

Ökonomischer Vergleich zwischen hochaufgelösten und herkömmlichen
Bodenbeprobungen am Beispiel des pH-Wertes unter Verwendung eines On-
The-Go pH-Sensors

Dissertation
zur Erlangung des
Doktorgrades der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III
Agrar- und Ernährungswissenschaften,
Geowissenschaften und Informatik

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Herrn Tobias Leithold

geb. am 21.12.1984 in Zwickau

Erstgutachter: Prof. Dr. Peter Wagner

Zweitgutachter: PD Dr. Markus Gandorfer

Datum der Verteidigung: 09.11.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	4
2	Stand der Forschung	5
2.1	Der pH-Wert als ertragslimitierender Faktor	5
2.2	Stand der Kalkdüngung – Entscheidungsregeln	8
2.3	Ergebnisse von hochaufgelösten Bodenbeprobungen nach der herkömmlichen Methodik	9
2.3.1	Kleinräumige Variabilität des pH-Wertes	10
2.3.2	Einfluss der Probenahme	10
2.3.2.1	Einfluss der Entnahmetiefe	11
2.3.2.2	Einfluss der Beprobungsdichte	11
2.3.3	Einfluss der Art der Zonierung nach starren oder intelligenten Raster	12
2.3.4	Ergebnisse von kurzfristigen Wiederholungsbeprobungen	13
2.3.5	Quantifizierung der Fehlerquellen der Bodenprobenahme und -analyse	14
2.3.6	Wirtschaftlichkeit der Bodenbeprobung	15
2.4	Ergebnisse hochaufgelöster Bodenbeprobungen unter Verwendung eines pH-Sensors	17
2.5	Heterogenitätsindikatoren und ihre Verwendung im Precision Farming	22
2.5.1	Ertrag	22
2.5.1.1	Ertragskartierung und Fehlerquellen der Ertragskartierung	23
2.5.1.2	Mehrjährige Auswertung von Ertragskarten	24
2.5.2	Höhe und Topographic Wetness Index	25
2.5.3	Scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens	26
2.5.4	Bodenschätzung	27
3	Material und Methoden	29
3.1	Standort- und Versuchsbeschreibungen	29
3.1.1	Kalksteigerungsversuch Julius-Kühn-Versuchsfeld – Feld A	29
3.1.2	Versuchsschlag „550“ am Standort Görzig	31
3.1.3	Standortbeschreibungen der Praxis schläge	33
3.2	Aufbau und Messprinzip des Verissensors	34
3.2.1	Messprinzip des pH-Wertes	34
3.2.2	Messprinzip der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens	35
3.3	Datengrundlage der Heterogenitätsindikatoren	36
3.3.1	Naturalertrag	36
3.3.1.1	Ertragsmessung nach dem volumetrischen Messprinzip	37
3.3.1.2	Ertragsmessung nach dem Kraft-/Impuls- Messprinzip	37
3.3.2	Höhe	38
3.3.3	Chemische Bodenuntersuchungen	38
3.3.4	Simulierte herkömmliche Bodenbeprobungen	39
3.3.5	Digitale Karten der Bodenschätzung	39
3.4	Ableitungen der Heterogenitätsindikatoren zu merkmals-homogenen Karten	40
3.4.1	Mehrjährige Ertragskarte	40
3.4.1.1	Mehrjährige Ertragskarte nach Blackmore (2000)	40
3.4.1.2	Mehrjährige Ertragskarte nach Blackmore et al. (2003)	41
3.4.1.3	Mehrjährige Ertragskarte nach Schneider (2009)	42
3.4.2	Höhe und Topographic Wetness Index	43
3.4.3	Scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens	44
3.5	Verwendete statistische Verfahren zur Datenauswertung	44

3.5.1 Methodenvergleich	44
3.5.1.1 Korrelationskoeffizienten nach <i>Pearson</i> und <i>Lin</i>	44
3.5.1.2 Bland-Altman-Plot	45
3.5.1.3 Fehlermaße	47
3.5.1.4 Boundary-Line Methode	47
3.5.1.5 t-Test für verbundene Stichproben	48
3.5.1.6 Anpassung mittels regressionsanalytischer Verfahren	48
3.5.2 Erstellung interpolierter Karten unter der Verwendung geostatistischer Verfahren	50
3.5.3 Evaluierung der Heterogenitätsindikatoren als Eignung zur Abgrenzung nährstoffhomogener Zonen	51
3.6 Determinanten der Wirtschaftlichkeit der Precision-Farming Verfahren	52
3.6.1 Zeitliche Entwicklung des pH-Wertes durch Kalkung und natürliche Bodenversauerung	53
3.6.2 Fruchtfolge, Ertragserwartungen, Produkt- und Faktorpreise	53
3.6.3 Verfahrenskosten	54
3.6.4 Fehlallokierte Kalkkosten	54
3.6.5 Entgangener Nutzen des Phosphateffektes	55
3.6.6 Erwartete Ertragsdepressionen infolge suboptimaler pH-Werte	56
4 Ergebnisse	59
4.1 Methodenvergleich zwischen Verissensor und Labormethode zur Messung des pH-Wertes	59
4.1.1 Fehlerquellen innerhalb der Methoden	59
4.1.1.1 Verissensor	59
4.1.1.2 Labormethode	61
4.1.2 Genauigkeit zwischen den Methoden	64
4.1.3 Algorithmus zur Kalibrierung des Verissensors	65
4.1.4 Kalibrieransätze anderer Autoren	66
4.1.5 Evaluierung der Kalibrieransätze	67
4.1.6 Auswirkungen der Fehler auf die Düngegabe	68
4.2 Kalksteigerungsversuch Julius-Kühn-Feld	71
4.2.1 Einfluss der langjährigen Kalk- und Phosphatdüngung auf den pH-Wert	71
4.2.2 Einfluss der langjährigen Kalk- und Phosphatdüngung auf den Phosphatgehalt	71
4.2.3 Einfluss der langjährigen Kalk- und Phosphatdüngung auf den Kalium- und Magnesiumgehalt	73
4.3 Methodenvergleich zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte	74
4.3.1 Ertragsfilter	74
4.3.2 Vergleich von vier Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte	77
4.3.2.1 Versuchsschlag „550“ am Standort Görzig	77
4.3.2.2 Versuchsschlag „Lange Winde“ am Standort Warnstedt	81
4.3.2.3 Abschließende theoretische Anmerkungen zu den Methoden	85
4.3.2.4 Zwischenfazit – Fehlerhafte Einordnung „richtig-stabiler“ Ertragszonen als „instabile“	87
4.3.3 Verteilungsunabhängige Methode zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte	87
4.3.3.1 Kriterium „Ertragsniveau“	88
4.3.3.2 Kriterium „zeitliche Stabilität“	89
4.3.4 Validierung der untersuchten Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte anhand eines simulierten Schlagbeispiels	90
4.3.4.1 Datengrundlage des simulierten Schlagbeispiels	90
4.3.4.2 Klassifizierungen der Methoden	91

4.3.5 Zwischenfazit.....	92
4.4 Ökonomischer Vergleich zwischen hochaufgelösten und herkömmlichen Bodenbeprobungen	94
4.4.1 Versuchsschlag „550“ am Standort Görzig	94
4.4.1.1 Ergebnisse der hochaufgelösten herkömmlichen Bodenbeprobungen der Jahre 2007 und 2011	94
4.4.1.2 Ergebnisse der hochaufgelösten Bodenbeprobungen des Verissensors der Jahre 2011 und 2012	98
4.4.1.3 Ergebnisse des Vergleichs zwischen dem Verissensor und der herkömmlichen Bodenbeprobung im Jahr 2011.....	99
4.4.1.4 Ertrags-pH-Beziehungen nach der Boundary-Line Methode	100
4.4.1.5 Klassifizierung homogener Teilflächen auf Basis der Heterogenitätsindikatoren	104
4.4.1.6 Annahmen für den ökonomischen Vergleich	106
4.4.1.7 Ökonomischer Vergleich	106
4.4.1.8 Ergebnisse zur Homogenisierung der Nährstoffzonen durch die Klassifizierung homogener Zonen der Heterogenitätsindikatoren.....	111
4.4.1.9 Zwischenfazit.....	112
4.4.2 Ergebnisse der Praxisflächen.....	113
4.4.2.1 Teilflächenabgrenzungen mit Hilfe der Heterogenitätsindikatoren	113
4.4.2.2 Ergebnisse der hochaufgelösten Bodenbeprobungen des Verissensors	114
4.4.2.2.1 Ergebnisse der Kalibrierungen	114
4.4.2.2.2 Ergebnisse der pH-Wert Messungen und Kalkbedarf.....	116
4.4.2.2.3 Ergebnisse kleinräumiger Intensivbeprobungen	117
4.4.2.2.4 Ertrags-pH-Beziehungen der Praxisstandorte.....	119
4.4.2.2.5 Ökonomischer Vergleich.....	124
4.4.2.2.6 Ergebnisse zur Homogenisierung der Nährstoffzonen durch die Klassifizierung homogener Zonen der Heterogenitätsindikatoren	129
4.4.2.3 Zwischenfazit.....	131
5 Diskussion	132
5.1 Bewertung der Methoden zur Ermittlung des pH-Wertes mit Hilfe des Verissensors und der Labormethodik.....	132
5.2 Bewertung der hochaufgelösten Bodenbeprobungen gegenüber den herkömmlichen Verfahren der Bodenbeprobungen.....	134
5.2.1 Kleinräumige pH-Variabilität.....	135
5.2.2 Effekte der Verfahrenskosten und die ökonomische Wirkung.....	136
5.2.3 Effekte der Nährstoffumverteilungen und die ökonomische Wirkung.....	136
5.2.4 Effekte der Nährstoffwechselwirkungen und die ökonomische Wirkung	137
5.2.5 Effekte der Ertragssteigerung und die ökonomische Wirkung	139
5.2.6 Gesamtbewertung	141
5.3 Bewertung der Heterogenitätsindikatoren zur Abgrenzung homogener Teilflächen als Grundlage der Bodenbeprobung	143
5.3.1 Bewertung der Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte	143
5.3.2 Eignung der Heterogenitätsindikatoren als Grundlage der Bodenbeprobung	144
6 Zusammenfassung	146
7 Literaturverzeichnis.....	149
8 Anhangsverzeichnis.....	169
9 Anhang	171

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2-1: Geschätzte Ertragsfunktionen von Körnermais und Sojabohnen (BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER, 2000: 61)
- Abb. 2-2: Verfahrenskosten der untersuchten Bodenprobenstrategien in Abhängigkeit der Rastergröße nach ADAMCHUK (2000: 83)
- Abb. 3-1: Versuchsplan des Kalksteigerungsversuchs „Feld A“ (angelehnt an SCHMIDT et al., 2004: 28)
- Abb. 3-2: Versuchsaufbau 2010 und Fahrspuren des Verissensors
- Abb. 3-3: Beprobungsspuren im Jahr 2007 und Versuchsdesign des Versuchsschlages „550“ bis 2011
- Abb. 3-4: Versuchsdesign nach Umstellung des Pflegesystems im Jahr 2011
- Abb. 3-5: Standortübersicht der Versuchsflächen
- Abb. 3-6: Technische Zeichnung Veris MSP pH-Manager (LUND et al., 2004: 5)
- Abb. 3-7: Technische Zeichnung Veris EC (VERIS-TECHNOLOGIES, 2008)
- Abb. 3-8: Aufbau des volumetrischen Ertragsmesssystem (verändert nach MOORE, 1998: 31)
- Abb. 3-9: Aufbau eines Ertragsmesssystem nach dem Kraft-/Impuls-Prinzip (verändert nach MOORE, 1998: 33)
- Abb. 3-10: Simulierte Beganglinie im 1-ha-Raster
- Abb. 3-11: Beispiel für Lokationsshift, Skalenshift und die Kombination von Lokations- und Skalenshift
- Abb. 3-12: Beispiel eines Bland-Altman-Plots
- Abb. 3-13: Zeitliche Entwicklung des pH-Wertes unter dem Einfluss der Kalkung und der natürlichen Bodenversauerung
- Abb. 3-14: Faustregel der Wechselwirkung zwischen P-Gehalt und pH-Wert nach KERSCHBERGER (1987: 319, verändert)
- Abb. 3-15: Mittlere zu erwartende Relativerträge und Grenzen der Relativerträge für kalkanspruchsvolle und kalkanspruchslose Fruchtarten (gültig für Bodengruppe IV)
- Abb. 4-1: Histogramm der Differenzen und Scatterplot der Ergebnisse der Erst- und Zweitmessung identischer Bodenproben der Sensormethodik
- Abb. 4-2: Bland-Altman-Plot der Ergebnisse nach der Sensormethodik
- Abb. 4-3: Dreifache Probenahme identischer Begehungslinien und Ausschnitt an Einzeleinstichen
- Abb. 4-4: Häufigkeitsverteilungen der Differenzen des Probenahmefehlers
- Abb. 4-5: Histogramm der Differenzen und Scatterplot der Ergebnisse der Erst- und Zweitmessung identischer Bodenproben der Labormethodik
- Abb. 4-6: Bland-Altman-Plot für die Labormethodik
- Abb. 4-7: Ergebnisse der Labor- und Sensormethodik für identische Bodenproben und Bland-Altman-Plot
- Abb. 4-8: Boxplots der Ergebnisse der Labormethodik, der Rohdaten des Verissensors und den kalibrierten Rohdaten nach den Ansätzen verschiedener Autoren
- Abb. 4-9: Häufigkeitsverteilungen der Fehlerkomponenten
- Abb. 4-10: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen für den Zielwert *CaO-Gabe* nach den beiden Verfahren
- Abb. 4-11: Ergebnisse der langjährigen Kalk- und Phosphatdüngung auf den pH-Wert
- Abb. 4-12: Wechselwirkungen der Phosphat- und Kalkdüngung auf die Phosphatverfügbarkeit unter der Vorfrucht Ackerbohne
- Abb. 4-13: Beispiel zur Erkennung eines Wendevorgangs durch den Fahrtrichtungswinkel (γ)
- Abb. 4-14: Beispiel eines Ertragsausreißers
- Abb. 4-15: Beispiel eines Teilbreitendrusches mit fehlender Markierung im Rohdatensatz
- Abb. 4-16: Schema zur Eliminierung fehlerhafter und unplausibler Ertragsmesspunkte
- Abb. 4-17: Häufigkeitsverteilungen der interpolierten Körnermaiserträge für die Erntejahre 1999, 2003 und 2006

Abb. 4-18: Klassifizierte Ertragszonen der untersuchten Methoden am Versuchsschlag „550“

Abb. 4-19: Häufigkeitsverteilungen der interpolierten Absoluterträge für die untersuchten Erntejahre

Abb. 4-20: Ertragszonen der untersuchten Methoden am Versuchsschlag „Lange Winde“

Abb. 4-21: Boxplot Darstellungen der Körnermaiserträge des Versuchsschlages „550“

Abb. 4-22: Häufigkeitsverteilungen der fünf Erntejahre für das simulierte Schlagbeispiel

Abb. 4-23: Darstellung der jährlichen simulierten Ertragskarten

Abb. 4-24: Darstellung des mittleren mehrjährigen Ertrags und dessen Standardabweichung

Abb. 4-25: Klassifizierungen der Methoden für das simulierte Schlagbeispiel

Abb. 4-26: Ergebnisse der Bodenbeprobungen der Jahre 2007 und 2011 der Nährstoffe Phosphor, Kalium und Magnesium (jeweils in mg Nährstoff je 100 g Boden) sowie des pH-Werts

Abb. 4-27: Theorie der Entwicklung der Korrelationskoeffizienten durch unterschiedliche Düngungsstrategien

Abb. 4-28: Effekte der Düngevarianten auf die Entwicklung der Nährstoffgehalte von 2007 bis 2011

Abb. 4-29: Ergebnisse der Beprobungen nach dem Verissensor in den Jahren 2011 und 2012

Abb. 4-30: Vergleich der herkömmlichen Bodenbeprobung mit den Ergebnissen des Verissensors

Abb. 4-31: Interpolierte pH-Wert-Karte des Verissensors und Ertragskarte aus dem Jahr 2011

Abb. 4-32: Darstellung der Ertrags-pH-Beziehung im Streudiagramm und der Ergebnisse der Boundary-Line-Methode für das Jahr 2011

Abb. 4-33: Ergebnisse der Boundary-Line-Methode innerhalb der Varianten des Versuchsschlages „550“ im Jahr 2011

Abb. 4-34: Interpolierte pH-Wert-Karte des Verissensors und Ertragskarte aus dem Jahr 2012

Abb. 4-35: Darstellung der Ertrags-pH-Beziehung im Streudiagramm und der Ergebnisse der Boundary-Line-Methode für das Jahr 2012

Abb. 4-36: Ergebnisse der Boundary-Line-Methode innerhalb der Varianten des Versuchsschlages „550“ im Jahr 2012

Abb. 4-37: Einteilungen von Teilflächen nach verschiedenen Heterogenitätsindikatoren

Abb. 4-38: Verfahrenskosten der Klassifizierungen der untersuchten Heterogenitätsindikatoren

Abb. 4-39: Entgangener Nutzen des Phosphateffektes für den Versuchsschlag „550“

Abb. 4-40: Entgangener Nutzen durch Ertragsdepressionen für den Versuchsschlag „550“

Abb. 4-41: Gesamtkosten und entgangener Nutzen für den Versuchsschlag „550“

Abb. 4-42: Variabilität der Nährstoffe innerhalb der Zonen nach den vorgeschlagenen Klassifizierungen der Heterogenitätsindikatoren

Abb. 4-43: Anteil der über- und unterdüngten Flächen und Mengen (in %) nach den Empfehlungen der untersuchten Beprobungsverfahren

Abb. 4-44: Ergebnisse der Intensivbeprobung „Lange Winde“

Abb. 4-45: Ergebnisse der Intensivbeprobung „Deutsches Feld“

Abb. 4-46: pH-Wert Karten (2011) und Ertragskarten (2012) der Versuchsschläge „Kuhberg“ und „Lange Welle“

Abb. 4-47: Darstellung der Ertrags-pH-Beziehung im Streudiagramm (links) und der Ergebnisse der Boundary-Line-Methode (rechts) für die Versuchsschläge „Kuhberg“ und „Lange Welle“

Abb. 4-48: pH-Wert Karte (2011) und Ertragskarten der Erntejahre 2010 und 2011 des Versuchsschlages „Lange Winde“

Abb. 4-49: Darstellung der Ertrags-pH-Beziehung im Streudiagramm und der Ergebnisse der Boundary-Line-Methode für den Versuchsschlag „Lange Winde“

Abb. 4-50: Verfahrenskosten der Heterogenitätsindikatoren der untersuchten Praxis schläge

Abb. 4-51: Fehlallokierte Kalkkosten der Heterogenitätsindikatoren der untersuchten Praxis schläge

Abb. 4-52: Entgangener Nutzen durch den Phosphateffekt der untersuchten Praxis schläge

Abb. 4-53: Entgangener Nutzen durch Ertragsdepressionen der Versuchsschläge im Szenario „Best-Case“

- Abb. 4-54: Entgangener Nutzen durch Ertragsdepressionen der Versuchsschläge im Szenario „Average-Case“
- Abb. 4-55: Entgangener Nutzen durch Ertragsdepressionen der Versuchsschläge im Szenario „Worst-Case“
- Abb. 4-56: Jährliche Kosten und jährlich entgangener Nutzen der untersuchten Beprobungsverfahren
- Abb. 4-57: pH-Variabilität der Versuchsschläge in Abhängigkeit von der Anzahl der Zonen

Tabellenverzeichnis

- Tab. 2-1: Fruchtarten nach ihren Kalkanspruch (übernommen und ergänzt nach SCHILLING, 2000: 384)
- Tab. 2-2: Übersicht der verwendeten statistischen Verfahren für die Methodvalidierung
- Tab. 2-3: Filteransätze zur Bereinigung von Rohertragsdaten
- Tab. 3-1: Standortbeschreibungen
- Tab. 3-2: Klassengrenzen der Ertragszonen (verändert nach BLACKMORE, 2000: 41)
- Tab. 3-3: Klassengrenzen der Ertragszonen (BLACKMORE et al., 2003)
- Tab. 3-4: Zielwerte einer Modellanpassung zur Interpolation
- Tab. 3-5: Kalkulationsgrundlagen für die Szenario-Berechnungen
- Tab. 3-6: Fruchtarten nach ihren Kalkansprüchen (teilweise übernommen und ergänzt nach SCHILLING, 2000: 384)
- Tab. 4-1: Deskriptive Statistik zur Wiederholgenauigkeit der Sensormethode
- Tab. 4-2: Deskriptive Statistik zur Wiederholgenauigkeit der Labormethode
- Tab. 4-3: Statistische Kennzahlen und Beurteilungskriterien des Methodenvergleiches an identischen Bodenproben
- Tab. 4-4: Beispiel für die Auswahl von Proben zur Kalibrierung des Verissensors
- Tab. 4-5: Vergleich der Differenzen zwischen den Ergebnissen der Labormethodik und den Rohdaten des Verissensors sowie den Ergebnissen verschiedener Ansätze zur Kalibrierung
- Tab. 4-6: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen auf den Zielwert *pH-Wert* nach den beiden Verfahren
- Tab. 4-7: Ergebnisse der Differenzen des paarweisen Vergleiches nach den Scheffé-Tests der Wechselwirkung
- Tab. 4-8: Übersicht statistischer Kennzahlen der Erträge und Witterung der Erntejahre
- Tab. 4-9: Übereinstimmungsmatrix der Methoden der mehrjährigen Ertragskarte am Versuchsschlag „550“
- Tab. 4-10: Korrelationsmatrix der Methoden der mehrjährigen Ertragskarte am Versuchsschlag „550“
- Tab. 4-11: Ergebnisse des Friedman-Tests am Versuchsschlag „550“
- Tab. 4-12: Klassifizierungen der Rasterzellen mit den zehn niedrigsten und den zehn höchsten Durchschnittserträgen des Versuchsschlags „550“
- Tab. 4-13: Übersicht der Ertragsdaten und Witterungsdaten des Versuchsstandortes „Lange Winde“
- Tab. 4-14: Ergebnisse der Klassifizierung der Methoden
- Tab. 4-15: Übereinstimmungsmatrix der Klassifizierungen der untersuchten Methoden am Versuchsschlag „Lange Winde“
- Tab. 4-16: Korrelationsmatrix der Methoden am Versuchsschlag „Lange Winde“
- Tab. 4-17: Ergebnisse des paarweisen Vergleichs am Versuchsschlag „Lange Winde“
- Tab. 4-18: Klassifizierungen der Rasterzellen mit den zehn niedrigsten und den zehn höchsten Durchschnittserträgen des Versuchsschlags „Lange Winde“
- Tab. 4-19: Formulierten Ziele der Autoren
- Tab. 4-20: Betriebsinterne Schlagvergleiche der durchschnittlichen Winterweizenerträge ($t\ ha^{-1}$)
- Tab. 4-21: Klassengrenzen des Ertragsniveaus und der zeitlichen Stabilität für den Vergleich der vorgestellten Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte
- Tab. 4-22: Statistische Kennzahlen des simulierten Schlagbeispiels (in $t\ ha^{-1}$)
- Tab. 4-23: Korrelationsmatrix zwischen den Methoden am simulierten Schlagbeispiel
- Tab. 4-24: Übereinstimmungsmatrix der Methoden am simulierten Schlagbeispiel
- Tab. 4-25: Korrelationsmatrix der Ergebnisse der Bodenbeprobungen am Versuchsschlag „550“
- Tab. 4-26: Korrelationskoeffizienten (r) des *pH-Wertes* und der Grundnährstoffe der Düngungsstrategien der Jahre 2007 und 2011 am Versuchsschlag „550“

- Tab. 4-27: Entwicklung der Variationskoeffizienten der Düngungsstrategien am Versuchsschlag „550“
- Tab. 4-28: Ergebnisse der angepassten pH-Messungen nach dem entwickelten Algorithmus zur Kalibrierung des Verissensors
- Tab. 4-29: Ertragskennzahlen Raps 2011
- Tab. 4-30: Ertragskennzahlen Winterweizen 2012
- Tab. 4-31: Kalkulationsgrundlagen für die Szenario-Berechnungen
- Tab. 4-32: Kostenkalkulation für den Verissensor
- Tab. 4-33: Fehlallokierte Kalkkosten der Verfahren
- Tab. 4-34: Verfügbare Heterogenitätsindikatoren für die Standorte
- Tab. 4-35: Anzahl der Zonen und Probendichten der Heterogenitätsindikatoren
- Tab. 4-36: Überblick der Kalibrierungen von Messungen auf den Praxis schlägen
- Tab. 4-37: Notwendige und empfohlene CaO-Mengen nach Klassifizierung der Heterogenitätsindikatoren (in t ha⁻¹)
- Tab. 4-38: Erwartete Zilerträge unter Berücksichtigung der standörtlichen Gegebenheiten
- Tab. 4-39: Zusammenfassung der Versuchsschläge

Abkürzungsverzeichnis

BG	Bodengruppe
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
CCE	Calcium Carbonate Equivalent
DGPS	Differential Global Positioning System
DWD	Deutscher Wetterdienst
EC	scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens
GPS	Global Positioning System
LS	Least-Square Methode
MAE	Mean Absolute Error
ME	Mean Error
MSE	Mean Square Error
mV	Millivolt
P	Phosphor
PB	Passing-Bablok-Regression
PF	Precision Farming
pH _{Min}	minimaler pH-Wert
pH _{5%}	Grenze des fünften Perzentils der pH-Wert Verteilung
pH _{25%}	Grenze des ersten Quartils der pH-Wert Verteilung
pH _{Median}	Median der pH-Wert Verteilung
pH _{MW}	Mittelwert der pH-Wert Verteilung
pH _{75%}	Grenze des dritten Quartils der pH-Wert Verteilung
pH _{95%}	Grenze des 95. Perzentils der pH-Wert Verteilung
pH _{MAX}	maximaler pH-Wert
pH _s	Standardabweichung des pH-Wertes
RMSE	Root Mean Square Error
r _{CCC}	Konkordanz-Korrelationskoeffizient nach Lin
r _s	Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman
RTK	Real Time Kinematic
s	Standardabweichung
SBS	Standardklassen der Bodenschätzung
TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
TWI	Total Wetness Index
Veris MSP	Veris Mobile Sensor Platform
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
VF	Vorfrucht
VK	Variationskoeffizient
Y (Rang)	verteilungsunabhängige Methodik zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte
Y (Rel)	prozentuale Methodik zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte
Y	Ertrag
Y _{min}	minimaler Ertrag
Y _{MED}	Median des Ertrag
Y _{MW}	Mittelwert des Ertrages
Y _{MAX}	maximaler Ertrag
Y _s	Standardabweichung des Ertrages

1 Einleitung

Mit einer steigenden Weltbevölkerung, dem zunehmenden Fleischbedarf durch veränderte Essgewohnheiten infolge einer Wohlstandssteigerung der Schwellenländer und der stetig wachsenden Nutzung der Bioenergie steigt der zukünftige Bedarf an landwirtschaftlichen Produkten. Aktuelle Studien zeigen, dass die Produktion bis 2050 nahezu verdoppelt werden müsste, um die prognostizierte Nachfrage zu erfüllen (TILMAN et al., 2011: 20260). Neben der Herausforderung die Versorgung mit Lebensmitteln sicher zu stellen, gilt die Landwirtschaft als größter Einflussfaktor auf den Klimawandel und trägt zur Verringerung der Biodiversität sowie zur Degradation von Boden und Frischwasser bei. In einem 4-Punkte-Plan stellen FOLEY et al. (2011: 337ff) die Technologien des Precision Agriculture als ein Instrument heraus, um mit einer Erhöhung der Ressourceneffizienz die Anforderungen der Ernährungsversorgung und der Schonung der Umwelt gleichermaßen zu erfüllen.

Technologien des Precision Agriculture zeichnen sich dadurch aus, dass sie informationsbasierend getrieben sind und zu einer Optimierung der Produktion unter der Berücksichtigung von variablen und unsicheren Umweltgrößen führen sollen (GEBBERS und ADAMCHUK, 2010: 828). Die Notwendigkeit der Entwicklung dieser Technologien ergab sich aus dem Informationsverlust durch die zunehmende Vergrößerung der Bewirtschaftungseinheiten. In Indiana (USA) bewirtschafteten zehn Landwirte in den 1920er Jahren die gleiche Fläche, die ein Landwirt zur Jahrtausendwende allein bewirtschaftete (LOWENBERG-DEBOER und SWINTON, 1997: 371). Damit gingen die Erfahrungen und Informationen über die Flächen, z.B. zur Ertragsvariabilität durch wechselnde Bodenverhältnisse, verloren. Schon im frühen 20. Jahrhundert wurden Untersuchungen zur kleinräumigen Variabilität vorgenommen. GOY (1928: 318) zeigte auf Schlagebene, dass „bei Schlägen, wo guter und schlechter Pflanzenbestand war, auf letzteren Stellen [...] auch der chemisch ermittelte Säurezustand stets schlechter“ war. SMITH (1938) untersuchte die kleinräumige Variabilität des Ertrages und erstellte als einer der Ersten eine Ertragskarte. KEEN und HAINES (1925) beobachteten durch Widerstandsmessungen am Pflug wechselnde Bodenarten innerhalb eines Schrages und YODEN und MEHLICH (1937) führten Untersuchungen zur Heterogenität des pH-Wertes auf unterschiedlichen Skalenebenen durch. In einer Studie im Rahmen des *Preagro*-Projekts konnte die GPS-gestützte Bodenbeprobung als eine der maßgeblichen Precision-Farming (PF)-Technologien identifiziert werden, die von den Studienteilnehmern stark akzeptiert wird (KLÖPFER et al., 2001: 530). Eine bewährte Methode des Ackerbaus rückt durch die Nutzung von GPS-Technologie und Elektronikkomponenten damit wieder näher in das Bewusstsein der Landwirte. Möglich wird dies, weil für den Landwirt die Informationen über die Nährstoffverteilungen und die damit verbundenen Entscheidungsregeln bekannt sind. Die gezielte variable Ausbringung der Düngemittel nach Applikationskarten ist technisch umgesetzt. SCHNEIDER (2011: 152) und DOBBERS (2002: 1) schlussfolgern aus ihren Untersuchungen, dass die z.T. fehlenden pflanzenbaulichen Entscheidungsregeln oftmals der limitierende Faktor für die Umsetzung von weiteren neuen PF-Technologien sind. Sind die Entscheidungsregeln bekannt, erlauben es die neuen Technologien, zur richtigen Zeit die richtige Menge am richtigen Ort auszubringen (GEBBERS und ADAMCHUK, 2010: 828).

1.1 Problemstellung

Mit der Einführung von PF-Technologien wird das Ziel verfolgt, pflanzenbauliche Maßnahmen teilflächenspezifisch anzuwenden. Dafür ist eine hohe Informationsdichte notwendig, um eine bedarfsgerechte Bewirtschaftung zu ermöglichen. Eine Düngung mit einer einheitlichen Gabe führt zwangsläufig zu Zonen mit einer Über- oder Unterdüngung auf Schlägen, was negative ökologische und ökonomische Auswirkungen zur Folge hat. PIERCE und NOWAK (2008: 1) analysieren als ausschlaggebende

Faktoren, die bei der Entwicklung von PF-Technologien berücksichtigt werden müssen, die räumliche Stetigkeit und die zeitliche Varianz der Variablen. Als Beispiele zählen sie die Kalkung und die Grunddüngung mit einer hohen räumlichen Stetigkeit und einer geringen zeitlichen Varianz auf, während das Auftreten von Schadinsekten mit einer hohen zeitlichen Varianz und einer geringen räumlichen Stetigkeit verbunden ist. Für Variablen, die zur ersten Gruppe gehören, sollte die Entwicklung einfacher zu realisieren sein, da zwischen der Bonitur des Merkmals und der Einleitung geeigneter Bewirtschaftungsmaßnahmen ein längerer Zeitraum möglich ist. Die Umsetzung von PF-Technologien mit einer hohen zeitlichen Varianz erfordert einen Online-Ansatz, der während der Erfassung des Merkmals die entsprechende Behandlungsmaßnahme steuert.

Obwohl es technologische, agronomische und sozio-ökonomische Grenzen für die Entwicklung, Praktikabilität und die Einführung der PF-Technologien gibt, sieht ROBERT (2002: 148) die Entwicklung von Nährstoffsensoren als einen wichtigen Meilenstein des Precision Farming. Fast zeitgleich stellt ADAMCHUK (2000) eine Sensorplattform vor, die neben der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens auch den pH-Wert mittels pH-sensitiver Elektroden während der Überfahrt misst. Der Sensor bietet den Vorteil, den pH-Wert innerhalb weniger Sekunden in einer vielfach höheren Beprobungsdichte zu bestimmen, als unter herkömmlichen Bodenbeprobungsverfahren ökonomisch vertretbar wäre. Hinsichtlich ihres Messprinzips unterscheiden sich die Sensor- und Labormethode dahingehend grundlegend, dass bei der Labormethodik ein Extraktionsmittel eingesetzt wird. Dies sorgt dafür, dass die Differenz der Ergebnisse zwischen beiden Methoden mit sinkendem pH-Wert zunimmt und eine Kalibrierung der Sensorwerte notwendig wird (u.a. ADAMCHUK, 2000; BORCHERT et al., 2010; SCHIRRMANN et al., 2011). Die Kenntnis des durch die Labormethodik bestimmten pH-Wertes ist jedoch notwendig, da die Entscheidungsregeln der Kalkdüngung darauf beruhen. In Untersuchungen von BIANCHINI und MALLARINO (2002), CONYERS und DAVEY (1990), SEEBOLDT (1983) sowie WELLS und CASE (1995) konnte für den pH-Wert eine hohe kleinräumige Variabilität festgestellt werden. Die Entwicklung eines pH-Sensors, der hochauflösende pH-Wert Karten als Ergebnis bereitstellt, wird deswegen als nutzbringendes Instrument im Precision Farming angesehen. Dies zeigt auch die hohe Anzahl an Studien (> 20), die zur Ermittlung der kleinräumigen Variabilität des pH-Wertes durchgeführt wurden und auf einem baugleichen pH-Sensor von ADAMCHUK (2000) basieren. Seit dem Jahr 2003 wird der pH-Sensor durch die Firma VERIS-TECHNOLOGIES unter der Sensorplattform „Veris MSP – pH-Manager“ vertrieben. In der vorliegenden Arbeit bezieht sich deshalb der Begriff „pH-Sensor“ auf den pH-Sensor der o.g. Sensorplattform.

Die hochauflösenden pH-Wert Karten bieten dem Landwirt eine deutlich höhere Informationsdichte. Damit wird es ihm möglich, Nährstoffumverteilungen bei der Kalkdüngung vorzunehmen. Die Effekte der Nährstoffumverteilung auf den Ertrag konnten bisher nicht abgeschätzt werden, da keine ausreichenden Versuche mit hohen Beprobungsdichten nach der herkömmlichen Labormethodik durchgeführt wurden. Mit einem Anteil von ca. 9 % an den Kosten der mineralischen Düngung nehmen die Kosten für die Kalkung nur eine untergeordnete Rolle ein (BMELV, 2012: 163). Die Ertrags-pH-Beziehungen sind jedoch durch eine Vielzahl von Versuchen hinreichend bekannt. Mit dem Veris-sensor könnte die Lücke der fehlenden hochauflösenden Beprobungsdichte geschlossen werden, sofern er hinsichtlich der Messgenauigkeit eine realitätsnahe Abbildung der räumlichen Verteilung des pH-Wertes geben kann. Das System der Kalkdüngung unterscheidet sich von dem der Stickstoffdüngung sehr deutlich. Während des Pflanzenwachstums wird ein Teil des Calciums als Nährstoff von den Pflanzen aufgenommen, der andere, überwiegende Teil beeinflusst den Säuregrad im Wurzelbereich. Dabei werden versauernd wirkende Effekte vermieden, die eine negative Wirkung auf das Pflanzenwachstum ausüben können (SCHILLING, 2000: 378). Je nach pH-Sensibilität reagieren die

Fruchtarten unterschiedlich stark auf die Kalkdüngung (SCHILLING, 2000: 384). Die Ermittlung des optimalen pH-Bereichs für unterschiedliche Bodengruppen wurde in umfangreichen Kalksteigerungsversuchen im Zeitraum von 1965 bis 1995 untersucht (KERSCHBERGER und RICHTER, 1982; KERSCHBERGER, 1996). Viele Untersuchungen, die Ertragswirkungen infolge suboptimaler pH-Werte beobachten, führen jedoch keine ökonomischen Bewertungen der gefundenen Ergebnisse durch (u.a. BENKENSTEIN et al., 2000; CRAWLEY et al., 2005; MERBACH et al., 1999). Dies ist aber von hohem Interesse, weil der Düngezeitraum der Kalkung bis zu sechs Jahre umfassen kann. Ertragseffekte sind deshalb auch für die Folgefrüchte zu erwarten.

