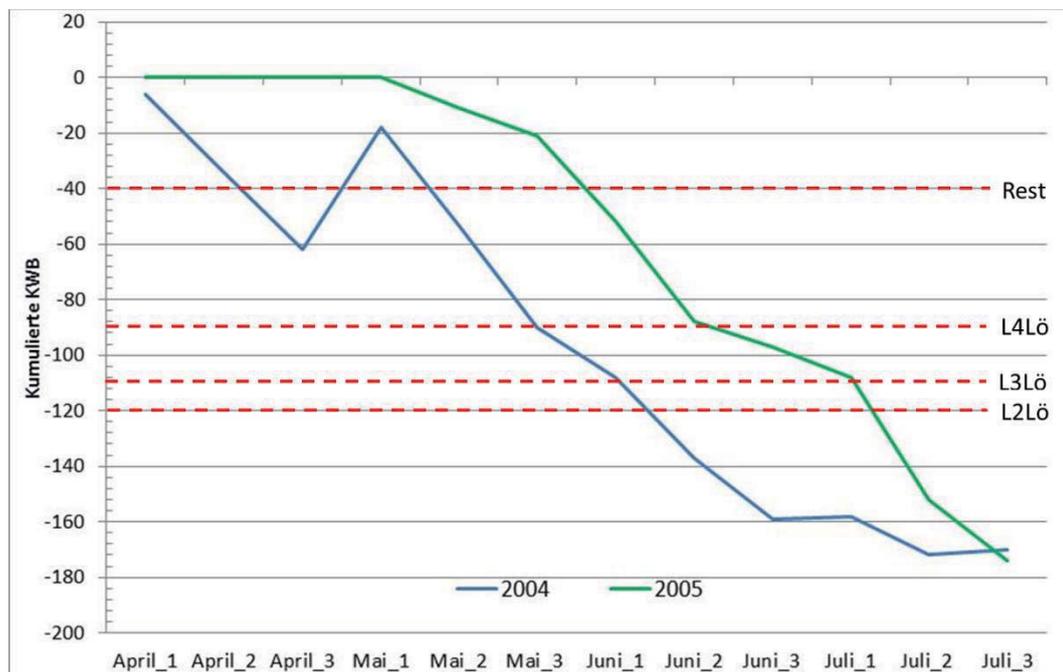


Abbildung 56: Wasserhaushaltskurven der Jahre 2004 und 2005 für den Standort Marienborn (Eigene Berechnungen, DWD, 2013a)

Mit Hilfe der Wasserhaushaltskurve lassen sich Erklärungen für das hohe Bestimmtheitsmaß der nFK im Jahr 2005 finden. Bedingt durch die positive KWB bis Mitte Mai konnten sich üppige Pflanzenbestände entwickeln. Durch das Absinken der kumulierten KWB im Juni unter die kritischen Marken der nFK-Werte der niedrig geschätzten Bodenpunkte und der L4Lö-Punkte erfolgte eine räum-



liche Ertragsdifferenzierung zu Gunsten der Standorte mit hoher Wasserhaltekapazität, deren Wasserreserven die negative kumulierte KWB besser überstanden. Im Gegensatz dazu geraten die Standorte im Jahr 2004 bereits im April in eine negative kumulierte KWB, die nicht ganz so starke Pflanzenbestände erwarten lassen. Im Juni 2004 fällt die kumulierte KWB so deutlich ins Minus, dass auch die guten L2Lö-Standorte betroffen sind und die nFK nicht so stark ertragsdifferenzierend wirkt wie 2005.

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich um Schlussfolgerungen aus einzelnen Jahren handelt und zur Verallgemeinerung dieser Aussagen eine umfangreichere Datengrundlage notwendig ist.



10 Verwertung der Analyseergebnisse

10.1 Bisherige Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Ergebnissen der RBS und Ernteerträgen

Seit der Durchführung der Reichsbodenschätzung in den 1930-er Jahren wurden in unregelmäßigen Zeitabständen mehrere Untersuchungen über die Aussagefähigkeit der RBS bezüglich der Ertragsfähigkeit von Ackerpflanzen angestellt.

Eine der ersten Abhandlungen darüber waren die Untersuchungen von H. A. Roth 1956 auf dem Gebiet der ehemaligen DDR. Er bezieht sich hierbei auf Ernteergebnisse der Jahre 1934-1939. Diese Arbeit ist von besonderem Interesse, da sich der Zeitraum der für die Untersuchung verwendeten Daten sehr nahe an der Entstehung der Reichsbodenschätzung befindet und daher mit den wirtschaftlichen Ertragsbedingungen des Zeitpunktes der Bodenschätzung übereinstimmen dürften. Die wissenschaftliche Aussagekraft der Analyse der RBS-Daten in dieser Untersuchung leidet darunter, dass sowohl die Bodendaten als auch die Ertragsergebnisse auf Kreisebene aggregiert sind, sodass die vorhandene Heterogenität der Bodenqualitäten sicherlich keine exakten Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen RBS und Ertragsfähigkeit zulässt. Trotzdem ermittelt ROTH für Getreidearten einen deutlichen Zusammenhang zwischen steigenden Ackerzahlen und ansteigenden Erträgen, wobei die Zunahmeraten der Ernteerträge nicht gleichmäßig, sondern mit höher werdenden Ackerzahlen in ihrer absoluten Größe geringer werden (ROTH, 1956, S. 19).

Für Blattfrüchte stellte er ähnliche Korrelationen fest, mit dem Unterschied, dass die Ertragssteigerungen prozentual geringer ausfielen, dafür aber linear anstiegen (ROTH, 1956, S. 41).

In den 1960-er Jahren gab es zur Eignung der RBS zur Abbildung der Ertragsfähigkeit von Ackerböden zwei Untersuchungen in Niedersachsen, die beide eine Annäherung der Ernteerträge von leichten und schweren Böden zum Ergebnis hatten. GALLARD verglich hierbei die Ernteergebnisse aus zwei fast 20 Jahre auseinanderliegenden Zeitperioden. Er stellte in seinen Analysen in der späteren Zeitperiode (1953-1956) eine deutliche Ertragssteigerung bei leichten Böden im Verhältnis zu den schweren Böden im Vergleich zur früheren Zeitspanne (1935-1939) fest (GALLARD, 1964, S. 319 ff.).



PFINGSTEN kam zu ähnlichen Ergebnissen und schloss daraus, dass die Ackerzahl alleine nicht geeignet sei, die Ertragsfähigkeit des Bodens abzubilden (PFINGSTEN, 1963, S. 16 ff).

Mit Zahlen aus Schleswig-Holstein von 1954-1971 untersuchte REICHEL die Aussagekraft der RBS in Bezug auf die Ertragsfähigkeit von Ackerböden, im Besonderen die ökonomische Relevanz der Ackerzahlen. Sie kommt zunächst zu dem Schluss, dass die Daten der RBS aus folgenden Gründen alleine nicht ausreichen, um das Ertragspotenzial der Böden zu beschreiben:

1. Unterschiedliche Reaktionen der einzelnen Feldfrüchte auf bestimmte Bodengüten
2. Einfluss des Klimas auf Ertragsbildung
3. Ertragszunahmeraten bei steigenden Ackerzahlen haben abnehmende Tendenz

Abschließend urteilt sie aber, dass die Ackerzahl „trotz der Einflüsse vieler anderer natürlicher oder produktionstechnischer Faktoren ein relativ guter Anhaltspunkt für die Ertragsleistung der Ackerböden ist“ (REICHEL, 1973, S. 163).

Neuere Untersuchungen greifen bei der Ertragsermittlung bereits auf die GPS-gestützte Ertragskartierung auf Mähdreschern zurück. DOBERS untersuchte 2002 im Mittleren Fläming mit Hilfe der Ertragskartierung den Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der RBS in Form der Bodenzahlen und Winterweizenerträgen. Auch er stellt einen signifikanten Ertragszuwachs bei ansteigenden Bodenzahlen fest, wobei er sich aber nur in der Spanne von 18-57, also den Bodenarten „Sand“ bis „stark lehmiger Sand“ bewegt (DOBERS, 2002, S. 162). Ebenfalls auf positive Korrelationen in allen acht untersuchten Ertragsjahren zwischen den Bodenzahlen und den Ertragsdaten von Winterweizen, Raps und Erbsen können RÖTSCHER und CHRISTEN bei ihren Berechnungen in Thüringen verweisen. Besonders die Zusammenführung mehrerer Ertragskartenjahre erhöhen nach ihren Analysen die Korrelationen zwischen Bodenzahlen der RBS und Ernteergebnissen deutlich. Abschließend kommen RÖTSCHER und CHRISTEN auf Grund der gefundenen Zusammenhänge zu dem Schluss, dass die RBS auch für die Zwecke des



Precision Farmings eine verlässliche Grundlage bildet (RÖTSCHER / CHRISTEN, 2012).

10.2 Unterteilung der Schläge in Teilschläge

Das pflanzenbauliche Ziel der mehrjährigen Ertragskartierung und der Quantifizierung der Zusammenhänge der räumlichen Ertragsstruktur mit den Ergebnissen der RBS besteht in der Generierung von in sich möglichst homogenen und in ihrem Ertragsniveau grob vorhersehbaren Teilflächen innerhalb der Schläge. Die Ergebnisse einer fünfjährigen Ertragskartierung erlaubt in gewissen Grenzen die Fortschreibung gefundener räumlicher Ertragsstrukturen in die Zukunft, wobei die pflanzenbaulichen und ökonomischen Resultate einer dann teilschlagorientierten Wirtschaftsweise jährlich überprüft werden müssen und gegebenenfalls zu Korrekturen an der vorgenommenen Teilflächeneinteilung und ertragserwartungsmäßigen Einstufung führen kann.

Die räumliche Einteilung der Schläge orientiert sich am Probenahmeraster der Bodennachschätzung und unterstellt in diesem Fall eine bodenkundliche Homogenität der Teilflächen. Die Vorgehensweise zur Einstufung der Teilflächen in Hoch-, Mittel- und Niedrigertragszonen ist folgende: Für jeden, einem Bodenbohrpunkt der RBS zugeordneten aufbereiteten Ertragswert der 10-er Methode, wird der relative Ertragswert im Verhältnis zum durchschnittlichen Ertragswert der 10-er Methode berechnet. Über den Zeitraum der fünf Ertragskartenjahren wird für jeden Bodenschätzungspunkt abgezählt, in wie vielen Jahren der jeweilige Standort über dem Durchschnittswert liegt. In Abhängigkeit der dadurch ermittelten Anzahl wird eine Einstufung in eine Ertragszonengruppe vorgenommen:

- Vier oder fünf Jahre über Schlagdurchschnitt → Hohertragszone
- Zwei oder drei Jahre über Schlagdurchschnitt → Mittlerertragszone
- Null oder ein Jahr über Schlagdurchschnitt → Niedrigertragszone

Das Ergebnis einer solchen Teilschlagbildung wird am Beispiel des Hofackers in Abbildung 57 präsentiert.

Neben der farblichen Kennzeichnung der ertragsmäßigen Einstufung werden in der Abbildung als Hintergrundinformation die Bodenklassen der jeweiligen



Teilflächen angegeben. Anhand dieser beiden teilschlagspezifischen Informationen kann man die Ertragsstabilität der einzelnen Bodenklassen ablesen.

Die Abbildung 57 zeigt einige Auffälligkeiten. Im nordöstlichen Teil des Schlages würde auf Grund der Bodenschätzungsergebnisse eine Hohertragszone erwartet werden. Tatsächlich zeigt diese Teilregion des Schlages nur durchschnittliche Ergebnisse, bzw. durchschnittliche Ertragsstabilität. Es ist zu vermuten, dass der dort vorherrschende Bodentyp Kolluvisol zur Vernässung neigt und es auf Grund dessen nicht zu einer vollen Ausschöpfung des Ertragspotenzials kommt.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die unter „Rest“ eingruppierten Bodenschätzungspunkte mit einer Bewertung der Bodenzahl von unter 60 fast ausschließlich in den Niedrigertragszonen liegen. Hier haben sich die Ertragsverhältnisse, wie sie auf Grund der Bodenschätzung erwartet wurden, bestätigt.



Abbildung 57: Beispiel für eine Teilschlagunterteilung des Schlages Hofacker auf Grundlage einer mehrjährigen Ertragskartierung (Eigene Darstellung)



11 Umsetzung der Ergebnisse zur Vorbereitung der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung

11.1 Eignung der RBS für die Zwecke des PF

Eine zentrale Fragestellung der Arbeit ist, ob die RBS sich als Datenquelle für die Einführung der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung eignet. In der Literatur finden sich dazu keine eindeutigen Aussagen. So formulieren BOESS et al.: „Von den bislang genutzten Quellen entspricht die Bodenschätzung am ehesten den Anforderungen für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung [...] (BOESS et al., 2002, S. 97). Sie nennen aber auch weitere Verfahren, wie das Georadar und die Messung der elektrischen Leitfähigkeit zur Verbreiterung der Informationsbasis bezüglich der vorliegenden Standortbedingungen.

REIMER und LAMP verweisen darauf, dass die Einteilung und Festlegung von Bodenzahlen nicht unbedingt vorhandene Ertragsunterschiede erfasst (REIMER / LAMP, 2002, S. 100).

Die im Rahmen dieser Arbeit gewählte räumliche Auflösung der Zuordnung der Ertragsmesspunkte zu den Bodenschätzungspunkten fokussiert sich auf die zehn nächstgelegenen Ertragsmesspunkte, was ungefähr einem Fünftel der Fläche einer Bodenklasse entspricht. Kritisch zu hinterfragen ist an dieser Stelle die Übertragbarkeit der herausgearbeiteten Zusammenhänge zwischen RBS-Parametern und aufbereiteten Ertragswerten auf die Fläche zwischen den Schätzbereichen um die Bohrpunkte herum. Die gewählte Vorgehensweise kann nur eine Annäherung an die tatsächlichen Standortverhältnisse darstellen. Sie konzentriert sich dabei auf die qualitative Aussage der RBS unter relativer Vernachlässigung der Frage der räumlichen Auflösung. Aus diesem Grund kann die Frage, ob die räumliche Auflösung der RBS für die Zwecke des PF ausreichend ist, ohne Informationen über die Bodenqualitäten zwischen den Bohrpunkten nicht abschließend beantwortet werden.

Die Analyse des korrelativen Zusammenhangs der Daten der RBS anhand sechs ausgewählter Bodenparameter und aufbereiteten Ertragsdaten ergibt keine einheitlichen Ergebnisse über die drei Versuchsschläge und über die jeweils fünf Ertragskartenjahre hinweg. Trotzdem lassen sich gewisse Grundtendenzen erkennen. Eindeutig die besten Ergebnisse, das heißt, die höchsten Bestimm-

heitsmaße weisen die beiden Vergleichsvarianten auf, in denen Bohrpunkte ausgeschlossen wurden, deren Einstufung auf Grund veränderter ackerbaulicher Rahmenbedingungen (relative Verbesserung der Ertragsfähigkeit der Pararendzinen) und wegen vorherrschender Witterungsbedingungen (Vernässungsgefahr der Kolluvisol-Standorte) nicht ihrer Ertragserwartung entsprach. Eine Übertragung auf andere Anbauflächen ist nur unter Einbeziehung der bodenkundlichen und klimatischen Bedingungen vor Ort möglich. Zudem ist es klar ersichtlich, dass für die Anwendung dieser beiden Vergleichsvarianten auch eine ausreichende Anzahl an Pararendzinen und Kolluvien vorhanden sein muss.

Im Vergleich der beiden Wertzahlen Bodenzahl und Ackerzahl lässt sich keine relative Vorzüglichkeit einer der beiden Parameter ausmachen. Die Bestimmtheitsmaße beider Werte weichen in keinem Jahr prozentual stark voneinander ab. Auch der neu konzipierte Bodenparameter der modifizierten Ackerzahl bringt keine Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes gegenüber der herkömmlichen Ackerzahl, bzw. der Bodenzahl. Es kann deshalb keine Empfehlung für oder gegen die Verwendung der Bodenzahl, Ackerzahl und modifizierter Ackerzahl als Grundlage für die Teilschlagbildung im Vergleich untereinander gegeben werden.

Den höchsten Erklärungsbeitrag unter den direkt aus der RBS entnommenen Bodenparameter erzielt die nFK, die auf kumulierte Bestimmtheitsmaße von 31,25 %, 40,63 % und 19,66 % auf den einzelnen Versuchsschlägen kommt. Dies deckt sich mit der Quintessenz der Literaturanalyse zur pflanzlichen Ertragsbildung, wonach unter mitteleuropäischen Klimabedingungen das Wasser den knappen Wachstumsfaktor darstellt, der bodenkundlich durch die nFKdB ausgedrückt wird (vgl. Kapitel 2.4.1).

An dieser Stelle scheint das Differenzierungspotenzial der nFK-Klassifizierung noch nicht ausgereizt, da bei der RBS-Nachschätzung auf den Versuchsfeldern technisch bedingt nur eine Bohrprofilkartierung bis in eine Tiefe von 1,20 m vorgenommen wurde. Eine Aufgrabung eines L2Lö-Vergleichsstückes im Schlag Hofacker zeigte eine deutlich über die Tiefe von 1,20 m hinausreichende Durchwurzelung des Bodens. Eine weitere Ausdifferenzierung gerade der besten Böden über die bei der Nachschätzung erzwungenermaßen vorgenommene Deckelung der nFK bei 240 mm lässt eine weitere Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes der nFK zur Erklärung der räumlichen Ertragsvariation erwarten.

11.2 Vorgehensweise zur Einführung der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung

Die Empfehlung zur Vorgehensweise bei der Einführung des PF beziehen sich im konkreten Fall auf den Lehr- und Versuchsbetrieb Marienborn-Heldenbergen, können aber auf Betriebe mit vergleichbaren Standortvoraussetzungen und Datenbeständen übertragen werden. Die Einführung des PF sollte einer zwei-gleisigen Strategie folgen. Zum einen sollten die bisher erhobenen kleinräumigen Datenbestände weitergeführt und erweitert werden. Zum anderen sollte der Schritt von den datensammelnden PF-Verfahren wie der Ertragskartierung hin zu den anwendenden PF-Verfahren vollzogen werden.