Ergebnisse von Bodenuntersuchungen werden als Entscheidungshilfe für die Düngung mit den Grundnährstoffen Phosphor, Kalium, Magnesium und Kalk genutzt. Während im angloamerikanischen Raum überwiegend Punktbeprobungen durchgeführt werden (ROBERT, 2002: 146; ZHANG et al., 2002: 124), dominieren unter den hiesigen Bedingungen Rasterbeprobungen im 3- bis 5-ha-Raster (FÖLSCH und OTTER-NACKE, 2010: 70). Dazu werden von repräsentativen Teilflächen mit einer Größe zwischen einem und zehn Hektar Mischproben entnommen und analysiert. Das Ziel der Einteilung nach „repräsentativen Teilflächen“ ist eine möglichst homogene Nährstoffverteilung innerhalb der Teilflächen. Dazu werden von der VDLUFA (2000a: 6) Ergebnisse der Bodenschätzung, Reliefdaten und Ertragskarten beispielhaft als Heterogenitätsindikatoren empfohlen. Ertragskarten, die als jährlich wiederkehrende Messgröße den Erfolg der ackerbaulichen Maßnahmen widerspiegeln, unterliegen durch den Einfluss der Witterung starken Schwankungen. Diese interjährlichen Effekte müssen von den intrajährlichen räumlichen Ausprägungen der Ertragskarten isoliert werden, um Hinweise auf eine zeitliche Stabilität von Hoch- und Niedrigertragszonen zu gewinnen. Das Ergebnis der Verrechnung mehrerer Ertragskarten wird als mehrjährige Ertragskarte bezeichnet. Auf diesem Forschungsgebiet leisteten LARSCHIED et al. (1997), BLACKMORE (2000) und BLACKMORE et al. (2003) wichtige Beiträge und stellten Methoden vor, die weiteren Autoren als Grundlage ihrer Untersuchungen dienten.

Der Einsatz des Verissensors ermöglicht eine deutlich höhere Beprobungsdichte als bisher mit der konventionellen Methodik möglich war. Die gesteigerte Informationsdichte kann dazu verwendet werden, um belastbare Aussagen zur kleinräumigen Variabilität des pH-Werts zu generieren. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, das Verfahren der VDLUFA (2000a: 6), eine Abgrenzung von Bodenzonen anhand von Heterogenitätsindikatoren, auf seine Eignung zu prüfen. Die On-The-Go Erfassung des pH-Wertes mit dem Verissensor unterscheidet sich deutlich von der Labormethodik. Eine Analyse ermöglicht Differenzen beider Methoden zu erfassen und zu beurteilen, um zu prüfen, ob die Entscheidungsregeln der Kalkdüngung, die auf der Labormethodik beruhen, auch für die pH-Erfassung mittels Verissensor angewandt werden können.

1.2 Zielsetzung

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, die hochaufgelösten Ergebnisse der Bodenbeprobungen des pH-Sensors mit Ergebnissen von Bodenbeprobungen nach herkömmlichen Beprobungsverfahren unter pflanzenbaulichen und ökonomischen Aspekten zu vergleichen. Der Vergleich der verschiedenen Verfahren zur Bodenbeprobung beruht auf unterschiedlichen Beprobungsdichten. Bei den herkömmlichen Verfahren geht dabei zusätzlich ein Einfluss von der Art der Einteilung der Probenahmeflächen aus, die starre und intelligente Raster unterscheiden. Intelligente Raster nutzen zur Flächenabgrenzung Heterogenitätsindikatoren, die durch eine bessere Beschreibung des Bodens zu homogenen Nährstoffzonen führen sollen. Hierzu erfolgt eine Bewertung der Eignung der Heterogenitätsindikatoren als Grundlage der Rastereinteilung. Als Einflussfaktoren des ökonomischen Vergleichs werden die Verfahrenskosten, Nährstoffumverteilungen, Nährstoffwechselwirkungen und die Ertragswirkungen berücksichtigt.

Zusammenfassend werden die drei Ziele der Arbeit formuliert:

- 1.1 Bewertung der Messgenauigkeiten des pH-Wertes zwischen den Ergebnissen des pH-Sensors und der herkömmlichen Labormethodik
- 1.2 Bewertung der Wiederholgenauigkeiten des pH-Wertes innerhalb der beiden Methoden
- 2 Ökonomischer Vergleich von hochaufgelösten Bodenbeprobungen gegenüber herkömmlichen Vorgehensweisen mit den damit verbundenen Effekten auf die Verfahrenskosten, Nährstoffumverteilungen, Nährstoffwechselwirkungen und Erträge
- 3 Bewertung und Eignung von Heterogenitätsindikatoren als Grundlage der Rastereinteilungen der herkömmlichen Bodenbeprobungen

2 Stand der Forschung

2.1 Der pH-Wert als ertragslimitierender Faktor

In der Pflanzenernährung ist der pH-Wert für die Kulturarten kein Nährstoff im klassischen Sinne, sondern stellt vielmehr als Maß den Säuregrad der Umgebung der Wurzeln im Boden dar. Für die Kulturarten besteht eine starke Abhängigkeit zwischen dem pH-Wert und der Verfügbarkeit der Nährstoffe. Eine ertragslimitierende Wirkung durch suboptimale pH-Werte besteht einerseits durch Nährstoffmangel (z.B. Festlegung von Phosphat und Molybdat, SCHILLING, 2000: 269) oder Vergiftungen (z.B. Aluminiumfreisetzung, SCHILLING, 2000: 269) bzw. andererseits durch unterschiedliche Ansprüche der Kulturarten an einen optimalen pH-Wert (SCHILLING, 2000: 163ff).

Unter den humiden Bedingungen in Mitteleuropa sind die Böden einer natürlichen sowie einer anthropogenen Bodenversauerung ausgesetzt (SOIL ATLAS OF EUROPE, 2005: 126). Der Prozess kann als eine langsame Absenkung des pH-Wertes beschrieben werden. Auf der Grundlage regelmäßiger Bodenuntersuchungen wird der pH-Wert bestimmt und gegebenenfalls durch eine Kalkung erhöht.

Eine qualitative Übersicht der Kalkansprüche der Kulturarten wird in Tab. 2-1 dargestellt.

Tab. 2-1: Fruchtarten nach ihrem Kalkanspruch (übernommen und ergänzt nach SCHILLING, 2000: 384)

vorwiegend kalkanspruchsvoll	vorwiegend kalkanspruchslos
Winter- und Sommergerste	Winter- und Sommerroggen
Winter- und Sommerraps	Kartoffel
Futter- und Zuckerrübe	Hafer
Mais	Winterweizen ¹
Ackerbohne	
Luzerne, Rotklee, Senf	

¹KERSCHBERGER UND MARKS (2007: 69)

Ein Überblick zur Quantifizierung der Ertragswirkungen von suboptimalen pH-Werten wird in den folgenden Studien gegeben, dessen Umfang jedoch keine Vollständigkeit beansprucht. Eine tabellarische und grafische Zusammenfassung der Studien ist in den Anhängen A2-1-1 bis A2-1-4 gegeben.

Auf dem „Statischen Nährstoffmangelversuch“ in Thyrow (Brandenburg, Versuchsbeginn: 1937) konnten bei der Unterlassung einer Kalkung (Kalk als Prüffaktor, Variante 5a) die stärksten Ertragsrückgänge bei der Sommergerste beobachtet werden. Für den Versuchszeitraum von 40 bis 60 Jahren nach der letzten Kalkungsperiode lagen die Erträge im Durchschnitt auf einem Niveau von ca. 20 % im Vergleich zur gekalkten Variante. In drei Jahren konnte ein Totalausfall verzeichnet werden. Silomais und Kartoffeln reagierten auf die unterlassene Kalkung weniger stark und verzeichneten durchschnittliche Erträge von 66 % und 78 % gegenüber den gekalkten Varianten. Alle Fruchtarten reagierten auf eine Kalkung mit Ertragssteigerungen, die unter den standörtlichen Bedingungen (schwach schluffiger Sand, Bodenzahl 24) erst im zweiten Anbaujahr nach der Kalkung den Ertrag der gekalkten Vergleichsvariante erzielten. Eine Kompensation der Ertragsrückgänge durch den suboptimalen pH-Wert konnte mit anderen Nährstoffen nicht bewirkt werden (BENKENSTEIN et al., 2000: 523ff).

Im langjährigen Dauerdüngungsversuch „Feld A“ auf dem Julius-Kühn-Feld (Halle, Sachsen-Anhalt, s. Kap. 3.1.1) wird seit dem Jahr 1949 der Einfluss der Kalkung untersucht. Trotz der langen Versuchsdauer konnte keine eindeutige Ertragswirkung beobachtet werden. Die Fruchtarten Sommergerste und Kartoffeln zeigen keine Ertragswirkungen, während bei Ackerbohnen durch die Unterlassung der Kalkung Mindererträge von bis zu 5 % im langjährigen Ertragsdurchschnitt auftreten. Eine zu hohe

Kalkgabe führt bei Zuckerrüben zu Mindererträgen um bis zu 10 % gegenüber der optimalen Variante (MERBACH et al., 1999: 49ff).

BOLTON et al. (1976: 23) zeigen anhand eines Dauerversuchs (Woodslee, Ontario, Kanada, Versuchsbeginn: 1946), dass eine Kalkung bei Körnermais unter verschiedenen Fruchtfolgen zu höheren Erträgen führt. Die langjährigen Mehrerträge betragen bis zu $0,94 \text{ t ha}^{-1}$ (26,4 %) bei einem mittleren Ertrag in der ungedüngten Variante von $3,56 \text{ t ha}^{-1}$.

Der längste Dauerversuch zum Einfluss der Kalkung und Mineraldüngung auf Dauergrünland wurde im Jahr 1856 in Rothamsted mit der Bezeichnung „Park Grass“ (Großbritannien) angelegt. Während des Versuchszeitraums konnte eine enge Beziehung zwischen der Pflanzenartenvielfalt und dem pH-Wert beobachtet werden. So wurden auf Parzellen mit sehr geringen pH-Werten z.T. nur drei Arten gezählt, während auf gekalkten Varianten bis zu 45 Arten standen. Der Ertrag des Dauergrünlands korreliert mit dem pH-Wert und der Anzahl an Arten. Im stark sauren pH-Wert-Bereich besteht keine signifikante Beziehung zwischen der Anzahl an Arten und dem Biomasseertrag. Je höher der pH-Wert-Bereich, desto negativer wird die Beziehung zwischen der Anzahl an Arten und dem Ertrag der Biomasse: Ein hoher Ertrag geht mit einer sinkenden Anzahl an Arten einher (CRAWLEY et al., 2005: 182ff).

FARINA et al. (2000: 648ff) untersuchten in einem Langzeitversuch (Versuchsbeginn: 1982, Südafrika) unter stark versauerten pH-Werten im Unterboden den Einfluss einer zusätzlichen Tiefenkalkung zur konventionellen Oberflächenkalkung. Alle untersuchten Verfahren führten zu langfristigen Ertragssteigerungen von bis zu 25 % bei Silo- und Körnermais, die jedoch nicht bei allen Verfahren die Mehrkosten deckten und damit keine ökonomischen Vorteile erzielten. Die hohen Mehrkosten wurden v.a. durch einen hohen Anteil der Transportkosten für die Kalkbeschaffung unter südafrikanischen Bedingungen verursacht. In Jahren mit einer hohen Trockenheit während der Blüte führten die Verfahren der Tiefenkalkungen zu deutlich höheren relativen Ertragssteigerungen als unter normalen Witterungsbedingungen.

Auf einem stark versauerten chinesischen Standort (Lanxi County, Provinz Zhejiang, China, Versuchsbeginn: 1983) beobachteten CIFU et al. (2004: 101ff) nach einer einmaligen Kalkung sehr unterschiedliche Ertragswirkungen. Wintergerste zeigte mit einem Mehrertrag von $2,10 \text{ t ha}^{-1}$ (+ 467 %) in der Variante mit der höchsten Kalkaufwandmenge die stärkste Ertragswirkung. Neben Weizen mit deutlichen Ertragssteigerungen von 95 % (+ $1,47 \text{ t ha}^{-1}$) bzw. 227 % (+ $1,55 \text{ t ha}^{-1}$) konnten auch für Raps (bis zu 38 %) und Körnermais (14 %) höhere Erträge als in den ungekalkten Varianten beobachtet werden. Als ertragslimitierender Faktor wurde die Aluminiumfreisetzung infolge des geringen pH-Wertes festgestellt.

LIU et al. (2004: 288ff) untersuchen vier Schläge (Australien), auf denen Wachstumsstörungen infolge zu geringer pH-Werte beobachtet wurden. Über alle Standorte zeigte die Wintergerste mit einem zunehmenden pH-Wert die stärksten Ertragswirkungen mit einem Mehrertrag von bis zu $4,0 \text{ t ha}^{-1}$. Für Weizen konnte mit einem zunehmenden pH-Wert ein Mehrertrag von bis zu $3,0 \text{ t ha}^{-1}$ erzielt werden, während für Triticale die geringsten Ertragswirkungen mit Ertragszuwächsen von $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ beobachtet wurden. Für alle Kulturen wurden im dritten Versuchsjahr die höchsten Erträge beobachtet, die sich ab einem pH-Wert von $> 4,5$ einstellten.

Die Auswertung einer fünfjährigen Studie zum Einfluss des pH-Wertes auf den Ertrag von Körnererbsen, Linsen, Winterweizen und Sommergerste auf 39 Schlägen (Idaho, USA, Versuchsbeginn: 1981) zeigt, dass Leguminosen bereits ab einem deutlich höheren pH-Wert mit Mindererträgen reagieren als die Getreidearten. Für Körnererbsen liegt die Toleranzschwelle bei einem pH-Wert von 5,52, während für Winterweizen die Toleranzschwellen sortenabhängig zwischen 5,19 und 5,37 liegen (MAHLER und MCDOLE, 1987: 751ff).

Auf zweijährigen Feldversuchen in Iowa (USA, 2009 - 2010) untersuchten PAGANI und MALLARINO (2012: 1877ff) den Einfluss von drei Kalkdüngern auf den Ertrag von Sojabohnen und Körnermais sowie die Entwicklung des pH-Wertes im Versuchszeitraum. Eine schnellere Erhöhung des mittleren pH-Wertes konnte durch die Verwendung von reinem Calciumcarbonat ($990 \text{ g CCE kg}^{-1}$ Ware) erzielt werden. Kalkdünger aus Kalkstein mit Gehalten von $690 \text{ g CCE kg}^{-1}$ und $890 \text{ g CCE kg}^{-1}$ verursachten eine langsamere Erhöhung. Auch die pH_{MAX} differenzierten sich nach den Kalkdüngern in der Reihenfolge $\text{pH}_{990\text{CCE}} > \text{pH}_{890\text{CCE}} > \text{pH}_{690\text{CCE}}$. Signifikante Ertragswirkungen von 10 bis 12 % bei Sojabohnen und 15 bis 24 % bei Körnermais konnten unabhängig vom Kalkdünger auf zwei von vier Schlägen festgestellt werden, auf den verbleibenden zwei Versuchsschlägen zeigte die Kalkdüngung keine signifikante Ertragswirkung.

BIANCHINI und MALLARINO (2002: 1355ff) untersuchten auf zwei Versuchsschlägen den Einfluss einer teilflächenspezifischen Kalkdüngung gegenüber einer einheitlichen Düngegabe auf den Ertrag von Sojabohnen und Körnermais in Iowa (USA). Bei beiden Kulturarten stellten sich in dem dreijährigen Versuchen mehrheitlich keine signifikanten Ertragsunterschiede zwischen den unterschiedlichen Verfahren ein, geringe Mehrerträge von 2 % konnten bei Körnermais im Vergleich zur Unterlassung der Kalkung beobachtet werden. Als Ursache hierfür kommt v.a. ein standortbedingt zunehmender pH-Gradient mit steigender Tiefe in Betracht.

Untersuchungen von JOHNSON und RICHARD JR. (2010: 464ff) zum Einfluss einer einheitlichen und teilflächenspezifischen Kalkung auf den Ertrag von Zuckerrohr führten nur auf einem von drei Standorten (Louisiana, USA) zu Mehrerträgen von 17 %. Auf den beiden anderen Standorten konnte keine signifikante Ertragswirkung beobachtet werden.

In einem dreijährigen Gefäßversuch zeigt MIČA (1986: 342ff) an Kartoffeln, dass die Kalkdüngung zu Ertragsteigerungen von bis zu 18 % führt. Außerdem wurden ein höherer Stärkegehalt, ein höherer Anteil an reduzierenden Zuckern sowie ein niedrigerer Trockensubstanzgehalt beobachtet.

Weitere Ergebnisse von Untersuchungen zum Einfluss des pH-Wertes oder einer Kalkung auf den Ertrag von verschiedenen Kulturarten von REX (2000: 212ff) mit Mehrerträgen zwischen 6 bis 9 %, WEISZ et al. (2003: 323), KERSCHBERGER (1993: 24ff), WANG et al. (2003: 39ff), ZORN (2001) sowie ZORN et al. (2007) bestätigen die positive Ertragswirkung der Kalkung.

Nebeneffekte einer Kalkung

Mit der Regulierung des pH-Wertes durch die Kalkung gehen Nebeneffekte einher. Diese werden im Folgenden stichpunktartig zusammengefasst:

- Die Kalkung erhöht die Phosphatverfügbarkeit im Boden (JOHNSON und RICHARD JR. (2010: 471), KERSCHBERGER (1987: 319), REX (2000: 215) und SEEBOLDT (1983: 34)). KERSCHBERGER (1987: 319) quantifizierte diesen Effekt mit einer Faustregel wie folgt: Mit der Erhöhung des pH-Wertes um eine pH-Einheit steigt der pflanzenverfügbare Phosphatgehalt um $1 \text{ mg P je } 100 \text{ g Boden}$. Diese Faustregel gilt für den sauren pH-Bereich bis zu einem pH-Wert von 6,8.
- SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2008: 134) stellen unter hohen pH-Werten ($\text{pH} > 7,1$) eine sinkende P-Konzentration fest.
- JOHNSON und RICHARD JR. (2010: 469ff) stellten für Zuckerrohr erhöhte Zuckergehalte von bis zu 16 % als Folge der Kalkung fest.
- FUENTES et al. (2006: 130), ZELLES et al. (1990: 79ff) und BEZDICEK et al. (2003: 58ff) stellten fest, dass nach einer Kalkung die mikrobielle Aktivität und Biomasse zunimmt. Als ursächlich hierfür wird eine erhöhte Aktivität der Enzyme Dehydrogenase und Phosphatase angenommen, die für die Aktivität der Mikroorganismen entscheidend sind (BEZDICEK et al. (2003:

58ff). Grundsätzlich liegt das Optimum der Bodenmikroorganismen im neutralen pH-Wert-Bereich (RÖMBKE, 1997: 45).

- Mit einem abnehmenden pH-Wert beobachteten BROWN et al. (2008: 638), CIFU et al. (2004: 104), LIU et al. (2004: 290) sowie MOIR und MOOT (2010: 192ff) einen Anstieg der Aluminiumkonzentration, der zu Ertragsdepressionen führen kann. In den Studien führte die Kalkung zu einer Reduktion der Aluminiumkonzentration.
- KERSCHBERGER und MARKS (2007: 56) berichteten von einer verminderten Tonbildung unter sauren Bodenbedingungen, da Calciumionen für die Stabilität des Bodengefüges verantwortlich sind und zur Tragfähigkeit des Bodens beitragen.

2.2 Stand der Kalkdüngung – Entscheidungsregeln

Gesetzliche Grundlage

Mit dem Beschluss der EU-NITRATRICHTLINIE von 1991 wird das Ziel verfolgt, den Eintrag von gewässer-
verunreinigenden Stoffen wie Nitrat zu mindern und vorzubeugen. Die Umsetzung der Richtlinie erfolgt in Deutschland nach Bundesrecht mit der DÜNGEVERORDNUNG (2017), in der die Grundsätze der „guten fachlichen Praxis beim Düngen“ auf landwirtschaftlich genutzten Flächen definiert werden. Die Verordnung gibt vor, dass vor der Anwendung von stickstoff- oder phosphathaltigen Düngemitteln die im Boden verfügbaren Nährstoffgehalte ermittelt werden müssen. Dabei können für Stickstoff repräsentative Bodenproben gezogen oder Empfehlungen von zugelassenen Beratungsstellen übernommen werden. Für Phosphat müssen, ab einem Hektar Schlaggröße, Bodenproben gezogen und in einem anerkannten Labor untersucht werden. Für Kalium, Magnesium und den pH-Wert gilt zwar keine gesetzliche Pflicht zur Untersuchung, deren Bestimmung wird jedoch empfohlen (VON WULFFEN et al., 2007: 12). Die Methoden der Nährstoffanalysen sind im VDLUFA-Methodenbuch-Band I festgelegt und beschrieben. Für die Bestimmung des pH-Wertes gilt die Methode A5.1.1.

Technik der Bodenentnahme

In KAPE et al. (2009: 5ff) ist für Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt die Entnahme für Bodenproben zur Bodenuntersuchung beschrieben. Neben Zeitpunkt, Arbeitsmaterialien, Vorschriften zur Dokumentation und Empfehlungen der zu untersuchenden Nährstoffe wird die Technik der Bodenentnahme näher erläutert. Dabei sollten die Beprobungsflächen eine Größe von drei bis fünf ha umfassen und hinsichtlich der Bewirtschaftung und Bodenmerkmalen (Bodenart, Humus) homogen sein. Liegen derartige Informationen für den Beprobungsschlag nicht vor, können auch Karten der scheinbaren elektrischen Bodenleitfähigkeit, Ergebnisse der Bodenschätzung oder Luftbilder als Klassifizierungsmerkmale dienen. Die Begehungslinie sollte im Z- bzw. W-Muster oder diagonal über der Beprobungsfläche liegen. Für Ackerland müssen 20 bis 30 Einstiche im gleichen Abstand aus der Krumentiefe von 0-20 bzw. 0-30 cm entnommen werden. Probeentnahmen können auch punktförmig erfolgen, sie sollen dann aber nur aus kreisförmigen Stellen mit weniger als fünf Meter Durchmesser entnommen werden und nur für Flächen mit weniger als einem Hektar repräsentativ sein. Zur besseren Vergleichbarkeit von Ergebnissen späterer Bodenuntersuchungen empfehlen die Autoren den Einsatz von GPS-Technik, um die Begehungslinien zu dokumentieren und wiederholt zu beproben. Weiterhin sollten die Zeitpunkte innerhalb der Fruchtfolge identisch sein. Den Autoren erscheint „von ausschlaggebender Bedeutung [...] unerlässlich, dass die einzelne Bodenprobe die beprobte Fläche in ihrer Zusammensetzung repräsentiert“ (KAPE et al., 2009: 7). Zur geore-

ferenzierten Bodenprobennahme wurde seitens der VDLUFA ein Standpunkt erarbeitet, der alle wichtigen Maßnahmen von KAPE et al. (2009) beinhaltet (VDLUFA, 2000a).

Entscheidungsregeln und Ausbringung der Kalkdüngung

Die Entscheidungsregeln der Kalkdüngung nach den länderspezifischen Empfehlungen für Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt sind in VON WULFFEN et al. (2007: 11ff) enthalten. Diese beruhen auf langjährigen und mehrortigen Versuchen im Zeitraum von 1965 bis 1990 im früheren Institut für Pflanzenernährung in Jena/Zwätzen (KERSCHBERGER, 2012: 20). Neben dem ermittelten pH-Wert aus der Bodenuntersuchung beeinflussen der Humusgehalt, die Bodenart und die Nutzungsart (GL/AL) die Höhe der Kalkgabe (VON WULFFEN et al., 2007: 11ff). Die ausführlichen Düngungsregeln sind im Anhang A2-2 angefügt. Die teilflächenspezifische Ausbringung von Kalk stellt keine besonderen Ansprüche an die Düngetechnik.

2.3 Ergebnisse von hochaufgelösten Bodenbeprobungen nach der herkömmlichen Methodik

Kleinräumige Untersuchungen zur Erfassung der Nährstoffvariabilität und Nährstoffwechselwirkungen sind mit hohen Beprobungskosten verbunden, weshalb nur wenige Versuche auf Schlagebene durchgeführt wurden. Problematisch erscheint zudem, dass verallgemeinerbare Aussagen zu den Wechselwirkungen der Nährstoffe nicht möglich sind. Die Gründe sind sehr vielschichtig, u.a. zählen das Klima, Relief, komplexe geologische und pedologische Prozesse, Bewirtschaftungsverfahren, der Einsatz organischer Dünger, Fruchtfolgeeffekte und die Bodengenese zu den wichtigsten Einflussfaktoren (CAHN et al., 1994: 1240ff; CAMBARDELLA et al., 1994: 1501ff; MALLARINO, 1996: 1473ff; PONITKA und PÖRNECK, 2006: 17).

GEBBERS (2008: 53ff) kommt bei seinen Untersuchungen von zwei Schlägen zu dem Ergebnis, dass für einen Schlag geringe Korrelationen ($r_s < 0,46$) zwischen den untersuchten Bodenparametern (pH-Wert, P, K, Mg, Ton-, C_{ORG} -gehalt) bestehen, während für den benachbarten Schlag starke Korrelationen mit $r_s < 0,65$ gefunden werden können. Neben der Stärke der Zusammenhänge änderten sich auch die Beziehungen zwischen den Parametern, z.B. für die Korrelation zwischen dem pH-Wert und dem Tongehalt mit $r_s = 0,46$ (Schlag 1) und $r_s = -0,20$ (Schlag 2).

PONITKA und PÖRNECK (2006: 17ff) führten auf einem Schlag (34,1 ha) eine Bodenbeprobung mit einer Probendichte von 4 n ha^{-1} durch. Für den pH-Wert stellen sie nur eine geringe Variabilität fest (VK = 4 %), wohingegen für Phosphor (VK = 48 %) und Kalium (VK = 51 %) eine deutliche Variabilität zu beobachten war. Magnesium weist mit einem VK von 22 % eine mittlere Variabilität auf. Zwischen den untersuchten Parametern konnten keine Verbindung zur scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens gefunden werden. Als Ursache wird eine besonders hohe Intensität der mineralischen und organischen Düngung angeführt, die zu einer Nährstoffakkumulation führt. Deutliche Beziehungen zwischen den Nährstoffen konnten für P und K ($r = 0,86$), P und Mg sowie P und C_{gesamt} ($r = 0,78$) und P und N_{gesamt} ($r = 0,70$) sowie C_{gesamt} und N_{gesamt} ($r = 0,86$) festgestellt werden. Eine geringe Korrelation bestand zwischen dem pH-Wert und P mit einem $r = 0,40$.

MORAL et al. (2010: 339) beobachteten einen Zusammenhang zwischen dem pH-Wert und der Bodentextur. Zwischen Grobsand und dem pH-Wert konnte ein negativer Korrelationskoeffizient mit $r = -0,62$ festgestellt werden. Dahingegen lag der Korrelationskoeffizient zwischen dem Tonanteil und dem pH-Wert bei $r = 0,66$.

2.3.1 Kleinräumige Variabilität des pH-Wertes

Auf verschiedenen Skalenebenen kann für den pH-Wert eine hohe Varianz beobachtet werden. In kleinräumigen Untersuchungen entlang eines Transekts mit Probenabständen von sechs Metern wurde mehrfach eine pH-Wert Differenzen von bis zu zwei pH-Einheiten zwischen benachbarten Proben gemessen (BIANCHINI und MALLARINO, 2002: 1361). WELLS und CASE (1995: 1) maßen innerhalb eines Transektes von 3,66 Meter eine Differenz von zwei pH-Einheiten. Von den 99 gezogenen Bodenproben entsprach kein Einzelergebnis einer Bodenprobe dem Mittelwert aller Bodenproben. Auf Grünland stellen CONYERS und DAVEY (1990: 697ff) fest, dass innerhalb eines Quadratmeters 30 bis 100 % der Variabilität des pH-Wertes im Vergleich zum Gesamtschlag auftraten. Die höchste Variabilität für den pH-Wert maßen sie im 0,05 x 0,05 m-Raster. Bei Wurzeluntersuchungen an Rapssämlingen (MURANYI et al., 1994: 63) und an Fichtensämlingen (MARTH, 1995: 122) konnten, ausgehend von der Wurzeloberfläche, innerhalb weniger Millimeter pH-Gradienten von bis zu 1,9 pH-Einheiten beobachtet werden.

Eine herausragende Arbeit zur kleinräumigen Variabilität des pH-Wertes stammt von SEEBOLDT (1983). SEEBOLDT (1983: 22ff) beobachtete auf fünf Praxisschlägen eine deutlich geringere räumliche Variabilität des pH-Wertes mit Variationskoeffizienten von 7 bis 11 % als für die Grundnährstoffe Phosphor, Kalium und Magnesium mit Variationskoeffizienten zwischen 20 bis 40 %. Die Spanne der pH-Werte auf den Schlägen lag dabei zwischen 2,3 und 3,1 pH-Einheiten. Auf 50 m²-Parzellen konnten bei einer Probendichte von 2,4 n m⁻² Differenzen von bis zu 1,1 pH-Einheiten festgestellt werden. Innerhalb dieser Parzellen wurden Bodenwürfel mit einer Kantenlänge von 30 cm entnommen und in 216 Einzelproben zerlegt (je Probe wurde ein Volumen mit 5 cm Kantenlänge verwendet). Die horizontale Variabilität ist dabei mit Variationskoeffizienten bis zu 7,4 % erheblich. Eine vertikale Variabilität konnte ebenfalls in Form eines zunehmenden pH-Gradienten mit steigender Tiefe beobachtet werden, der auf sandigen Standorten am stärksten ausgeprägt war.

Eine mittlere Variabilität auf Schlagebene (8 bis 14 % VK) stellten WOLLENHAUPT et al. (1997: 22) für den pH-Wert anhand von *Range*-Werten¹ zwischen 20 bis 132 m fest. Auf elf Versuchsschlägen kommen BROUDER et al. (2005: 432ff) zu dem Ergebnis, dass eine Punktbeprobung im 1-ha-Raster optimal ist. Ein größeres Raster führt zu hohen Informationsverlusten und mit einem höher aufgelösten Raster steigen die Beprobungskosten zu stark an. Auch bei ihren Untersuchungen konnten für den pH-Wert innerhalb von 100 m sehr kleinräumige Variabilitäten aufgedeckt werden. Nach Ergebnissen von LAUZON et al. (2005: 527) dürfte die Beprobungsdichte ein 30-m-Raster nicht übersteigen, um die kleinräumige Variabilität des pH-Wertes, Phosphor und Kalium entsprechend darzustellen. Untersuchungen zur kleinräumigen Variabilität für den pH-Wert von WEBSTER und BUTLER (1976: 18) zeigen, dass innerhalb von 56 Metern der höchste Anteil der Variabilität zu beobachten ist.

Unter sehr hohen pH-Werten (pH > 7,00 bis 8,08) stellten LÓPEZ-GRANADOS et al. (2002: 99) und ARDAHANLIOGLU et al. (2003: 498) nur geringe kleinräumige Variabilitäten für den pH-Wert anhand enger Nugget-Sill-Verhältnisse² fest.

2.3.2 Einfluss der Probenahme

Um den Einfluss der Anzahl der Einstiche je Mischprobe auf das Ergebnis der Bodenuntersuchungen zu untersuchen, simulierten CAMERON et al. (1971: 166ff) zwischen 10 und 40 Einstiche je Mischprobe. Bei einer Toleranz der Genauigkeit des Ergebnisses von +/- 5 % konnte für den pH-Wert bei 10

¹ siehe Kapitel 3.4.2

² siehe Kapitel 3.4.2

Einstichen eine Übereinstimmung zwischen 70 % und 98 % beobachtet werden. Für die weiteren untersuchten Nährstoffe (N, P, K) lagen bei gleichen Bedingungen die Übereinstimmungen zwischen 17 bis 62 %. Mit steigender Anzahl der Einstiche je Probe stiegen die Übereinstimmungen der simulierten Ergebnisse auf bis zu 100 % für den pH-Wert, 57 % für Stickstoff, 61 % für Phosphor und 92 % für Kalium an.

2.3.2.1 Einfluss der Entnahmetiefe

VIEIRA und MOLIN (2001: 492) berichteten unter Direktsaatbedingungen von einem leicht abnehmenden pH-Wert-Gradienten mit zunehmender Beprobungstiefe. Die Variabilität des pH-Wertes nahm mit der Beprobungstiefe ebenfalls ab, was die Autoren auf eine Nährstoffakkumulation in den oberen Beprobungsschichten zurückführen. Einflüsse der Entnahmetiefe sind insbesondere bei einer nichtwendenden Bodenbearbeitung mit abnehmenden Nährstoffgradienten zu beobachten (WOLLENHAUPT et al., 1997: 23).

HEROLD et al. (2001: 8ff) konnten zwischen einer wendenden und nichtwendenden Bodenbearbeitung keine signifikanten pH-Wert-Gradienten feststellen. Auf zwei von drei Standorten kristallisierten sich abnehmende Gradienten für den Phosphor- und Kaliumgehalt heraus, insbesondere unter einer langjährigen flachgründigen Bodenbearbeitung.

In einem Vergleich zwischen konventionellen und konservierenden Bewirtschaftungsverfahren konnten LÓPEZ-FANDO und PARDO (2009: 280) nach fünf Versuchsjahren zunehmende pH-Gradienten mit einer zunehmenden Bearbeitungstiefe für die Direktsaat- und Mulchsaatvarianten feststellen. Unter den konventionellen Varianten mit wendenden Bearbeitungsgeräten konnten keine pH-Gradienten beobachtet werden. YOUNG und MEHLICH (1937: 65) beobachteten auf einem von zwei Standorten einen zunehmenden pH-Gradienten. Auf dem anderen Standort konnte kein ausgeprägter pH-Gradient beobachtet werden.

2.3.2.2 Einfluss der Beprobungsdichte

Ausgehend von einer 30-m-Punktbeobachtung mit 15 Einzeleinstichen untersuchten CHANG et al. (1999: 282ff) den Einfluss der Probenahmedichte, indem sie vier 60-m- und neun 90-m-Punktbeobachtungen aus den 30-m-Beprobungen generierten. Für Phosphor, Kalium und Zink konnten sehr kleinräumige Variabilitäten beobachtet werden, die mit einer 60-m-Beprobung nicht mehr ausreichend dargestellt werden konnten. Die Ergebnisse der Semivariogramme der untersuchten Nährstoffe konnten in neun Varianten der 90-m-Beprobungen nicht reproduziert werden. Methodisch bedingt konnten sie durch den Nuggeteffekt überprüfen, dass die Wahl des Einstichpunktes für die Nährstoffe (P, K und Zn) ab dem 60-m-Raster und für alle Nährstoffe ab dem 90-m-Raster einen bedeutenden Einfluss hat.

FRANZEN und PECK (1995: 569ff) untersuchten Punktbeobachtungen mit Gitterweiten von 25 bis 100 m, was Beprobungsdichten zwischen 16 bis 1 n ha⁻¹ entspricht. Dabei stellten sie fest, dass mit einer abnehmenden Beprobungsdichte die Übereinstimmung zur hochauflösenden Beprobung deutlich sinkt. Der mittlere Korrelationskoeffizient über alle Nährstoffe sank von $r = 0,445$ auf $r = 0,185$. Für den Einstieg in die teilflächenspezifische Bodenbeobachtung empfehlen die Autoren eine Beprobung im 67-m-Raster.

Eine Verbesserung der Genauigkeit der interpolierten Verteilungen der organischen Substanz mit einer zunehmenden Beprobungsdichte beobachten auch MULLA et al. (2000: 5).

DOMSCH und SCHIRRMANN (2009: 14ff) verglichen punkt- und flächenbezogene Beprobungsvarianten auf Basis von 1-ha-Rastern auf zwei Versuchsschlägen. Das punktbezogene Verfahren mit 18 Einzeleinstichen mit einem Durchmesser von zehn Metern wich dabei erheblich von Ergebnissen der

flächenbezogenen Verfahren ab, insbesondere für Kalium. Der Vergleich zweier flächenbezogener Verfahren, deren Einstichpunkte um zehn Meter westlich verschoben sind, führte zu Korrelationskoeffizienten (r_s) von 0,96 für den pH-Wert, 0,92 für Phosphor, 0,68 für Kalium und 0,92 für Magnesium.

Zu ähnlichen Ergebnissen führen die Untersuchungen von KRAUSE et al. (1997: 11ff), die eine zunehmende Differenzierung für die Nährstoffe Phosphor und Kalium zwischen punkt- und flächenbezogenen Beprobungsvarianten mit steigender Rastergröße feststellten.

Mit einer Beprobungsdichte im 1-ha-Raster zeigten STÉPHIEN et al. (2013: 62ff), dass eine ehemalige Lagerstätte für Ziegel und Beton einen Einfluss auf die Bodeneigenschaften ausgeübt hatte, der nur im 1-ha-Raster aufgedeckt werden konnte. Durch eine Beprobung im 2-ha- und 4-ha-Raster konnte der kleinräumige Einfluss der Lagerstätte nicht festgestellt werden. Zwischen den untersuchten Rastern konnten Abweichungen für den pH-Wert an identischen Orten von bis zu 0,8 pH-Einheiten festgestellt werden. Auf Teilflächen der Versuchsfläche von ca. 45 ha ist der pH-Wert, gemessen an der Abweichung zum optimalen Wertebereich, der stärkste ertragslimitierende Faktor. Als weitere Faktoren folgen die Phosphat- und Kaliumverfügbarkeit. Mit einer zunehmenden Beprobungsdichte können keine Einsparungen von Düngemitteln erwartet werden, vielmehr ist eine bedarfsgerechtere Verteilung zu beobachten. Im Vergleich zum 1-ha-Raster werden bei dem 4-ha-Raster 48 % der Flächen über- oder unterdüngt.

BRONSON et al. (2000: 10ff) untersuchten den Einfluss einer abnehmenden Beprobungsdichte ausgehend von 0,1-ha- und 0,2-ha-Punktbehebungen und prüften deren Übereinstimmungen. Dazu entfernten sie je 50 % der Beprobungspunkte in zwei Schritten, sodass die Probendichten um 75 % reduziert wurden. Die Übereinstimmungen der resultierenden interpolierten Nährstoffkarten sanken von 72 % im 0,4-ha-Raster auf 52 % im 0,8-ha-Raster für Nitrat und Phosphor.