Im Bereich der Datenerhebung ist eine Fortführung der begonnenen Ertragskartierung sinnvoll, um die getroffenen Teilschlagunterteilungen durch weitere Ertragskartierungsjahre verifizieren zu können. Im Falle einer teilflächenspezifischen Bestandesführung gewinnt die Ertragskartierung zusätzlich an Bedeutung. Sie dient dann als Kontrollinstrument zur Überprüfung der Ertragsauswirkungen der teilschlagorientierten Bewirtschaftung.

Der Datenbestand sollte in räumlicher Ebene höher aufgelöst werden. Zur Verdichtung der Standortinformationen bietet sich die Verwendung der Messung der elektrischen Leitfähigkeit an.

In Anbetracht der charakteristischen Geländeform und der in den Schlägen vorkommenden starken Hängigkeit sollte die Nutzung eines digitalen Geländemodelles mit darauf aufbauender Modellierung des Oberflächenabflusses in Erwägung gezogen werden. Die Aufzeichnungen der Niederschläge im Zeitraum 2002 - 2008 weisen für keines der betreffenden Jahre innerhalb des für die Ertragsbildung wichtigen Zeitraumes einen extremen Wassermangel aus, aber der höchste Erklärungsbeitragswert für den RBS-Kennwert nFK weist doch darauf hin, dass der Faktor Wasserhaltefähigkeit eine bedeutende Rolle bei der räumlichen Ertragsverteilung spielt. Eine Modellierung des Oberflächenabflusses könnte zu einer qualitativen Verbesserung der Aussagegenauigkeit hinsichtlich der Bedeutung des pflanzenverfügbaren Wassers für die Ertragsbildung führen. Eine Abbildung der Verläufe des Oberflächenabflusses zu Zeitpunkten des Wasserüberschusses könnte eine Bestätigung für die Vermutung liefern, dass der größtenteils mit L2L0 geschätzte nordöstliche Bereich des Schlages Hofacker, der



nur mittelmäßige Erträge produzierte, unter einer Vernässung durch Oberflächenabfluss leidet. Auf einen Einfluss des Oberflächenabflussregimes gerade auf die Areale mit der Bodentypklassifizierung Kolluvisol deutet die deutliche Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes bei der Eliminierung eben jener Bodenschätzpunkte aus den Berechnungen hin.

Neben der Fortführung und Verdichtung der kleinräumigen Datenbasis kann mit der Anwendung der teilflächenspezifischen Applikation von Betriebsmitteln begonnen werden. Da der Betrieb bereits über eine gewisse Datenfülle an Standortinformationen verfügt, bietet sich eine Offline-Anwendung der Düngung nach teilflächenspezifischen Ertragspotenzialkarten an, auch weil für diese Art der Betriebsmittelapplikation auf den Flächen des Betriebes das größte ökonomische Potenzial vermutet wird. Hierfür sollte aber ein digitales Geländemodell in die Düngplanung integriert werden, um erosionsgefährdete Standorte identifizieren zu können.



12 Zusammenfassung

Der teilflächenspezifische Pflanzenbau basiert auf einer Bestandesführung, die sich am kleinräumigen Ertragspotenzial der oftmals in der Fläche variabel vorliegenden Standortbedingungen orientiert. Dieses Konzept einer informationsgeleiteten Pflanzenproduktion vereint die ökonomischen Vorzüge einer optimalen Ausschöpfung der natürlichen Ertragsbedingungen mit den ökologischen Ansprüchen einer Anpassung der speziellen Betriebsmittelintensität an die natürlichen Standortbedingungen unter Vermeidung möglicher Umweltbelastungen. Trotz dieser offensichtlichen ökonomisch-ökologischen Win-Win-Situation gewinnt die Idee der teilschlagspezifischen Bestandesführung nur zögerlich Verbreitung in der landwirtschaftlichen Praxis. Ein wesentlicher Grund hierfür ist das Fehlen von pflanzenbaulichen Entscheidungsregeln, wie auf vorhandene Standortheterogenitäten reagiert werden soll. Dieser Mangel begründet sich auf der Unsicherheit darüber, welche natürlichen Wachstumsfaktoren ertragsrelevant sind und auf welche Art und Weise diesbezüglich Informationen gewonnen werden können, um daraus Erklärungen für vorhandene räumliche Ertragsvariabilitäten zu finden, die wiederum als Grundlage für eine Identifizierung von räumlich und zeitlich stabilen Ertragspotenzialzonen dienen sollen.

Ziel dieser Arbeit war daher die mittels einer Literaturanalyse identifizierten wesentlichen ertragsrelevanten Wachstumsfaktoren mit Hilfe einer Nachschätzung der Versuchsflächen nach den Vorgaben der Reichsbodenschätzung räumlich abzubilden. Die räumliche Verteilung der Wachstumsfaktoren sollte mit der räumlichen Ertragsvariabilität der Ernteergebnisse einer siebenjährigen Ertragskartierung verglichen werden, um daraus Handlungsempfehlungen für eine teilflächenspezifische Bestandesführung zu generieren.

Am Beginn der Arbeit steht eine umfangreiche Literaturanalyse zur Ertragsbildung im Pflanzenbau, um daraus die wesentlichen ertragsrelevanten Wachstumsfaktoren zu identifizieren. Als Ergebnis wird für die naturräumlichen Bedingungen des Versuchsstandortes das pflanzenverfügbare Bodenwasser als ertragslimitierender Wachstumsfaktor ermittelt. Abgebildet wird dieser pflanzenbauliche Produktivfaktor mit der bodenkundlichen Größe der nutzbaren Feldkapazität im durchwurzelbaren Bodenraum (nFKdB). Um Kenntnis über die räumliche Verteilung der Wasserhaltefähigkeit des Bodens zu erlangen, wurde auf den Flächen des

Lehr- und Versuchsbetriebes Marienborn-Heldenbergen eine Nachschätzung nach den Vorgaben der Reichsbodenschätzung durchgeführt, die besonderes Augenmerk auf die Erfassung der nFkDB anhand des Bohrstockprofils legte. Die Nachschätzung ergab eine räumliche Variabilität der Bodenkennwerte, was unabdingbare Voraussetzung für die Anwendung des standortorientierten Pflanzenbaus ist.

Aus den Ergebnissen der RBS-Nachschätzung wurden die drei Bodenkennzahlen Bodenzahl, Ackerzahl und nFK für den Vergleich mit den räumlich variablen Ertragswerten ausgewählt. Die Ertragsdaten wurden im Rahmen dieser Arbeit in einer siebenjährigen satellitengestützten Ertragskartierung erhoben und verarbeitet. Die Ertragswerte wurden nach einer Fehlerbereinigung und Aufbereitung den Bodenschätzungspunkten in einer bestimmten Gewichtung räumlich zugeordnet und mit den genannten Bodenkennwerten der RBS verglichen.

Im Laufe der Vergleichsanalyse auf drei ausgewählten Versuchsschlägen mit jeweils fünf qualitativ ausreichenden Ertragskartierungsjahren wurden die bodenkundlichen Kenngrößen um die abgeleiteten Bodenparameter modifizierte Ackerzahl, Bodenzahl / Ackerzahl mit Ausschluss der L4Lö-Bodenschätzungspunkte sowie Bodenzahl / Ackerzahl mit Ausschluss der Kolluvisol-Bodenschätzungspunkte erweitert. Der räumliche Vergleich erfolgte über eine Korrelationsanalyse und der Berechnung des Bestimmtheitsmaßes zur Ermittlung des Erklärungsbeitrages des jeweiligen Bodenkennwertes der RBS zur räumlichen Ertragsvariabilität.

Die Vergleichsanalysen ergeben eine starke räumliche und zeitliche Schwankung der Ergebnisse von Schlag zu Schlag und von Jahr zu Jahr. Unbeachtet der jährlichen Schwankungen lässt sich eine Rangfolge der einzelnen Schläge hinsichtlich des Bestimmtheitsmaßes erkennen, die für eine Einordnung der Jahre nicht möglich ist. Als einzige Ausnahme diesbezüglich sticht das Jahr 2005 hervor, das auf allen drei Schlägen die höchsten Erklärungsbeiträge im Vergleich zu den jeweiligen anderen Untersuchungsjahren liefert.

Eine Analyse der Witterungsbedingungen ermöglicht mit Hilfe der Wasserhaushaltskurve einen Hinweis zur Erklärung der hervorgehobenen Position des Jahres 2005 hinsichtlich der Höhe des Erklärungsbeitrages der nFK zu den räumlichen Ertragsheterogenitäten. Im Jahr 2005 gerieten die einzelnen Teilflächen zu einem späteren Zeitpunkt in eine zu Ertragseinbußen führende Verringerung des



nFK-Vorrates als in anderen Jahren. Durch eine lang anhaltende positive Klimabilanz zu Beginn der Vegetationsperiode gelang in 2005 die Ausbildung eines üppigen Bestandes, der zum Zeitpunkt der negativen kumulierten Wasserbilanz eine räumliche Ausdifferenzierung der Erträge ermöglichte.

Bei der Betrachtung der berechneten Bestimmtheitsmaße der einzelnen Bodenkennzahlen ist grundsätzlich festzuhalten, dass alle Korrelationen einen positiven Wert aufweisen. Die einzelnen Werte des Bestimmtheitsmaßes schwanken in ihrer Spannweite zwischen 0,07 % und 52,86 %. Die Schwankungsbreite innerhalb eines Jahres und Schläges zwischen den ausgewählten Bodenparametern ist deutlich geringer als die Schwankungen zwischen den Jahren und Schlägen.

Die eindeutig besten Erklärungsbeiträge liefern die beiden Vergleichsvarianten, in denen die L4Lö-, bzw. die Kolluvisol-Bodenschätzkpunkte, aus der Vergleichsmenge ausgeschlossen werden. Dies deutet auf einen eventuellen Bedarf der Neubewertung der entsprechenden Bodenklassen hin.

Bei den aus der RBS unverändert übernommenen Bodenkennwerten erreicht die nFK die höchsten Erklärungsbeiträge zu den räumlichen Ertragsvariationen mit kumulierten Werten für die einzelnen Versuchsschläge von 31,25 %, 40,63 % und 19,66 %. Zusammengefasst lässt sich also festhalten, dass die nFK über alle Schläge hinweg für den gesamten Zeitraum der Untersuchung gut ein Drittel der räumlichen Ertragsvariation erklären kann. Es ist zu vermuten, dass dieser Erklärungsbeitrag in Jahren mit einem Witterungsverlauf wie im Jahr 2005 mit einer lang anhaltenden positiven klimatischen Wasserbilanz und einer ab Mitte bis Ende Mai einsetzenden raschen Verringerung des Auffüllungsgrades der nFK noch ansteigen würde. Die nFK ist daher als geeignetes Maß der in der RBS gewonnenen Bodenkennwerte zur Erklärung der räumlich variablen Ertragsstrukturen zu empfehlen, wie dies bereits anhand der Literaturanalyse vermutet worden war.

Ausgehend von den gewonnenen mehrjährigen räumlichen Ertragsstrukturen und, an den Beprobungsrastern der RBS orientierend, werden Teilschläge in der Einstufung Hoch-, Mittel- und Niedrigertragszonen abgeleitet und als ein erster Strategievorschlag zur Einführung einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung vorgestellt.

Die RBS ist grundsätzlich als Datenquelle zur Vorbereitung der Einführung der teilschlagorientierten Flächenbewirtschaftung zu empfehlen. Die gewonnenen Ergebnisse dieser Arbeit zeigen einen immer gegebenen Zusammenhang zwischen den Parametern der RBS und der räumlichen Ertragsvariation. Bei Verwendung der nFK konnte nachgewiesen werden, dass durchschnittlich ein Drittel der Ertragsvariation erklärt werden kann. Dieser Wert muss durch eine Verbreiterung der räumlichen und zeitlichen Basis evaluiert werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht zudem in der Fragestellung, ob die räumliche Auflösung den Ansprüchen des Precision Farmings genügt. Hier sollte zur Vergrößerung der Datenbasis unterstützend auf Erfassungsmethoden wie die Messung der elektrischen Leitfähigkeit, die über eine hohe räumliche Auflösung verfügen, zurückgegriffen werden.

Die gewonnenen räumlichen Ertragsvariabilitäten und zeitlichen Ertragsstabilitäten in Verbindung mit den berechneten Erklärungsbeiträgen auf der Basis von RBS-Kenngrößen lassen die Schläge Hofacker und vor allem Lettkippel als geeignet für die Einführung des Precision Farmings erscheinen, wohingegen es auf dem Schlag Köhlerwald schwierig ist, räumliche Ertragsstrukturen zu finden, die über die Zeit ortstreu sind.



13 Summary

The objective of precision farming is to exhaust existing yield potentials by small-scale adaptation of the crop stand management to the frequently heterogeneous natural site conditions and thus avoid possible environmental pollution caused by squandering farm inputs. Despite the evident economic and ecological advantages of this new technology, farmers in Germany are only taking up precision farming hesitantly. One of the main reasons for this, alongside the uncertain cost efficiency of the process, is the uncertainty regarding precise and efficient data surveys of the suitable, yield-relevant growth parameters as an information base for precision crop management.

In a review of the pertinent literature, this study shows the yield-forming processes in crop production and identifies the soil water available to plants as a yield-limiting growth factor for the trial location at the teaching and experimental farm Marienborn-Heldenbergen. In a supplementary evaluation of the farm land based on the specifications of the nationwide soil evaluation system “Reichsbodenschätzung”, the small-scale pedological site conditions were surveyed and recorded using geo-referencing methods. Particular attention was paid to determining the available field moisture capacity (FC) as a measure of the plant-available soil water. In a long-term time series running over several years, geographical yield structures were determined with the help of GPS-aided yield mapping. The explanation contributed by the Reichsbodenschätzung to the geographical variances in yield is calculated by linking these two sources of information. Only the ten closest error-corrected yield measuring points adapted to the weight checks were used for the purposes of comparison with various soil rating figures of the Reichsbodenschätzung and subjected to a correlation analysis. An examination of the similarities between the yield measurements and various parameters of the Reichsbodenschätzung reveals that in a comparison with the soil fertility numbers, the available FC proves to be the value factor that makes the greatest contribution to explaining the geographical variance in yield. For the three test fields in the long-term yield survey, the cumulative figures were 31.25 %, 40.63 % and 19.66 %. Even higher coefficients of determination are achieved when the yield measurements are compared with soil fertility values if the soil drilling points classified as colluvisol are excluded from the comparison



set in each case. This indicates a possible need for re-assessing the corresponding soil classes.

The Reichsbodenschätzung proves to be fundamentally suitable as a basis for generating field parcels. It is recommended that a spatially high-resolution survey method, such as for example mapping the electrical conductivity, be used to increase the small-scale precision of the site-specific information. In view of the slope gradients in the test fields, a digital terrain model should be used to support the mapping of the soil water balance.

From a classification of the yield measurements displaying yield figures relative to the field average, it is possible to show zones with high, medium and low yields that are stable in the long term by adding up the figures in time series. These zones can then be farmed as sub-fields or parcels and form the starting point for precision farming. On the basis of this parcel-forming method, two of the three test fields can be recommended for precision farming applications, as they offer both geographically stable and time-stable yields.



14 Literaturverzeichnis

ACHTNICH, W. (1980): Bewässerungslandbau. Stuttgart.

AGRICON (2012): Listenpreis des N-Sensors. Online-Ressource. Abgerufen am 17.9.2012. <http://www.kalkulator.n-sensor.de/>

ALBERT, E., LISSO, H., MERKEL, U. (2003): Gründung - Möglichkeiten ihrer Optimierung. In: HASERT, G. [Hrsg.] (2003): Zukunftsträchtiger Ackerbau. Systeme der computer- und GPS-gestützten teilflächenspezifischen Bewirtschaftung praxisnah bewertet. Berlin. S. 57-74.

AL-KARADSHEH, E. W. (2003): Potentials and development of precision irrigation technology. Landbauforschung Völkenrode SH 245.

AUERNHAMMER, H. (2000): Das Landwirtschaftliche BUS-System LBS und die Satellitenortung GPS als Schlüsseltechnologien für die Prozesssteuerung im Pflanzenbau. Vortrag im Rahmen der 21. GIL-Jahrestagung in Freising-Weihenstephan 2000 (Band 13). Weihenstephan.

BACH, H., BEGIEBING, S. (2008): Erfassung von Bestandeszuständen durch Fernerkundung zur modellgestützten Analyse aktueller Ertragsziele. In: WERNER, A., DREGER, F., SCHWARZ, J. [Hrsg.] (2008): Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung – preagro II. Abschlussbericht. Müncheberg. S. 93-121.

BAHRENBERG, G., GIESE, E., NIPPER, J. (1999): Statistische Methoden in der Geographie. Band 1: Univariate und bivariate Statistik. Stuttgart. Leipzig.



- BAUER, M. (2011): Vermessung und Ortung mit Satelliten: globale Navigations-satellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme. 6. Auflage. Berlin.
- BERG, E., KUHLMANN, F. (1993): Systemanalyse und Simulation für Agrarwissenschaftler und Biologen: Methoden und PASCAL-Programme zur Modellierung dynamischer Systeme. Stuttgart.
- BIERHUIZEN, J. F., SLATYER, R. O. (1965): Effect of atmospheric concentration of water vapour and CO₂ in determining transpiration-photosynthesis relationships of cotton leaves. *Agricultural Meteorology* 2. S. 259-270.
- BILL, R. (1996): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. Heidelberg.
- BILL, R. (2010): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. 5. Auflage. Berlin und Offenbach.
- BILL, R., FRITSCH, D. (1994): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1: Hardware, Software und Daten. 2. Auflage. Heidelberg.
- BÖHRNSEN, A. (2002): Mit Licht und Optik den Bestand führen. In: DLG-Mitteilungen. Special: Smart Farming: Mehr als nur Elektronik. Frankfurt am Main. S. 10-15.
- BOESS, J., LÖSEL, G., BENNE, I. (2002): Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung der Bodenschätzung für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung. *DBG-Mitteilungen*. Band 99 (1-24). S. 97-98.
- BOESS, J. (2004): Kartierkonzept zur Erstellung einer hoch auflösenden Bodenkarte für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung. In: NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG [Hrsg.]. Arbeitshefte Boden. Heft 5/2004. Hannover. S. 35-45.
- BOGUSLAWSKI, E. VON (1981): Ackerbau. Grundlagen der Pflanzenproduktion. Frankfurt am Main.