In einer Studie von STAUGAITIS et al. (2010: 123ff) stieg mit einer zunehmenden Beprobungsdichte auch die Variabilität des pH-Wertes an. Auf drei von vier Versuchsschlägen konnten leicht zunehmende Werte für die Standardabweichung, als Maß für die Heterogenität der pH-Wert-Verteilung, beobachtet werden. Auf einem Versuchsschlag konnte eine deutliche Differenzierung mit zunehmender Beprobungsdichte beobachtet werden. Auf leicht sauren bzw. neutralen Böden können mit einer abnehmenden Beprobungsdichte leicht zunehmende mittlere pH-Werte festgestellt werden. Die räumlichen Strukturen des pH-Wertes gingen mit einer abnehmenden Beprobungsdichte verloren, insbesondere wenn in starren Raster beprobt wurde. Vorteile konnten unter Berücksichtigung von Bodenkarten und vorangegangenen Bodenbehebungen erzielt werden. Die Autoren empfehlen eine Beprobung im 4-ha-Raster, da ein 2-ha-Raster keinen höheren Erkenntnisgewinn bringt, der die deutlich höheren Beprobungskosten rechtfertigen würde.

HEROLD et al. (2001: 31) stellten fest, dass unter sehr hohen pH-Werten eine höhere Beprobungsdichte, ausgehend von einem 6-ha-Raster bis hin zum 0,25-ha-Raster, keine Auswirkungen auf die räumliche Differenzierungen der pH-Wert-, Kalium- und Magnesiumverteilung hat. Lediglich für den Phosphorgehalt kann mit zunehmender Beprobungsdichte eine kleinräumige Differenzierung festgestellt werden, die sich zwischen dem 0,25-ha- und 1-ha-Raster jedoch nur geringfügig unterscheidet.

2.3.3 Einfluss der Art der Zonierung nach starren oder intelligenten Raster

Mit einer teilflächenspezifischen Kalkung konnten BIANCHINI und MALLARINO (2002: 1355ff) bei ihren Untersuchungen ca. 60 % des Kalkdüngers einsparen, da insbesondere weniger- und nichtkalkbedürftige Flächen durch die einheitliche Kalkung überdüngt worden wären. In den Untersuchungen wurden zur Beschreibung der pH-Wert-Verteilung verschiedene Strategien zur Bodenbe-

probung simuliert und geprüft. Die Beprobungsdichten variierten von 0,3 bis 10 n ha⁻¹ und wurden anhand verschiedener Heterogenitätsindikatoren in starre und intelligente Raster unterschieden. Die Abgrenzung der Probenflächen nach merkmals-homogenen Zonen der Heterogenitätsindikatoren führte bei allen untersuchten Ansätzen zu signifikanten Unterschieden der pH-Wert-Verteilungen zwischen den Zonen. Mit einer zunehmenden Beprobungsdichte können kleinräumige pH-Wert Variabilitäten aufgedeckt werden, die jedoch zu sehr hohen Beprobungskosten führen. Als Kompromiss werden Verfahren empfohlen, die basierend auf Heterogenitätsindikatoren eine flexible Einteilung der Probenflächen gegenüber starren Rastern ermöglicht und damit Kosten einsparen. Als Indikatoren sind die geografische Höhe und die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens besser geeignet als Karten der Ertragskartierung und historische Bodenkarten.

THOMPSON et al. (2004: 356) verglichen Punktbeprobungen und Rasterbeprobungen nach Zonierungen einer historischen Bodenkarte, einer Ertragskarte und nach Daten der Fernerkundung. Als zweiter Einflussfaktor wurde die Beprobungsdichte geprüft. Mit einer höheren Beprobungsdichte stellten sie geringere Variabilitäten für den pH-Wert über alle untersuchten Verfahren fest. Die Variabilitäten der Punktbeprobungen waren signifikant größer als die Ergebnisse der Zonierungen, wobei die Unterschiede zwischen den Heterogenitätsindikatoren gering waren.

MALLARINO und WITTRY (2000: 3ff) simulierten auf Basis einer 0,2-ha-Bodenbeprobung verschiedene Strategien zur Bodenbeprobung nach einem starren 1,8-ha-Raster und intelligenten Zoneneinteilungen. Die intelligenten Einteilungen basierten auf Bodenkarten, der geografischen Höhe und der Beachtung mehrerer Datenebenen (Bodenkarten, Orthofotos, Ertragskarten, schlagbezogenen Angaben). Für Phosphor und Kalium konnten hohe kleinräumige Variabilitäten festgestellt werden, für den pH-Wert kristallisierten sich moderate Variabilitäten heraus. Bei der Auswertung des Vergleichs der Strategien für acht Felder dominierte keine Strategie. Die kartenbasierten Ansätze und die einheitlicher Düngung neigten zu einer Unterdüngung der Flächen.

Bei einem Vergleich von zehn Strategien zur Bodenbeprobung zeigten STAUGAITIS und ŠUMSKIS (2011: 324ff) auf drei Versuchsflächen, dass interpolierte pH-Wert-Karten überwiegend einen geringen Anteil an versauerten Zonen aufweisen. Nur eine Bodenbeprobung auf Basis von Bodenkarten und unter Berücksichtigung vorangegangener Bodenbeprobungen erlaubt die Interpolation der Ergebnisse mit den bekannten Verfahren (IDW, Kriging). Sollte der Anteil der versauerten Zonen geringer als 25 % an der Gesamtfläche sein, führt eine Interpolation zu einer Unterschätzung der versauerten Bereiche.

WOLLENHAUPT et al. (1997: 48) schlussfolgern, dass eine Beprobung nach unregelmäßigen Zonierungen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit einhergeht, wichtige Nährstoffmuster zu erfassen. Nach GODWIN und MILLER (2003: 393ff) stellen die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens und das Relief als Heterogenitätsindikatoren eine sehr gute und kostengünstige Möglichkeit dar, die Variabilität innerhalb eines Schlags zu erfassen.

2.3.4 Ergebnisse von kurzfristigen Wiederholungsbeprobungen

EARL et al. (2003: 434) führten im Herbst und im folgenden Frühjahr identische Punktbeprobungen in einem 50-m-Raster durch. Neben den Makronährstoffen Phosphor, Kalium, Magnesium, Schwefel wurden auch die Mikronährstoffe Mangan, Kupfer und Zink sowie der pH-Wert untersucht. Die Analyseergebnisse für den pH-Wert und die angeführten Nährstoffe lagen, außer für Phosphor und Schwefel, zu beiden Untersuchungszeitpunkten auf einem ähnlichen Niveau. Zur Bewertung der Konkordanz und Korrelation der Ergebnisse dienten vorrangig Scatterplots. Maßzahlen, wie beispielsweise der Korrelationskoeffizient, wurden nicht angeführt.

Bei Wiederholungsbeprobungen mit einem Zeitabstand von vier bis acht Wochen anhand einer 1-ha-Rasterbeprobung konnten KRAUSE et al. (1997: 20ff) für den pH-Wert durchschnittliche Variationskoeffizienten zwischen 1,3 und 1,7 % feststellen. Die zeitliche Entwicklung des pH-Wertes ist damit als gering einzustufen. Zum ersten Zeitpunkt wurden Punkt- und Rasterbeprobungen mit Beprobungsdichten in 1-ha-, 3-ha- und 5-ha-Auflösungen durchgeführt. Deren mittlere paarweise Differenzen lagen für den pH-Wert in einem Bereich zwischen 0,1 bis 0,2 pH-Einheiten. Der Übereinstimmungsgrad, gemessen an den Nährstoffgehaltsklassen, lag zwischen 74 und 94 %. Im Vergleich zu den Ergebnissen der anderen untersuchten Nährstoffen (P, K, Mg) schnitt der pH-Wert mit den geringsten Abweichungen am besten ab.

DOMSCH und SCHIRRMANN (2009: 19ff) stellten einen sehr starken Zusammenhang zwischen vier Wiederholungsbeprobungen (je zwei im Herbst und Frühjahr innerhalb von 1,5 Jahre) mit Korrelationskoeffizienten von $r_s \geq 0,90$ für den pH-Wert, Phosphor und Magnesium fest. Für Kalium konnten mit Korrelationskoeffizienten zwischen $r_s = 0,65$ und $r_s = 0,89$ nur geringe Zusammenhänge zwischen den Probenahmezeitpunkten ermittelt werden. Die Übereinstimmungen der Häufigkeitsverteilungen anhand der P90-Grenzen führen auf den Flächen zu Abweichungen des pH-Wertes zwischen den vier Zeitpunkten von 0,4 bis 0,5 pH-Einheiten. Für die anderen Nährstoffe konnten ähnliche Beobachtungen festgestellt werden, sodass die Autoren schlussfolgern, dass der Einfluss des Zeitpunktes der Probenahme eine geringe Auswirkung hat. TAYLOR et al. (2003: 451) beobachteten für eine Wiederholungsbeprobung nach intelligenten Teilflächen ebenfalls sehr gute Übereinstimmungen für den pH-Wert und Phosphor. Sehr gute Ergebnisse für eine Wiederholungsbeprobung nach elf Monaten Versuchsdauer erzielten auch ROSSEL und WALTER (2004: 18ff) für den pH-Wert, der mit einer mobilen ISFET-Lösung³ gemessen wurde.

2.3.5 Quantifizierung der Fehlerquellen der Bodenprobenahme und -analyse

Die Entnahme und Analyse der Bodenproben in der Praxis ist methodisch bedingt fehlerbehaftet (KRAUSE, 1997: 33). Zur Qualitätssicherung der Untersuchungsergebnisse wurde von LEITERER et al. (1998) ein VDLUFA-Standpunkt erarbeitet, der u.a. Ringversuche und Nachuntersuchungen von Rückstellmustern vorsieht. Die akkreditierten Labore sind zur jährlichen Teilnahme an mindestens einem Ringversuch verpflichtet. Dazu werden von der zuständigen Behörde Bodenproben aufbereitet und an die teilnehmenden Labore verschickt. Die Ergebnisse von Ringversuchen zeigen, dass innerhalb der Labore geringe Fehler zu beobachten sind (ZIMMERMANN, 2006: 4ff). Zwischen den Laboren können jedoch erheblich größere Unterschiede für die Ergebnisse identischer Proben mit einer maximalen pH-Wert Differenz von 0,40 pH-Einheiten (ZIMMERMANN, 2006: 4) und 0,68 pH-Einheiten (ÜBELHÖR et al., 2012a: 20) festgestellt werden. Die Auswertung von mehreren Ringversuchen zeigt für den pH-Wert eine erweiterte Messunsicherheit von 0,20 pH-Einheiten unabhängig vom Niveau des pH-Wertes (MUNZERT et al., 2007: 725). Das heißt, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % der „wahre pH-Wert“ innerhalb des Wertebereiches von +/- 0,20 pH-Einheiten um den ermittelten mittleren pH-Wert liegt. Die Aktualisierung der *Erweiterten Messunsicherheit* erfolgt im Anhang E5 des VDLUFA-Methodenbuches Band I und beträgt zurzeit 0,21 pH-Einheiten (ÜBELHÖR et al., 2012b: 1).

WELLS und CASE (1995: 1ff) untersuchten die Genauigkeit und Präzision von Ergebnissen der Bodenuntersuchungen unter Berücksichtigung vier wichtiger Einflussfaktoren. Ein Faktor geht von der natürlichen Variabilität des untersuchten Bodens aus. So können sie eine ausgeprägte vertikale und hori-

³ ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor): Eine Kombination aus ionenselektiven Elektroden und einem Feldeffekttransistor, der durch die Veränderung des Oberflächenpotentials in Anwesenheit von H⁺-Ionen direkt den pH-Wert messen kann.

zontale Heterogenität von 2 pH-Einheiten entlang einer Transektuntersuchung auf einer Länge von 3,65 m und einer Tiefe bis zu 0,65 m feststellen. Der mittlere pH-Wert über alle 99 Proben von 6,1 wurde durch kein Ergebnis einer einzelnen Bodenprobe repräsentiert. Diese Erkenntnis wirft für die Autoren die Frage auf, wie intensiv eine Probenfläche untersucht werden sollte, um ein repräsentatives Ergebnis zu erzielen. Als zweite Einflussgröße nennen sie die Anzahl der Einstiche je Bodenprobe. Ihre Ergebnisse werden nur anhand des Phosphors für eine Versuchsfläche von 3,4 ha dargestellt. Die untersuchten Verfahren variieren von 6 bis 162 Einstiche und führen bis auf eine Ausnahme zu ähnlichen mittleren Nährstoffgehalten. Basierend auf den Ergebnissen wären bei einer einheitlichen Düngempfehlung nur geringe Differenzierungen der Düngegaben erfolgt. Eine Anzahl von neun Einstichen erscheint den Autoren als ausreichend, um ein sicheres Ergebnis zu erzielen. Als dritter Faktor wird der Einfluss unterschiedlicher Personen zur Bodenentnahme untersucht. Auf einem 0,25 ha großen Versuchsschlag zogen zwei Beprober zehn Bodenproben, deren mittlere Differenz für den pH-Wert nur 0,02 pH-Einheiten betrug. Von beiden Beprobern wurden die Bodenproben geteilt und zeitlich versetzt im Labor analysiert. Obwohl der Zeitraum zwischen beiden Analysezeitpunkten nur eine Woche betrug, konnten Abweichungen von ca. 0,30 pH-Einheiten zwischen beiden Probenätzen beobachtet werden. Die Laborgenauigkeit stellt die vierte Einflussgröße auf das Ergebnis der Bodenprobe dar. Anhand von sechs Bodenproben wurde die Analysegenauigkeit untersucht, indem diese sechs Proben in einem Zeitraum von ca. vier Monaten hundertfach wiederholt analysiert wurden. Die pH-Spanne wird beispielhaft für zwei Bodenproben angegeben und liegt in einem Bereich von bis zu 0,28 pH-Einheiten. DOMSCH und SCHIRRMANN (2009: 18) führen die hohen Fehler der Bodenprobenahme in ihren Untersuchungen auf die unterschiedlichen Einstichverteilungen zurück und unterstellen einen geringen Laborfehler, da die Analysen zum gleichen Zeitpunkt stattfanden. Durch die Einführung der GPS-Technik bei der Bodenbeprobung konnte die Präzision der Untersuchungsergebnisse deutlich erhöht werden. KRAUSE et al. (1997: 23) vergleichen die gefundenen Variationskoeffizienten von 1,3 % bis 1,7 % für den pH-Wert mit Ergebnissen von RICHTER und KERSCHBERGER (1992: 163ff), die mit $VK = 5\%$ für den pH-Wert die drei- bis vierfache Variabilität beobachten konnten. GRABO und PÖBNECK (2007: 44) zeigten unter praktischen Bedingungen, dass die Fehlerquellen der Bodenprobenahme mit Verwendung von GPS-Technik und der Analytik für die pH-Wert-Bestimmung mit einem Variationskoeffizient von 2 % sehr niedrig liegt.

2.3.6 Wirtschaftlichkeit der Bodenbeprobung

BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2000: 55ff) untersuchten unterschiedliche Strategien zur Kalkung auf ihre Wirtschaftlichkeit auf drei Standorten mit 22 Schlägen (Indiana, USA). Dazu simulierten sie den Mehrertrag von Körnermais und Sojabohnen in Abhängigkeit von dem pH-Wert mit Hilfe quadratischer Funktionen (s. Abb. 2-1). Als Datengrundlage für die geschätzten Ertragsfunktionen dienten Ergebnisse regionaler Versuchsstationen und wurden von BONGIOVANNI (1998) übernommen (F. 2-3).

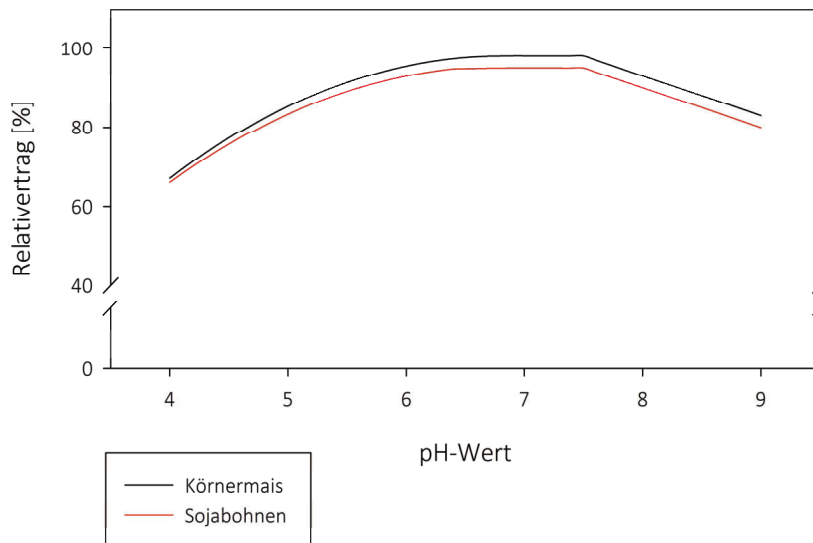


Abb. 2-1: Geschätzte Ertragsfunktionen von Körnermais und Sojabohnen (BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER, 2000: 61)

Die Relativertragsfunktionen für beide Fruchtarten aus der Abb. 2-1 folgen:

$$Y_{\text{Körnermais}} = \begin{cases} -0,8287 + 0,5318 * pH - 0,0391 * pH^2, & pH \leq 6,8 \\ 0,98, & 6,8 < pH \leq 7,5 \\ 0,98 - \frac{pH - 7,5}{10}, & pH \geq 7,5 \end{cases}$$

F. 2-3

$$Y_{\text{Sojabohnen}} = \begin{cases} -0,7510 + 0,5003 * pH - 0,0367 * pH^2, & pH \leq 6,8 \\ 0,95, & 6,8 < pH \leq 7,5 \\ 0,95 - \frac{pH - 7,5}{10}, & pH \geq 7,5 \end{cases}$$

Von den untersuchten Strategien schneidet der teilflächenspezifische Ansatz mit ökonomisch hinterlegten Entscheidungsregeln mit einem höheren Gewinn von 19,55 \$ ha⁻¹ a⁻¹ gegenüber der praxisüblichen einheitlichen Kalkung mit einem jährlichen Gewinn von 405,59 \$ ha⁻¹ a⁻¹ am besten ab. Die teilflächenspezifische Strategie mit den pflanzenbaulichen Entscheidungsregeln führt zu einem höheren Gewinn von 7,24 \$ ha⁻¹ a⁻¹ gegenüber der praxisüblichen Variante. Am schlechtesten schneidet mit einem jährlichen Gewinn von 400,01 \$ ha⁻¹ a⁻¹ die Unterlassung einer Kalkung ab. Bei der Auswertung wurde angenommen, dass auch nicht kalkbedürftige Versuchsschläge gekalkt werden. Werden nur kalkbedürftige Schläge gedüngt, erhöht sich der Vorteil des teilflächenspezifischen Ansatzes mit ökonomisch hinterlegten Entscheidungsregeln auf 23,45 \$ ha⁻¹ a⁻¹. Durch eine zunehmende Beprobungsdichte vom 1-ha-Raster zum 0,4-ha-Raster gehen die ökonomischen Vorteile der teilflächenspezifischen Ansätze verloren. Dem höheren Informationsgewinn stehen zu hohe Beprobungskosten gegenüber.

Bei WEISZ et al. (2003: 328) führte die Precision-Farming-Variante mit einer teilflächenspezifischen Kalkdüngung nur dann zu einem positiven ökonomischen Ergebnis von 4,86 \$ ha⁻¹, wenn die Ergebnisse der Nährstoffbeprobung als Grundlage für mehrere Applikationen verwendet werden. Eine zielgerichtete Nachbeprobung von unterversorgten Teilflächen führt zu dem höchsten positiven ökonomischen Ergebnis mit einer Mehrleistung von 7,31 \$ ha⁻¹.

TAYLOR et al. (2003: 451) erzielen durch eine Bodenbeprobung nach intelligenten Teilflächen eine Kostenreduktion um 85 % gegenüber einer intensiven Punktbeprobung. Als wesentlicher Einflussfaktor gilt die Reduzierung der Anzahl der Bodenproben von 27 auf vier Proben.

In den Untersuchungen von KRAUSE et al. (1997: 19) sind Beprobungen im 1-ha-Raster mit Mehrleistungen von 69 bis 134 DM ha⁻¹ in einer Düngeperiode von 5 Jahre ökonomisch vorteilhaft gegenüber Beprobungen im 5-ha-Raster. Die Grundlage der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bilden simulierte Mehrerträge einer gezielteren Düngerverteilung, Düngereinsparungen und die Kosten der Bodenbeprobung.

2.4 Ergebnisse hochaufgelöster Bodenbeprobungen unter Verwendung eines pH-Sensors

Der Veris-MSP pH-Sensor wird in mehreren Studien untersucht (s. Tab. 2-2). Die Kernfragen beziehen sich auf den direkten Vergleich der Messergebnisse des pH-Sensors und der Labormethodik bzw. auf einen Vergleich der resultierenden Karten durch die unterschiedlichen Vorgehensweisen bei den Bodenbeprobungen (als Ergebnis- und Kartenvergleich in der Tabelle 2-2 bezeichnet). Für die Bewertung der Vergleiche verwenden alle Autoren das Bestimmtheitsmaß und passen die Rohdaten des pH-Sensors an die Ergebnisse der Labormethodik mit Hilfe einer Regressionsanalyse an. Dafür werden identische oder nichtidentische Bodenproben nach beiden Methoden analysiert. Nichtidentische Bodenproben werden entweder in geringer Entfernung vom Entnahmepunkt des pH-Sensors gezogen oder als Mischprobe einer repräsentativen Fläche um den Entnahmepunkt des pH-Sensors entnommen und mit der Labormethode untersucht. Durch *Kriging* oder *Inverse Distance Weighting* werden die Ergebnisse nach beiden Methoden auf ein einheitliches Raster interpoliert und anschließend verglichen. Mit den Fehlermaßen Mean Error (ME), Mean Absolute Error (MAE) oder Root Mean Square Error (RMSE) wird das Maß der Abweichungen quantifiziert. Die Schlussfolgerung, die aus allen Untersuchungen gezogen werden kann, ist, dass die Ergebnisse des pH-Sensors an die Ergebnisse der Labormethodik angepasst werden müssen (s. Tab. 2-2).

Tab. 2-2: Übersicht der verwendeten statistischen Verfahren für die Methodvalidierung

Autor(en)	Vergleich erfolgt mit ... Bodenproben	Kartenvergleich	Ergebnisvergleich	R ²	ME	MAE	RMSE	weitere statistische Tests	Regressionsanalyse	Seite(n) in Quelle
ADAMCHUK, 2000	identischen		x	x	x				x	44 - 55
ADAMCHUK et al., 2003	identischen		x	x			x		x	27 - 33
	nichtidentischen		x	x					x	
ADAMCHUK et al., 2005	identischen		x	x			x	Levene-Test, F-Test	x	272 - 294
ADAMCHUK et al., 2007	nichtidentischen, interpolierten	x	(x)	x		x			x	139 - 149
ADAMCHUK et al., 2011	nichtidentischen	x		x			x		x	289 - 301
BORCHERT und PRALLE,	identischen		x	x					x	-

Autor(en)	Vergleich erfolgt mit ... Bodenproben	Kartenvergleich	Ergebnisvergleich	R ²	ME	MAE	RMSE	weitere statistische Tests	Regressionsanalyse	Seite(n) in Quelle
2011	nichtidentischen	x		x					x	
BORCHERT et al., 2010	identischen*		x	x					x	511 - 516
BORCHERT et al., 2010	nichtidentischen	x	x	x					x	
BORCHERT et al., 2011	nichtidentischen			x					x	-
JONJAK, 2011	nichtidentischen, interpolierten	x		x		x	x	t-Test	x	1 - 48
KRAMER et al., 2011	nichtidentischen identischen	(x)	x x	x x						64 - 67
LUND et al., 2004	nichtidentischen, interpolierten	x		x			x		x	-
LUND et al., 2005	nichtidentischen, interpolierten	x	x	x			x		x	457 - 464
OLFS und TRAUTZ, 2009	nichtidentischen			x					x	-
OLFS et al., 2010	nichtidentischen	x		x					x	-
RODRIGUES et al., 2012	nichtidentischen		x	x			x		x	-
SCHIRRMANN et al., 2011	identischen nichtidentischen (< 1m)	x	x x	x x	x x	x x		inverse Regression	x x	573 - 598
STAGGENBORG et al., 2007	nichtidentischen (< 1m)		x	x			x	t-Test	x	854 - 861
THIEME, 2009	identischen		x	x				t-Test	x	38 - 41

*Untersuchungen des pH-Sensors mit CAL-Extraktionsmittel

Eine eigene Entwicklung eines pH-Sensors (SpHLRMS), der mit einem Extraktionsmittel arbeitet, stellen ROSSEL et al. (2005: 9ff) vor. Der Sensor wurde auf einem 7,6 ha großen Versuchsfeld eingesetzt und als Extraktionsmittel wurden deionisiertes Wasser, 0,01 molare Calciumchloridlösung und eine Pufferlösung nach Mehlich verwendet. Zur Evaluierung wurden 35 Bodenproben gezogen und im Labor mit den gleichen Extraktionslösungen auf den pH-Wert untersucht. Allerdings untersuchten beide Methoden keine identischen Bodenproben. Für den Vergleich der Ergebnisse beider Methoden wurden diese auf ein einheitliches Raster von 2 x 2 m interpoliert. Die anschließende Evaluierung des Sensors wurde anhand der interpolierten Karten mit dem Bestimmtheitsmaß, des RMSE zur Genauigkeit, des Mean Error zum Versatz und der Standardabweichung des Fehlers zur Präzision durchgeführt. Größere Abweichungen traten vor allem unter Verwendung des deionisierten Wassers auf, mit einem RMSE von 0,68, ME von 0,66 und R² von 0,67. Eine bessere Übereinstimmung konnte durch Verwendung von Calciumchlorid festgestellt werden (RMSE = 0,37; ME = 0,30 und R² = 0,64). Zudem zeigte sich, dass die Ergebnisse des Sensors eine geringere pH-Spanne hatten als die Ergebnisse der Labormethodik.

Messprinzip des Veris pH-Sensors

Im Messsystem des pH-Sensors dienen zwei pH-sensitive Antimonelektroden zur Bestimmung des pH-Wertes in einer erdfeuchten Bodenprobe. Antimonelektroden wurden auch zur kleinräumigen Bestimmung des pH-Wertes im Wurzelbereich mit wenigen Millimetern Elektrodenabstand von SCHALLER und FISCHER (1981) sowie MARTH (1995) verwendet. So stellten SCHALLER und FISCHER (1981, 197ff) fest, dass Antimonelektroden aufgrund ihrer stabileren Bauart zu robusteren pH-Wert Messungen führen als Glaselektroden.

ADAMCHUK et al. (2005: 285ff) untersuchten die Präzision und Richtigkeit des Messprinzips des Verisensors, u.a. mit der Verwendung pH-sensitiver Glaselektroden. Mit Fehlerwerten (RMSE) für die Präzision von 0,11 bis 0,12 pH-Einheiten nach einer 60-sekündigen Messzeit bzw. von 0,14 bis 0,15 pH-Einheiten nach einer 10-sekündigen Messzeit konnten gegenüber den RMSE-Werten der Labormethodik mit 0,21 pH-Einheiten deutliche Vorteile erzielt werden. Mit Bestimmtheitsmaßen (R^2) zwischen 0,93 und 0,96 bzw. RMSE-Werten zwischen 0,19 und 0,21 konnten auch für die Richtigkeit der pH-Wert Messungen mit dem Verissensor gegenüber der Labormethodik sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Allerdings zeigen die Ergebnisse eine leichte Unterschätzung der pH-Werte von weniger als 0,5 pH-Einheiten über den gesamten Messbereich. SETHURAMASAMYRAJA et al. (2008: 220ff) stellten keine signifikanten Unterschiede für die Präzision und Richtigkeit zwischen den Messungen aufbereiteter (mit Extraktionsmittel) und nicht aufbereiteter Bodenproben mit baugleichen Glas- und Antimonelektroden fest, wie sie auch im Verissensor verwendet werden. Zwischen der Verwendung von normalen Leitungswasser und destilliertem Wasser als Spülwasser zur Entfernung von restlichem Bodenmaterial an den Elektroden, beobachten LUND et al. (2010: 10) Unterschiede auf Böden, deren Sandanteil mehr als 50 % beträgt. Unterschiedliche Messzeiten zwischen 10 und 36 Sekunden führten bei ihnen zu den gleichen Ergebnissen.

Untersuchungen von ADAMCHUK et al. (2005: 272ff) mit anderen ionensensitiven Elektroden zur Messung von Kalium und Nitrat zeigten für die Richtigkeit und Präzision noch zu hohe Fehler für die Messungen im direkten Bodenkontakt. Die Ergebnisse erlauben nur zwischen niedrigen und hohen Nährstoffgehalten zu differenzieren. Hier besteht noch ein weiterer Forschungsbedarf, um die Nährstoffgehalte genauer bestimmen zu können.

Ökonomie und kleinräumige Variabilität

ADAMCHUK (2000: 78ff) untersucht in seiner Dissertation die Wirtschaftlichkeit des Veris pH-Sensors in einer Modellrechnung unter Berücksichtigung von agronomischen, ökonomischen und geostatistischen Aspekten. Dazu wird ein Feld simuliert, dessen Größe unendlich ist, um Interpolationsfehler durch den Effekt der Feldgrenzen auszuschließen. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird in der Formel 2-4 beschrieben (ADAMCHUK, 2000: 71):

$$W = \frac{P_C}{1+d} * Y_{C_1} + \frac{P_S}{(1+d)^2} * Y_{S_2} + \frac{P_C}{(1+d)^3} * Y_{C_3} + \frac{P_S}{(1+d)^4} * Y_{S_4} - C_L * Q_L - C_S - C_A \quad \text{F. 2-4}$$

mit

- W - Gewinnbeitrag (\$ ha⁻¹)
- d - Diskontierungszins (10 %)
- P_C - Preis Körnermais (102,27 \$ t⁻¹)
- P_S - Preis Sojabohnen (233,11 \$ t⁻¹)
- Y_{C_i} - Ertrag Körnermais im i -ten Jahr (t ha⁻¹)
- Y_{S_i} - Ertrag Sojabohnen im i -ten Jahr (t ha⁻¹)
- C_L - Kosten Kalk frei Feld (24,26 \$ t⁻¹)

- Q_L - Düngemenge Kalk ($t\ ha^{-1}$)
 C_S - Kosten der Bodenbeprobung und -analyse ($\$ ha^{-1}$)
 C_A - Kosten der Kalkausbringung ($\$ ha^{-1}$)

Folgende Aspekte werden bei der Ermittlung der Kosten berücksichtigt (in Klammern sind die Grenzen der Parameter der Sensitivitätsanalyse angegeben):

- pH - Ertragsbeziehungen von BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2000: 61, siehe Abb. 2-1)
- Betrachtungszeitraum: 4 Jahre, Körnermais - Sojabohnen - Körnermais - Sojabohnen
- Initialer pH-Wert: 5,80 (5,22 - 6,38)
- Annahmen über den jährlichen Kalkverbrauch unter Körnermais: $0,79\ t\ ha^{-1}$ (entspricht einer Absenkung des pH-Wertes um 0,11 pH-Einheiten)
- Annahmen über den jährlichen Kalkverbrauch unter Sojabohnen: $0,34\ t\ ha^{-1}$ (entspricht einer Absenkung des pH-Wertes um 0,05 pH-Einheiten)
- Preis für Körnermais: $102,27\ \$\ t^{-1}$ (40,91 - 122,72 $\$ t^{-1}$)
- Preis für Sojabohnen: $233,11\ \$\ t^{-1}$ (93,24 - 279,73 $\$ t^{-1}$)
- Kosten für Kalk: $24,26\ \$\ t^{-1}$ (14,56 - 33,96 $\$ t^{-1}$)
- Kosten für die einheitliche Ausbringung: $7,41\ \$\ t^{-1}$
- Kosten für die variable Ausbringung: $14,81\ \$\ t^{-1}$
- Kosten für die pH-Wert Analyse: $2,20\ \$\ n^{-1}$
- Kosten für die Bodenbeprobungen (Anhang A2-4-1):
 - 1-ha - Raster: $2,65\ \$\ ha^{-1}$ (F. A2.4a und F. A2.4b)
 - 0,4-ha - Punktbeprobung: $4,64\ \$\ ha^{-1}$ (F. A2.4a und F. A2.4c)
 - fixe Kosten pH-Sensor: $2183\ \$\ a^{-1}$ (F. A2.4d)
 - Einflussfaktoren der variablen Kosten für den pH-Sensor (F. A2.4e):
 - Kosten der Feldarbeit (F. A2.4f)
 - Kosten für Treibstoffe (F. A2.4g)
 - Kosten für Spülwasser (F. A2.4h)
 - Kosten für den Betrieb des pH-Sensors (F. A2.4i)
 - Auslastung des pH-Sensors (F. A2.4j)
 - Gesamtbeprobungsfläche, Arbeitsgeschwindigkeit, Fahrabstand (F. A2.4k - F. A2.4m)
 - Gesamtkosten für den pH-Sensor (F. A2.4n):
- pH-Wert - Fehler verfahrensbedingt für den pH-Sensor mit $s = 0,50$ und für die Labormethodik $s = 0,10$
- Sill des Semivariogramms: $0,50$ (0,10 - 0,90)
- Range des Semivariogramms: $120\ m$ (60 - 144 m)

Die Ergebnisse der Verfahrenskosten der Bodenbeprobung sind in der Abb. 2-2 dargestellt, die von ADAMCHUK (2000: 83) entnommen wurden. Die höchsten Kosten verursachen die Rasterbeprobungen nach den Punktbeprobungen der herkömmlichen Methodik. Deutlich geringere Kosten weist das Verfahren nach dem pH-Sensor aus, dass ab einer Rastergröße von ca. 20 m die Grenze von $4\ \$\ ha^{-1}$ unterschreitet. Die Annahmen zur Kostenkalkulation sind im Anhang A2-4-1 enthalten.

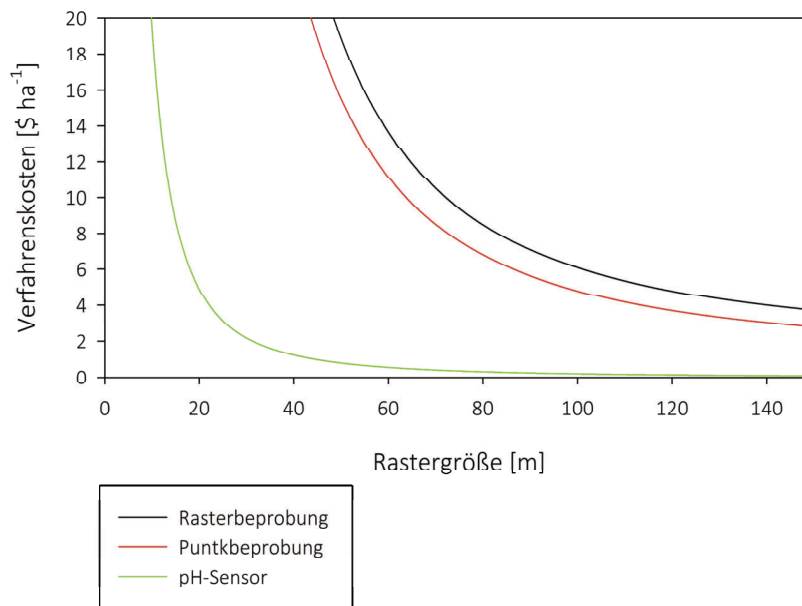


Abb. 2-2: Verfahrenskosten der untersuchten Bodenprobenstrategien in Abhängigkeit der Rastergröße nach ADAMCHUK (2000: 83)

Der Vergleich der drei untersuchten Strategien zur Bodenbeprobung zeigt weiterhin, dass unter Berücksichtigung der agronomischen, ökonomischen und geostatistischen Annahmen die optimale ökonomische Beprobungsdichte sehr unterschiedlich ist. Die optimale Rasterweite des pH-Sensors liegt bei 30 m. Für die Rasterbeprobung ist die optimale Rasterweite 60 m, während für die Punktbeobachtung 80 m optimal ist. Die Sensitivitätsanalyse führt unter der Variation der Annahmen zu folgenden Schlussfolgerungen (ADAMCHUK, 2000: 90ff):

- Mit einer steigenden Beprobungsdichte steigt der jährliche ökonomische Vorteil des pH-Sensors mit einer variablen Kalkausbringung auf 2 bis 6 \$ ha⁻¹ a⁻¹ im Vergleich zur Raster- und Punktbeobachtung an.
- Für leicht saure Böden (pH-Werte 5,4 bis 5,8) steigt die ökonomische Vorzüglichkeit des Einsatzes des pH-Sensors mit einer variablen Kalkausbringung an. In sauren Böden (pH-Wert ≤ 5,0) ist die Kombination des pH-Sensors mit einer konstanten Kalkausbringung überlegen. Mit einem sinkenden pH-Wert steigt der jährliche ökonomische Vorteil auf bis zu 33,27 \$ ha⁻¹ a⁻¹ an.
- Je kleinräumiger die Variabilität des pH-Wertes ist, desto größer wird der jährliche ökonomische Vorteil des pH-Sensors mit einer variablen Kalkapplikation (bis zu 12,66 \$ ha⁻¹ a⁻¹).

Auf Basis von Felduntersuchungen mit dem Veris pH-Sensor kommen OLFS et al. (2012a) ab einer durchschnittlichen Schlaggröße von 12 ha zu positiven ökonomischen Ergebnissen (+ 14 bis + 27 € ha⁻¹). Die Wirtschaftlichkeit ist aufgrund der relativ höheren Vorbereitungszeit für kleinere Schlaggrößen nicht rentabel (- 33 € ha⁻¹), obwohl die kleinräumige Variabilität des pH-Wertes von der Schlaggröße unabhängig ist (OLFS et al., 2012b). So können pH-Wert-Spannen von 2 pH-Einheiten sowohl für Schlaggrößen ≤ 5 ha als auch für Schlaggrößen ≥ 20 ha gemessen werden.

In ersten Untersuchungen nach der Markteinführung des Verissensors in den USA konnten Kalkeinparungen von ca. 785 kg ha⁻¹ gegenüber einer Kalkung basierend auf einem 1-ha-Raster beziffert

werden, die bewertet mit einem Kalkpreis von 20 \$ t⁻¹, die Kosten für die Bodenbeprobung decken. Neben der Kalkeinsparung stieg die Effizienz der Kalkdüngung an (ERICKSON, 2004: 2ff).

Methodenvergleich

Für einen Methodenvergleich weisen BLAND und ALTMAN (1986: 2ff) sowie SACHS (1993: 118ff; 2003: 519ff) darauf hin, dass die Bewertung der Übereinstimmung durch das Bestimmtheitsmaß bzw. den Korrelationskoeffizienten ungeeignet ist. KOCH und SPÖRL (2007: 52) zeigen, dass ein Methodenvergleich in populationsbezogene und intraindividuelle Fragestellungen klassifiziert werden muss und sich damit die geeigneten statistischen Verfahren wesentlich unterscheiden. So eignet sich z.B. der Konkordanz-Korrelationskoeffizient nach LIN (1989: 255ff) besser als der Pearsonsche Korrelationskoeffizient. PASSING und BABLOCK (1983: 710) weisen darauf hin, dass bei der Anwendung der linearen Regressionsanalyse häufig die Voraussetzung von messfehlerfreien unabhängigen Variablen verletzt ist. Die Autoren erarbeiteten dazu einen neuen regressionsanalytischen Ansatz, der in der vorliegenden Arbeit getestet wird. Die Methodik ist im Kapitel 3.4.1.6 beschrieben.

2.5 Heterogenitätsindikatoren und ihre Verwendung im Precision Farming

Mit der Verwendung von Heterogenitätsindikatoren zur Abgrenzung homogener Teilflächen für die Bodenprobenahme können positive Effekte erzielt werden (s. Kap. 2.3.3). In der vorliegenden Arbeit werden folgende Heterogenitätsindikatoren geprüft:

- Ergebnisse der Ertragskartierung und ihre Ableitungen zur **mehnjährigen Ertragskarte**
- **Geografische Höhe** und ihre Ableitung zu Karten des **Topographic Wetness Index (TWI)**
- Ergebnisse der Messungen der **scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens**
- Ergebnisse der **Bodenschätzung**

Die Abgrenzung von homogenen Teilflächen nach Heterogenitätsindikatoren verfolgt implizit das Ziel, nährstoffhomogene Zonen abzugrenzen. Für die teilflächenspezifische Bodenbeprobung wird diese Strategie von der VDLUFA (siehe Kapitel 2.2) empfohlen.

Die Evaluierung der abgegrenzten Teilflächen nach den Heterogenitätsindikatoren erfolgt mit einer von FRAISSE et al. (2001) entwickelten Methodik, die als Zielgröße die Summe der Varianzen innerhalb der Zonen berechnet und gewichtet. Je kleiner die Zielgröße, desto besser (und homogener) beschreiben die Zonen die gemessene Variabilität (siehe Kapitel 3.5.3). Zur Bewertung der kleinräumigen Variabilität einer untersuchten Kenngröße, wie dem pH-Wert oder dem Ertrag innerhalb eines Schlages, ist die alleinige Verwendung des Variationskoeffizienten nur bedingt geeignet (WOLLENHAUPT et al., 1997: 21). So können geringe bis mittlere Variationskoeffizienten von 8 bis 29 % für den Ertrag beobachtet werden, obwohl die Differenz zwischen geringstem und höchstem Ertrag von 0,63 t ha⁻¹ und 8,13 t ha⁻¹ innerhalb einer Zone sehr hoch ist.

Im folgenden Literaturüberblick werden die Heterogenitätsindikatoren und ihre Verwendung im Precision Farming vorgestellt und ein Bezug zur Bodenbeprobung hergestellt.

2.5.1 Ertrag

Durch die jährliche Datenerfassung zählt die Ertragskartierung zu den dynamischen Heterogenitätsindikatoren im Precision-Farming. Mit der Erstellung der mehrjährigen Ertragskarten sollen ertrags-homogene Zonen abgegrenzt werden und z.B. als Grundlage für eine Bodenbeprobung bzw. Düngerapplikation dienen (HUGGINS und ALDERFER, 1994: 417ff). MOORE und WOLCOTT (2000: 12), Blackmo-

re (2000: 49) sowie DIKER et al. (2004: 435) weisen darauf hin, dass ausgehend von mehrjährigen Ertragskarten, Niedrigertragszonen gezielt auf Nährstoffdefizite beprobt werden sollten.

2.5.1.1 Ertragskartierung und Fehlerquellen der Ertragskartierung

Die Messung des Ertrags erfolgt teilflächenspezifisch durch den Mähdrescher. Die Ertragsmesssysteme zeichnen georeferenziert mit einer Aufzeichnungsfrequenz zwischen einer und fünf Sekunden auf (s. Kap. 3.3.1.). Mit der automatischen Messung werden auch unplausible bzw. fehlerhafte Ertragspunkte aufgezeichnet, deren Ursachen von den folgenden Autoren untersucht und quantifiziert wurden:

NOACK (2006: 8) führt die Eingangsvariablen auf, die für die Ertragskartierung notwendig sind und als Fehlerquellen in Betracht kommen:

- Position
- Geschwindigkeit
- Schnittbreite
- Durchsatzmessung

Eine detaillierte Beschreibung der Fehlerquellen geben BLACKMORE und MARSHALL (1996: 406), BLACKMORE und MOORE (1999: 54) sowie SHEARER et al. (1999: 8), die nachfolgend zusammengefasst werden (in Klammern sind die Fehlereinflüsse auf den Ertrag in % quantifiziert):

- Glättungsfehler bei der Erstellung der Erntekarte (+ 5,4 %)
- Regelmäßige Kalibrierung des volumetrischen Erntemassensensor (+/- 1,6 %)
- Keil- und Restdrusch führt ohne Anpassung der Schnittbreite zu geringeren Flächenerträgen (- 1,2 %)
- Füllphase des Dreschwerks am Beginn des Vorgewendes führt zu geringeren Flächenerträgen (- 1,1 %)
- Fehlerhaft eingestellter Zeitversatz zur Korrektur zwischen Schnittzeitpunkt und Ertragsmesszeitpunkt durch den Erntegutfluss im Dreschwerk (- 0,4 %)
- GPS-Positionsfehler (k. A.)
- Ungleichmäßiger Erntefluss im Dreschwerk (k. A.)
- Allgemeine Ernteverluste durch den Mähdrusch (ca. - 0,3 %)
- Genauigkeits- und Kalibrierfehler des Erntemassensensors (0,4 % bis 7,4 %)
- Abweichende Schnittbreite von der Arbeitsbreite des Schneidwerks (k. A.)
- Verfälschung der Kornfeuchte durch Pflanzenreste im Feuchtigkeitssensor (k. A.)

Die Rohdaten der Ertragskartierung müssen auf die aufgeführten Fehlermöglichkeiten geprüft und korrigiert werden. In der Tabelle 2-3. ist eine Literaturübersicht dargestellt, die wichtige Arbeiten zur Filterung von Rohertragsdaten beinhaltet. Eine Standardmethode zur Fehlerbereinigung hat sich bisher nicht durchgesetzt.

Tab. 2-3: Filteransätze zur Bereinigung von Rohertragsdaten

Quelle	Bezeichnung	Filterkriterien
BECK et al., 1999	TAES	Entfernung von Ertragsmesswerten durch globale und lokale Schwellenwerte Untere und obere Geschwindigkeitsgrenze als Ausschlusskriterium

Quelle	Bezeichnung	Filterkriterien
BLACKMORE, 2003	Potential Mapping	Setzt Beerntung eines Schlages mit einem Mährescher voraus Vollständige Aufzeichnung notwendig Massefluss als Parameter muss im Datensatz enthalten sein
GEBBERS und DOMSCH, 2007	Yieldsweeper	Bestimmung der effektiven Erntefläche für jeden Ertragspunkt Entfernung der Füll- und Entleerungsphasen Entfernung von Ertragsmesswerten durch globale Schwellenwerte
MOLIN und MENEGATTI, 2002		Acht-stufige Filterung nach logischer Abfolge Entfernung von Ertragsmesswerten durch globale Schwellenwerte
MOORE, 1998	Moore	Entfernung von Ertragsmesswerten durch lokale Schwellenwerte
NOACK, 2006	H-Methode	Entfernung von Ertragsmesswerten durch lokale Schwellenwerte
RANDS, 1995	Expert Filter	Entfernung von Ertragsmesswerten durch globale Schwellenwerte Obere Geschwindigkeitsgrenze als Ausschlusskriterium
STEINMAYR, 2002	Steinmayr	Verknüpfung aus Expert- und TAES-Methode Entfernung von Ertragsmesswerten durch globale Schwellenwerte
TAYLOR et al., 2000	MPGM	Basiert auf Durchsatzmessungen und statistischen Schwellenwerten
THYLEN et al., 2000	Screening	Entfernung von Ertragsmesswerten durch lokale Schwellenwerte

2.5.1.2 Mehrjährige Auswertung von Ertragskarten

Die Auswertung von Erntekarten aus mehreren Erntejahren mit dem Ziel, Hoch- und Niedrigertragszonen zu identifizieren, definiert MOORE (1998: 188) als mehrjährige Ertragskarte. Weiterhin ist von Bedeutung, inwiefern die Zonen zeitlich stabil konstante Erträge ausweisen (BLACKMORE, 2000: 37).

Anfängliche Untersuchungen zu mehrjährigen Ertragskarten aus Daten der Mährescherertragskartierung von STAFFORD et al. (1996: 112ff) sowie LARK und STAFFORD (1997: 111ff) weisen auf die Komplexität der Auswertung hin. Als ein wichtiger Grund können die unterschiedlichen Formen der Häufigkeitsverteilungen der Erntejahre angesehen werden. In beiden Arbeiten fanden die Autoren geringe stabile räumliche Muster. Untersuchungen von TIMLIN et al. (1998: 767ff) zur zeitlichen Stabilität einer mehrjährigen Ertragskarte unter Einbezug des Reliefs führten zu keinen wesentlichen Verbesserungen. Ein Einfluss des Reliefs auf den Ertrag ist in den drei untersuchten Erntejahren zu beobachten, jedoch verhält sich dieser ambivalent und lässt keine generellen Schlussfolgerungen zu. Die Autoren verwendeten jedoch manuelle Ertragsschnitte zur Kartierung des Ertrages.

LARSCHEID et al. (1997: 895ff) trennen in ihrer Methodik den räumlichen und zeitlichen Effekt der Ertragskartierung: Im ersten Schritt werden die Erträge relativiert und es wird jahrübergreifend eine durchschnittliche Prozentwertkarte berechnet. Somit können fünf Zonen von „sehr hohen“ bis „sehr niedrigen“ Erträgen abgegrenzt werden. Mit dem zweiten Schritt wird eine Stabilitätskarte erzeugt, die eine Aussage über die Konstanz der Relativerträge gibt. Dazu wird der Variationskoeffizient (VK) als Kriterium verwendet und ein Grenzwert von $VK = 30\%$ angeführt, um zwischen stabilen und instabilen Zonen zu unterscheiden. Im letzten Schritt werden beide Karten zu einer Klassifizierungskarte zusammengeführt, die die Zonen mit den Merkmalen „Stabilität“ und „Ertragsniveau“ beschreibt. BLACKMORE (2000: 39ff) und BLACKMORE et al. (2003: 456ff) passen die Methodik an, um absolute und relative Ertragskarten im mehrjährigen Vergleich zusammen zu führen. Diese Methodik ist in den

Arbeiten von ANUAR (2008: 1393), DA SILVA et al. (2006), FOUNTAS (2004), GEMTOS et al. (2005), GRENZDÖRFER und GEBBERS (2001) sowie LEITHOLD (2006) die Grundlage für weitere Untersuchungen zur Erstellung mehrjähriger Ertragskarten. Die Mehrheit der Studien (BLACKMORE et al., 2003: 464; DA SILVA et al., 2006: 346; GEMTOS et al., 2005: 3; LEITHOLD, 2006: 144) schlussfolgert, dass ein geringer Teil der untersuchten Schläge stabile Ertragsmuster ausweist, während bei BLACKMORE (2000: 44); BLACKMORE et al. (2003: 463); FOUNTAS et al. (2004: 9) sowie GRENZDÖRFER und GEBBERS (2001: 33) ein hoher Anteil der Flächen stabile Ertragsmuster zeigt. Auffallend ist bei den Arbeiten von ANUAR et al. (2008: 1395) und DA SILVA et al. (2006: 346), dass mehrheitlich die Hohertragszonen als zeitlich stabil und die Niedrigertragszonen als instabil eingestuft wurden.

BOURENNANE et al. (2001: 762) kommen bei der Auswertung von Ertragskarten von zwei Erntejahren zu der Erkenntnis, dass die räumliche Variabilität innerhalb eines Erntejahres für den Versuchsschlag geringer ist als die zeitliche Variabilität. Die zeitliche Variabilität untersucht die Ertragsmessungen an fixen Ertragspunkten. Die Autoren führen die unterschiedliche Ertragsbildung auf saisonale klimatische Einflüsse zurück. Die Ursachen der Variabilität des Ertrags können anwenderbezogen durch die Historie des Schlages, Bodenschadverdichtungen, Beregnungsanlagen und technischen Problemen während der Ertragskartierung oder naturbedingt durch Wettereinfluss, Bodenfruchtbarkeit, Wasserhaltevermögen, konzentriertes Auftreten von Krankheiten, Schädlingen oder Schadpflanzen, externen Einflussfaktoren wie Windschutzhecken, Bäumen oder Zäunen sein (GRISSE et al. (2009: 3ff)). Eine Interpretation der mehrjährigen Ertragskarte kann unter Umständen mehr Fragen aufwerfen als Antworten geben, da die Ursachen vielschichtig und nicht eindeutig sind. Insbesondere für instabile Zonen, die für eine Fruchtart hohe Erträge aufweisen und für die Folgefrucht niedrige Erträge bewirken, können nährstoffbedingte Defizite bzw. ein partielles Auftreten von Krankheiten zu einer Ertragsdepression führen. Eine teilflächenspezifische Managementstrategie könnte zu einer Defizitbeseitigung führen und höhere Erträge zur Folge haben. WOLLENHAUPT et al. (1997: 31ff) sehen in den Ertragskarten eine gute Möglichkeit, Teilzonen abzugrenzen und differenziert die Ursachen von Ertragsdepressionen zu ergründen.

2.5.2 Höhe und Topographic Wetness Index

Zur Qualität der Höhendaten verschiedener Erfassungsmethoden stellte SCHMIDT (2001: 113) fest, dass Höhendaten, die mittels Laserscanning (s. Kap. 3.3.2) ermittelt wurden, zur Terrainanalyse optimal geeignet sind. Zum Zeitpunkt seiner Untersuchungen waren Messungen mit Hilfe des Laserscanning-Verfahrens erst ab einem Flächenumfang von mehr als 10.000 Hektar kostengünstiger als RTK-GPS-Messungen. Zum heutigen Zeitpunkt können für Deutschland fast flächendeckend Höhendaten des Laserscanning-Verfahrens für weniger als 1 € ha⁻¹ von den Landesämtern für Vermessung bezogen werden (persönliche Recherche: Vergleich der DGM-Produkte aller zuständigen Landesämter für Vermessung).

Grundlegende Publikationen zur Reliefanalyse basierend auf digitalen Geländemodellen stellen die Arbeiten von MOORE et al. (1991) und MOORE et al. (1993) dar. Erst durch den Einbezug sekundärer Reliefattribute (s. Kap. 3.5.2) zu den primären Reliefattributen erreichten BÖHNER und SELIGE (2006: 24) Bestimmtheitsmaße von 0,71 bis 0,88 zur Erklärung räumlicher Muster der Bodeneigenschaften. Unter Verwendung der Variablen „scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens“ und „geografische Höhe“ klassifizieren HANQUET et al. (2003: 45) durch eine Clusteranalyse Managementzonen für eine mögliche Bodenbeprobung. Die Validierung der Klassifizierungen erfolgt durch eine hochaufgelöste Bodenbeprobung (16 n ha⁻¹) und führt zu einer deutlichen Reduzierung der Varianz von durchschnittlich 35 % der untersuchten neun Bodenparameter (P, K, Mg, Ca, Ton, Schluff, Sand, organische Substanz, pH-Wert) gegenüber einer einheitlichen Bodenbeprobung. Einen signifikanten Einfluss des

Reliefs auf die Phosphor- und Kaliumverteilung beobachteten auch KOZAR et al. (2002: 411ff). BROGE et al. (2003: 374) beobachteten positive signifikante Korrelationen zwischen den Bodenparametern organische Substanz und Tonanteil mit dem TWI ($r \leq 0,45$) sowie negative signifikante Korrelationen mit der geografischen Höhe ($r \geq -0,27$). FRANZEN et al. (1998: 367ff) untersuchten verschiedene Beprobungsdichten und -verfahren unter Einbezug der Topografie. Dies führte dazu, dass die Korrelationen der Ergebnisse zu den Ergebnissen der höchstaufgelösten Bodenbeprobung höher sind als ohne Berücksichtigung der Topografie. Die Autoren empfehlen die Topografie zu berücksichtigen, wenn die Daten der Ertragskartierung des Mähreschers Hinweise auf einen Zusammenhang zum Relief zeigen, kein Einsatz von organischem Dünger und nur ein geringer Mineraleinsatz erfolgte und mobile Nährstoffe (z.B. Stickstoff) bestimmt werden. In einer Evaluierung verschiedener Verfahren zur Modellierung der TWI-Karten stellen SØRENSEN et al. (2006: 105) auf einem Versuchsschlag mit niedrigen pH-Wert-Bedingungen Korrelationskoeffizienten zwischen 0,40 und 0,52 zwischen dem TWI und pH-Werten fest. In einer hohen pH-Wert-Umgebung können Korrelationskoeffizienten zwischen 0,74 und 0,84 beobachtet werden.

KUMHÁLOVÁ et al. (2011: 829ff) beobachteten sehr starke Korrelationen der N_{MIN} - bzw. C_{ORG} -Verteilungen mit topografischen Parametern der Hangneigung und der Wasserakkumulation. Als Basis der Berechnung topografischer Parameter verwendeten sie DGPS-Höhendaten (Mährescher) und RTK-Höhendaten (Handmessungen). Die Autoren kommen dabei zu der Schlussfolgerung, dass keine bedeutenden Qualitätsunterschiede zwischen den Datenquellen der Höhe bestehen. Den Einfluss topografischer Variablen (geografische Höhe, TWI, Hangneigung und Hangrichtung) auf den Ertrag verschiedener Fruchtarten untersuchten FLORIN et al. (2009: 214ff), LUCHIARI et al. (2000: 1ff) und MCKINION et al. (2010: 195ff). Deren Ergebnisse zeigen, dass starke Beziehungen zwischen dem Ertrag und den Variablen bestehen. Eine eindeutige Richtung der Beziehung ist jedoch nicht zu beobachten, da z.B. LUCHIARI et al. (2000: 7) mit einem $r = -0,71$ und KUMHÁLOVÁ et al. (2011: 826) mit einem $r = +0,19$ gegensätzliche Korrelationen feststellen. Gerade in feuchten Jahren sind die Korrelationen zwischen Ertrag und topografischen Parametern geringer bzw. leicht positiv als in trockenen Jahren mit negativen Korrelationskoeffizienten (KUMHÁLOVÁ et al., 2011: 826).

2.5.3 Scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens

Die Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens (EC) zur Kartierung der Bodenheterogenität erfolgte erstmals in den 1970er Jahren (RHODES und INGVALSON, 1971: 54ff). Einen dominierenden Einfluss auf die Ergebnisse der Leitfähigkeitskartierung üben vor allem der Tongehalt (DALGAARD et al., 2001: 371ff; DOMSCH und GIEBEL, 2001: 374ff; GEBBERS et al., 2009: 188), der Wassergehalt des Bodens (KACHANOSKI et al., 1988: 719) und der Salzgehalt des Bodens aus (LESCH et al., 2005: 363). DALGAARD et al. (2001: 372) fanden bei ihren Untersuchungen sehr gute Zusammenhänge zwischen dem Tonanteil und der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens mit einem R^2 von 0,79. Auch DOMSCH und GIEBEL (2001: 378) stellten bei ihren Untersuchungen auf mehr als 30 Schlägen fest, dass positive Zusammenhänge zwischen der EC und dem Tongehalt bestehen. Nicht unbeachtet sollten der Einfluss des Schluffs und ein möglicher Einfluss wasserführender Bodenhorizonte bleiben. HARTMANN et al. (2011: 2ff) untersuchten, ob die Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen des Verissensors mit einer allgemeinen Regressionsgleichung in Tongehalte transformiert werden können. Die Regressionskoeffizienten zwischen den einzelnen Auswertungen der schlagspezifischen Kalibrierungen unterscheiden sich jedoch zu stark, sodass eine Verallgemeinerung über mehrere Schläge nicht möglich ist. Über die vielfältigen Anwendungen der EC-Messungen im Precision Agriculture berichteten CORWIN und LESCH (2005: 7) in ihrem Review. Den größten Nutzen sehen sie in der Ab-

grenzung von Teilflächen für die Bodenbeprobung wie auch die Untersuchungen von JOHNSEN et al. (2003: 313) zeigen. In Untersuchungen von TAYLOR et al. (2003: 451ff) konnten teilweise signifikante Unterschiede zwischen den abgegrenzten Teilflächen kombiniert nach der EC und dem Ertrag für den pH-Wert, P, Cu, Zn, Mg und Mn festgestellt werden. Besonders in trockenen Jahren sind die Übereinstimmungen der Ertragsvariabilität und der Nährstoffvariabilität am stärksten. PERALTA und COSTA (2013: 224ff) führten Bodenuntersuchungen auf Basis homogener Leitfähigkeitszonen durch, um homogene Zonen der Bodeneigenschaften und Nährstoffgehalte abzugrenzen. Die Ergebnisse beider Versuchsflächen zeigen mit Korrelationskoeffizienten von $r = + 0,93$ und $r = + 0,95$ zwischen dem pH-Wert und der EC eine sehr gute Beziehung an. Die Abgrenzung weiterer Bodeneigenschaften gelingt auf Basis der EC ebenfalls sehr gut. Für die Nährstoffgehalte können nur für Zn, Ca, Mg, Mn, Na, Fe und Cu gute Beziehungen beobachtet werden, während für P, K, $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{SO}_4\text{-S}$ keine konsistenten Schlussfolgerungen getroffen werden können. In der Arbeit von LI et al. (2007: 159ff) wird der Ertrag durch die Einteilung in leitfähigkeitshomogenen Zonen sehr gut abgebildet. Unter humiden subtropischen Bedingungen stellten sie eine negative Korrelation zwischen dem Ertrag von Baumwolle und der EC mit einem $r = - 0,60$ fest. Sie schlussfolgerten, dass auf Basis der Zonierung nach der EC gezielte Bodenprobennahmen möglich sind und damit eine Kostenreduzierung erfolgen könnte. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen MORAL et al. (2010: 339), die zwischen der EC und Kennziffern der Bodeneigenschaften (pH-Wert, Kationenaustauschkapazität, Gesamtstickstoff) sowie der Bodentextur (Fein-/Grobsand, Ton) ebenfalls gute Beziehungen finden. Weitere Untersuchungen stellen Beziehungen zwischen der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens mit der Zugkraft (GILBERTSON, 2001: 383ff), mit Bodenübersichtskarten (HARTSTOCK et al., 2001: 389ff) und dem Auftreten bodenbürtiger Rübenezystennematoden (*H. schachtii*) her (HBIRKOU, 2011: 48ff) dar.

Einen zusammenfassenden Überblick zum Einfluss der Messung der EC ausgehend von den Bodeneigenschaften gibt die Arbeit von FRIEDMAN (2005). Zur Erfassung der EC für Anwendungen im Precision Agriculture sind die Instrumente ARP 03 und Veris 3100 besonders gut geeignet (GEBBERS et al., 2009: 188). Beide Geräte werden in Vergleichsuntersuchungen mit sieben EC-Messinstrumenten nach verschiedenen Messverfahren auf Basis von Systemen der Elektromagnetik (**EM38**, **EM38DD**, **EM38-MK2** (alle von Geonics), **CM-138** (GF INSTRUMENTS)), Gleichstromgeoelektrik (**ARP 03** (Geocarta), **Veris 3100** (Veris Technologies)) und einem kapazitiv gekoppelte Elektrodensystem (**OhmMapper** (Geometrics)) getestet. LÜCK und GEBBERS (2007: 27ff) zeigen für das Veris 3100, dass die Wiederholbarkeit der EC-Messungen mit Kendalls Tau Korrelationskoeffizienten zwischen 0,46 und 0,83 moderat bis sehr gut sind. Die Signalcharakteristik für die flachere Messschicht entstammt aus einer Messtiefe von bis zu 45 cm (DOI_{95}^4) während die tiefere Messschicht eine Signalcharakteristik von bis zu 120 cm beschreibt. Damit wird die Hauptwurzelzone im Gegensatz zu gängigen elektromagnetischen Verfahren mit einem DOI_{95} von bis zu 500 cm sehr gut dokumentiert. Robuste Messwerte konnten auch unter sehr hohen oberflächennahen Bodenfeuchten und unter regnerischen Wetterbedingungen mit dem Veris 3100 erzielt werden. Zur Überprüfung der Messwerte auf einen Drift (rosa Rauschen) über die Zeit sollte mit einer abschließenden diagonalen Fahrt an Kreuzstellen ein Vergleich der EC-Messwerte erfolgen.

2.5.4 Bodenschätzung

Der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Bodenschätzung und der Ertragsbildung wird in vielen Arbeiten untersucht. Von signifikanten Ertragsbeziehungen berichten DOBERS (2002: 162),

⁴ DOI_{95} (Effective depth of investigation): Diese Kenngröße beschreibt den erfassten Bodenraum, der das gemessene Signal an der Bodenoberfläche zu 95 % beeinflusst.

TREUE (2003: 68) und SCHAUPPENLEHNER (2008: 88). Die Auswertung von 110 Ernten führte bei RÖTSCHER (2012: 120) zu positiven Korrelation zwischen dem Ertrag und der Bodenschätzung in 79 Fällen, 23 Ernten wiesen keinen signifikanten Zusammenhang auf und in acht Fällen konnten negative Ertragsbeziehungen beobachtet werden. LEHMANN (2004: 15ff) stellten auf einem mecklenburgischen Standort zwischen dem Ertrag und der Ackerzahl eine positive quadratische Beziehung fest. Sie führen die Ertragsdepressionen mit höheren Ackerzahlen auf einen abnehmenden Einfluss der Bodengüte und den zunehmenden Einflüssen anderer Faktoren zurück. Ähnliche Zusammenhänge wurden auch von SCHLIEPHAKE (2011: 17) für Winterweizen und Winterraps beschrieben, der die hohen Leitfähigkeitswerte auf mögliche Störgrößen wie Bodenverdichtungen, Staunässe, Melioration oder ehemaliger Wege und Gräben zurückführt. Für Winterweizen beobachtete der Autor starke Ertrags-EC-Beziehungen von $R^2 = 0,80$ und $R^2 = 0,73$. Die sich ausprägenden räumlichen Hoch- und Niedrigertragsstrukturen kristallisierten sich zudem als sehr stabil heraus. MIRSCHEL et al. (2014: 35) nutzten die Ackerzahl als Eingangsvariable für ein Modell zur regionalen Ertragsschätzung. LORENZ und BOESS (2010) nutzten die Ergebnisse der Bodenschätzung als eine wichtige Grundlage zur Erstellung der Hofbodenkarte, die eine breite Anwendung im Precision Farming u.a. als Grundlage für die Bodenbeprobung, Aussaatkarte und der variablen Tiefenführung bei der Grundbodenbearbeitung finden kann.

Im *preagro I*-Projekt stellten SCHMIDHALTER et al. (2004: 248) keine bis sehr gute Beziehungen ($R^2 = 0,01$ bis $R^2 = 0,71$) zwischen der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens und den Bodenzahlen der Bodenschätzungen fest. Mit steigender Heterogenität der Flächen nahmen die Beziehungen zu. HINCK et al. (2010: 203ff) nutzten die Bodenarten der Bodenschätzung als Heterogenitätsindikator zur Abgrenzung von Teilflächen zur Bodenbeprobung. Gegenüber der herkömmlichen Bodenbeprobung nach einem starren Raster erzielten sie eine deutliche Differenzierung der Nährstoffgehalte. LEHMANN (2004: 13ff) konnten für die Ergebnisse der Bodenbeprobungen (pH-Wert, P, K und Mg) auf Basis der abgegrenzten Zonen nach der Bodenschätzung keine Beziehungen zum Ertrag, zur Düngung und zum Nährstoffgehalt der Pflanzen beobachten. Internationale Untersuchungen empfehlen eine Bodenuntersuchung auf Grundlage von Bodenkarten, da die Abgrenzungen meist mit einer unterschiedlichen Nährstoffversorgung einhergehen (WOLLENHAUPT et al., 1997: 31; POCKNEE et al., 1996: 159ff). GRENZDÖRFER und GEBBERS (2001: 34ff) weisen in ihrer Arbeit auf das Problem historischer Bodenkarten hin, in denen die größte Fläche einer Zone 35 ha beträgt. Damit können Nährstoffvariabilitäten auf einer kleinräumigen Skalenebene nicht zuverlässig erfasst werden.

3 Material und Methoden

3.1 Standort- und Versuchsbeschreibungen

3.1.1 Kalksteigerungsversuch Julius-Kühn-Versuchsfeld – Feld A

Das Julius-Kühn-Versuchsfeld befindet sich in Halle und ist weltbekannt durch den Versuch „Ewiger Roggenanbau“, der 1878 von seinem Namensgeber Julius Kühn¹ initiiert wurde. Weitere Dauerdüngungsversuche legte 1949 Karl Schmalfluss an, u.a. auch den Kalksteigerungsversuch, der als systematische Blockanlage konzipiert wurde. Dessen Versuchsfrage besteht darin, den langfristigen Einfluss unterschiedlicher Kalkmengen auf Boden und Pflanze zu prüfen. Nach der Getreideernte werden alle drei Jahre in 4 Stufen von 0, 5, 10 und 20 dt CaO ha⁻¹ ausgebracht. Als Kalkdünger wird kohlenaurer Kalk verwendet, für die jährliche NPK-Düngung wird Ammonsulfat, Superphosphat und Kalidüngesalz 60 verwendet. Letztere drei wirken besonders bodenversauernd. Seit 1980 wurde auf zwei der drei Teilstücke jeder Abteilung die Phosphordüngung eingestellt, um die Phosphatverfügbarkeit im Boden in Abhängigkeit des pH-Wertes zu untersuchen. Die aktuelle Fruchtfolge erfolgt nach dem Schema Leguminose – Hackfrucht – Sommergetreide. Geprägt durch den Regenschatten des Harzes zählt der Standort zum mitteldeutschen Trockengebiet mit einer mittleren Niederschlagssumme von 494 mm, gemessen im Zeitraum von 1878 bis 1995. Das Relief weist eine ebene Oberfläche auf. Die Bodenart des Kalksteigerungsversuches ist ein sandiger Lehm. In der Abbildung 3-1 ist der Versuchsplan dargestellt (SCHMIDT et al., 2004: 28ff).

Abteilung 1			Abteilung 2			Abteilung 3			CaO-Stufe [dt CaO ha ⁻¹]
20	20	20	20	20	20	20	20	20	
10	10	10	10	10	10	10	10	10	
5	5	5	5	5	5	5	5	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	20	20	20	20	20	20	20	20	
10	10	10	10	10	10	10	10	10	
5	5	5	5	5	5	5	5	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	20	20	20	20	20	20	20	20	
10	10	10	10	10	10	10	10	10	
5	5	5	5	5	5	5	5	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
mP	oP	oP	mP	oP	oP	mP	oP	oP	P-Stufe

Abb. 3-1: Versuchsplan des Kalksteigerungsversuchs „Feld A“ (angelehnt an SCHMIDT et al., 2004: 28)

Ergiebige Regenfälle im Herbst 2010 führten dazu, dass der Kalksteigerungsversuch teilweise unter Wasser stand. Erst am 18.10.2010 konnte eine Beprobung erfolgen, allerdings nur für die Abteilungen 2 und 3, da auf der Abteilung 1 die Kartoffelernte noch nicht beendet war.

¹ Julius Kühn (1825-1910) wurde 1862 als erster ordentlicher Professor für Landwirtschaft an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg ernannt. Seine mehr als 300 wissenschaftlichen Publikationen reichen über alle Forschungsgebiete der Landwirtschaft. Sein Lebenswerk war der Aufbau des Institutes in Halle zu einer der bedeutendsten Lehr- und Forschungsstätte für Agrarwissenschaften in Deutschland zu der damaligen Zeit, in das er auch sein Privatvermögen einbrachte (Wussow, 2008: 1ff).

Versuch 1: Grundlagenversuch für den Methodenvergleich zwischen der Labormethodik und der pH-Sensorik des Verissensors

Der erste Teil der Messungen des pH-Wertes wurde mit dem Verissensor durchgeführt. Eine Befahrung im Modus der automatischen Beprobung, wie es unter Normalbedingungen üblich ist, konnte auf dem Kalksteigerungsversuch nicht durchgeführt werden. Aufgrund der Kleinräumigkeit der Parzellen mit Maßen von 6 m Breite und 5 m Länge muss möglichst der mittlere Bereich der Parzelle beprobt werden. Softwarebedingt führt der Verissensor im Automatikmodus erst ab einer Mindestgeschwindigkeit von ca. 3 km h⁻¹ Messungen mit einem variablen Messzyklus zwischen 15 bis 20 Sekunden durch. Ein weiterer Grund, der eine automatische Beprobung ausschließt, liegt in dem Verschleppungseffekt der Bodenbearbeitung. Diese sind nach GRAF (1988: 54ff) in den Randbereichen bis 1,50 m der Parzellen nachweisbar. Um weitgehend identische Bedingungen zu garantieren, wurde eine Befahrung durchgeführt, indem der Entnahmeschuh in der Position der Bodenentnahme fixiert wurde. Damit entstand der für den Verissensor typisch hinterlassene Bodenkern, der im automatischen Messmodus beprobt worden wäre. Aus der Parzellenmitte wurde ein Bodenkern entnommen und manuell an die Messsensorik des Verissensors herangeführt. Der sich einstellende pH-Wert wurde manuell notiert. Insgesamt konnten mit dieser Prozedur 72 Parzellen beprobt werden. Jede Bodenprobe wurde nach den Messungen in Probenahmebeutel verpackt und im Labor auf den pH-Wert und die Grundnährstoffe P, K und Mg untersucht.

Versuch 2: Bestimmung der Nährstoffwechselwirkungen durch den Einfluss unterschiedlicher Kalkstufen, der Phosphordüngung und der Fruchtart

Die chemischen Bodenuntersuchungen der Grundnährstoffe P, K, und Mg im Labor (s. Kap. 3.3.4) lassen es zu, den Einfluss unterschiedlicher Kalkstufen, der Phosphordüngung und der Fruchtart auf den pH-Wert, Phosphor, Kalium und Magnesium zu untersuchen. Im Mittelpunkt der Auswertung des Versuches stehen die Nährstoffwechselwirkungen des pH-Wertes und den weiteren Nährstoffen. Auf diese Effekte weisen Ergebnisse verschiedener Autoren hin (s. Kap. 2.1).

In der Abb. 3-2 sind die Fahrspuren und die beprobten Parzellen dargestellt, die mit dem Verissensor untersucht wurden.