- BONGIOVANNI, R., LOWENBERG-DEBOER, J. (2004): Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*, 5. Jg., Nr. 4, S. 359-387.
- BOONE, F. R. (1988): Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. *Soil and Tillage Research*, 1988, 11. Jg., Nr. 3, S. 283-324.
- BRIGGS, L. J., SHANTZ, H. L. (1913a): Water Requirement of Plants: I. Investigations in Great Plains in 1910 and 1911. US Government Printing Office.
- BRIGGS, L. J., SHANTZ, H. L. (1913b): Water Requirement of Plants: II. A review of literature. US Government Printing Office.
- BROZIO, S., GEBBERS, R. (2004): Düngung. In: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V. [Hrsg.] (2004): Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau. Verbundprojekt pre agro. Abschlussbericht. Müncheberg. Kap. 4, S. 151-284.
- BRÜGEMANN, H. (2013): Kosten von Precision Farming Technik. Persönliche Mitteilung per E-Mail.
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE [Hrsg.] (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart.
- CHRISTEN, O. (1996): Nachhaltige Landwirtschaft - Ideengeschichte, Inhalte und Konsequenzen für Forschung, Lehre und Beratung. *Berichte über Landwirtschaft*, 74. Jg., Nr. 1, S. 66-86.
- DABERKOW, S. G.; MCBRIDE, W. D. (2003): Farm and operator characteristics affecting the awareness and adoption of precision agriculture technologies in the US. *Precision Agriculture*, 4. Jg., Nr. 2, S. 163-177.
- DAMMER, K.-H. (2004a): Teilflächenspezifische Ausbringung von Chlormequat-Wachstumsreglern in Winterweizen. In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming.



- Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 4.2-27 – 4.2-37.
- DAMMER, K.-H. (2004b): Teilflächenspezifische Ausbringung von Fungiziden in Getreide. . In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 4.2-45 – 4.2-49.
- DAMMER, K.-H., DEGLER, H. (2004): Fungizide, Herbizide, Halmstabilisatoren. In: LEIBNIZ-ZENTRUM FÜR AGRARLANDSCHAFTS- UND LANDNUTZUNGSFORSCHUNG (ZALF) E.V. [Hrsg.] (2004): Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau. Verbundprojekt pre agro. Abschlussbericht. Münchenberg. Kap. 4.7, S. 285-326.
- DAMMER, K., EHLERT, D. (2006): Variable-rate fungicide spraying in cereals using a plant cover sensor. Precision Agriculture. 7. Jg. Nr. 2. S. 137-148.
- DAMMER, K.-H., WOLLNY, J., HAU, B., VOLK, T., WISCHKE, T. (2008): Grundlagen zum Pflanzenschutz im Precision Farming. In: WERNER, A., DREGER, F., SCHWARZ, J. [Hrsg.] (2008): Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung – preagro II. Abschlussbericht. Münchenberg. S. 261-289.
- DBV [Hrsg.] (2012): Situationsbericht 2012/13. Trends und Fakten zur Landwirtschaft. Berlin.
- DEMMELE, M., MUHR, T., ROTTMEIER, J., PERGER, P. AUERNHAMMER, H. (1992): Ortung und Ertragsermittlung beim Mähdrusch in den Erntejahren 1990 und 1991. In: VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik. Heft 14. Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge. Tagung 5.-6. März 1992. Weihenstephan.



- DEMMELE, M. (2001): Ertragsermittlung im Mähdrescher. DLG-Merkblatt 303. Frankfurt am Main.
- DE WIT, C. T. (1958): Transpiration and crop yields. Medeling 59. Verslagen van landbouwkundige onderzoekingen. No. 64.6. Wageningen.
- DIEPENBROCK, W., FISCHBECK, G., HEYLAND, K.-U., KNAUER, N. (1999): Spezieller Pflanzenbau. 3. Auflage. Stuttgart.
- DOBERS, E. S. (2002): Methoden der Standorterkundung als Grundlage des DGPS-gestützten Ackerbaus: eine Fallstudie aus dem Lössgebiet des Mittleren Fläming. Göttinger bodenkundliche Berichte 115. Göttingen.
- DOMSCH, H. (2004): Aufnahme und Interpretation der elektrischen Bodenleitfähigkeit für eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung. In: NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG [Hrsg.]. Arbeitshefte Boden. Heft 5/2004. Hannover. S. 11-20.
- DWD (2013): Niederschlagskarte der BRD für den Zeitraum 1961-1990. Online-Ressource. Abgerufen am 16. April 2013:
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_windowLabel=T16803570191148991649290&_urlType=action&_pageLabel=_dwdwww_spezielle_nutzer_landwirtschaft_agrarklima
- DWD (2013a): Daten der Klimatischen Wasserbilanz für den Zeitraum 2002-2008. Aufbereiteter Datenauszug auf Anfrage. Digitale Ressource. Offenbach.
- ECK, H. V. (1988): Winter wheat response to nitrogen and irrigation. Agronomy Journal 80. S. 902-908.
- EHLERS, W. (1976): Evapotranspiration and drainage in tilled and untilled loess soil with winter wheat and sugarbeet. Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau 142. No. 4. S. 285-303.

- EHLERS, W. (1989): Transpiration efficiency of oat. *Agronomy Journal*. Jg. 81. Nr. 5. S. 810-817.
- EHLERS, W. (1996): *Wasser in Boden und Pflanze. Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag*. Stuttgart.
- EHLERS, W. (1997): Zum Transpirationskoeffizienten von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen. *Pflanzenbauwissenschaften*. Jg. 1. Nr. 3. S. 97-108.
- EHLERT, D. (1994): Technik und Verfahren der kleinräumigen Bestandsführung – Handlungsbedarf. *KTBL Arbeitspapier 210*. S. 64-72.
- EHLERT, D. (1998): Ertragskartierung und Erfassung von Biomasse. In: *KTBL [Hrsg.] (1998): Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. KTBL / ATB-Workshop vom 15. bis 16. Januar 1998 in Potsdam. Darmstadt*. S. 62-67.
- EHLERT, D. (2004): Erfassung der Pflanzenmasse mit dem Pendelsensor. In: *HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt*. S. 3.2-95 – 3.2-98.
- EHLERT, D., DAMMER, K.-H., VÖLKER, U. (2004): Applikation nach Pflanzenmasse. In: *Landtechnik*. 59. Jg., Heft 2. S. 76-77.
- FELLENBERG, G. (1981): *Pflanzenwachstum: Physiologie – Regulation – Ökologie*. Stuttgart.
- FOY, T. (2004): Die Topographische Karte, Flurstückverwaltung und Schlagvermessung als Grundlagen für Precision Farming. In: *HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt*. S. 3.2-5 – 3.2-9.
- GALL, H. BURCK, M., KLITSCH, S., ZACHOW, B. (1994): Ergebnisse der Lysimetermessungen in Groß-Lüsewitz aus pflanzenbaulicher Sicht. *Wasser und Boden*. Vol. 46. Nr. 10. S. 64-68.



- GANDORFER, M. (2006): Bewertung von Precision Farming dargestellt am Beispiel der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung. Online-Ressource: urn: nbn: de: bvb:91-diss20060614-0932217060. München.
- GEBBERS, R. (2004a): Grundnährstoffkartierung (P, K, Mg und pH) für die Bodenausgleichsdüngung. In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 3.2-61 – 3.2-65.
- GEBBERS, R. (2004b): Teilflächenspezifische Grunddüngung. In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 4.2-5 – 4.2-12.
- GEBBERS, R., LÜCK, E. (2004): Messung des Durchdringungswiderstands und der elektrischen Leitfähigkeit mit dem Veris[®] Profiler 3000. . In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 3.2.3-97 – 3.2.3-103.
- GEISLER, G. (1983): Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas. Berlin. Hamburg.
- GEISLER, G. (1988): Pflanzenbau. Ein Lehrbuch – Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion. 2. Auflage. Berlin und Hamburg.
- GEO-KONZEPT (2013): Übersicht gängiger Korrekturdatendienste. Online-Ressource. Abgerufen am 4.1.2013. http://www.geo-konzept.de/de/40_geo-wissen.php
- GERHARDS, R., KÜHBAUCH, W. (2004): Teilflächenspezifische Herbizidausbringung, artenabhängig. In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse,



- Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S 4.2-39 – 4.2-43.
- GERHARDS, R., SÖKEFELD, M., SCHULZE-LOHNE, K., MORTENSEN, D. A., KÜHBAUCH, W. (1997). Site specific weed control in winter wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*. Vol. 178(4), S. 219-225.
- GRAEF, F. (2007): Ronneburger Hügelland: Wanderungen durch Landschaft, Dorf und Geschichte. Geschichts- und Heimatverein e. V. Ronneburg. Hanau.
- GRENZDÖRFFER, G. (1998): Dokumentation und Analyse kleinräumiger Heterogenität mit Fernerkundung und GtIS. In: KTBL [Hrsg.] (1998): Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. KTBL / ATB-Workshop vom 15. Bis 16. Januar 1998 in Potsdam. Darmstadt. S. 93-105.
- GRENZDÖRFFER, G. (2004): Hochgenaue digitale Luftbilder. In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 3.2-45 – 3.2-49.
- HABER, W. (1997): Die Herausforderung an die Landwirtschaft in den nächsten 20 Jahren – aus der Sicht des Ökologen. In: DLG [Hrsg.] (1997): Landwirtschaft braucht Zukunftstechnologien. Vorträge der DLG-Wintertagung. Frankfurt am Main.
- HABER, W. (2002): Von der differenzierten Landnutzung zu Precision Agriculture. In: WERNER, A., JARFE, A. [HRSG.] (2002): Precision Agriculture. Herausforderung an Integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung Nr. 38. Darmstadt. S. 355-364.
- HÄCKEL, H. (2005): Meteorologie. 5. Auflage. Stuttgart.