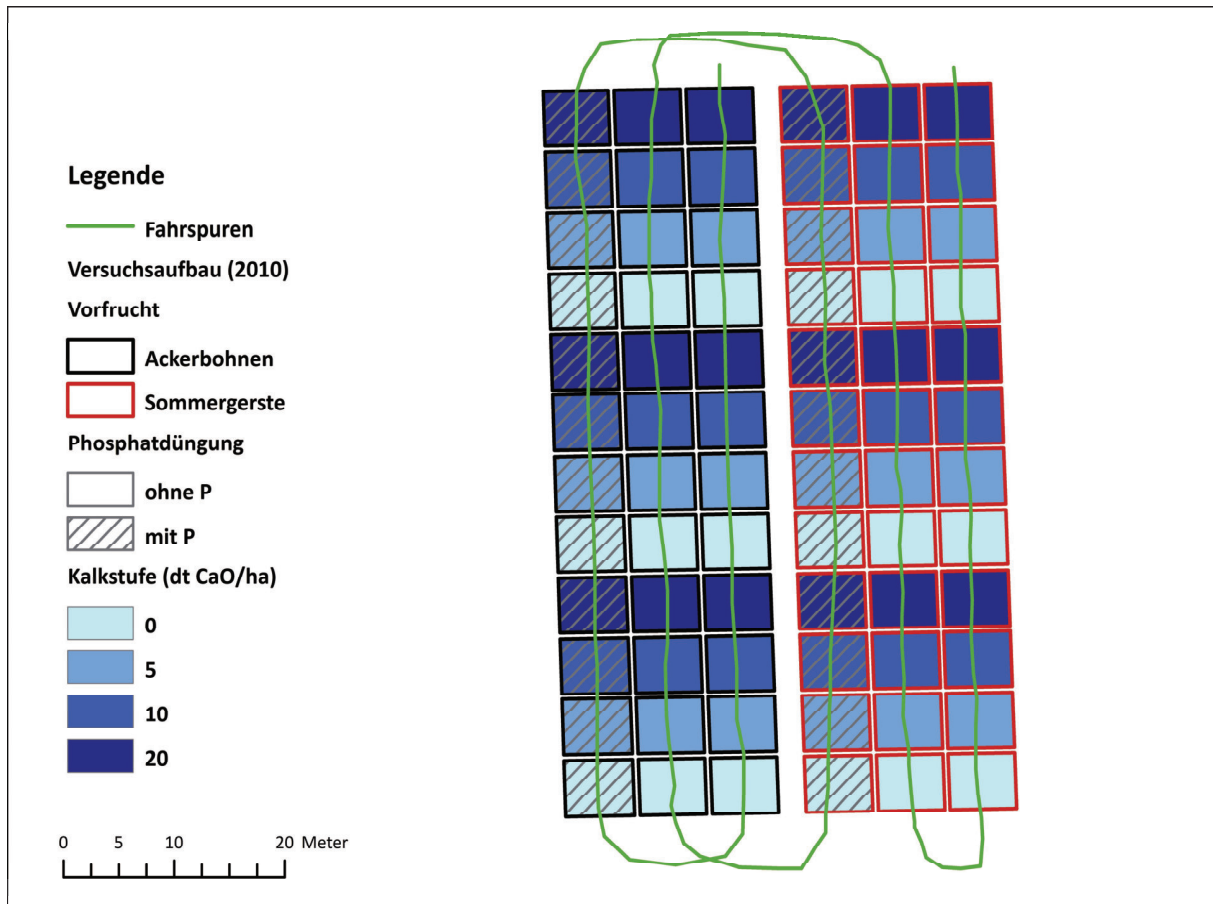


Abb. 3-2: Versuchsaufbau 2010 und Fahrspuren des Verissensors

3.1.2 Versuchsschlag „550“ am Standort Görzig

Der Versuchsschlag „550“ (N51,664627; E12,007145) in Görzig mit einer Fläche von ca. 66 ha gehört zu der Domäne Pfaffendorf und wird unter praxisüblichen Bedingungen und nichtwendend konservierenden Verfahren bewirtschaftet. Der Schlag nimmt eine herausragende Stellung ein, weil er gleichzeitig als Versuchsfläche für einen langjährigen Grunddüngungsversuch der Professur für Landwirtschaftliche Betriebslehre der MLU Halle-Wittenberg dient. Als Bodenarten treten vorwiegend ein mittel-toniger Schluff bis mittel-lehmiger Sand auf, vereinzelt auch ein mittel-sandiger Feinsand (HARTMANN, 2012). Die mittlere jährliche Temperatur liegt bei 9,7 °C bei einem mittleren jährlichen Niederschlag von 562 mm (DWD, 2015). Im Jahr 2007 erfolgte eine Nährstoffgrundinventur in einem Beprobungsraster von 25 x 25 m. Im gleichen Jahr wurde ein Versuch zum Einfluss unterschiedlicher Düngungsstrategien der Grundnährstoffe angelegt. Untersucht werden die betriebsübliche Düngestrategie, die eine flächeneinheitliche Gabe vorsieht, eine teilflächenspezifische Düngung, die auf Basis der Nährstoffgrundinventur eine gezielte Nährstoffausbringung im 25-m-Raster durchführt und als Kontrollvariante eine Nullvariante, in der keine Grunddüngung erfolgt. In der Abbildung 3-3 sind die Beprobungsspuren des 25-m-Rasters im Jahr 2007 und das Versuchsdesign dargestellt.

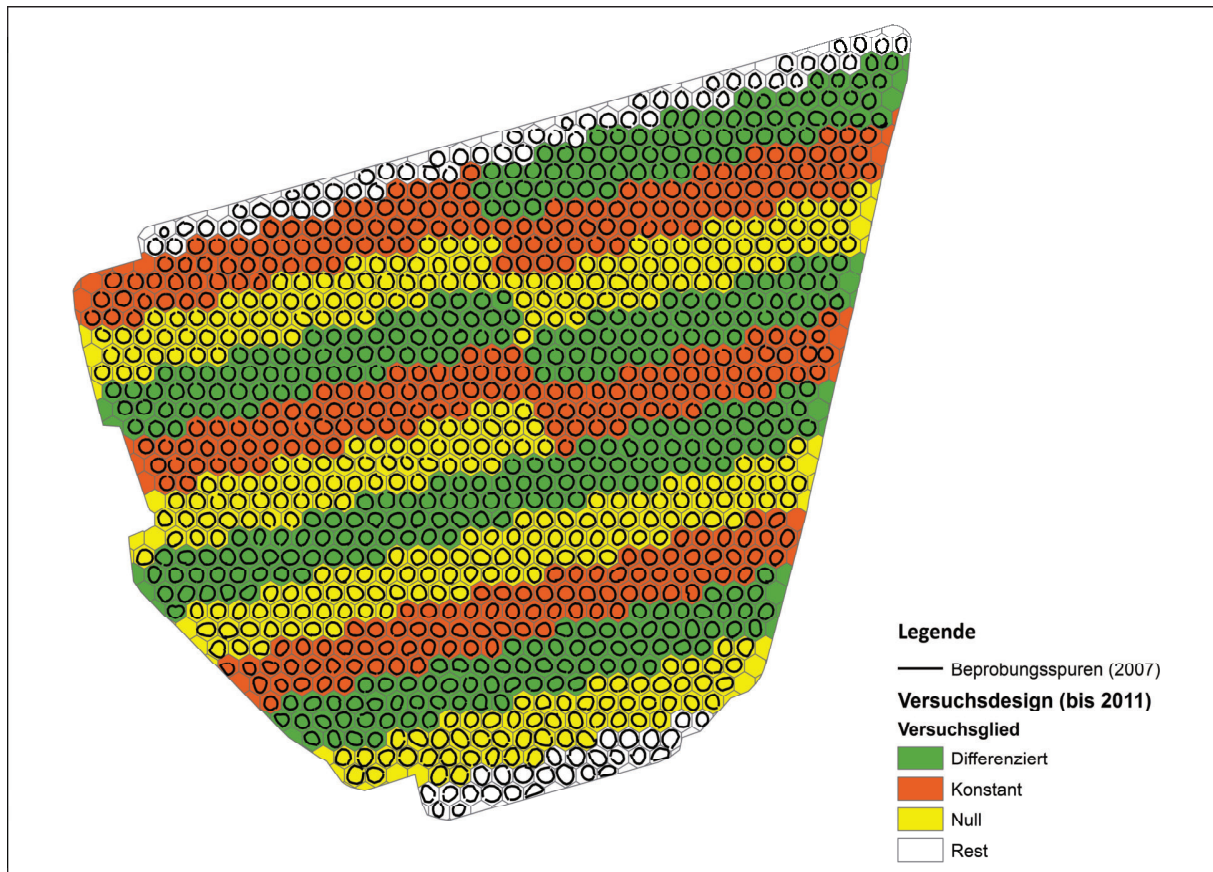


Abb. 3-3: Beprobungsspuren im Jahr 2007 und Versuchsdesign des Versuchsschlages „550“ bis 2011

Durch die Umstellung des Pflegesystems von 27-m- auf 36-m-Fahrgasse im Jahr 2007 müssen die Ergebnisse der 25-m-Rasterbeprobung entsprechend in das neue 36-m-Raster verrechnet werden. Die Vorgehensweise zur Verrechnung ist im Anhang A3-1-2 beschrieben. Mit der Anpassung wurde das Design entsprechend der Ausrichtung der Fahrgassen ausgerichtet und entsprach somit nicht mehr einem Nord-Süd-Raster. Damit soll eine Fehlapplikation vermieden werden, da die Technik zur Ausbringung der Düngemittel keine differenzierte Ansteuerung der Teilbreiten zulässt. Die Abbildung 3-4 stellt das neue Raster dar.

Für den Standort Althen konnten in drei aufeinanderfolgenden Jahren Messungen mit dem Verisensor durchgeführt werden. Auf allen anderen Standorten erfolgte eine einmalige Messung.

Tab. 3-1: Standortbeschreibungen

	Althen	Dennheritz	Krosigk		Starsiedel	Warnstedt			
Versuchsfeld	110	Lange Welle	Kuhberg	Maststall	Deutsches Feld	Dölzig I	Dölzig II	Lange Winde	Rieder
Größe (ha)	40,66	28,08	25,01	13,75	116,27	19,35	22,52	45,31	65,99
geogr. Breite (°)	51,333535	50,761330	50,822710	50,820179	51,624684	51,348183	51,344483	51,778179	51,744936
geogr. Länge (°)	12,514977	12,464438	12,474382	12,454416	11,958724	12,229227	12,228094	11,048319	11,159561
Bodenart des Oberbodens	sandig-lehmiger Schluff bis sandiger Lehm ¹	schluffig-toniger Lehm bis stark kiesiger, sandiger Lehm ¹	lehmgiger Schluff bis schluffiger Lehm ¹	lehmgiger Schluff bis schluffiger Lehm ¹	stark toniger Schluff bis mittel toniger Schluff ²	sandig-lehmiger Schluff bis sandiger Lehm ¹	sandig-lehmiger Schluff bis sandiger Lehm ¹	sandig-lehmiger Schluff, mittel toniger Schluff bis mittel lehmiger Sand ²	stark toniger Schluff bis mittel toniger Schluff ²
mittl. jährl. Niederschlagsmenge ³ (mm)	653	657	630	630	525	526	526	531	551
mittl. Jahrestemperatur ³ (°C)	9,7	8,7	8,7	8,7	9,6	9,4	9,4	9,3	9,3
Höhe (m üNN)	126	305	281	296	93	115	116	170	174
Beprobungszeitpunkte (Verisensor)	14.10.2010 13.09.2011 14.08.2012	24.07.2011	25.07.2011	06.08.2011	20.-22.09.2011	19.10.2010	19.10.2010	16.09.2011	15.09.2011

¹SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (2015), ²HARTMANN (2012), ³DWD (2015)

3.2 Aufbau und Messprinzip des Verissensors

Der Verisensor kann in der Dreipunktaufhängung eines Standard-Traktors angebaut gefahren oder als Anhänger gezogen werden. Die technischen Anforderungen sind gering, benötigt werden nur ein Hydraulikkreislauf und eine ausreichende elektrische Versorgungsleistung. Mit der Ausstattung der Sensorplattform ist es möglich, in einer Überfahrt den pH-Wert und die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens zu messen. Die zusätzliche Ausstattungsoption „OpticalMapper“ ermöglicht die Erfassung der organischen Substanz mittels eines optischen Systems. Da dieses Zusatzmodul im verwendeten Verisensor nicht vorhanden war, soll darauf nicht näher eingegangen werden.

3.2.1 Messprinzip des pH-Wertes

In der Abb. 3-6 ist eine technische Zeichnung des Verissensors dargestellt. Der Vorräumer (1) entfernt Wurzelreste, Strohstoppeln und anderes Material aus der Entnahmespur. Das zur Tiefenführung dienende Rad (2) läuft parallel zu den sechs Scheibensechen (nicht dargestellt), die zur Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit dienen. Über einen Hydraulikzylinder (3) wird der Bodenentnehmer (4) in den Boden gedrückt. Durch die Vorfahrt wird ein Bodenkern geformt und fließt kontinuierlich durch den Entnahmeschuh (5). Über den Hydraulikzylinder wird die Bodenprobe an die Halterung der zwei Elektroden (6) herangeführt und es erfolgt der Messvorgang. Die beiden Flachstrahldüsen (8) reinigen die Elektroden mit Leitungswasser (9), während der Bodenentnehmer für den nächsten Messzyklus eine Probe entnimmt. Mit den Einräumscheiben (10) wird die Entnahmespur wieder verschüttet. Der Controller (11) steuert den Messzyklus, misst den Elektrodenoutput (in mV) und sendet die Signale zum externen Datenlogger von Veris (LUND et al., 2004: 5ff). Für den Feldeinsatz ist es notwendig, die Elektroden mit Pufferlösungen mit pH-Werten von 4,0 und 7,0 zu kalib-

rieren. Weiterhin ist darauf zu achten, dass bei längeren Standzeiten der Elektroden eine intensive Reinigung der Kontaktflächen mit Sandpapier erfolgt, um eine mögliche Oxidschicht zu entfernen.

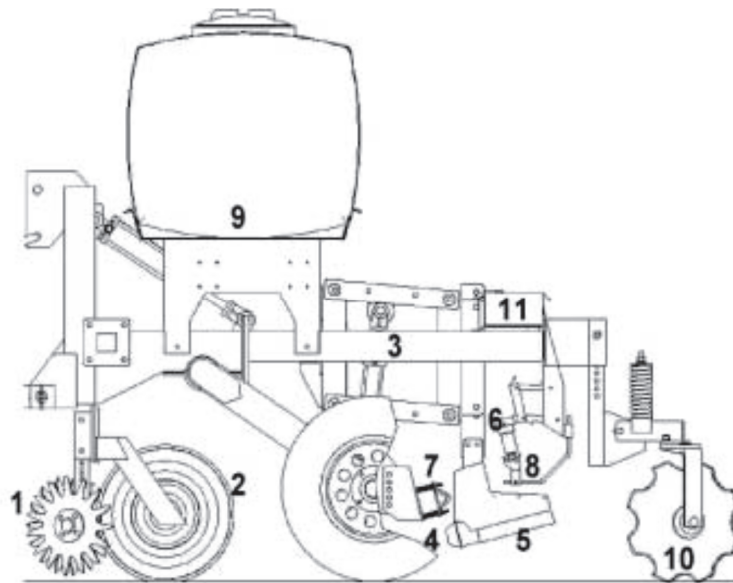


Abb. 3-6: Technische Zeichnung des Veris MSP pH-Manager (LUND et al., 2004: 5)

3.2.2 Messprinzip der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens

Die Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens erfolgt nach dem Prinzip des geoelektrischen Messverfahrens (LÜCK und GEBBERS, 2007: 6). Für die Messungen ist eine galvanische Ankopplung des Messgerätes mit dem Boden erforderlich. Dazu dienen die Scheibenseche 2 und 5 als stromführende Elektroden, während die Scheiben 3 und 4 die Leitfähigkeitswerte der flachen Bodenschicht (0 bis 30 cm) messen und die Scheiben 1 und 6 die Leitfähigkeitswerte der tiefen Bodenschicht (0 bis 90 cm) messen (Abb. 3-7). Es wird mit einer Messfrequenz von 1 Hz gemessen. Softwareseitig erfolgt die Datenaufzeichnung nur ab einer Mindestgeschwindigkeit von ca. 3 km h⁻¹ (VERIS-TECHNOLOGIES, 2008).

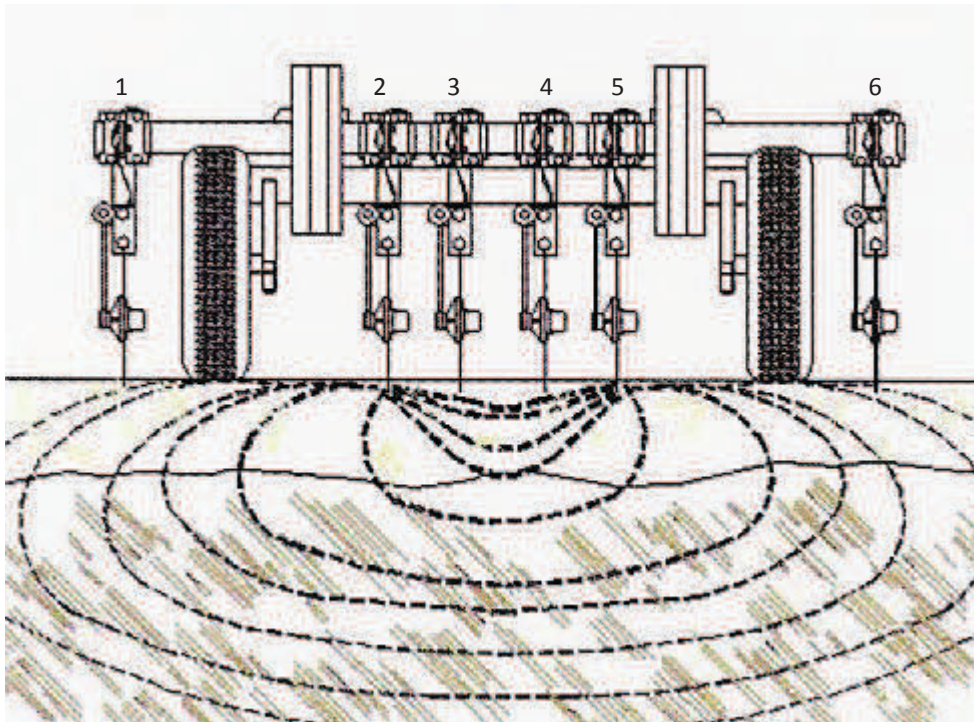


Abb. 3-7: Technische Zeichnung Veris EC (VERIS-TECHNOLOGIES, 2008)

3.3 Datengrundlage der Heterogenitätsindikatoren

Die Heterogenitätsindikatoren werden anhand ihrer Aufnahmezeit in zwei Arten unterschieden. Die erste Gruppe erhebt in regelmäßigen Zeitabständen Merkmalskarten. Beispiele hierfür sind Boniturkarten, Nährstoffkarten, Ertragskarten, Fernerkundungsdaten oder bodengebundene Sensorkarten. Die zweite Gruppe der Heterogenitätsindikatoren erhebt zeitlich einmalig oder unregelmäßig die Merkmalsausprägung. Als Beispiele sind die Karten der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens, digitale Geländemodelle oder Karten der Bodenschätzung anzuführen.

Die untersuchten Heterogenitätsindikatoren **Bodenschätzung**, **Höhe** und die **scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens** gehören zur zweiten Gruppe. Der **Naturalertrag** wird jährlich teilflächenspezifisch erfasst und bedarf bei Vorliegen mehrerer Ertragskarten einer mehrjährigen Auswertung.

3.3.1 Naturalertrag

Zu den wichtigsten Heterogenitätsindikatoren zählen die Ertragskarten. Dazu wird während des Mähdruschs am Körnerrelevator die Ertragsmasse bestimmt. Über die Schnittbreite und Vorfahrtsgeschwindigkeit kann die gedroschene Erntemasse pro Flächeneinheit ermittelt werden um somit Hektarerträge teilflächenspezifisch zu dokumentieren. Zur Ermittlung der Ertragsmasse haben sich zwei Messsysteme durchgesetzt (MOORE, 1998: 6):

- Volumetrisches Messprinzip
- Kraft-/Impuls- Messprinzip

Beide Systeme werden in den Erntemaschinen auf den untersuchten Standorten eingesetzt und werden im folgenden Kapitel erläutert.

3.3.1.1 Ertragsmessung nach dem volumetrischen Messprinzip

Volumetrische Ertragsmesssysteme bestimmen die Ertragsmasse indirekt über das Volumen und die spezifischen Schüttdichten der Fruchtarten. Mit einem höheren Ertrag nimmt die Menge zu, die sich auf den Elevatorschaufeln befindet. Für jede Sorte einer Fruchtart ist eine tägliche und schlagspezifische Kalibrierung empfehlenswert. Die Abb. 3-8 zeigt den schematischen Aufbau des Messsystems.

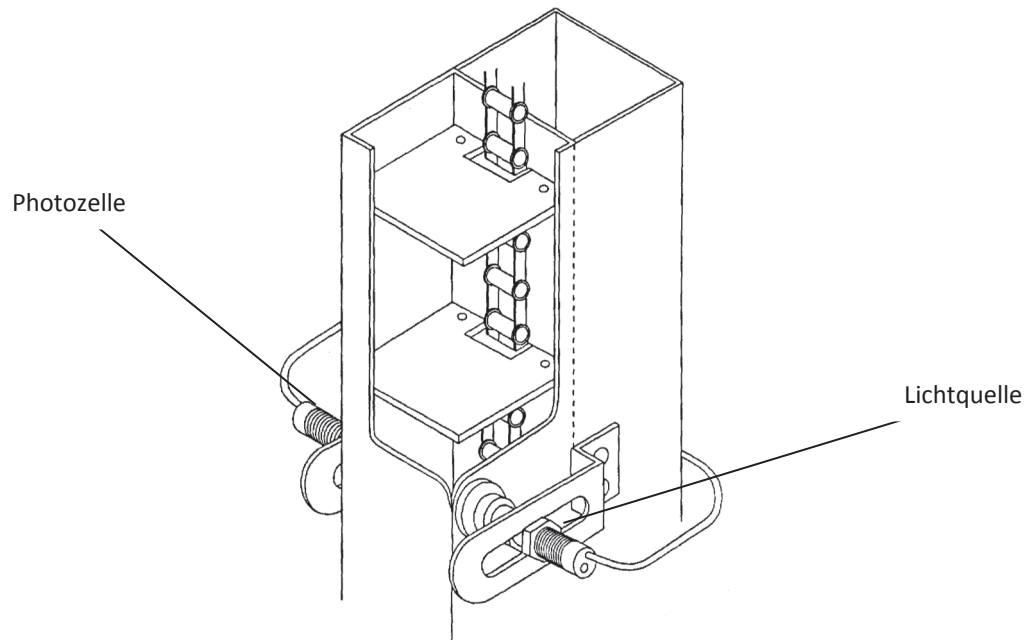


Abb. 3-8: Aufbau des volumetrischen Ertragsmesssystem (verändert nach MOORE, 1998: 31)

Die Datenaufzeichnung erfolgt fortlaufend in Abständen zwischen zwei und fünf Sekunden und enthält folgende Merkmale (Einheiten):

- GPS - Koordinaten (Breitengrad, Längengrad)
- GPS - Höhe (m üNN)
- Zeitstempel (Datum; hh:mm:ss)
- Vorfahrtsgeschwindigkeit (km h^{-1})
- aktueller Flächenertrag (t ha^{-1})
- Kornfeuchte (%)
- Litergewicht (g l^{-1})
- Erntedurchsatz (t h^{-1})
- Teilbreitendrusch (0 - 100 %, n - stufig)
- Neigungssensoren (Grad)
- Motorumdrehungen (UPM)

Auf den Betrieben Warnstedt und Görzig werden Fabrikate des Herstellers CLAAS für den Mähdrusch verwendet, die über ein volumetrisches Ertragsmesssystem verfügen.

3.3.1.2 Ertragsmessung nach dem Kraft-/Impuls- Messprinzip

Das hier zugrundeliegende physikalische Messprinzip ist eine Kraft-/Impuls-Messung. Mittels einer Prallplatte oder zweier Messfinger wird der am Körnerelevatorkopf von den ausgeworfenen Körnern ausgeübte Impuls gemessen. Der Impuls ist definiert als Produkt der Masse und Geschwindigkeit. Die

Geschwindigkeit wird am Körnerelevatorkopf gemessen und ermöglicht damit den Massestrom zu bestimmen (DEMMELE, 2001: 4ff). Eine schematische Darstellung des Messprinzips gibt Abb. 3-9 wieder.

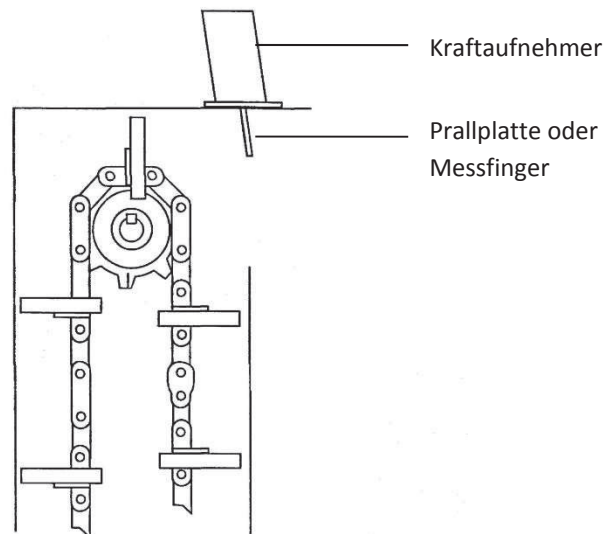


Abb. 3-9: Aufbau eines Ertragsmesssystem nach dem Kraft-/Impuls-Prinzip (verändert nach MOORE, 1998: 33)

Die Datenstruktur der Ertragserfassung ähnelt der des volumetrischen Messprinzips mit dem Unterschied, dass die Aufzeichnungsrate 1 Hz beträgt. Eingesetzt wird das Masse-Fluss-Messprinzip von den Herstellern John Deere, New Holland, Case, Deutz-Fahr, Fendt und Massey Ferguson. Die Betriebe Krosigk und Winter verwenden ein oder mehrere Mähdrescher der genannten Firmen.

3.3.2 Höhe

Die Höhendaten der untersuchten Praxisschläge wurden von den zuständigen Stellen in Sachsen (Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen) und Sachsen-Anhalt (Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt) bezogen. Die Datenerhebung erfolgte unter der Koordination des Amtlichen deutschen Vermessungswesens (AdV) in dem Projekt ATKIS (Amtlich Topografisch-Kartografisches Informationssystem), dessen Aufgabe die Erfassung der Topografie der Bundesländer ist. Mittels Befliegungen wurden durch das Verfahren „Airborne Laserscanning“ hochaufgelöste Höhendaten gemessen. Die höchste Datendichte wird im 1-m-Raster mit einer Höhengenaugigkeit von +/- 0,2 m angeboten. Je nach Auflösungsdichte und Umfang liegen die Kosten zwischen 0,75 € ha⁻¹ (2-m-Raster) und 0,29 € ha⁻¹ (25-m-Raster) bei einem Flächenumfang von 100 ha (LIST, 2013). Die Datenbereitstellung erfolgte als ASCII-Textdatei im Gauss-Krüger-Streifen-4-Koordinatensystem.

3.3.3 Chemische Bodenuntersuchungen

In KAPE et al. (2009: 8ff) sind die Bestimmungen der Bodenprobenahme festgelegt und wurden bereits in Kapitel 2.2 ausführlich dargestellt. Die Bestimmung des pH-Wertes von Acker- und Grünland ist durch die VDLUFA-Methode A.5.1.1. gesetzlich festgelegt. In der Probenaufbereitung wird die Bodenprobe getrocknet und auf 2 mm gesiebt. Davon werden 10 g eingewogen und in einem Verhältnis von 1:2,5 mit einer 0,01 mol l⁻¹ Calciumchloridlösung gerührt. Nach einer Stunde Reaktionszeit und zweimaligen umrühren wird mittels eines pH-Messgerätes die Analyse des pH-Wertes vorge-

nommen (VDLUFA, 1991). Die Vorgehensweisen zur Bestimmung von Phosphor und Kalium sind in der VDLUFA-Methode A.6.2.1.1 und für Magnesium in der Methode A.6.2.4.1 festgelegt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass alle Methoden ein Extraktionsmittel verwenden (für Phosphor und Kalium: Calcium-Acetat-Lactat-Lösung, Magnesium: Calciumchloridlösung).

3.3.4 Simulierte herkömmliche Bodenbeprobungen

Für den Vergleich der Ergebnisse zwischen den hochaufgelösten und herkömmlichen Bodenbeprobungen erfolgten keine separaten Beprobungen nach der herkömmlichen Methodik. Für die Versuchsdurchführung hätte sich ein erheblich höherer Zeit- und Kostenaufwand ergeben, der in einer deutlich geringeren Versuchsfläche gemündet wäre.

Der Vergleich zwischen den hochaufgelösten und herkömmlichen Bodenbeprobungen erfolgte anhand simulierter Beganglinien mit der empfohlenen Anzahl von ca. 20 Einzeleinstichpunkten nach der guten fachlichen Praxis. Die Beganglinien wurden angelehnt an das beschriebene Vorgehen nach dem Standpunkt der VDLUFA (2000a) vorgeplant. Mit der interpolierten pH-Wert-Karte als Ergebnis der hochaufgelösten Bodenbeprobung des Verissensors erfolgt eine Verknüpfung mit den Einzeleinstichpunkten. Für die Beganglinien konnten die deskriptiven Statistikparameter Mittelwert, Minimal-/Maximalwert und die Standardabweichung bestimmt werden. In der Abb. 3-10 ist das Beispiel einer simulierten Beganglinie im 1-ha-Raster dargestellt.

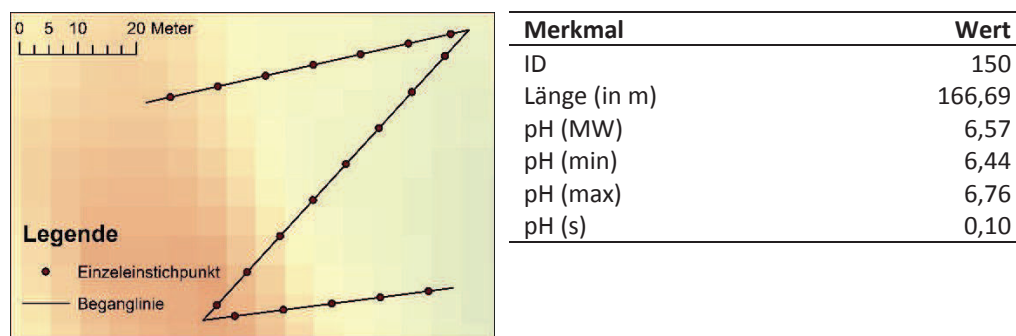


Abb. 3-10: Simulierte Beganglinie im 1-ha-Raster

3.3.5 Digitale Karten der Bodenschätzung

Die Bodenschätzung geht auf das im Jahr 1934 erlassene Gesetz zur Schätzung des landwirtschaftlichen Kulturbodens (BODSCHÄTZG, 2007: § 1 Abs. 1) zurück und hat als Hauptziel, eine einheitliche Bewertungsgrundlage zur Besteuerung landwirtschaftlicher Flächen zu schaffen. Weitere nichtsteuerliche Ziele liegen in der Anwendung der Ergebnisse der Bodenschätzung für die Agrarordnung, den Bodenschutz und in Bodeninformationssystemen. Instrumente der Bodenschätzung sind die Schätzungsrahmen für Ackerland und Grünland (BODSCHÄTZG, 2007: § 3). Nach denen werden die Nutzungsart und die Bodeneigenschaften festgelegt. Für das Ackerland werden mit der Bodenart, Zustandsstufe und Entstehungsart Bodenklassen definiert, die mit Wertzahlen hinterlegt sind. Sollten die natürlichen Ertragsbedingungen von den Normalbedingungen abweichen, können anhand der Ackerzahl prozentuale Zu- bzw. Abschläge erfolgen. Mit kleinen Abweichungen gilt das beschriebene Verfahren auch für Grünland (BODSCHÄTZG, 2007: § 4). Falls sich die natürlichen Ertragsbedingungen zum heutigen Zeitpunkt geändert haben, ist eine Nachschätzung der Flächen erforderlich (§ 11).

Die Digitalisierung der Karten der Bodenschätzung ist in den Bundesländern unterschiedlich weit fortgeschritten. Für die betreffenden Praxisschläge in Sachsen liegen keine digitalen Karten der Bodenschätzung vor, während für Sachsen-Anhalt die Digitalisierung der Bodenschätzung weitgehend flächendeckend vorhanden ist. Für die betreffenden Versuchsflächen in Sachsen-Anhalt konnten die digitalen Karten als Shape-Dateien über das Landesamt für Geologie und Bergwesen bezogen werden.

3.4 Ableitungen der Heterogenitätsindikatoren zu merkmals-homogenen Karten

In den folgenden Kapiteln werden die methodischen Vorgehensweisen zur Erstellung merkmals-homogener Zonen auf Basis der Heterogenitätsindikatoren vorgestellt.

3.4.1 Mehrjährige Ertragskarte

Für die Auswertung der Ertragskarten in der vorliegenden Arbeit werden die Methoden von BLACKMORE (2000) und BLACKMORE et al. (2003) verwendet, die auf Untersuchungen von LARSCHIED et al. (1997: 895ff) basieren. Sie bilden auch die Grundlage der Publikationen von ANUAR et al. (2008), FOUNTAS et al. (2004), GEMTOS et al. (2005), GODWIN et al. (2003), GRENDÖRFFER und GEBBERS (2001: 31ff), LEITHOLD (2006), PEREZ-QUEZADA et al. (2003), PING und DOBERMANN (2005) sowie DA SILVA (2006). SCHNEIDER (2009) lehnt sich an die Methodik von BLACKMORE et al. (2003) an und wird auf ihre Eignung zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte in der vorliegenden Arbeit geprüft.

3.4.1.1 Mehrjährige Ertragskarte nach BLACKMORE (2000)

BLACKMORE (2000: 37ff) differenziert bei der Auswertung von Ertragskarten zwei Fälle. Fall 1 setzt voraus, dass in jedem Jahr dieselbe Fruchtart angebaut wurde (Einheitliche Fruchtart im Untersuchungszeitraum). Wurde mehr als eine Fruchtart angebaut, kommt die Auswertung nach der zweiten Methodik zur Anwendung (Mehrere Fruchtarten im Untersuchungszeitraum).

Fall 1: Einheitliche Fruchtart im Untersuchungszeitraum

Im ersten Schritt wird eine **räumliche Trendkarte („spatial trend map“)** erzeugt. Dazu werden die Ertragskarten der Einzeljahre auf ein einheitliches Raster (10x10 m) interpoliert und der Mittelwert nach Formel 3-1 berechnet (BLACKMORE, 2000: 39).

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{t=1}^n y_{it}}{n} \quad \text{F. 3-1}$$

mit

\bar{y}_i	-	Durchschnittsertrag der Rasterzelle i
y_{it}	-	Ertrag der Rasterzelle i im Jahr t
n	-	Anzahl der Erntejahre

Als Stabilitätskriterium wird im zweiten Schritt der Variationskoeffizient nach Formel 3-2 für jeden Rasterpunkt i berechnet. Die daraus erzeugte Karte definiert BLACKMORE (2000: 40) als **zeitliche Stabilitätskarte („temporal stability map“)**.

$$CV_i = \frac{\left(\frac{n \sum_{t=1}^{t=n} y_{it}^2 - (\sum_{t=1}^{t=n} y_{it})^2}{n(n-1)} \right)^{0,5}}{\bar{y}_i} \times 100 \quad \text{F. 3-2}$$

mit

CV_i - Variationskoeffizient der Rasterzelle i

Die beiden berechneten Kenngrößen können zu einer **Klassifizierungskarte („classified management map“)** zusammengefasst und in drei Zonen eingeteilt werden: stabile Hohertragszone, stabile Niedrigertragszone und instabile Zone. Die Grenzen der Ertragszonen sind für den Fall 1 und 2 in Tab. 3-2 dargestellt. Um die verschiedenen Methoden zu vergleichen, wird die instabile Zone in eine Hoch- und Niedrigertragszone unterschieden.

Fall 2: Mehrere Fruchtarten im Untersuchungszeitraum

Für den zweiten Fall schlägt BLACKMORE (2000: 39) eine Standardisierung der Erträge der Einzeljahre auf den Mittelwert vor. Zur Anwendung kommt dabei die Formel 3-3.

$$s_i = \left(\frac{y_i}{\bar{y}} \right) \times 100 \quad \text{F. 3-3}$$

Mit den standardisierten Erträgen können ähnlich wie im Fall 1 mit den Formeln 3-4 und 3-5 eine **räumliche Trendkarte**, eine **zeitliche Stabilitätskarte** und eine **Klassifizierungskarte** erstellt werden.

$$\bar{s}_i = \frac{\sum_{t=1}^n s_{it}}{n} \quad \text{F. 3-4}$$

und

$$CVs_i = \frac{\left(\frac{n \sum_{t=1}^{t=n} s_{it}^2 - (\sum_{t=1}^{t=n} s_{it})^2}{n(n-1)} \right)^{0,5}}{\bar{s}_i} \times 100 \quad \text{F. 3-5}$$

In der Tabelle 3-2 sind die Grenzen der möglichen Ertragszonen dargestellt.

Tabelle 3-2: Klassengrenzen der Ertragszonen (verändert nach BLACKMORE, 2000: 41)

Bezeichnung der Ertragszone	Fall 1: Eine Fruchtart		Fall 2: Mehrere Fruchtarten	
	Ertragsniveau	Stabilitätskriterium	Ertragsniveau	Stabilitätskriterium
hoch - stabil	$\bar{y}_i > Y$	$CV_i < 30$	$\bar{y}_i > Y$	$CVs_i < 30$
hoch - instabil	$\bar{y}_i > Y$	$CV_i > 30$	$\bar{y}_i > Y$	$CV_i > 30$
niedrig - stabil	$\bar{y}_i < Y$	$CV_i < 30$	$\bar{y}_i < Y$	$CVs_i < 30$
niedrig - instabil	$\bar{y}_i < Y$	$CV_i > 30$	$\bar{y}_i < Y$	$CVs_i > 30$

3.4.1.2 Mehrjährige Ertragszone nach BLACKMORE et al. (2003)

Ähnlich der Methodik im vorangestellten Kapitel wird im ersten Schritt eine **räumliche Trendkarte** erzeugt. Grundlage sind die interpolierten Ertragskarten der Einzeljahre auf ein einheitliches Raster

von 20 x 20 m. Als Differenzierung homogener Ertragszonen schlagen BLACKMORE et al. (2003: 456) Klassengrenzen von 1 t ha⁻¹ vor. Die Berechnung der **zeitlichen Stabilität** der Ertragspunkte erfolgt in zwei Schritten.

Um den Effekt „guter“ und „schlechter“ Erntejahre besser darzustellen, werden in einem Diagramm die Häufigkeitsverteilungen der Einzeljahre dargestellt. Dieser als **Jahreseffekt („inter-year offset“)** bezeichnete Effekt soll die Differenz der Durchschnittserträge besser demonstrieren.