- HANKS, R. J., GARDNER, H. R., FLORIAN, R. L. (1968): Evapotranspiration-Climate Relations for Several Crops in the Central Great Plains. *Agronomy Journal*. Vol. 60 (5). S. 538-542.
- HANUS, H. (1997): Ökologische Grundlagen des Pflanzenbaues. In: KELLER, E. R., HANUS, H., HEYLAND, K.-U. [Hrsg.] (1997): *Grundlagen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion*. Stuttgart.
- HARRACH, T. (1970): Für die landwirtschaftliche Nutzbarkeit relevante Bodeneigenschaften. *Ergebnisse landwirtschaftlicher Forschung an der JLU*. Heft XI. S. 63-71. Gießen.
- HARRACH, T. (1978): Die Durchwurzelbarkeit von Böden als wichtiges Kriterium des Ertragspotentials. *Kali-Briefe (Büntehof)*. 14. Jg.. Nr. 2. S. 115-122.
- HARRACH, T. (2010): Der Kulturzustand des Bodens in der Bodenschätzung am Beispiel der Pararendzina aus Löss. *Berichte der DBG*. Tagungsbeitrag bei der Vortrags- und Exkursionstagung zur Bodenschätzung AG Bodenschätzung und Bodenbewertung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 07.–09.09.2010 im Kloster St. Marienthal bei Ostritz/Oberlausitz.
- HARRIS, D. (1997): Risk Management in Precision Farming. In: STAFFORD, J. V. [Ed.] (1997): *Precision Agriculture. Volume II: Technology, IT and Management*. Oxford. S. 949-956.
- HASERT, G., JÜRSCHIK, P. (2003): Betriebswirtschaftliche Beurteilung des Gesamtsystems der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung. In: HASERT, G. [Hrsg.] (2003): *Zukunftsträchtiger Ackerbau. Systeme der computer- und GPS-gestützten teilflächenspezifischen Bewirtschaftung praxisnah bewertet*. Berlin. S. 147-151.
- HAUDE, W. (1954): Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potenziellen Evaporation und Evapotranspiration. *Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes*. Mai 1954, Nr. 8.



- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes 11. Nr. 2.
- HERBST, R., LAMP, J. (1998): Zur kleinräumigen Heterogenität der Böden Deutschlands und zum Akzeptanzpotential der Teilflächenbewirtschaftung. In: KTBL [Hrsg.] (1998): Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. KTBL / ATB-Workshop vom 15. bis 16. Januar 1998 in Potsdam. KTBL Arbeitspapier 264. Darmstadt. S. 33-41.
- HERBST, R., LAMP, J. (2002): Deutschlandweite Untersuchungen zur räumlichen und attributiven Auswertung der Bodenschätzung für großmaßstäbige Bodenfunktionsarten. DBG-Mitteilungen. Band 99 (1-24). S. 95-96.
- HERBST, R. (2002): Bodenschätzung, geoelektrische Sondierung und pedostatistische Modellierungen als Basis von digitalen Hof-Bodenkarten im Präzisions Landbau. Kiel.
- HERBST, R. (2004): Leitfähigkeitsmessung mit dem EM 38. In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 3.2-37 – 3.2-40.
- HERBST, R., REIMER, G. (2004): Digitale Hof-Bodenkarte. In: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V. [Hrsg.] (2004): Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau. Verbundprojekt pre agro. Abschlussbericht. Müncheberg. Kap. 3, S. 3-74.
- HEYLAND, K.-U. (1991): Integrierte Pflanzenproduktion: System und Organisation. Stuttgart.
- HLUG, LGB RLP [Hrsg.] (2008): Großmaßstäbige Bodeninformationen für Hessen und Rheinland-Pfalz. Auswertung von Bodenschätzungsdaten zur Ableitung von Bodenfunktionen und –eigenschaften.



ten. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz. Wiesbaden.

HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt.

JÄGER, S., MERKEL, U. (2003): Aussaat – Entwicklung eines Konzeptes zur teilflächenspezifischen Aussaat. In: HASERT, G. [Hrsg.] (2003): Zukunftsträchtiger Ackerbau. Systeme der computer- und GPS-gestützten teilflächenspezifischen Bewirtschaftung praxisnah bewertet. Berlin. S. 77-90.

JARFE, A. (2004): Anwendung von Modulen in der Praxis. In: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V. [Hrsg.] (2004): Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau. Verbundprojekt pre agro. Abschlussbericht. Müncheberg. Kap. 2. S. 51-66.

JÖRNS, S., BERGER, G., WOLF, I. (2008): Naturschutzfachliche Bedeutung des Precision Farming im Landschaftskontext. In: WERNER, A., DREGER, F., SCHWARZ, J. [Hrsg.] (2008): Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung – preagro II. Abschlussbericht. Müncheberg. S. 485-526.

KAPPAS, M. (2012): Geographische Informationssysteme. Das Geographische Seminar. 2. Auflage. Braunschweig.

KEIL, B. (1991): Das Ertragspotenzial des Standortes als Funktion der Speicherkapazität des Bodens für pflanzenverfügbares Wasser. Gießen.

KEIL, B. (2005): Daten der Nachschätzung der Reichsbodenschätzung für den Versuchsbetrieb Marienborn-Heldenbergen. Unveröffentlicht.

KEIL, B., VORDERBRÜGGE, T. (2012): Zustandsstufe der Bodenschätzung – Bodentyp oder Wurzelraum? Berichte der DBG. Tagungsbeitrag



zu: Vortrags- und Exkursionstagung der AG Bodenschätzung und Bodenbewertung vom 19.-21.09.2012 in St. Wendel (Saarland).

KELLER, E. R., HANUS, H., HEYLAND, K.-U. [Hrsg.] (1997): Grundlagen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. Stuttgart.

KERSEBAUM, K.-CH. (2004): N_{\min} -Messung. In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 3.2-67 – 3.2-71.

KILIAN, B. (2004): Kriterien für die ökonomische Bewertung einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung. . In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 6-1 – 6-25.

KILIAN, B., VOGEL, T. (2004): Ökonomie. In: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V. [Hrsg.] (2004): Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau. Verbundprojekt pre agro. Abschlussbericht. Müncheberg. Kap. 5, S. 3-62.

KING, B. A., STARK, J. C., WALL, R. W. (2004): Increased gross return from site-specific water management for potatoes under center pivot irrigation. In: Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture. Minneapolis. S. 808-818.

KLAPP, E. (1962): Ertragssteigerung und Wasserverbrauch landwirtschaftlicher Kulturen. Zeitschrift für Kulturtechnik, 3. Jg., S. 1-5.

KLOEPFER, F. (2004): Technik für Precision Farming. In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 3.1-1 – 3.1-23.



- KNEIB, W., SCHRÖDER, D. (1984): Die Bewertung der Produktionsfunktion „Pflanzliche Produktion“ in Schleswig-Holstein. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. Vol. 147. S. 425-434.
- KORTE, W. (1961): Die „klimatische Wasserbilanz“ als Charakteristik der Witterung. Landbauforschung Völkenrode. 11. Jg.. Heft 1. S. 9-11.
- KTBL (2005): Faustzahlen für die Landwirtschaft. Darmstadt.
- KTBL (2012): Betriebsplanung Landwirtschaft 2012/13. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. 23. Auflage. Darmstadt.
- KTBL (2013): Standarddeckungsbeiträge 2011/2012. Online-Datenbank. www.ktbl.de/index.php?id=798. Abgerufen am 9.1.2013.
- KÜHLBACH, K. (2007): Geodateninfrastrukturen und Geodienste für die Landwirtschaft. KTBL-Heft 66. Darmstadt.
- KUHLMANN, F. (1997): Ökonomisch und ökologisch effiziente Landbewirtschaftung durch verbesserte Entscheidungsgrundlagen und -hilfsmittel. Vortrag gehalten am 11.6.1997 in Grünberg (Hessen).
- KUHLMANN, F. (2007): Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft. 3. Auflage. Frankfurt am Main.
- KUHLMANN, F., NEUMANN, S. (2011). Ein entscheidungstheoretischer Ansatz zur Bewertung des praktischen Nutzens der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu Getreide. Berichte über Landwirtschaft. Jg. 89(2), S. 232-266.
- KUHNKE, A. (1936): Die Abhängigkeit des Pflanzenertrages von der Wasserverdunstung. Die Bewegung des Vegetationsfaktors Wasser, ihre Auswirkung im Wasserhaushalt von Klima, Boden und Pflanze. Schriften der Königsberger Gelehrten Gesellschaft. 13. Jahrgang, Heft 4. Halle (Saale).
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, G., SCHWERDTFEGER, G. (1988): Bodenkunde. 4. Auflage. Stuttgart.