Mit dem zweiten Kriterium der zeitlichen Stabilität wird eine **zeitliche Varianzkarte** erstellt. Dazu werden die Jahreseffekte der interpolierten Ertragspunkte mit der Formel 3-6 eliminiert.

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{t=1}^{t=n} (Y_{ti} - \bar{Y}_t)^2}{n} \quad \text{F. 3-6}$$

mit

- σ_i^2 - Zeitliche Varianz der Rasterzelle *i*
- \bar{Y}_t - Durchschnittsertrag des Schlags im Erntejahr *t*
- Y_{ti} - Ertrag der Rasterzelle *i* im Jahr *t*
- n* - Anzahl der Erntejahre

Für eine bessere Interpretation der Ergebnisse nach Formel 3-6 ist es möglich, durch radizieren die zeitliche Standardabweichung σ zu berechnen. Die Einheiten entsprechen dann t ha⁻¹. BLACKMORE et al. (2003: 457) definieren für die berechneten Kenngrößen folgende Klassengrenzen (s. Tab. 3-3):

Tab. 3-3: Klassengrenzen der Ertragszonen (BLACKMORE et al., 2003)

Bezeichnung der Ertragszone	Ertragsniveau	Stabilitätskriterium
hoch - stabil	$\bar{y}_i > Y$	$\sigma < 1 \text{ t ha}^{-1}$
hoch - instabil	$\bar{y}_i > Y$	$\sigma > 1 \text{ t ha}^{-1}$
niedrig - stabil	$\bar{y}_i < Y$	$\sigma < 1 \text{ t ha}^{-1}$
niedrig - instabil	$\bar{y}_i < Y$	$\sigma > 1 \text{ t ha}^{-1}$

3.4.1.3 Mehrjährige Ertragskarte nach Schneider (2009)

SCHNEIDER (2009) entwickelt die von BLACKMORE et al. (2003) vorgestellte Methodik weiter. Für eine bessere Vergleichbarkeit werden die Erträge der Einzeljahre mit dem Getreideeinheitenschlüssel vereinheitlicht. Als Grenze des Ertragsniveaus dienen die Durchschnittserträge der neuen Bundesländer als Grundlage, die umgerechnet in Getreideeinheiten (TLL, 2006, s. Anhang A3-4-1-3), 67,17 dt ha⁻¹ entsprechen. Im ersten Schritt wird nach Formel 3-7 die **räumliche Trendkarte** auf Basis der Erträge in Getreideeinheiten erzeugt.

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{t=1}^n y_{it}}{n} \quad \text{F. 3-7}$$

mit

- \bar{y}_i - Durchschnittsertrag der Rasterzelle *i*
- y_{it} - Ertrag der Rasterzelle *i* im Jahr *t*
- n* - Anzahl der Erntejahre

Die zeitliche Stabilität wird ähnlich nach Formel 3-6 berechnet, jedoch mit einer kleinen Abweichung (siehe Formel 3-8, Änderung ist rot markiert). Damit wird die Varianz der Rasterzelle *i* nicht auf den

Durchschnittsertrag des Schlages im Erntejahr t bezogen, sondern auf den Durchschnittsertrag der Rasterzelle i über alle Erntejahre (SCHNEIDER, 2009: 28).

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{t=1}^{t=n} (Y_{ti} - \bar{Y}_i)^2}{n} \quad \text{F. 3-8}$$

mit

σ_i^2	-	Zeitliche Varianz der Rasterzelle i
\bar{Y}_i	-	Durchschnittsertrag der Rasterzelle i über alle Erntejahre
Y_{ti}	-	Ertrag der Rasterzelle i im Jahr t
n	-	Anzahl der Erntejahre

Aus der zeitlichen Varianz ist es wiederum möglich, durch Radizieren die zeitliche Standardabweichung (in GE ha^{-1}) und damit den Variationskoeffizienten CV_i zu berechnen (s. Formel 3-9). SCHNEIDER (2009: 29) definiert als Grenze der **zeitlichen Stabilität** einen Variationskoeffizienten von 25 %.

$$CV_i = \frac{\sigma_i}{\bar{y}_i} \times 100 \quad \text{F. 3-9}$$

3.4.2 Höhe und Topographic Wetness Index

Eine weitere Schlageinteilung erfolgt in höhenhomogene Zonen mit dem „*natural-breaks*“-Algorithmus (JENKS UND CASPALL, 1971). Dieser Algorithmus minimiert die Varianz innerhalb der gebildeten Klassen. Aus den Daten der geografischen Höhe können primäre und sekundäre Reliefattribute berechnet werden. Zu den primären Reliefattributen zählen z.B. die Neigung, Exposition, Vertikal- und Horizontalkrümmung sowie die Tangentialkrümmung. Die Berechnungen der Parameter erfolgt durch die Auswertung der Nachbarschaftsbeziehungen in einer 3×3 - Matrix (SCHMIDT, 2003: 55).

Sekundäre Reliefattribute werden aus mehreren primären Reliefattributen kombiniert oder daraus berechnet. Dazu zählt u.a. der Topographic Wetness Index (TWI), der maßgeblich durch BEVEN und KIRKBY (1979) entwickelt wurde. Das Konzept des TWI beruht auf der Hypothese, dass die räumliche Verteilung der Bodenfeuchte durch die Topografie beeinflusst wird. Dafür wird angenommen, dass Niederschlagswasser oberflächennah verbleibt und durch das Relief der Topografie entsprechend in niedergelegene Regionen des Schlages verläuft. Grundlage der Berechnung des TWI ist die Hangneigung und das spezifische Einzugsgebiet der untersuchten Rasterzelle (s. Formel 3-10). Der TWI nimmt in konvergierenden Geländebereichen mit keiner oder einer geringen Hangneigung hohe Werte an. Die Umsetzung der Berechnung erfolgt mit dem „Spatial Analyst“ in ARCGIS (2009) (SCHMIDT, 2003: 58).

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \alpha}\right) \quad \text{F. 3-10}$$

mit

A_s	-	Spezifische Einzugsgebiet
α	-	Hangneigung

wichtige Grundannahmen:

- Konstante Infiltrationsrate im Untersuchungszeitraum
- Homogene Bodenpermeabilität

- Steady-state Zustand ist erreicht, d.h. oberflächennaher Zu-/Abfluss ist für jede Zelle beobachtbar

3.4.3 Scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens wird zur Teilschlagabgrenzung ebenfalls nach dem „natural-breaks“-Algorithmus nach JENKS und CASPALL (1971) klassifiziert.

3.5 Verwendete statistische Verfahren zur Datenauswertung

Die Auswahl der statistischen Methoden erfolgt nach dem von VORBERG und BLANKENBERGER (1999) entwickelten Entscheidungsbaum.

3.5.1 Methodenvergleich

Die statistischen Verfahren des Methodenvergleichs sollen die Präzision und Richtigkeit der Ergebnisse von Messungen an identischen Objekten bestimmen. Grundlegende Voraussetzungen für die Durchführung eines Methodenvergleiches sind Messungen an **identischen** Objekten und der Ausschluss der gegenseitigen Einflussnahme der Messmethoden. Durch die Verwendung eines Extraktionsmittels zur Gewinnung der Aliquoten bei der Labormethode, müssen die Messungen des pH-Sensors somit zeitlich vor den Messungen der Labormethode erfolgen (KROMIDAS, 1999: 23ff).

3.5.1.1 Korrelationskoeffizienten nach *Pearson* und *Lin*

Pearsonscher Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmaß

Als klassisches statistisches Instrument zur Messung eines linearen Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalsausprägungen ist der Korrelationskoeffizient (r) nach Pearson geeignet. Der Koeffizient kann Werte zwischen - 1 und + 1 annehmen, was einem negativen bzw. positiven funktionalen linearen Zusammenhang entspricht. Kein Zusammenhang zwischen den beiden Merkmalsausprägungen besteht, wenn der Korrelationskoeffizient den Wert Null annimmt. Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten erfolgt nach der folgenden Gleichung (SACHS, 2003: 519):

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad \text{F. 3-11}$$

Für eine ausführliche Beschreibung des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten sei auf SACHS (1993: 118ff) sowie einführende Literatur wie KÖHLER et al. (2002: 51ff) verwiesen.

Aus dem Pearsonschen Korrelationskoeffizienten lässt sich das Bestimmtheitsmaß nach F. 3-12 ableiten. Das Bestimmtheitsmaß ist eine zusätzliche Maßzahl zur Messung der Stärke des Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalsausprägungen X und Y. Es kann Werte zwischen 0 und + 1 annehmen. Für ein r von 0,75 beträgt das dazugehörige Bestimmtheitsmaß (R^2) 0,56. Eine verbale Interpretation dazu wäre: Die Veränderung von Y lässt sich zu 56 % durch die Variation von X erklären (KÖHLER et al., 2002: 55).

$$R^2 = r^2 \quad \text{F. 3-12}$$

Linscher Konkordanz-Korrelationskoeffizient

Der Konkordanz-Korrelationskoeffizient (r_{CCC}) nach LIN (1989) misst ähnlich wie der Pearsonsche Korrelationskoeffizient den Grad des linearen Zusammenhangs zweier Merkmalsausprägungen X und Y. Er berücksichtigt dabei jedoch die Abweichung von der Übereinstimmungslinie im X-Y-Diagramm. Mögliche Abweichungen können durch Lokations- und Skalenshift auftreten, die in Abb. 3-11 beispielhaft dargestellt sind.

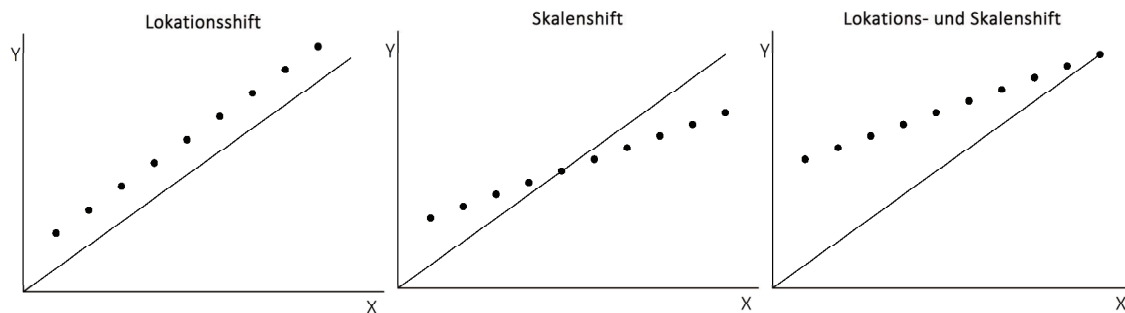


Abb. 3-11: Beispiel für Lokationsshift, Skalenshift und die Kombination von Lokations- und Skalenshift

Die Korrektur des Konkordanz-Korrelationskoeffizienten erfolgt durch einen Strafterm, der die Abweichung von der Übereinstimmungslinie beachtet. LIN (1989: 258) definiert folgende Formel:

$$r_{CCC} = \frac{2S_{12}}{S_1^2 + S_2^2 + (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2)^2} \quad \text{F. 3-13}$$

mit

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{ij}$$

$$S_j^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2$$

$$j = 1, 2$$

Die in der Abb. 3-11 dargestellten Beispiele möglicher Abweichungen stellen jeweils einen linearen Zusammenhang dar. Eine Analyse nach beiden vorgestellten Methoden führt zu den Ergebnissen, dass der $r_{PEARSON}$ für alle drei Beispiele einen Wert von 1,00 annimmt, trotz unterschiedlicher Arten der Abweichungen. Erwartungsgemäß niedriger sind die Werte für den r_{CCC} mit 0,60 (Fall a), 0,84 (b) und 0,87 (c).

3.5.1.2 Bland-Altman-Plot

BLAND und ALTMAN (1986) stellten 1986 erstmals eine einfache grafische Analyse eines Methodenvergleichs vor. Ziele eines Methodenvergleiches sind Aussagen zur Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen zwei Messmethoden an identischen Objekten. Mithilfe des Bland-Altman-Plots lässt sich der methodeninterne Messfehler bestimmen, der durch wiederholte Messungen einer Methode an identischen Objekten zu beobachten ist (GROUVEN et al., 2007: 71). Im Bland-Altman-Plot werden die Differenzen und die Mittelwerte aus den nach beiden Methoden bestimmten Messergebnissen für die identischen Objekte dargestellt. Die ermittelten Differenzen werden auf der Ordinate und die dazugehörigen Mittelwerte auf der Abszisse des Diagramms abgetragen. In der Abb. 3-12 ist ein Beispiel dargestellt.

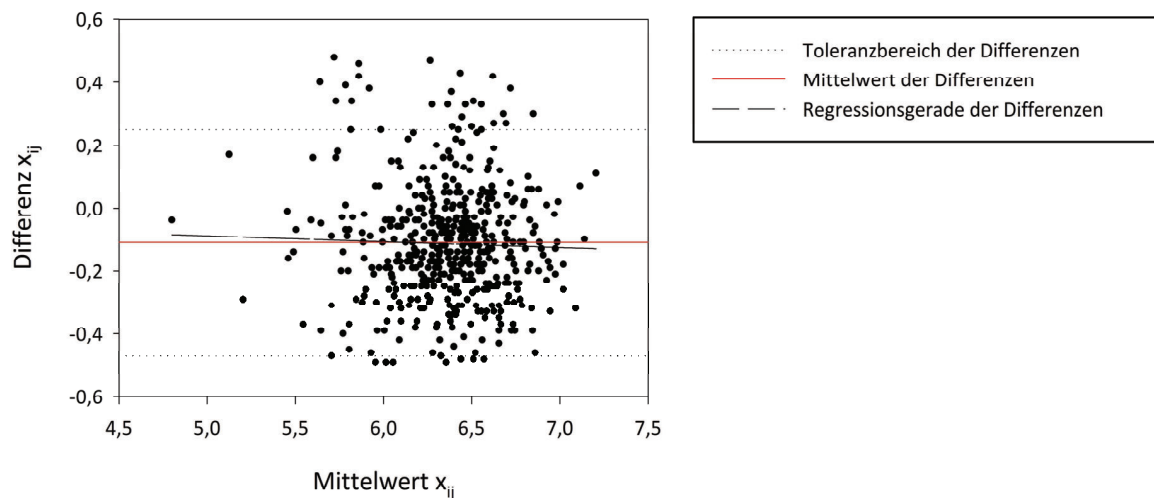


Abb. 3-12: Beispiel eines Bland-Altman-Plots

Die Analyse des Bland-Altman-Plots für das dargestellte Beispiel untersucht einen möglichen Trend der Differenzen der Wertepaare x_{ij} in Abhängigkeit von der Größe der Mittelwerte von x_{ij} . Dazu wird eine Regression der „Differenzen auf den Mittelwert“ durchgeführt, die in der Abb. 3-12 durch die gestrichelte Linie dargestellt ist. Der Regressionskoeffizient b der linearen Regressionsfunktion drückt dabei die Stärke des Trends der Differenzen aus. Der Wert des Regressionskoeffizienten b beträgt $-0,01$ bei einem p-Wert von $0,47$ und ist damit nicht signifikant verschieden von Null. Damit ist kein Trend der Differenzen mit zu- oder abnehmenden Mittelwert für die Einzelwerte feststellbar. In der weiteren Analyse wird mit dem gepaarten t-Test untersucht, ob die mittlere Differenz verschieden von Null ist. Für das angeführte Beispiel beträgt die mittlere Differenz $-0,11$, die in der Abb. 3-12 mit der roten Linie dargestellt ist. Die Nullhypothese („Die mittlere Differenz zwischen den Ergebnissen beider Methoden ist Null.“) muss mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% bei einem p-Wert von $0,001$ verworfen werden. Mit nachstehender Formel wird die mittlere Differenz (\bar{d}) berechnet:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad \text{F. 3-14}$$

Die in der Abb. 3-12 mit gepunktet markierten Linien stellen die Übereinstimmungsgrenzen dar, in denen 95% der Werte liegen. Für das Beispiel ergibt sich ein Bereich von $-0,47$ bis $+0,24$, d.h. dass die erste Methode in 95% der Fälle einen Wert misst, der bis zu $0,47$ Einheiten kleiner bzw. bis zu $0,24$ Einheiten größer ist als der Messwert, der mithilfe der zweiten Methode 2 ermittelt wurde. Die Berechnung der Übereinstimmungslinien erfolgt nach der Formel 3-15:

$$\text{obere/untere Grenze} = \bar{d} \pm 1,96 * s \quad \text{F. 3-15}$$

mit

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}}$$

Das ermittelte statistische Intervall innerhalb der Übereinstimmungsgrenzen sollte kleiner sein als das zulässige fachliche Intervall. Ist diese Bedingung erfüllt, sind beide Methoden austauschbar (BLAND und ALTMAN, 1986: 307ff).

3.5.1.3 Fehlermaße

Neben den allgemein bekannten deskriptiven Lage- und Streuungsmaßen, wie dem Mittelwert oder der Standardabweichung, gibt es weitere geeignete Maße zur Beschreibung von Differenzen. Unter dem Begriff „Differenzen“ wird hierbei die Differenz zwischen einer beobachteten und einer prognostizierten Größe an identischen Objekten verstanden. Ebenso zählt die Differenz zwischen den Messergebnissen zweier Methoden dazu.

Der **Mean Error (ME)** zeigt die Tendenz der Differenzen an (QUAAS, 2009: 4). Seine Berechnung erfolgt mit der Formel 3-15, die der allgemeinen Formel zur Berechnung des Mittelwerts entspricht.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad \text{F. 3-15}$$

mit

$$\begin{array}{ll} y_i & - \text{ Gemessener Wert } i \\ \hat{y}_i & - \text{ Prognostizierter Wert } i \end{array}$$

Mit dem **Mean Absolute Error (MAE)** werden die absoluten Differenzen zur Berechnung verwendet. Damit wird ein Vergleich mehrerer Prognosen, z.B. durch unterschiedliche Regressionsmodelle, mit der beobachteten Größe möglich. Der MAE ist definiert nach Formel 3-16 (QUAAS, 2009: 5):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad \text{F. 3-16}$$

Der **Root Mean Square Error (RMSE)** quadriert die Differenzen und gewichtet damit Ausreißer stärker als kleinere Abweichungen. Wenn der RMSE und der MAE den gleichen Wert annehmen, dann besitzen alle Differenzen exakt den gleichen Wert. Aus dem RMSE lässt sich der **Mean Square Error (MSE)** ableiten, der der Summe der Abweichungsquadrate entspricht. Die Formeln 3-17 und 3-18 beschreiben die Fehlergrößen (QUAAS, 2009: 6).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad \text{F. 3-17}$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{F. 3-18}$$

Für alle angeführten Fehlermaße gilt, je näher sie gegen Null gehen, desto treffsicherer und genauer sind die Prognosen bzw. die Messergebnisse beider Methoden. Bis auf den MSE liegen die Fehlermaße in den Einheiten der untersuchten Ausgangsgröße vor. Der MSE und der RMSE sind ähnlich zu interpretieren wie die Varianz und die Standardabweichung.

3.5.1.4 Boundary-Line Methode

Die Boundary-Line Methode wurde erstmals von WEBB (1972: 309ff) beschrieben, indem in einem Streudiagramm die Punktwolke von einer Grenzlinienfunktion umhüllt wird. Damit kann der Einfluss

der unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable gemessen werden, während Punkte unterhalb der Grenzlinie durch andere limitierende Faktoren beeinflusst wurden. Für die Ermittlung der Grenzlinienfunktion bestehen verschiedene Ansätze von BLACK und ABRAMS (2003: 1739ff), BLANCO-MACÍAS et al. (2009: 219), LEWANDOWSKI und SCHMIDT (2006: 339), SCHMIDT et al. (2000: 122), SCHNUG et al. (1994: 899ff) sowie SHATAR und McBRATNEY (2004: 556ff), die im Wesentlichen der gleichen Methodik folgen. Als Grundlage für die Auswertung der Ertrags-pH-Beziehungen dienen die Vorgehensweisen von SCHMIDT et al. (2000), BLANCO-MACÍAS et al. (2009) und SCHNUG et al. (1994).

Schritt 1: Äquidistante Klassenbildung

Die Klassenbildung erfolgt unter der Berücksichtigung einer ausreichenden Anzahl von Punkten innerhalb der Stichprobe einer Klasse und der genügenden Anzahl von Stützpunkten für die Ermittlung der Grenzlinienfunktion. Dazu erfolgt eine äquidistante Klassenbildung mit einem pH-Abstand von 0,2 pH-Einheiten. Ein größerer Klassenabstand führt gerade im hohen pH-Wert Bereich der Gehaltsklassen D und E zur Verwischung der Klassengrenzen, da deren Klassenbreiten sehr gering sind (SCHMIDT et al., 2000: 122).

Schritt 2: Ermittlung der Stützpunkte für die Berechnung der Grenzlinienfunktion

Zur Berechnung der Stützpunkte der Grenzlinienfunktion werden aus jeder Klasse die zehn höchsten Werte ermittelt und eine Mittelwertbildung vorgenommen. BLACK und ABRAMS (2003: 1741) zeigen, dass mit der Perzentilmethode für Klassen mit einer großen Stichprobe in den 99%-Perzentil zu viele valide Ergebnisse ausgeschlossen werden und der Stützpunkt nicht annähernd den Wert des limitierenden Einflusses der unabhängigen Variablen repräsentiert. Währenddessen kann für kleine Klassen z.T. nur ein Wert die Stichprobe repräsentieren.

Schritt 3: Anpassung der Grenzlinienfunktion und Ermittlung des optimalen Bereiches

Eine polynomiale Grenzlinienfunktion 4. Grades (F. 3-19) ermöglicht den Anstieg auf beiden Seiten des Maximums zu berechnen (SCHNUG et al., 1994: 903). Die Umsetzung erfolgt mit SIGMA PLOT 11.0.

$$y = y_0 + a * x + b * x^2 + c * x^3 + d * x^4 \quad \text{F. 3-19}$$

mit

y	-	Abhängige Variable
y_0	-	Konstante
x	-	Unabhängige Variable

Die Ermittlung eines optimalen Bereichs der unabhängigen Variable berechnen BLANCO-MACÍAS et al. (2009: 220) ausgehend vom Maximum der abhängigen Variable, indem die Grenzen der unabhängigen Variable so gewählt werden, dass das Intervall 95 % des Maximalwertes umfasst.

3.5.1.5 t-Test für verbundene Stichproben

Der t-Test für verbundene Stichproben untersucht den Effekt einer Behandlung an identischen Objekten. Dazu wird die Differenz der Messwertepaare gebildet und geprüft, ob der Mittelwert der Differenz Null ist (Nullhypothese). Der t-Test setzt voraus, dass die Differenzen normalverteilt und unabhängig sind (SACHS, 1993: 80). Liegen nichtnormalverteilte und unabhängige Differenzen vor, dann ist der Vorzeichentest für gepaarte Beobachtungen anzuwenden.

3.5.1.6 Anpassung mittels regressionsanalytischen Verfahren

Für die Anpassung der Ergebnisse des Verissensors an die Ergebnisse der Labormethodik werden zwei regressionsanalytische Verfahren geprüft.

Least-Square-Methode (LS)

Die Ermittlung einer linearen Regressionsgerade (F. 3-20) mit der *Least-Square-Methode* („Methode der kleinsten Quadratsumme“) erfolgt nach dem Prinzip der Minimierung der quadratischen Abweichung A_y (F. 3-21).

$$y = a_{yx} + b_{yx} * x \quad \text{F. 3-19}$$

mit

y	-	Abhängige Variable
x	-	Unabhängige Variable
a_{yx}	-	Regressionskonstante
b_{yx}	-	Linearer Regressionskoeffizient

und

$$A_y = \sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2 \rightarrow \min \quad \text{F. 3-20}$$

mit

A_y	-	Summe der quadratischen Abweichungen
y_i	-	Empirischer Wert
Y_i	-	Theoretischer Wert

Mit dem Einsetzen von F. 3-19 in F3-20 ergibt sich F. 3-21. Daraus geht hervor, dass die Summe der Abweichungen als eine Funktion von a_{yx} und b_{yx} abhängig ist (FÖRSTER und EGERMAYER, 1966: 56ff).

$$A_y = \sum_{i=1}^n (y_i - a_{yx} - b_{yx}x_i)^2 \rightarrow \min \quad \text{F. 3-21}$$

Eine tiefere Einführung in die Regressionsanalyse nach der *LS-Methode* ist in den Standardwerken der Statistik (z.B. SACHS, 2003) gegeben.

Passing-Bablok-Regression (PB)

Die Regressionsanalyse nach der Methode von PASSING und BABLOK (1983) sollte vor allem bei Methodenvergleichen Anwendung finden, da die Anforderung an die Stichprobenverteilung geringer ist und ein Messfehler im Vergleich zur *LS-Methode* mit einbezogen werden kann. In Methodenvergleichen kommt es oft vor, dass die abhängige und die unabhängige Variable fehlerbehaftet und nicht normal verteilt sind.

Folgende Annahmen treffen PASSING und BABLOCK (1983):

- x, y stammen von einer stetigen kontinuierlichen Verteilung
- ϑ, ε zufällige Fehlerterme mit gleichem Verteilungstyp
- $\sigma_{\vartheta}^2, \sigma_{\varepsilon}^2$ Varianzen von ϑ, ε müssen nicht konstant über den Untersuchungsbereich sein, jedoch ein proportionales Verhältnis zeigen mit $\frac{\sigma_{\varepsilon}^2}{\sigma_{\vartheta}^2} = \beta^2$
- Ausreißer sind keine Messfehler und werden nicht eliminiert

Der Ansatz von PASSING und BABLOCK (1983: 710ff) setzt einen linearen Zusammenhang zwischen der abhängigen und unabhängigen Variable voraus, der in Formel F. 3-22 beschrieben ist.

$$y_i^* = \alpha + \beta x_i^* \quad \text{F. 3-22}$$

Die Bestimmung des Regressionskoeffizienten β erfolgt nach THEIL (1950) mit F. 3-23. Dazu werden aus $\binom{n}{2}$ -Wertepaaren die Steigungsparameter S_{ij} berechnet und nach zunehmender Größe sortiert (F. 3-24).

$$S_{ij} = \frac{y_i - y_j}{x_i - x_j} \quad \text{F. 3-23}$$

für $1 \leq i < j \leq n$

$$S_{ij(1)} \leq S_{ij(2)} \leq \dots \leq S_{ij(m)} \quad \text{F. 3-24}$$

Der Median der ermittelten Steigungsparametern S stellt die Regressionskoeffiziente β dar. Als Randbedingung werden $S_{ij} < -1$ nicht beachtet und der Median verschiebt sich entsprechend um die Anzahl der nicht berücksichtigten Fälle. Weitere Sonderfälle werden in PASSING und BABLOCK (1983: 712ff) beschrieben. Die Schätzung der Regressionskonstante α erfolgt mit F. 3-25. Mit den ermittelten Parametern werden je 50 % der Wertepaare ober- und unterhalb durch die Regressionsgerade getrennt.

$$a = \text{med} \{y_i - \beta x_i\} \quad \text{F. 3-25}$$

Bei einem Methodenvergleich werden die Hypothesen $\alpha = 0$ und $\beta = 1$ geprüft. Wird $\alpha = 0$ abgelehnt, besteht zwischen beiden Methoden ein Bias, d.h. ein konstanter Fehler tritt auf. Ein proportionaler Fehler tritt auf, wenn $\beta = 1$ abgelehnt werden kann. Bei der Nichtablehnung beider Hypothesen sind die untersuchten Methoden austauschbar.

Die Anwendung der Passing-Bablok-Regression erfolgt mit dem Statistikprogramm BIAS (2012). Weitere grundlegende Einführungen werden in den Arbeiten von PASSING und BABLOCK (1983), HAECKEL und PASSING (1985) sowie in BABLOCK und PASSING (1985) geboten.

3.5.2 Erstellung interpolierter Karten unter Verwendung geostatistischer Verfahren

Precision-Farming-Technologien zeichnen sich dadurch aus, dass sie neben dem beobachteten Merkmal a die georeferenzierten Koordinaten x , y , z dokumentieren. Oft liegen jedoch die Informationen des Merkmals a in einem unsystematischen punktuellen Raster vor. Zur Erstellung flächendeckender Karten müssen die punktuellen Informationen auf ein einheitliches Raster interpoliert werden. Dazu stehen verschiedene geostatistische Verfahren zur Verfügung, die auf der **Theorie der regionalisierten Variablen** beruhen. Merkmalsgebend für eine regionalisierte Variable ist die räumliche Verteilung der beobachteten Größe a im Raum x mit ihren Koordinaten x , y , z . Allgemein gilt die Formulierung $a(\mathbf{x})$ als regionalisierte Variable (DUTTER, 1985: 13). Grundlegende Arbeiten dazu wurden von MATHERON (1971) veröffentlicht. Die Theorie der regionalisierten Variable beruht auf der Annahme, dass im untersuchten Beobachtungsraum x , nahe beieinander liegende Beobachtungen ähnlicher sind als weiter voneinander entfernte Punkte (AKIN und SIEMES, 1988: 27).

Die Abhängigkeit oder Korrelation zwischen den Realisationen des untersuchten Merkmals a in dem Beobachtungsraum x wird durch ein **Variogramm** bestimmt. Für die Berechnung wird die Semivarianz $\lambda(h)$ (halbe, mittlere quadratische Differenz) zwischen äquidistanten Punkten berechnet (s. Formel 3-26). Ist eine Abhängigkeit der Differenzen von der Richtung des Abstandsvektors (h) zu beobachten, spricht man von **Anisotropie**, andernfalls liegt bei **Isotropie** keine Richtungsabhängigkeit

vor. Aus dem Variogramm lässt sich durch die Beobachtungen ein theoretisches Modell der Abhängigkeit benachbarter Punkte ableiten. Ab einem bestimmten Abstand (**range**) zwischen den Beobachtungspaaren geht die Semivarianz im Normalfall gegen einen Schwellenwert (**sill**), der auch als statistische Varianz bezeichnet wird. Ab dem **range** gelten die Beobachtungen unabhängig voneinander. Die im Ursprung beobachtbare und modellierte Varianz wird als Klumpeneffekt oder **Nuggeteffekt** bezeichnet. Die Unstetigkeit kann nicht durch wiederholbare Messungen erklärt werden, da für einen Beobachtungspunkt nur eine einzige beobachtbare Merkmalsausprägung vorliegt. Zwei Ursachen können die Höhe des Nuggeteffekts beeinflussen: Einerseits kann eine mögliche Variabilität im Mikroraum vorliegen oder andererseits ein Messfehler die Variabilität verursachen. Auf eine detaillierte Einführung in das Thema der Geostatistik, insbesondere zur Theorie der regionalisierten Variable und den verschiedenen Interpolationsverfahren, soll an dieser Stelle jedoch verzichtet werden. Eine allgemeine Einführung geben AKIN und SIEMES (1988) sowie DUTTER (1985), während in WEBSTER und OLIVER (2007) die Anwendung der geostatistischen Verfahren für umweltwissenschaftliche Untersuchungen beschrieben ist.

$$\lambda(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad \text{F. 3-26}$$

In der vorliegenden Arbeit werden die Interpolationen mit Kriging im „Geostatistical Analyst“ im ARCGIS (2009) durchgeführt. Die Güte der Interpolation wird mit fünf Kenngrößen für den Vorhersagefehler gemessen, deren Werte durch die Modellanpassung gegen die Zielwerte (s. Tab. 3-4) streben sollen (ESRI, 2001: 18). Wichtige Parameter zur Modelloptimierung sind:

- Anzahl der lags
- Größe der lags
- Funktionsart der Variogrammfunktion (exponentiell, sphärisch, kreisförmig, etc.)
- Aniso- oder Isotropie der Variogramme
- Größe der Suchnachbarschaft

Tab. 3-4: Zielwerte einer Modellanpassung zur Interpolation

Kenngröße für den Vorhersagefehler	Zielwert (Optimierungsbedingung)
Mean	gegen 0
Root-Mean-Square	0 (minimal)
Average Standard Error	gegen den Wert des Root-Mean-Square
Mean Standardized	0 (minimal)
Root-Mean-Square Standardized	gegen 1

3.5.3 Evaluierung der Heterogenitätsindikatoren als Eignung zur Abgrenzung nährstoffhomogener Zonen

Für die Berechnung der Varianz innerhalb einer Zone kommt Formel 3-27 zur Anwendung (FRAISSE et al., 2001: 159):

$$S_Z^2 = \frac{1}{n_Z} \sum_{i=1}^{n_Z} (Y_i - \bar{Y}_Z)^2 * \frac{n_Z}{n_T} \quad \text{F. 3-27}$$

mit

S_Z^2	-	Gewichtete Varianz der Zone Z
Y_i	-	Beobachteter Wert des Merkmals Y in der Rasterzelle i
\bar{Y}_Z	-	Beobachteter Mittelwert des Merkmals Y in der

		Zone Z
n_Z	-	Anzahl der Rasterzellen in der Zone Z
n_T	-	Anzahl der Rasterzellen für den kompletten Schlag

Mit der Gleichung 3-27 kann durch die Summenbildung der Varianzen innerhalb der Zonen das am besten angepasste Verfahren gewählt werden, indem die Summe der Varianzen innerhalb der Zonen minimal ist.

$$S_T^2 = S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_Z^2 \quad \text{F. 3-27}$$

mit

$$S_T^2 \quad - \quad \text{Summe der Varianzen innerhalb der Zonen}$$

3.6 Determinanten der Wirtschaftlichkeit der Precision-Farming-Verfahren

WAGNER (2004: 6-31ff) beschreibt die Determinanten der Wirtschaftlichkeit für Verfahren im Precision Farming wie folgt:

- Investitionsbedarf für Precision Farming
- Betriebsgröße und Anbaufläche
- Heterogenität des Standortes und Intensität der Düngung
- Anteil und Umfang der Fruchtarten im Produktprogramm
- Effizienz des Precision Farming Ansatzes
- Organisation des Technikeinsatzes
- Produkt- und Faktorpreisverhältnis / Subventionen
- Ausmaß der Reduktion des Ertragsrisikos
- Managementfähigkeiten des „Bedienpersonals“ (Arbeitszeitbedarf / Wissen)

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Precision Farming Technologien können z.T. keine allgemeingültigen Annahmen getroffen werden. Als Beispiel kann der Arbeitsbedarf für die Einführung bzw. Nutzung von Verfahren des Precision Farmings angeführt werden. Während SCHMERLER (2001: 28) von einer zusätzlichen Arbeitskraft ausgeht, kann LISSO (2003: 1143) die Einsparung einer Arbeitskraft feststellen. Weiterhin ist die Effizienz des Precision Farming Ansatzes stark abhängig von der Heterogenität des Standortes, die zu höheren Mehrgewinnen bzw. Einsparungen von Produktionsfaktoren führen kann. Dazu empfiehlt WAGNER (2004: 6-40) die Durchführung von betriebsspezifischen On-Farm-Experimenten, um die Eignung der Precision-Farming-Technologien auf dem eigenen Standort zu bewerten.

In der vorliegenden Arbeit besteht das grundlegende Problem, dass der Einfluss der Kalkdüngung einen langjährigen Einfluss hat. Einjährige Experimente führen zu Fehlinterpretationen. SCHILLING (2000: 283, 378ff) weist zudem auch darauf hin, dass die Extraktion der Entscheidungsregeln für die Kalkdüngung ein langjähriges, mehrortiges Versuchswesen benötigt. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in der vorliegenden Arbeit werden deshalb nach Formel 3-28 die Gesamtkosten der untersuchten Verfahren ermittelt. Diese setzen sich aus den Verfahrenskosten (F. 3-29), den fehlallokierten Kalkkosten (F. 3-30), dem entgangenen Nutzen des Phosphoreffektes (F. 3-31) und den erwarteten Ertragsdepressionen (F. 3-32) zusammen. Auf eine Diskontierung wird verzichtet, da die getroffenen Annahmen eine gewisse Toleranz der ökonomischen Ergebnisse erwarten lässt, deren Einfluss auf das ökonomische Ergebnis deutlich höher ist als der Einfluss einer Diskontierung.

Der Untersuchungszeitraum erstreckt sich über einen Zeitraum von sechs Jahren, der gesetzlich als längster Zeitraum für den Untersuchungszeitraum der Bodenbeprobungen zugelassen ist (DÜNGEVER-

ORDNUNG, 2017). Für die Untersuchungen werden Fruchtfolgen betriebsspezifisch simuliert und dafür eine einmalige Kalkung zu Beginn des Zeitraums angenommen.

$$K_i = V_i + L_i + P_i + Y_i \quad \text{F. 3-28}$$

mit

K_i	-	Gesamtkosten (€ ha ⁻¹)
V_i	-	Verfahrenskosten (€ ha ⁻¹)
L_i	-	Fehlallokierte Kalkkosten (€ ha ⁻¹)
P_i	-	Phosphoreffekt (€ ha ⁻¹)
Y_i	-	Erwartete Ertragsdepressionen (€ ha ⁻¹)
i	-	Verfahren der Bodenbeprobung

Die Kostenarten werden in den Formeln 3-29 bis 3-32 detailliert beschrieben.

3.6.1 Zeitliche Entwicklung des pH-Wertes durch Kalkung und natürliche Bodenversauerung

Die Modellierung der zeitlichen Entwicklung des pH-Wertes unter der Berücksichtigung einer Kalkdüngung wird von vielen Einflussfaktoren wie z.B. des Niederschlags oder des Einsatzes versauernd wirkender Dünger bestimmt. Für die natürliche Bodenversauerung wird eine jährliche Absenkung des pH-Wertes um 0,1 pH-Einheit angenommen, von der ROWELL (1997: 271) berichtet. Anhand der Entscheidungsregeln der Kalkdüngung wird die zu erwartende Entwicklung des pH-Wertes unter einer Kalkdüngung abgeleitet (VON WULFFEN et al., 2007: 14ff). Es wird dabei unterstellt, dass der Kalkdünger zwei Jahre nach der Düngung vollständig umgesetzt und wirksam ist. Als beispielhafte Darstellung beträgt für die Bodengruppe IV (Humusgehalt < 4 %) die Differenz der CaO-Gaben zwischen benachbarten pH-Werten der Gehaltsklassen A und B ca. 600 kg CaO ha⁻¹. In dem Modell würden damit erhöhte CaO-Gaben, die nicht zum Optimum führen würden, zu dementsprechend höheren pH-Werten führen.

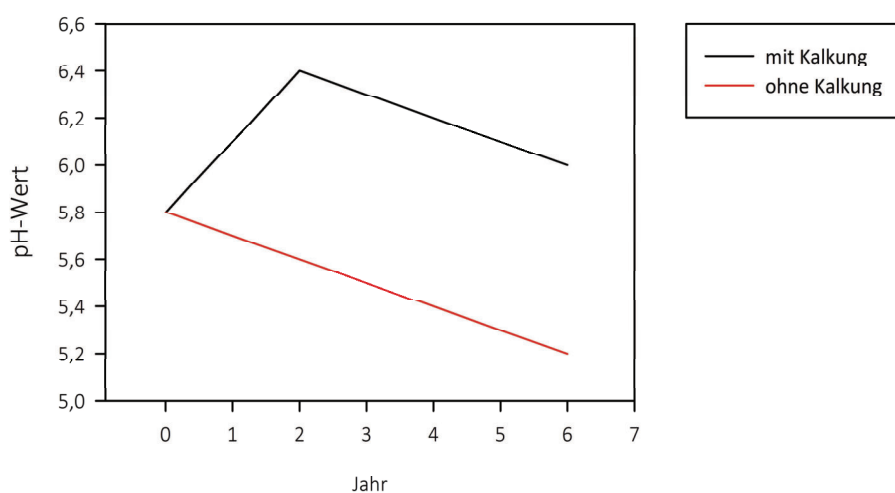


Abb. 3-13: Zeitliche Entwicklung des pH-Wertes unter dem Einfluss der Kalkung und der natürlichen Bodenversauerung

3.6.2 Fruchtfolge, Ertragserwartungen, Produkt- und Faktorpreise

Die erwarteten Zielderträge der Fruchtarten werden von den Betriebsleitern der Standorte übernommen. Eine Szenarien-Berechnung auf Basis von Durchschnittserträgen der amtlichen Statistik wäre fehlerbehaftet, weil deren Erträge durch heterogene teilflächenspezifische pH-Wert-Verteilungen beeinflusst sein könnten. Die Produktpreise werden als dreijähriges Preismittel von HAMM et al.

(2013) und BEIL (2010, 2011, 2012) abgeleitet. Für den Phosphatpreis wird der dreijährige Durchschnittspreis aus den monatlichen Veröffentlichungen der AMI (2010, 2011, 2012, 2013) in den wöchentlich erscheinenden Ausgaben der BAUERNZEITUNG (2010, 2011, 2012, 2013) berechnet. In der Tabelle 3-5 sind die Kalkulationsgrundlagen zusammengefasst, die Grundlagen der dreijährigen Durchschnittspreise für Phosphat und Kalk sind im Anhang A3-6-2 enthalten.

Tab. 3-5: Kalkulationsgrundlagen für die Szenario-Berechnungen

<i>Fruchtarten</i>	Erwarteter Zilertrag (in dt ha ⁻¹)	Reinnährstoffgehalt (in %)	Dreijähriger Preis (in € t ⁻¹)	Dreijähriger Preis (€ kg ⁻¹ -Nährstoff)	Quelle
Sommergerste	65	-	19,89	-	[1] S. 51, Tab. 2.1.10
Wintergerste	85	-	15,69	-	[1] S. 51, Tab. 2.1.10
Winterraps	45	-	34,94	-	[1] S. 54, Tab. 2.2.2.
Winterroggen	90	-	19,17	-	[1] S. 51, Tab. 2.1.10
Winterweizen	90	-	18,45	-	[1] S. 51, Tab. 2.1.10
Zuckerrüben	700	-	4,40	-	[2], [3], [4] je S. 33
Düngerart					
Triplephosphat	-	20,00	434,22	2,165	[5]
Kohlensaurer Kalk (85 % CaCO ₃)	-	47,60	21,33	0,045	[5]

[1] HAMM et al. (2013), [2] BEIL (2010), [3] BEIL (2011), [4] BEIL (2012), [5] AMI (2010 bis 2013) in BAUERNZEITUNG (2010 bis 2013)

3.6.3 Verfahrenskosten

Zu den Verfahrenskosten (F. 3-29) zählen die klassischen Kosten für die Entnahme und Analyse der Bodenproben. Weiterhin werden die Kosten zur Beschaffung der Datengrundlage der Heterogenitätsindikatoren und die Kosten für deren Aufbereitung durch notwendige Fachkenntnisse dazurechnet. Es wird außerdem angenommen, dass aufgrund des speziellen Einsatzspektrums des pH-Sensors die Bodenbeprobungen als Dienstleistung in Anspruch genommen wird.

$$V_i = K_{pH} + n_{Beprobungsdichte} * (p_{Entnahme} + p_{Analyse}) + K_{Daten} + K_{Aufbereitung} \quad \text{F. 3-29}$$

mit

V_i	-	Verfahrenskosten (€ ha ⁻¹)
K_{pH}^1	-	Kosten des pH-Sensors (20 € ha ⁻¹)
$n_{Beprobungsdichte}$	-	Beprobungsdichte (n ha ⁻¹)
$p_{Entnahme}^1$	-	Preis für Bodenprobenentnahme (7,90 € n ⁻¹)
$p_{Analyse}^2$	-	Preis für pH-Wert Analyse (2,50 € n ⁻¹)
K_{Daten}	-	Kosten für Datenmaterial des Heterogenitätsindikators (€ ha ⁻¹)
$K_{Aufbereitung}$	-	Kosten für Aufbereitung des Heterogenitätsindikators (5 € ha ⁻¹)

¹AGRI CON (2011), ²LAUE (2010)

Die Kosten für das Datenmaterial der Heterogenitätsindikatoren betragen:

- Scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens: 7,00 € ha⁻¹ (HERBST, 2004a: 3.2-38)
- Karten der Bodenschätzung: 10,00 € ha⁻¹ (HERBST, 2004c: 3.2-26)
- DGM-Höhendaten des Landesvermessungsamts: 0,30 € ha⁻¹ (MENTZEL, 2011)

3.6.4 Fehlallokierte Kalkkosten

Aus den Kalkapplikationskarten der Klassifizierungen der Heterogenitätsindikatoren und der Kalkapplikationskarte des Verissensors, deren optimale Kalkverteilung zu einem optimalen pH-Wert

führt, können die fehlallokierten Kalkkosten berechnet werden. Die fehlallokierten Kalkkosten setzen sich aus den überdüngten Mengen und dem Kalkpreis zusammen (F. 3-30).

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^n ((q_i - q_{pH}) * p_K * a_j)}{a} \quad \text{F. 3-30}$$

mit

L_i	-	Fehlallokierte Kalkkosten (€ ha ⁻¹)
q_i	-	Empfohlene Kalkgabe des <i>i</i> -ten Verfahren (t ha ⁻¹)
q_{pH}	-	Optimale Kalkgabe nach dem pH-Sensor (t ha ⁻¹)
p_K	-	Kalkpreis (€ t ⁻¹)
a	-	Fläche (ha)
a_j	-	Fläche der <i>j</i> -ten Rasterzelle (ha)
j	-	Rasterzelle (ha)

3.6.5 Entgangener Nutzen des Phosphateffektes

Der beobachtete Nebeneffekt der Kalkdüngung auf die Phosphatverfügbarkeit (s. Kap. 2.1) wird in dem Modell berücksichtigt. Dazu werden die Ergebnisse von KERSCHBERGER (1987: 319) umgesetzt und als *entgangener Nutzen des Phosphateffektes* bezeichnet (F. 3-31). Aus den Ergebnissen seiner Untersuchungen entwickelte er eine Faustregel die besagt, dass die Erhöhung des pH-Wertes um eine Einheit den Phosphorgehalt um 1 mg P je 100 g Boden erhöht. Um mit mineralischen Phosphatdüngern eine gleichwertige Erhöhung des Phosphorgehaltes zu erzielen, wäre eine Düngergabe von 100 kg P ha⁻¹ notwendig (FREY und KERSCHBERGER, 2009: 50). Für den ökonomischen Vergleich wird diese Faustregel leicht abgeändert. Innerhalb der Gehaltsklasse C des pH-Wertes ist eine derartige Wechselwirkung nicht vorhanden. Erst durch eine Absenkung des pH-Wertes in die Gehaltsklassen A und B bzw. Erhöhung des pH-Wertes in die Gehaltsklassen D und E tritt die Faustregel in Kraft. Zwar ist die Faustregel nach KERSCHBERGER (1987) für den alkalischen pH-Wert-Bereich der Gehaltsklassen D und E nicht geprüft worden, jedoch ist in der Literatur bekannt, dass eine Phosphatfestlegung in dem relevanten Bereich zu beobachten ist (s. Kap. 2-1). Die Abb. 3-14 stellt den beschriebenen Zusammenhang grafisch dar.

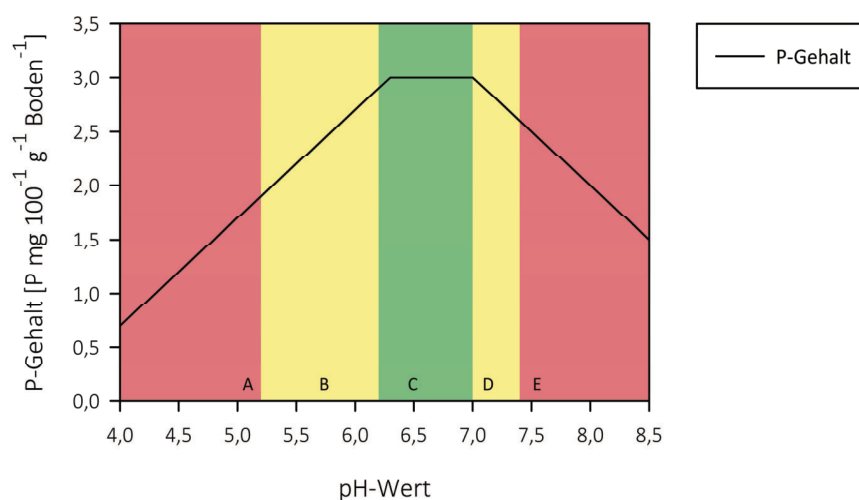


Abb. 3-14: Faustregel der Wechselwirkung zwischen P-Gehalt und pH-Wert nach KERSCHBERGER (1987: 319, verändert)

Die Formel 3-31 stellt den beschriebenen Zusammenhang dar.

$$\begin{aligned}
 P_i = \text{für } pH < C & : \frac{\sum_{j=1}^n (|pH_{akt_i} - pH_{opt}| * 100 * p_P * a_j)}{a} \\
 P_i = \text{für } pH = C & : 0 \\
 P_i = \text{für } pH > C & : \frac{\sum_{j=1}^n (|pH_{akt_i} - pH_{opt}| * 100 * p_P * a_j)}{a}
 \end{aligned}
 \tag{F. 3-31}$$

mit

P_i	-	Entgangene Nutzen des Phosphoreffektes (€ ha ⁻¹)
pH_{akt_i}	-	pH-Entwicklung im dritten Untersuchungsjahr nach dem <i>i</i> -ten Verfahren
pH_{opt}	-	Optimale pH-Entwicklung im dritten Untersuchungsjahr nach dem pH-Sensor
100	-	Umrechnungsfaktor (kg ha ⁻¹)
p_P	-	Phosphorpreis (€ kg ⁻¹)
a	-	Fläche (ha)
a_j	-	Fläche der <i>j</i> -ten Rasterzelle (ha)
j	-	Rasterzelle (ha)

3.6.6 Erwartete Ertragsdepressionen infolge suboptimaler pH-Werte

Aus Ergebnissen zahlreicher Untersuchungen zum Einfluss des pH-Wertes auf den Ertrag sind keine einheitlichen Reaktionen für die Fruchtarten zu beobachten (s. Kapitel 2.1). Teilweise sind Fruchtarten tolerant gegenüber suboptimalen pH-Werten, andererseits reagieren pH-sensitive Fruchtarten mit sehr hohen Ertragsdepressionen. Nach SCHILLING (2000: 384) können kalkanspruchsvolle und -lose Fruchtarten differenziert werden (s. Tab. 3.6).

Tab. 3.6: Fruchtarten nach ihren Kalkansprüchen (teilweise übernommen und ergänzt nach SCHILLING, 2000: 384)

Vorwiegend kalkanspruchsvoll	Vorwiegend kalkanspruchslos
Winter- und Sommergerste	Winter- und Sommerroggen
Winter- und Sommerraps	Kartoffel
Futter- und Zuckerrübe	Hafer
Mais	Winter- und Sommerweizen
Ackerbohne	
Luzerne, Rotklee, Senf	

Es wird vereinfachend angenommen, dass die Ertragsreaktionen innerhalb beider Gruppen gleich sind. Die Abb. 3-15 stellt die Relativerträge für drei Szenarien für die Bodengruppe IV beispielhaft dar. Neben den mittleren zu erwartenden Ertragsdepressionen können auch geringere und stärkere Ertragswirkungen beobachtet werden. Damit wird ein Ergebnisraum aufgespannt, der die vielen unterschiedlichen Ergebnisse der Versuche zum Einfluss der Kalkung oder dem Einfluss des pH-Wertes auf den Ertrag berücksichtigen soll. Gemäß der Theorie des abnehmenden Grenzertrages, sinken typischerweise die Erträge innerhalb der Gehaltsklasse C für beide Gruppen in geringem Maße, erst mit Erreichen der Gehaltsklassen B und D nehmen die Ertragsdepressionen stärker zu. Dazu wurden quadratische Ertragsfunktionen verwendet, deren Parameter für die verschiedenen Bodengruppen im Anhang A3-6-6-1 enthalten sind. Für die Bodengruppen II und III sind die Ertragsreaktionen in den Anhängen A3-6-6-2 und A3-6-6-3 enthalten.

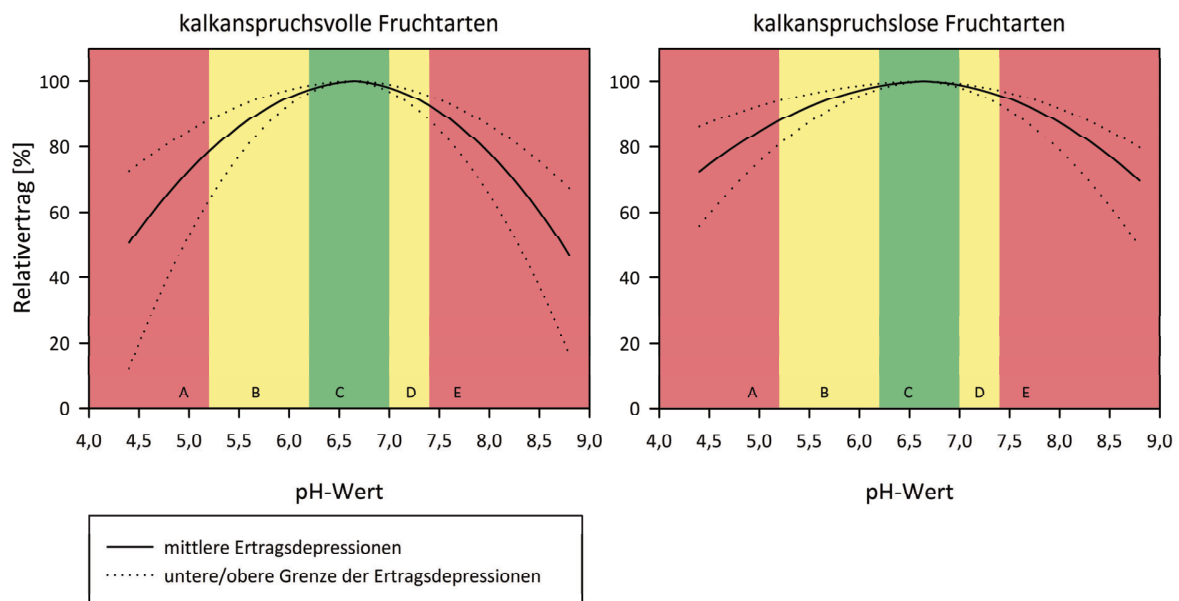


Abb. 3-15: Mittlere zu erwartende Relativerträge und Grenzen der Relativerträge für kalkanspruchsvolle und kalkanspruchslose Fruchtarten (gültig für Bodengruppe IV)

Die zu erwartenden Ertragsdepressionen können als entgangener Nutzen interpretiert werden. Dazu wird die Differenz zwischen dem erwarteten Zielertrag unter einem optimalen pH-Wert und dem mittleren zu erwarteten Ertrag in Abhängigkeit des pH-Wertes anhand der aktuellen Marktpreise der Fruchtarten bewertet. Zum Beispiel wird unter einem optimalen pH-Wert von 6,5 ein Zielertrag im Winterraps von 40 dt ha⁻¹ erwartet, jedoch bei einem pH-Wert von 5,0 tatsächlich nur ein mittlerer Ertrag von 29,2 dt ha⁻¹ realisiert. Die zu erwartenden Ertragsdepressionen induziert durch suboptimale pH-Werte werden in einem Zeitraum von sechs Jahren simuliert. Als Grundlage der Simulationen dienen die pH-abhängigen Ertragsfunktionen (F. 3-32), die in der Abb. 3-15 dargestellt sind. Die drei Szenarien umfassen die geringsten (Best-Case), mittleren und höchsten (Worst-Case) Ertragsdepressionen.

$$Y_i = \sum_{z=1}^6 \left(\frac{\sum_{j=1}^n |Y_{pH_i} - Y_{pH}| * p_F * a_j}{a} \right) \quad \text{F. 3-32}$$

mit

- Y_i - Ertragsdepressionen des *i-ten* Verfahren über den Simulationszeitraum (t ha⁻¹)
- Y_{pH_i} - Erwarteter Zielertrag nach dem *i-ten* Verfahren (t ha⁻¹)
- Y_{pH} - Erwarteter Zielertrag im pH-Optimum (t ha⁻¹)
- p_F - Preis der Fruchtart (€ t⁻¹)
- z - Anbaujahr

4 Ergebnisse

Der Ergebnisteil ist in vier Kapitel untergliedert: Im ersten Kapitel werden die Ergebnisse des Methodenvergleiches zwischen den Messergebnissen des pH-Sensors des Verissensors und der Labormethodik vorgestellt. Das zweite Kapitel stellt die Ergebnisse der Messungen des Kalksteigerungsversuchs dar. Die Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte werden im dritten Kapitel verglichen und geprüft. Im letzten Kapitel erfolgt der ökonomische Vergleich zwischen den untersuchten Verfahren.

4.1 Methodenvergleich zwischen Verissensor und Labormethode zur Messung des pH-Wertes

Für die Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit innerhalb und zwischen den Methoden kommen die nach Kap. 3.5.1 angeführten statistischen Methoden zur Anwendung.

4.1.1 Fehlerquellen innerhalb der Methoden

Die Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit beider Methoden sollen Aussagen darüber geben, inwieweit mögliche Fehlerquellen bei den einzelnen Teilschritten von der Probenahme bis zur Analytik einen Einfluss auf das Endergebnis nehmen. Eine vollständige Methodvalidierung, wie in KROMIDAS (1999) beschrieben, ist aus Zeit- und Kostengründen nicht durchführbar und auch nicht Ziel der vorliegenden Arbeit. Der Methodenvergleich dient zur näheren Einschätzung der Messergebnisse der untersuchten Methoden.

4.1.1.1 Verissensor

Probenahmefehler

Die Probenahme des Verissensors stellt eine Einzeleinstichprobe dar. Es werden punktuell Proben gezogen und sofort gemessen. Damit entfällt ein möglicher Fehlereinfluss der Probenahme.

Wiederholgenauigkeit

Die Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit der Sensormessungen wurden am 10.6.2011 durchgeführt (s. Kap. 3.1.1). Dazu wurden 72 Bodenproben aus Parzellen des Kalksteigerungsversuchs auf dem Julius-Kühn-Feldes zweifach geteilt und mit dem Sensor gemessen. Die Teilung ermöglicht es, Aussagen zur Wiederholgenauigkeit von identischen Bodenproben zu treffen. Der Inhalt des Probenbeutels wurde manuell zugeführt, sodass es zu keiner Verschleppung bzw. Vermischung mit anderen Bodenproben kommen konnte. Die Reihenfolge der Messungen der Bodenproben erfolgte innerhalb eines Probensatzes (bestehend aus 72 Bodenproben) zufällig, um einen Memory-Effekt wie bei SCHIRRMANN et al. (2011: 586) beschrieben, auszuschließen. Nach einer Messzeit von 15 Sekunden wurde der pH-Wert notiert. Die Elektroden wurden im Anschluss jeder Messung für mindestens 5 Sekunden mit Leitungswasser gespült. Im Anschluss daran wurden die 72 Bodenproben des zweiten Probensatzes nach der oben beschriebenen Vorgehensweise mit dem Sensor analysiert. Von den 144 Messwerten mussten 9 aufgrund fehlerhafter Messungen (Differenz zwischen beiden Elektroden größer als 0,5 pH-Einheiten) verworfen werden und es verblieben 63 Wertepaare identischer Bodenproben. In der Tab. 4-1 sind die Ergebnisse und die Korrelations- sowie Fehlermaße zur Wiederholgenauigkeit beschrieben.

Tab. 4-1: Deskriptive Statistik zur Wiederholgenauigkeit der Sensormethode

	Messung 1	Messung 2
pH _{MIN}	6,24	6,17
pH _{25%}	6,62	6,78
pH _{MED}	7,16	7,21
pH _{75%}	7,58	7,73
pH _{MAX}	8,10	8,21
pH _s	0,55	0,57
r_{PEARSON}		0,93
r_{CCC}		0,92
ME		0,10
MAE		0,17
RMSE		0,23

Die Abb. 4-1 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der absoluten und relativen Differenzen der Wiederholgenauigkeit. Im rechten Teil der Abbildung sind die Ergebnisse im X-Y-Diagramm dargestellt.

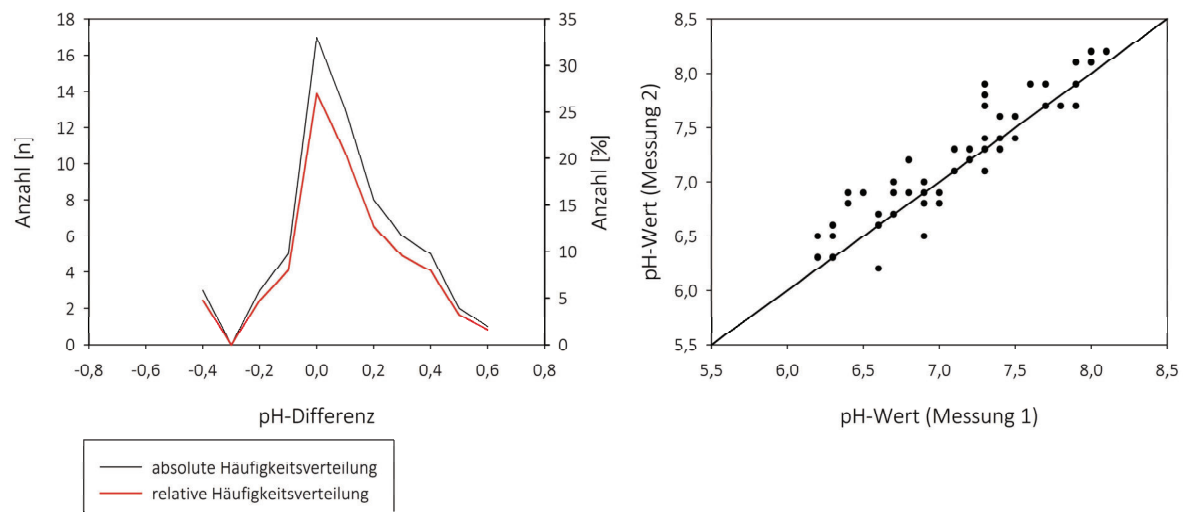


Abb. 4-1: Histogramm der Differenzen und Scatterplot der Ergebnisse der Erst- und Zweitmessung identischer Bodenproben der Sensormethodik

In der Abb. 4-2 ist der Bland-Altman-Plot für die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen des pH-Sensors dargestellt. Der statistische Vertrauensbereich liegt in einem Intervall zwischen + 0,51 bis - 0,32 pH-Einheiten mit einer mittleren pH-Differenz von 0,09 pH-Einheiten. Die mittlere Differenz ist signifikant verschieden von Null. Die Überprüfung der Hypothese, ob mit zu- oder abnehmendem pH-Wert ein Trend der Differenzen vorliegt, kann nach dem empfohlenen Vorgehen nach BLAND und ALTMAN (1986) verworfen werden. Der Regressionskoeffizient b , der als die Steigung der Differenzen in Abhängigkeit des pH-Wertes zu interpretieren ist, beträgt 0,02 (p -Wert = 0,51).

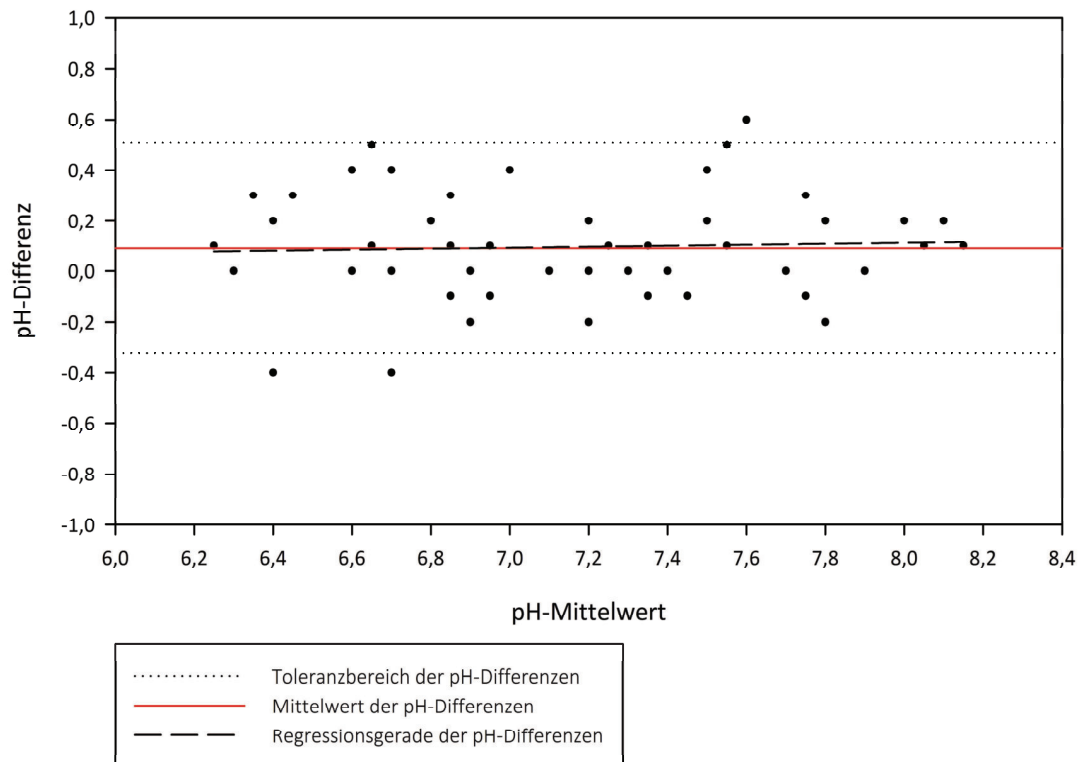


Abb. 4-2: Bland-Altman-Plot der Ergebnisse nach der Sensormethodik

4.1.1.2 Labormethode

Probenahmefehler

Für die Ermittlung des pH-Wertes mit der Labormethodik muss eine Mischprobe eines repräsentativen homogenen Teilstücks eines Schlages gezogen werden. Dazu werden ca. 20 Einzeleinstiche in gleichen Abständen über die Begehungslinie entnommen. Auf dem Versuchsschlag „550“ wurden dazu im Sommer 2011 in 15 Großparzellen je drei wiederholte Entnahmen identischer Begehungslinien vorgenommen. Es kam ein Probenahmefahrzeug zum Einsatz, das mit Hilfe von GPS-Technik die Begehungslinien wieder finden und beproben konnte. In der Abb. 4-3 sind die Begehungslinien und ein Ausschnitt der Einzeleinstiche der Begehungslinien dokumentiert.

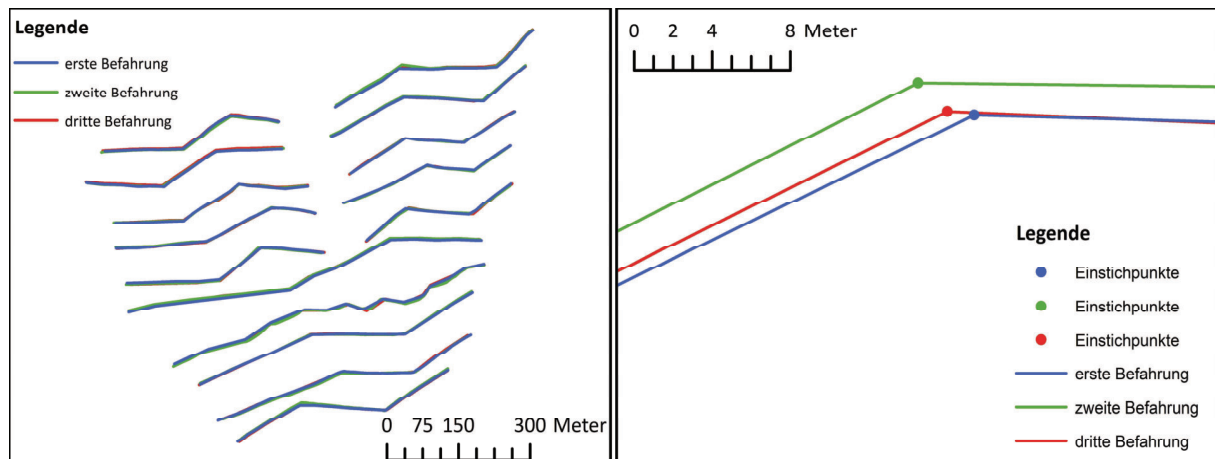


Abb. 4-3: Dreifache Probenahme identischer Begehungslinien und Ausschnitt an Einzeleinstichen

In der Abb. 4-4 sind die Häufigkeitsverteilungen der Differenzen dargestellt. Der Mittelwert der Differenzen liegt bei 0,02 pH-Einheiten mit einer Standardabweichung von 0,19 pH-Einheiten. Für die Fehlermaße MAE und RMSE können 0,13 und 0,19 pH-Einheiten festgestellt werden.

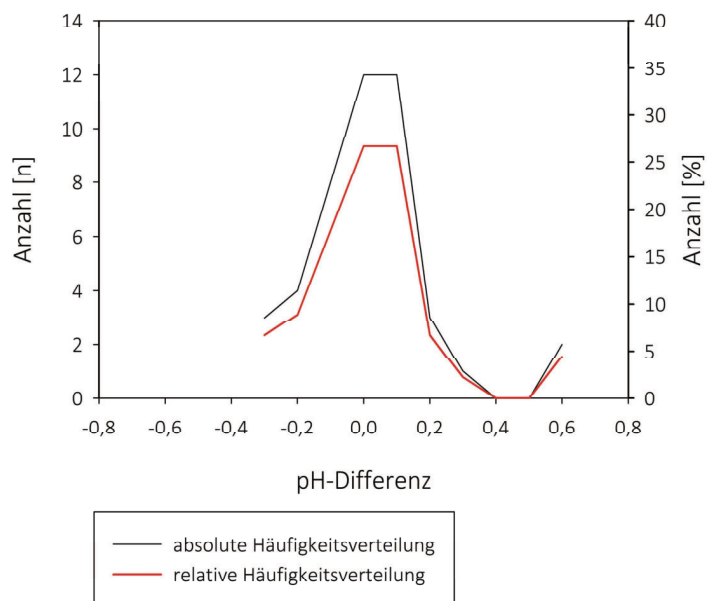


Abb. 4-4: Häufigkeitsverteilungen der Differenzen des Probennahmefehlers

Wiederholgenauigkeit

Die im Labor verbliebenen Rückstellmuster der Standorte Starsiedel, Althen und dem Julius-Kühnfeld wurden nach 4 Wochen wiederholt untersucht. Dafür wurden die Probenbeutel vor der Zweituntersuchung randomisiert, um ein Abgleichen der Ergebnisse zwischen der Erst- und Zweitbeurteilung zu verhindern. Insgesamt standen 154 Proben zur Verfügung. In der Tab. 4-2 sind die Ergebnisse beider Messreihen angeführt.

Tab. 4-2: Deskriptive Statistik zur Wiederholgenauigkeit der Labormethode

	Zeitpunkt 1	Zeitpunkt 2
pH _{MIN}	3,80	3,80
pH _{25%}	5,50	5,50
pH _{MED}	6,10	6,20
pH _{75%}	6,78	6,88
pH _{MAX}	7,50	7,40
pH _s	0,81	0,82
r _{PEARSON}		0,84
r _{CCC}		0,84
ME		-0,03
MAE		0,25
RMSE		0,46

In der Abb. 4-5 sind die Häufigkeitsverteilungen der Differenzen (a) und die Ergebnisse der Wiederholungsgenauigkeit (b) grafisch dargestellt.

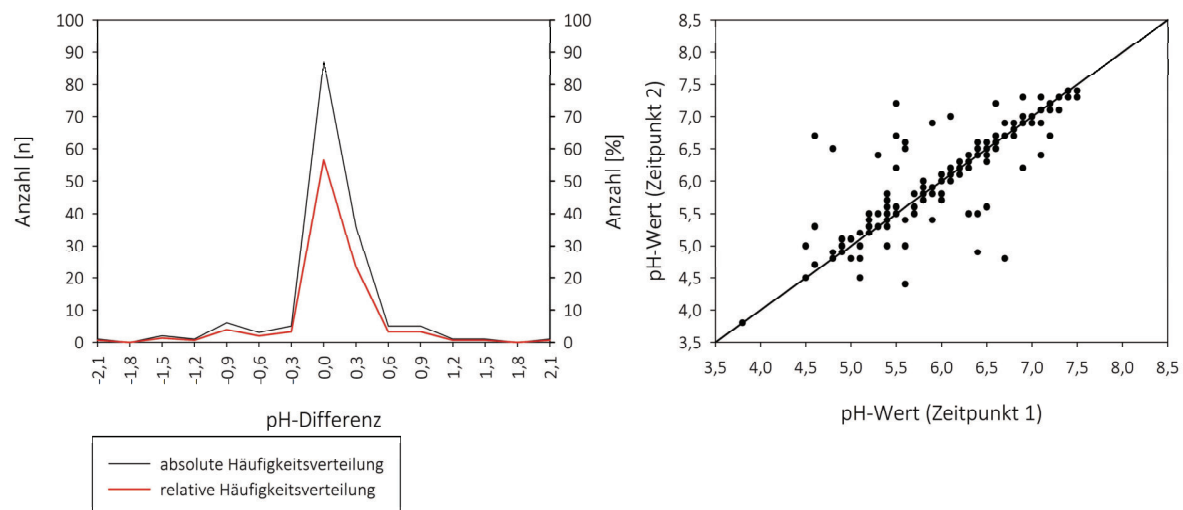


Abb. 4-5: Histogramm der Differenzen und Scatterplot der Ergebnisse der Erst- und Zweitmessung identischer Bodenproben der Labormethodik

Durch die Fehlermaße wird deutlich, dass die Labormethode ähnlich fehlerbehaftet ist wie die Sensormethodik. Aus dem Bland-Altman-Plot in Abb. 4-6 geht hervor, dass keine signifikante Steigung der Differenz mit zu- oder abnehmenden pH-Wert vorliegt ($b = 0,00$; p -Wert = $0,90$). Der Vergleich des Toleranzbereiches (+ 0,87 bis - 0,94 pH-Einheiten) zum Toleranzbereich der Sensormethodik zeigt, dass die Labormethodik für Wiederholungsbeprobungen einen größeren Spielraum zulässt und damit eine höhere Unsicherheit birgt.