- LAMBERT, D.; LOWENBERG-DE BOER, J. (2000): Precision agriculture profitability review. Purdue University.
- LAMP, J., CAPELLE, A., EHLERT, D., JÜRSCHIK, P., KLOEPFER, F., NORDMEYER, H., SCHRÖDER, D., WERNER, A. (1998): Erfassung der kleinräumigen Heterogenität in der teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion. In: KTBL [Hrsg.] (1998): Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. KTBL / ATB-Workshop vom 15. Bis 16. Januar 1998 in Potsdam. Darmstadt. S. 7-32.
- LISSE, H. (2003): GPS-gestützte Teilflächenbewirtschaftung. RKL-Schrift 4.1.0: S. 1123-1143.
- LÖSEL, G., BOESS, J., HENNINGS, V. (2004): Beitrag und Effizienz verschiedener konventioneller und geophysikalischer Methoden zur Erstellung einer Hof-Bodenkarte für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung. In: NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG [Hrsg.]. Arbeitshefte Boden. Heft 5/2004. Hannover. S. 47-64.
- LOWENBERG-DE BOER, J., SWINTON, S. M. (1997): Economics of site-specific management in agronomic crops. The state of site-specific management for agriculture. Nr. thestateofsites. S. 369-396.
- LUDOWICY, C., SCHWAIBERGER, R., LEITHOLD, P. (2002): Precision Farming – Handbuch für die Praxis. Frankfurt.
- LÜCK, E., EISENREICH, M., DOMSCH, H., BLUMENSTEIN, O. (2000): Geophysik für Landwirtschaft und Bodenkunde. Stoffdynamik in Geosystemen, 4. Jg., S. 167.
- MENGEL, K. (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. 7. Auflage. Jena.
- MÜCKENHAUSEN, E. (1993): Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen. 4. Auflage. Frankfurt am Main.



- MÜLLER, M., YARAMANCI, U., NITZSCHE, O. (2008): Handbuch Agrogeophysik. Potenzial und Anwendungsbeispiele geophysikalischer Techniken in Landwirtschaft und Bodenkunde. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Heft 25/2008. Dresden.
- NOACK, P. O. (2006): Entwicklung fahrspurbasierter Algorithmen zur Korrektur von Ertragsdaten im Precision Farming. München.
- NOACK, P. O. (2007): Ertragskartierung Getreidebau. KTBL-Heft 70. Darmstadt.
- NORDMEYER, H., HÄUSLER, A., NIEMANN, P. (1997): Patchy Weed Control as an Approach in Precision Farming. In: STAFFORD, J. V. [Ed.] (1997): Precision Agriculture. Volume I: Spatial Variability in Soil and Crop. S. 307-313.
- OLIVER, M. A. (2010): An Overview of Geostatistics and Precision Agriculture. In: OLIVER, M. A. [Ed.] (2010): Geostatistical Applications for Precision Agriculture. Dordrecht. Heidelberg. London. New York. S. 1-34.
- ØSTERGAARD, H. S. (1997): Agronomic consequences of variable N fertilization. In: STAFFORD, J. V. [Ed.] (1997): Precision Agriculture. Volume II: Technology, IT and Management. Oxford. S. 315-320.
- OSTHEIM, K.-U. (2000): Prüfung der ökonomischen und ökologischen Vorzüglichkeit einer GPS-gestützten teilflächenspezifischen Landwirtschaft: Gutachten im Auftrag der Stiftung Westfälische Landschaft in Münster. Münster-Hiltrup.
- PFINGSTEN, E. (1963): Die Ernteerträge niedersächsischer Ackerböden und ihre Bewertung nach dem Bodenschätzungsgesetz. In: Agrarwirtschaft. 12. Jg.. Heft 1. S. 16-27.
- RECKLEBEN, Y., SCHNEIDER, M., WAGNER, P., SCHWARZ, J., HÜTER, J. (2007): Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung. KTBL-Heft 75. Darmstadt.



- REICHARDT, M. (2010): Precision Farming in der deutschen Landwirtschaft – eine GIS-gestützte Analyse. Bochum.
- REICHARDT, M., JÜRGENS, C. (2008): Precision Farming in Deutschland – bestehende Akzeptanzmuster und zukünftige Perspektiven einer Technologie. In: WERNER, A., DREGER, F., SCHWARZ, J. [Hrsg.] (2008): Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung – preagro II. Abschlussbericht. Müncheberg. S. 577-610.
- REICHE, E.-W., RINKER, A. (2004): Regionaler Stoffhaushalt. In: LEIBNIZ-ZENTRUM FÜR AGRARLANDSCHAFTS- UND LANDNUTZUNGSFORSCHUNG (ZALF) E.V. [Hrsg.] (2004): Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau. Verbundprojekt pre agro. Abschlussbericht. Müncheberg. Kap. 5, S. 63-88.
- REICHEL, H. (1973): Überprüfung der Ergebnisse der Reichsbodenschätzung auf ihren ökonomischen Aussagewert unter heutigen Produktionsbedingungen. Hohenheim.
- REIMER, G., LAMP, J. (2002): GIS-gestützte Vergleiche von Bodenschätzungs- und Ertragskarten. DBG-Mitteilungen. Band 99 (1-24). S. 99-100.
- REINING, E., ROSNER, G., KÜHN, J. (2004): Ortsspezifische Aussaat von Winterweizen. In: LEIBNIZ-ZENTRUM FÜR AGRARLANDSCHAFTS- UND LANDNUTZUNGSFORSCHUNG (ZALF) E.V. [Hrsg.] (2004): Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau. Verbundprojekt pre agro. Abschlussbericht. Müncheberg. Kap. 4.4, S. 101-120.
- RENGER, M., STREBEL, O., GIESEL, W. (1974): Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kenn-



- werten. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung. 15. Jg.. S. 148-160.
- RENGER, M., STREBEL, O. (1980): Beregnungsbedarf landwirtschaftlicher Kulturen in Abhängigkeit vom Boden. Wasser und Boden, 32. Jg., Nr. 12, S. 572-575.
- RENGER, M., STREBEL, O. (1982): Beregnungsbedürftigkeit landwirtschaftlicher Nutzpflanzen in Niedersachsen. Geologisches Jahrbuch. Heft 13. Reihe F. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover.
- REUSCH, S. (1998): Online Erfassung der Stickstoffversorgung von Pflanzen. In: KTBL [Hrsg.] (1998): Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. KTBL / ATB-Workshop vom 15. bis 16. Januar 1998 in Potsdam. KTBL Arbeitspapier 264. Darmstadt. S. 110-117.
- RICHTER, A., ADLER, G. H., FAHRAK, M., ECKELMANN, W. (2007): Erläuterungen zur nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000.000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg.]. Hannover.
- ROGASIK, H., KOSZINSKI, D., ONASCH, I., HIEROLD, W., WEHRHAN, M., SOMMER, M. (2001): Profilskalige Gefügeuntersuchungen mittels Veris Profiler 3000. In: Böden verstehen – Böden nutzen – Böden fit machen. Jahrestagung der DBG. 3.-9. September 2011. Berlin.
- RÖSCH, A., KURANDT, F. (1991): Bodenschätzung: Gesetze mit amtlicher Begründung. Durchführungsbestimmungen und Verwaltungsvorschriften. 3. Auflage. Fotomechanischer Nachdruck (nur Teil „Bodenschätzung“) der Ausgabe von 1950. Köln. Berlin. Bonn. München.
- RÖSCH, C., DUSSELDORP, M., MEYER, R. (2007): Precision Agriculture. Landwirtschaft mit Satellit und Sensor. Frankfurt am Main.



- ROTH, H. A. (1956): Untersuchungen über die Beziehungen zwischen den von der Bodenschätzung erfaßten natürlichen Ertragsbedingungen und den Ernteerträgen des Ackerlandes. In: DEUTSCHE AKADEMIE DER LANDWIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN ZU BERLIN [Hrsg.] (1956): Wissenschaftliche Abhandlungen Nr. 19. Berlin.
- ROTH, R. (2004): Teilflächenspezifische Aussaat von Getreide, speziell Winterweizen. In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 4.2-13–4.2-16.
- ROTH, R., GÜNTHER, R. (1988): Transpirationskoeffizienten und Wasserausnutzungsraten landwirtschaftlicher Fruchtarten. 1. Mitteilung: Transpirationskoeffizienten und Wasserausnutzungsraten von Getreide, Hackfrüchten und Silomais unter Feldbedingungen und in Gefäßversuchen. Archiv Acker-Pflanzenbau Bodenkunde. Vol. 32. S. 397-403.
- ROTHKEGEL, W. (1950): Geschichtliche Entwicklung der Bodenbonitierungen und Wesen und Bedeutung der deutschen Bodenschätzung. Stuttgart.
- ROTHMUND, M. (2004): Gewannebewirtschaftung. In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 4.3-7-4.3-14.
- ROTHMUND, M., WODOK, M. (2010): ISOBUS-Eine systematische Betrachtung der Norm ISO 11783. In: GIL Jahrestagung. 2010. S. 163-166.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (1989): Lehrbuch der Bodenkunde. 12. Auflage. Stuttgart.
- SCHILLING, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Stuttgart.
- SCHIMMELPFENNIG, D., EBEL, R. (2011): The Information age and adoption of Precision agriculture. Amber Waves.



- SCHMERLER, J., JÜRSCHIK, P. (1997a): Lohnt sich der Aufwand? In: DLG-Mitteilungen. Heft 6. S. 49-51.
- SCHMERLER, J., JÜRSCHIK, P. (1997b): Technological and Economic Results of Precision Farming from a 7.200 Hectares Farm in Eastern Germany. In: STAFFORD, J. V. [Ed.] (1997): Precision Agriculture. Volume II: Technology, IT and Management. Oxford. S. 991-995.
- SCHMIDT, F. (2004): Auswertung digitaler Geländemodelle (Relief). In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 3.2-41–3.2-44.
- SCHMIDT, W. W. (1999): Landwirtschaftliches BUS System (LBS). DLG-Merkblatt 317. Frankfurt am Main.
- SCHNEIDER, M. (2011): Ökonomische Potenziale von Precision Farming unter Risikoaspekten. Berichte aus der Agrarökonomie. Aachen.
- SCHNEIDER, M., WAGNER, P. (2008): Ökonomische Effekte der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung auf betrieblicher Ebene. In: WERNER, A., DREGER, F., SCHWARZ, J. [Hrsg.] (2008): Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung – preagro II. Abschlussbericht. Müncheberg. S. 401-438.
- SCHRÖDER, D. (1998): Strategien zur Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. In: KTBL [Hrsg.] (1998): Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. KTBL / ATB-Workshop vom 15. Bis 16. Januar 1998 in Potsdam. Darmstadt. S. 47-52.
- SCHRÖDTER, H. (1985): Verdunstung. Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden. Berlin. Heidelberg. New York. Tokyo.
- SCHOFIELD, R. K. (1935): The pF of the water in soil. Trans. Int. Congr. Soil Sci. 3rd, II. 38. Jg.. S. 37-48.



- SCHULZE, E., SCHULZE-GEMEN, P. (1957): Der Wasserhaushalt des Bodens im Dauerdüngungsversuch Dikopshof (1953/54). Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau 103. S. 22-58.
- SCHWAIBERGER, R. (2004): Abschätzung der N-Versorgung von Beständen mit dem YARA N-Sensor®. In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 3.2.4-1–3.2.4-4.
- SEKERA, F. (1931): Die Beurteilung der Wasserversorgung der Pflanze als Standortfaktor. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde 22. S. 152-190.
- SELIGE, T. (2004): Multispektralanalyse von Fernerkundungsaufnahmen. In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 3.2-55–3.2-59.
- SORTG (2012): Sortenschutzgesetz (SortG). Online-Ressource: <http://www.buzer.de/gesetz/5511/index.htm>. Abgerufen am 12.11.2012.
- SOURELL, H. (2004): Teilflächenspezifische Beregnung (Precision Irrigation). . In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 4.2-57–4.2-63.
- SRINIVASAN, A. (2006): Handbook of precision agriculture: principles and applications. Binghamton NY.
- STEINMAYR, T. (2002): Fehleranalyse und Fehlerkorrektur bei der lokalen Ertragsermittlung im Mähdrescher zur Ableitung eines standardisierten Algorithmus für die Ertragskartierung. München.
- STEMPFHUBER, W. (2012): Precision Farming Zyklus. Online Ressource. Abgerufen am 20.8.2012. <http://www.geometh> -



data.ethz.ch/publicat/diploma/2008_pfarwall/precisionfarmin.html

STOCK, H.-G., WICKE, H.-J., MÜLLER, C. (1976): Bodenfeuchteansprüche von Getreide in verschiedenen Entwicklungsstadien. Archiv Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 20. Nr. 11. Berlin. S. 791-803.

STREIT, U. (2004): GIS-Einsatz in der Landwirtschaft – Defizite und Entwicklungspotenziale. In: KTBL [Hrsg.] (2004): Geographische Informationssysteme in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum. Defizite und Entwicklungspotenziale. KTBL-Schrift 428. S. 7-28.

SWINTON, S. M., AHMAD, M. (1996): Returns to Farmer Investments in Precision Agriculture Equipment and Services. In: ROBERT, P. C., RUST, R. H., LARSON, W. E. [Eds.] (1996): Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture. Minneapolis. S. 1009-1018.

SWINTON, S. M., LOWENBERG-DEBOER, J. (2001): Global adoption of precision agriculture technologies: Who, when and why. In: Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture. S. 557-562.

THAER, A. D. (1821): Grundsätze der rationellen Landwirtschaft. 2. Auflage. Berlin.

TIMMERMANN, C., GERHARDS, R., KÜHBAUCH, W. (2003): The economic impact of site-specific weed control. Precision Agriculture. 4. Jg., Nr. 3. S. 249-260.

VANACHT, M. (2008): Die weiße Revolution – Informationstechnologien als Wegbereiter der Internationalisierung der Landwirtschaft. Veranstaltung vom 28.02.2008. Berlin. Veranstalter: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V.. Online-



Ressource. Abgerufen am 17.06.2012.

http://www.preagro.de/docs/Grundsatzreferat_Vanacht.pdf

VAN EIMERN, J., HÄCKEL, H. (1984): Wetter- und Klimakunde. Ein Lehrbuch der Agrarmeteorologie. 4. Auflage. Stuttgart.

VORDERBRÜGGE, T., KASEL, H., FRIEDRICH, K., HARRACH, T., KEIL, B. (2002): Profilansprachen nach den Methoden der Bodenschätzung und der Bodenkunde. DBG-Mitteilungen. Band 99 (1-24). S. 113-118.

VOßHENRICH, H.-H. (2004): Bodenbearbeitung und Bestellung. In: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V. [Hrsg.] (2004): Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau. Verbundprojekt pre agro. Abschlussbericht. Müncheberg. Kap. 4.5, S. 121-150.

WAGNER, P. (1999): Produktionsfunktionen und Precision Farming. Gießener Schriften zur Agrar- und Ernährungswirtschaft (1999): Zukunftsorientierte Betriebswirtschaft und Informationstechnologien in der Agrarwirtschaft. Heft 29. Frankfurt am Main. S. 39-65.

WAGNER, P. (2004): Wirtschaftlichkeit von Precision Farming – Methoden und Möglichkeiten der Wirtschaftlichkeitsüberprüfung im landwirtschaftlichen Unternehmen. . In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 6-31–6-53.

WAGNER, P., SCHNEIDER, M., WEIGERT, G. (2005): Einsatz künstlicher neuronaler Netze zur automatisierten Ableitung von Entscheidungsregeln für die N-Düngung in Winterweizen. Zeitschrift für Agrarinformatik 4/05. S. 75-84.

WAGNER, U. (2004a): Praktischer GIS-Einsatz im landwirtschaftlichen Betrieb. In: KTBL [Hrsg.] (2004): Geographische Informationssysteme

in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum. Defizite und Entwicklungspotenziale. KTBL-Schrift 428. Darmstadt. S. 75-81.

WERHAN, M., KÜHN, J., BRENNING, A., ROGASIK, H., SOMMER, M. (2008): Methoden zur integrativen, nicht-invasiven Standortanalyse zur Charakterisierung der pflanzenbaulich relevanten Eigenschaften standortheterogener Ackerflächen. In: WERNER, A., DREGER, F., SCHWARZ, J. [Hrsg.] (2008): Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung – preagro II. Abschlussbericht. Müncheberg. S. 65-92.

WERNER, A. (2004): Einführung. In: In: HUFNAGEL, J., HERBST, R., JARFE, A., WERNER, A. [Hrsg.] (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Darmstadt. S. 1-1 – 1-12.

WELSH, J. P., WOOD, G. A., GODWIN, R. J., TAYLOR, J. C., EARL, R., BLACKMORE, S., KNIGHT, S. M. (2003). Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals, Part II: wheat. Biosystems Engineering, Vol. 84(4). S. 495-511.

WILL, D. (1987): Die Bodenschätzung in Theorie und Praxis sowie als bodenkundliche Datenquelle. Nachrichtenblatt des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation. S. 310-332.

ZIEKUR, R., SCHURICHT, R. (2004): Georadar. In: NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG [Hrsg.]. Arbeitshefte Boden. Heft 5/2004. Hannover. S. 21-33.