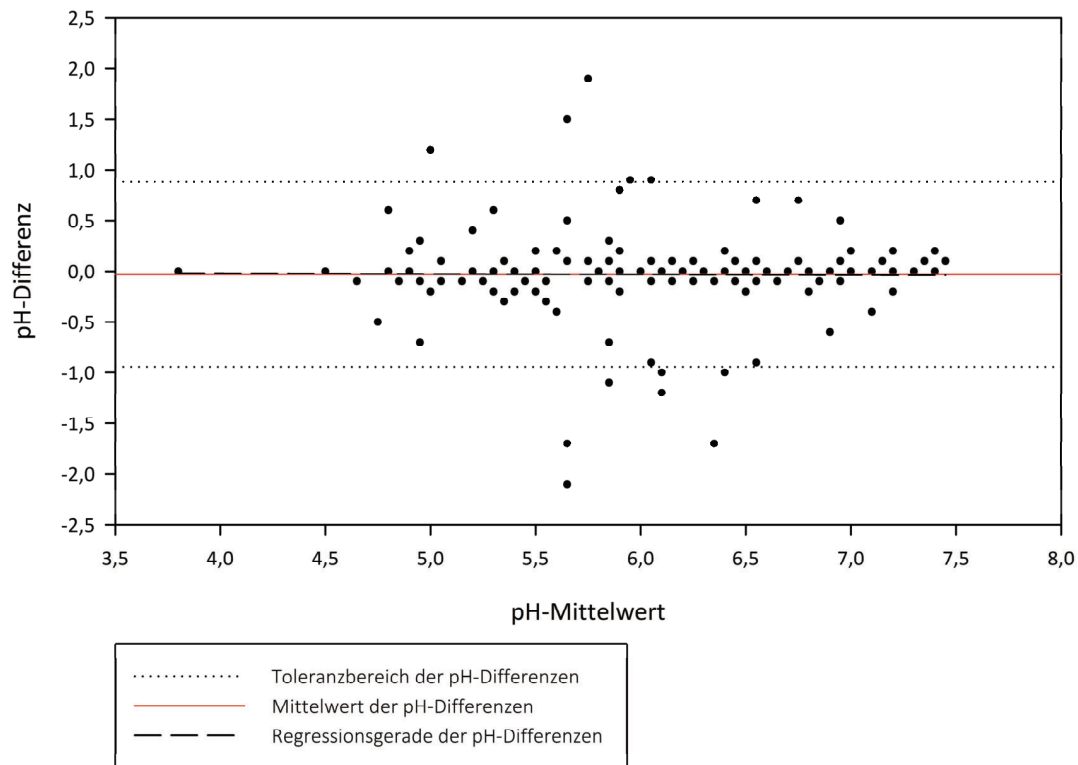


Abb. 4-6: Bland-Altman-Plot für die Labormethodik

4.1.2 Genauigkeit zwischen den Methoden

Anhand der Bodenproben des Kalksteigerungsversuches des Julius-Kühn-Feldes erfolgten die Untersuchungen des Methodenvergleichs zur Bestimmung des pH-Wertes nach der Labormethodik und des pH-Sensors. Von den 72 Bodenproben, die zur Verfügung standen, mussten 6 aufgrund einer zu hohen Differenz zwischen beiden Elektroden des Verissensors verworfen werden. In der Abb. 4-7 sind die Ergebnisse beider Methoden für die identischen Bodenproben (a) und der Bland-Altman-Plot (b) dargestellt.

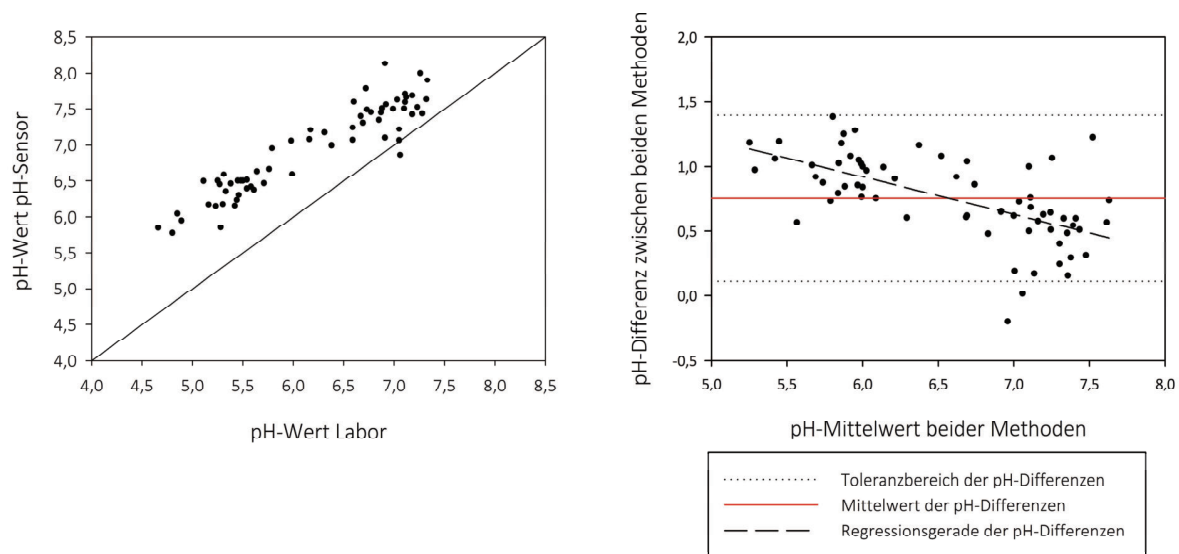


Abb. 4-7: Ergebnisse der Labor- und Sensormethodik für identische Bodenproben und Bland-Altman-Plot

Aus der Abbildung 4-7 geht hervor, dass der pH-Wert identischer Bodenproben in der Messung des Verissensors gegenüber der Labormethodik deutlich überschätzt wird. Der ermittelbare statistische Vertrauensbereich des Bland-Altman-Plots liegt zwischen + 0,11 und + 1,39 pH-Einheiten, bei einer mittleren Differenz von 0,75 pH-Einheiten. Zwischen beiden Methoden ist ein signifikanter Trend der Differenz mit zunehmenden pH-Wert feststellbar ($b = - 0,29$; $p < 0,001$). Die statistischen Maßzahlen der Messreihen beider Methoden sind in Tabelle 4-3 im ersten Teil wiedergegeben. Im zweiten Teil der Tabelle sind die Fehlermaße und die Korrelationskoeffizienten des Methodenvergleiches angeführt.

Tab. 4-3: Statistische Kennzahlen und Beurteilungskriterien des Methodenvergleiches an identischen Bodenproben

	Sensor	Labor	Differenz
pH _{MIN}	5,78	4,66	-0,20
pH _{25%}	6,46	5,45	0,57
pH _{MED}	7,06	6,35	0,76
pH _{75%}	7,48	6,92	1,01
pH _{MAX}	8,14	7,33	1,39
pH _s	0,61	0,81	0,33
r_{PEARSON}		0,93	
r_{CCC}		0,57	
ME		0,77	
MAE		0,77	
RMSE		0,83	

4.1.3 Algorithmus zur Kalibrierung des Verissensors

Anhand der Ergebnisse aus Kapitel 4.1.2 sowie aus Ergebnissen von Untersuchungen anderer Autoren (s. Kap. 2.4) wird deutlich, dass die Rohdaten des Verissensors den Ergebnissen der Labormethodik angepasst werden müssen, um die Anwendung der Entscheidungsregeln der Kalkdüngung zu ermöglichen. An die Kalibrierung werden dazu folgende Anforderungen gestellt:

- Praktikabilität, d.h. einfache und logische Vorgehensweise unter Feldbedingungen

- Präzise und richtige Anpassung
- Ökonomisch vertretbarer Mehraufwand
- Untersuchungen identischen Probenmaterials nach beiden Methoden
- Kein zeitlicher Versatz zwischen Feldmessungen und Kalibrierung

Während der Feldmessungen werden durch die herstellereigene Software die Rohdaten der gemessenen pH-Werte in eine Text-Datei geschrieben. Die Datei enthält u.a. die geografischen Koordinaten, die einzelnen Messwerte der Elektroden sowie deren Mittelwert. Mit Hilfe des GIS-Programms ARCGIS (2009) kann die Datei nach der Feldmessung eingelesen werden und als Grundlage der Kalibrierung genutzt werden. Fehlerhafte Messpunkte mit ungünstigen GPS-Koordinaten oder einer größeren Differenz von 0,50 pH-Einheiten zwischen beiden Elektroden werden gelöscht. Im Anschluss werden die Messpunkte nach aufsteigendem mittleren pH-Wert sortiert. Die Auswahl von Kalibrierproben erfolgt unter der Berücksichtigung, dass beginnend von dem kleinsten pH-Wert in einem Abstand von ca. 0,20 pH-Einheiten eine gleichverteilte Anzahl von Messpunkten bis zum größten pH-Wert vorhanden ist. Die Tabelle 4-4 stellt die Vorgehensweise beispielhaft dar.

Tab. 4-4: Beispiel für die Auswahl von Proben zur Kalibrierung des Verissensors

Nummer	Longitude	Latitude	pH (Elektrode 1)	pH (Elektrode 2)	pH (MW beid. El.)	Auswahl
n	Grad	Grad	pH	pH	pH	Ja/Nein
1	12,4607249	50,8210245	5,31	5,39	5,35	Ja
2	12,4569525	50,8202747	5,37	5,43	5,40	Ja
3	12,4555107	50,8208609	5,49	5,61	5,55	Ja
4	12,4536487	50,8206537	5,50	5,70	5,60	Nein
5	12,4517037	50,8201557	5,73	5,65	5,69	Nein
6	12,4504712	50,8197827	5,80	5,68	5,74	Ja
...						
723	12,4500951	50,8191544	7,16	7,30	7,23	Ja
724	12,4500937	50,8189792	7,39	7,29	7,34	Nein
725	12,4505605	50,8188574	7,30	7,46	7,38	Nein
726	12,4516208	50,8190354	7,32	7,48	7,40	Ja

Die verbleibenden Messpunkte stellen die Grundlage der Kalibrierung dar. In einer zweiten Befahrung mit dem Verissensor werden exakt diese Punkte angefahren und nochmals beprobt, allerdings mit dem Unterschied, dass die Bodenproben manuell der Messsensorik zugeführt werden. Nach dem Messvorgang kann die Bodenprobe in einem Probenahmebeutel aufbewahrt und im Labor analysiert werden. Auf diese Weise kann der Einfluss eines möglichen pH-Gradienten mit zunehmender Tiefe und dem Einfluss der Mikrovariabilität weitgehend ausgeschlossen werden. Für die Anpassung der Rohdaten kommt die in Kap. 3.5.1.6 beschriebene Passing-Bablock-Regression zur Anwendung.

4.1.4 Kalibrieransätze anderer Autoren

BORCHERT et al. (2011: 2) schlagen eine Kalibrierung mit drei Bodenproben vor, die je aus einer Zone mit niedrigen, mittleren und hohen pH-Wert entnommen und im Labor analysiert werden. SCHIRRMANN et al. (2011: 582ff) empfehlen eine Anpassung mit 10 Proben. ADAMCHUK et al. (2007: 143ff) testen neben einer globalen Kalibrierung, eine einfache Verschiebung (Shift) sowie eine schlagspezifische Kalibrierung mit fünf Kalibrierproben. Die von den Autoren vorgeschlagenen Ansätze zur Kalibrierung des Sensors werden neben dem eigenen Ansatz geprüft, mit Ausnahme der globalen Kalibrierung von ADAMCHUK et al. (2007). Alle Autoren verwenden zur Anpassung nichtidentische Bodenproben mit einer Regressionsanalyse nach der Methode der kleinsten Quadrate. Die Verwendung nicht-

identischer Bodenproben birgt das Potential mikrovariabler pH-Differenzen. Damit könnte die Validierung eine weitere mögliche Fehlerquelle enthalten. Deshalb werden alle Ansätze unter gleichen Bedingungen getestet, die durch die Untersuchungen des Kalksteigerungsversuches auf dem Julius-Kühn-Feld gegeben sind.

4.1.5 Evaluierung der Kalibrieransätze

In der Tab. 4-5 und Abb. 4-8 sind die Ergebnisse der Kalibrieransätze nach den Vorschlägen verschiedener Autoren zusammengefasst dargestellt. Dabei zeigt sich, dass ohne Kalibrierung die Abweichungen am größten und die Übereinstimmung am geringsten ist. Die statistische Prüfung der Ansätze bedarf der Anwendung nichtparametrischer Methoden, da die Messreihen nicht normalverteilt und verbunden sind. Mit dem Friedman-Test wird global die Hypothese geprüft, ob zwischen den Stichproben (Messreihen) signifikante Unterschiede bestehen (KÖHLER et al., 2002: 198). Ist ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen nachweisbar, können mit Hilfe des Dunnett-Tests die Gruppen gegen eine Kontrolle geprüft werden (VON DETTEN et al., 2008: 24). Dabei entsprechen die Gruppen den Ergebnissen der Kalibrieransätze und die Kontrolle entspricht den Ergebnissen der Labormethode.

Tab. 4-5: Vergleich der Differenzen zwischen den Ergebnissen der Labormethodik und den Rohdaten des Verissensors sowie den Ergebnissen verschiedener Ansätze zur Kalibrierung

Quelle/Ansatz	Rohdaten*	Borchert ^{1*}	Adamchuk ²	Adamchuk ²	Schirrmann ^{3*}	Leithold	Leithold*
Verfahrensbezeichnung	1	2	3	4	5	6	7
benötigte Kalibrierproben	0	3	5	5	10	13	13
Regressionsart	keine	LS ⁴	Shift	LS ⁴	LS ⁴	PB ⁵	LS ⁴
Achsenabschnitt (a)	0,0000	-1,6503	-0,8200	-0,6048	-1,8861	-2,5410	-1,8877
Regressionskoeffizient (b)	1,0000	1,0999	1,0000	0,9697	1,1348	1,2495	1,1658
Korrelation, Übereinstimmung und Fehlermaße							
r _{PEARSON}	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
r _{CCC}	0,57	0,88	0,89	0,88	0,88	0,93	0,92
ME	0,76	-0,20	-0,06	-0,06	-0,19	-0,05	0,02
MAE	0,76	0,28	0,27	0,28	0,28	0,22	0,22
RMSE	0,83	0,37	0,33	0,34	0,36	0,30	0,30
Deskriptive Beschreibung der Differenzen							
min	-0,20	-1,16	-1,02	-1,01	-1,16	-1,03	-0,95
25%	0,57	-0,34	-0,25	-0,25	-0,33	-0,19	-0,12
Median	0,76	-0,20	-0,06	-0,05	-0,20	-0,06	0,01
75%	1,01	0,01	0,19	0,22	0,00	0,11	0,21
max	1,39	0,39	0,57	0,58	0,44	0,71	0,69
Spanne	1,59	1,55	1,59	1,51	1,60	1,74	1,54

¹BORCHERT et al. (2011: 2), ²ADAMCHUK et al. (2007:143ff), ³SCHIRRMANN et al. (2011: 582ff), ⁴Least Squares-Methode, ⁵Passing-Bablok-Methode, * - signifikant verschieden von den Ergebnissen der Labormethode (p < 0,05)

Das Ergebnis des Friedman-Tests zeigt, dass signifikante Unterschiede (p < 0,001) zwischen den Kalibrieransätzen nachweisbar sind. Signifikant verschieden von den Ergebnissen der Labormethode sind mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % die Rohdaten sowie die Ansätze nach Borchert, Schirrmann und Leithold mit der Regressionsmethode Least Squares (in Tab. 4-5 mit * gekennzeichnet). Alle anderen Ansätze sind nicht signifikant verschieden von den Ergebnissen der Labormethodik.

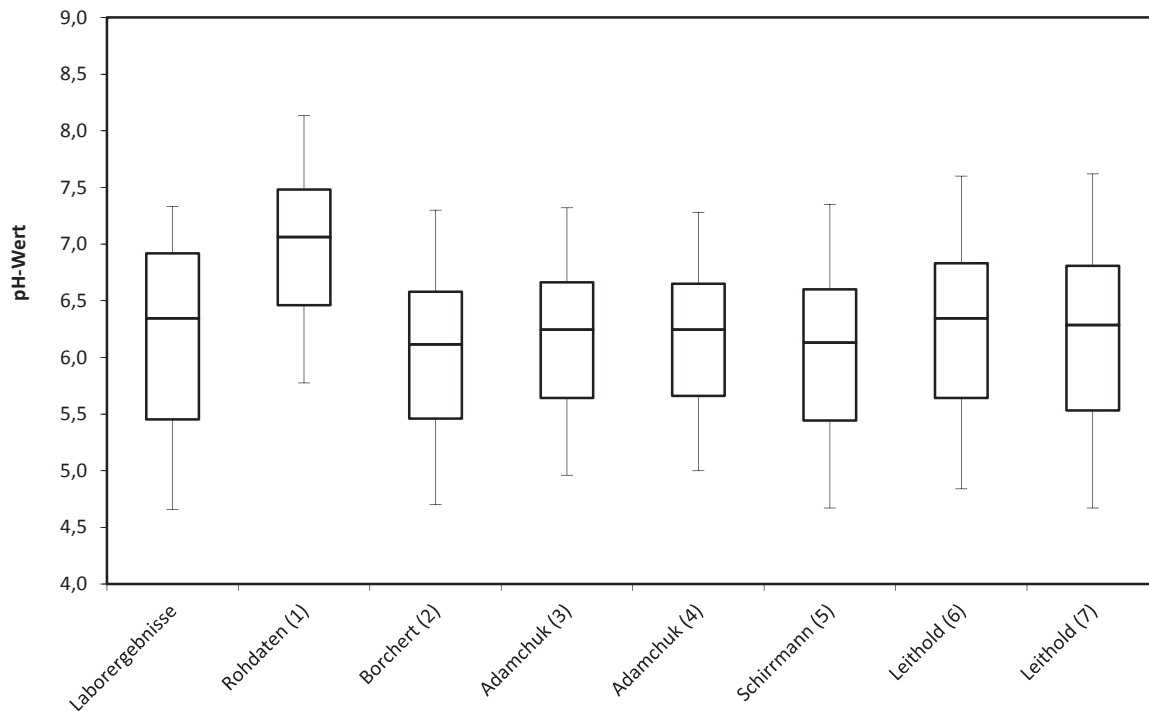


Abb. 4-8: Boxplots der Ergebnisse der Labormethodik, der Rohdaten des Verissensors und den kalibrierten Rohdaten nach den Ansätzen verschiedener Autoren

Detailliertere Abbildungen zu den Ergebnissen der verschiedenen Kalibrieransätze enthält der Anhang A4-1-7.

4.1.6 Auswirkungen der Fehler auf die Düngegabe

In den vorangehenden Kapiteln wurden die Fehleranteile der beiden untersuchten Verfahren bestimmt. Für die Ermittlung der Düngegabe können geringe Differenzen des pH-Wertes zu deutlichen Mengenänderungen führen. Deshalb müssen für beide Verfahren die Gesamtfehler ermittelt werden, um eine abschließende Bewertung der Güte beider Verfahren geben zu können. Nach KROMIDIAS (1999: 63) gilt bei stochastisch unabhängigen Prozessen die Additivität der Fehlergrößen. Zur Bewertung beider Verfahren werden mit den beobachteten Häufigkeitsverteilungen Sensitivitätsanalysen auf Basis von Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Die Umsetzung erfolgt mit dem Programm @RISK 5.5.1 von PALISADE CORPORATION (2010). Als Grundlage der Modelle (F. 4-1 und F. 4-2) dient ein Ausgangs-pH-Wert von 5,7, der in der Bodengruppe 4 den Mittelwert der Gehaltsklasse B repräsentiert und einer CaO-Gabe von 4.800 kg CaO ha⁻¹ entspricht. Die Bodengruppe 4 entspricht der am häufigsten vorkommenden Bodengruppe der untersuchten Versuchsfelder.

Modelle:

$$pH_{Labor} = pH_{Basis} + \varepsilon_{Probenahme} + \varepsilon_{Wiederholbarkeit} \quad \text{F. 4-1}$$

$$pH_{Veris} = pH_{Basis} + \varepsilon_{Wiederholbarkeit} + \varepsilon_{Kalibrierung} \quad \text{F. 4-2}$$

mit

- | | | |
|----------------------------------|---|---|
| $pH_{Labor/Veris}$ | - | Resultierender pH-Wert der MC-Simulation |
| pH_{Basis} | - | pH-Wert ohne Fehleranteil von 5,7 |
| $\varepsilon_{Wiederholbarkeit}$ | - | Fehler der Wiederholbarkeit des jeweiligen Verfahrens |
| $\varepsilon_{Probenahme}$ | - | Fehler der Probenahme |
| $\varepsilon_{Kalibrierung}$ | - | Fehler der Kalibrierung des Verissensors |

Für beide Verfahren werden die Fehleranteile in den Simulationen berücksichtigt, die in der Abb. 4-9 dargestellt sind. Kritisch an dieser Vorgehensweise ist, dass bei den Simulationen für den Verissensor die Kalibrierung der Rohdaten mit ausgewählten Ergebnissen der Labormethodik erfolgt. Diese Ergebnisse schließen den Laborfehler ($\varepsilon_{\text{Wiederholbarkeit}}$) mit ein, der in den Simulationen unberücksichtigt bleibt.

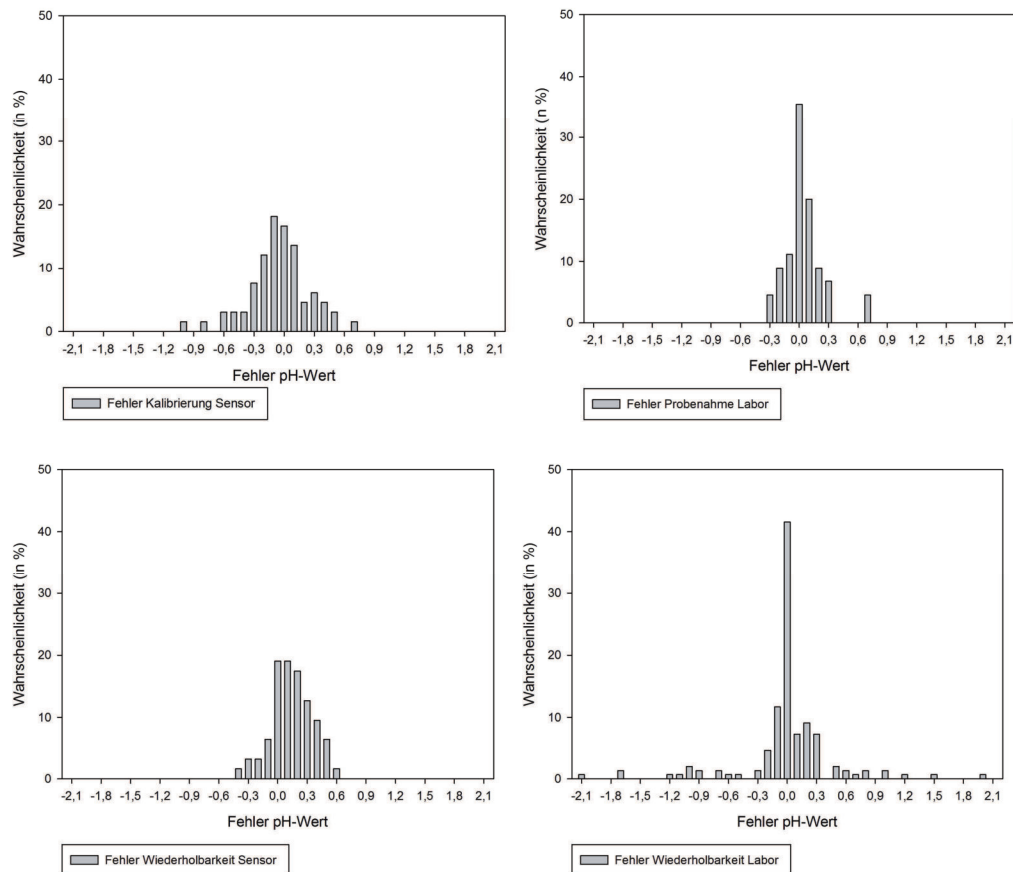


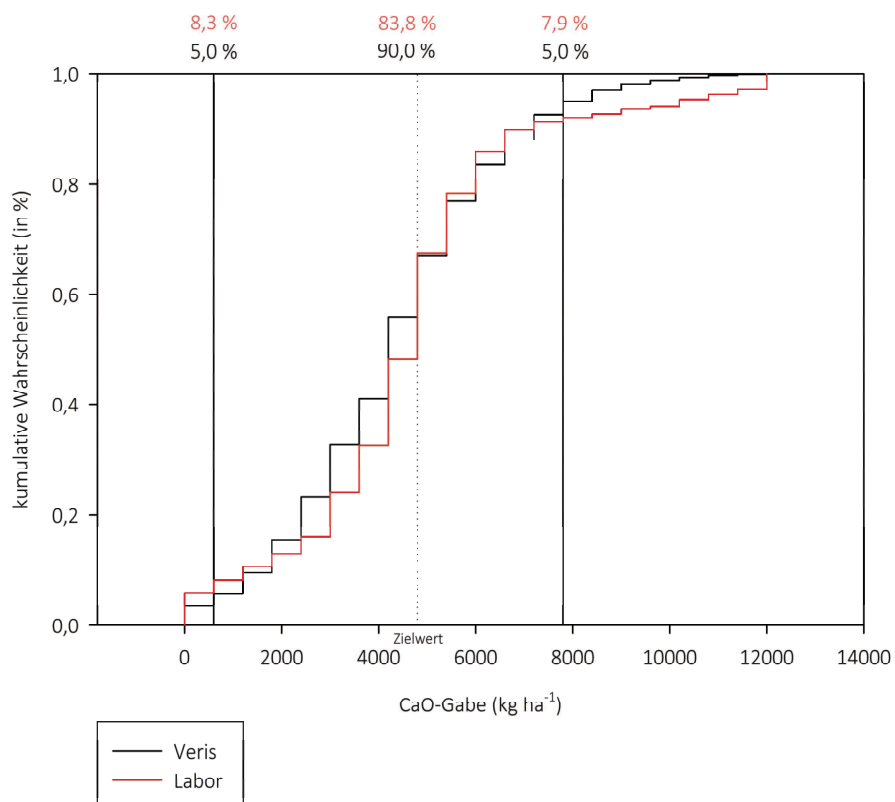
Abb. 4-9: Häufigkeitsverteilungen der Fehlerkomponenten

In den Monte-Carlo-Simulationen werden als variierende Eingangsparameter nur die Fehlerkomponenten der Zielwerte der *pH-Werte* und den daraus resultierenden *CaO-Düngegaben* untersucht. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Streuung der pH-Werte, die mittels Labormethode ermittelt wurden, größer ist als die gemessenen pH-Werte des Sensors. Die beiden mittleren pH-Werte liegen leicht erhöht über dem Basis-pH-Wert von 5,7. Die Grenzen der 5 % der geringsten und höchsten pH-Werte, bedingt durch einen hohen Einfluss der Fehlerkomponenten, unterscheiden sich zwischen den beiden untersuchten Verfahren deutlich. Mit pH-Werten von 5,2 und 6,4 für die untere und obere Grenze schneidet die Sensormethode deutlich besser ab als die Labormethode mit pH-Werten von 4,8 und 6,5 (Tab. 4-6).

Tab. 4-6: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen auf den Zielwert *pH-Wert* nach den beiden Verfahren

Kennziffer	Sensor	Labor
n	10.000	10.000
pH _{MIN}	4,30	3,30
pH _{5%}	5,20	4,80
pH _{MED}	5,79	5,75
pH _{95%}	6,40	6,50
pH _{MAX}	7,00	8,40
pH _s	0,37	0,51

Die Bewertung der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen nach dem Prinzip der *Stochastischen Dominanz* (1. und 2. Grades) führt zu keiner eindeutigen Rangfolge der untersuchten Verfahren (BRANDES und ODENING, 1992: 205ff). Zwar erbrachte die Labormethode einen deutlich höheren Anteil von Ergebnissen um den erwarteten Zielwert, jedoch weist sie auch in den Randbereichen, in denen die Ergebnisse mit den höchsten Fehleranteilen repräsentiert sind, höhere Anteile aus als der Verisensor. Damit liegt die Entscheidung der Wahl einer Methode an der Risikoaversion des Anwenders (Abb. 4-10).

**Abb. 4-10: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen für den Zielwert *CaO-Gabe* nach den beiden Verfahren**

4.2 Kalksteigerungsversuch Julius-Kühn-Feld

In den Untersuchungen auf dem Julius-Kühn-Feld werden die Einflüsse der Kalk- und Phosphatdüngung sowie der Einfluss der Vorfrucht (VF) auf die Ergebnisse der Bodenanalysen geprüft. Die Auswertung der Einflussfaktoren erfolgt getrennt für die Vorfrüchte Sommergerste und Ackerbohnen, da ein signifikanter Einfluss der Vorfrucht auf den pH-Wert nachweisbar ist ($p < 0,05$, siehe Anhang A4-2). Für die paarweisen Vergleiche wird aufgrund des unbalancierten Versuchdesigns der Scheffé-Test verwendet. Alle Ergebnisse des Statistikprogramms SAS sind im Anhang A4-2-1 und A4-2-2 enthalten.

4.2.1 Einfluss der langjährigen Kalk- und Phosphatdüngung auf den pH-Wert

Unter beiden Vorfrüchten ist ein signifikanter Einfluss der Kalkdüngung auf den pH-Wert zu beobachten ($p < 0,001$), während ein Einfluss der Phosphatdüngung auf den pH-Wert nicht beobachtet werden kann. In der Abb. 4-11 sind die Ergebnisse des Mittelwertvergleiches nach den paarweisen Scheffé-Tests dargestellt. Beachtliche Unterschiede können zwischen den Vorfrüchten auf gleichen Kalk-Stufen beobachtet werden. Nur in der Variante mit der höchsten Kalkgabe sind die Unterschiede vernachlässigbar. Bei beiden Versuchen zeigt sich die positive Auswirkung der langjährigen Kalkung auf den pH-Wert. Die stärksten Effekte sind, wie zu erwarten, zwischen den Kalkstufen 0 und 20 dt/ha mit einer pH-Wert Erhöhung um 1,62 pH-Einheiten (VF: Sommergerste) und 1,80 pH-Einheiten unter der Vorfrucht Ackerbohne zu messen (s. Abb. 4-11).

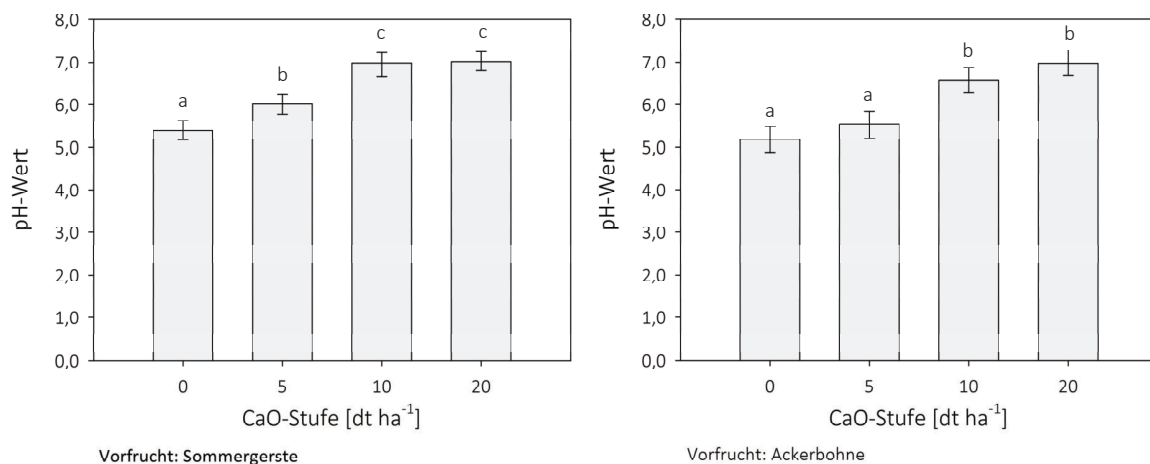


Abb. 4-11: Ergebnisse der langjährigen Kalk- und Phosphatdüngung auf den pH-Wert (gleiche Buchstaben: nicht signifikant verschieden von Null, unterschiedliche Buchstaben: signifikant verschieden von Null)

4.2.2 Einfluss der langjährigen Kalk- und Phosphatdüngung auf den Phosphatgehalt

Unter beiden Vorfrüchten können signifikante Einflüsse der Kalk- und Phosphatdüngung auf die Phosphatverfügbarkeit festgestellt werden ($p < 0,001$). Die schwierigen Umweltbedingungen (s. Kap. 3.1.1) zum Zeitpunkt der Bodenprobenahme spiegeln sich unter beiden Vorfrüchten in Form unerwünschter signifikanter Blockeffekte wider ($p < 0,002$). Nur unter der Vorfrucht Ackerbohne kann eine signifikante Wechselwirkung zwischen der Kalk- und Phosphatdüngung auf den Phosphatgehalt nachgewiesen werden ($p < 0,04$), während diese unter der Vorfrucht Sommergerste nicht signifikant ist.

Der Effekt einer langjährigen Phosphatdüngung führt unter beiden Vorfrüchten zu einer signifikant höheren Phosphatverfügbarkeit von 3,00 mg P je 100 g Boden ($p < 0,001$). Durch die langjährige Kalkdüngung ist unter der Vorfrucht Sommergerste ein signifikant höherer Phosphatgehalt um 1,68 mg P je 100 g Boden und unter der Vorfrucht Ackerbohne um 1,14 mg P je 100 g Boden zu beobachten ($p < 0,01$). Zur Auswertung wurden die Ergebnisse der CaO-Stufen 0 und 20 dt CaO ha⁻¹ verglichen (s. Anhang A4-2-1). Durch die signifikante Wechselwirkung der Kalk- und Phosphatdüngung auf den Phosphatgehalt unter der Vorfrucht Ackerbohne können folgende Aussagen getroffen werden (s. Tab 4-7):

- Der Einfluss der Phosphatdüngung auf den P-Gehalt ist bei einer Unterlassung der Kalkung mit 1,90 mg P je 100 g Boden signifikant geringer ($p < 0,001$). Unter dem Einfluss der höchsten CaO-Stufe führt die Phosphatdüngung zu einem signifikant höheren P-Gehalt von 3,35 mg P je 100 g Boden ($p < 0,001$).
- Der Einfluss der Kalkung auf den P-Gehalt ist bei einer Unterlassung der P-Düngung nicht signifikant ($p > 0,15$), während bei einer P-Düngung der Effekt durch die Kalkung bis zu 1,87 mg P je 100 g Boden beträgt ($p < 0,05$).

Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche der Scheffé-Tests sind in der Tabelle 4-7 enthalten.

Tab. 4-7: Ergebnisse der Differenzen des paarweisen Vergleiches nach den Scheffé-Tests der Wechselwirkung

Versuchsglied ¹	0/0	0/1	5/0	5/1	10/0	10/1	20/0	20/1
0/0	2,50	-1,90***	n.s.	-3,50***	n.s.	-3,03***	n.s.	-3,77***
0/1		4,40	+1,58**	-1,60**	+1,92***	-1,13*	+1,48**	-1,87**
5/0			2,82	-3,18***	n.s.	-2,72***	n.s.	-3,45***
5/1				6,00	+3,52***	n.s.	+3,08***	n.s.
10/0					2,48	-3,05***	n.s.	-3,78***
10/1						5,53	+2,62***	-0,73***
20/0							2,92	-3,35***
20/1								6,27

¹CaO-Stufe/P-Stufe, *** - $p < 0,001$, ** - $p < 0,01$, * - $p < 0,05$, n.s.-nicht signifikant, kursiv-fett geschrieben: Phosphatgehalte der Düngestufen, signifikante Differenzen sind gekennzeichnet durch Vorzeichen

Werden die Effekte der Kalkdüngung auf die Ergebnisse aus dem Kap. 4.2.1, den signifikant höheren pH-Werten zwischen den Stufen 0 und 20 dt CaO ha⁻¹, bezogen, ergeben sich Steigerungsraten von ca. 1,0 mg P je 100 g Boden pro pH-Einheit (VF: Sommergerste) und ca. 0,6 mg P je 100 g Boden pro pH-Einheit (VF: Ackerbohne). Bei Berücksichtigung der signifikanten Wechselwirkung der Kalk- und Phosphatdüngung unter der Vorfrucht Ackerbohne, beträgt die Steigerungsrate ca. 1,0 mg P je 100 g Boden pro pH-Einheit. In der Abb. 4-12 ist der Einfluss der Kalk- und Phosphatdüngung auf den P-Gehalt dargestellt.

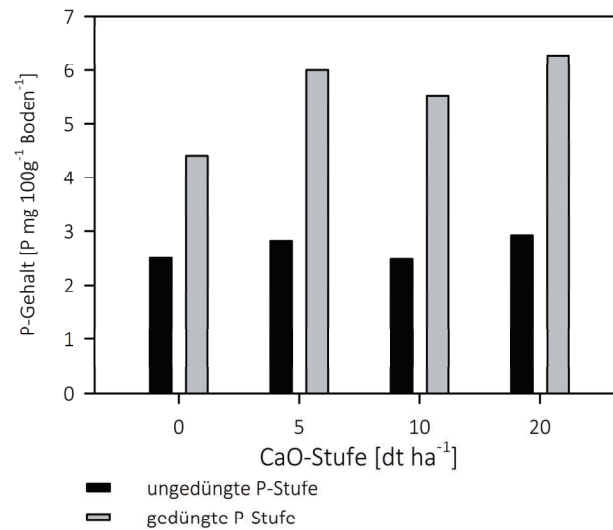


Abb. 4-12: Wechselwirkungen der Phosphat- und Kalkdüngung auf den Phosphatgehalt unter der Vorfrucht Ackerbohne

4.2.3 Einfluss der langjährigen Kalk- und Phosphatdüngung auf den Kalium- und Magnesiumgehalt

Für die Prüfung des Kalium- und Magnesiumgehalts als Prüfmerkmal des Einflusses der langjährigen Kalkdüngung können keine signifikanten Effekte beobachtet werden. Für die Vorfrucht Ackerbohne kann ein signifikanter Einfluss der langjährigen Phosphatdüngung auf den Kaliumgehalt beobachtet werden ($p < 0,02$), der unter der Phosphatdüngung sinkt. In den Versuchsgliedern mit einer Phosphatdüngung liegt der mittlere Kaliumgehalt mit 12,05 mg K je 100 g Boden um 1,60 mg K je 100 g Boden unter den der ungedüngten Versuchsgliedern mit 13,65 mg K je 100 g Boden. Für den Versuch unter der Vorfrucht Sommergerste können mittlere Kaliumgehalte mit 12,11 mg K je 100 g Boden für die ungedüngte P-Stufe sowie 12,38 mg K je 100 g Boden für die gedüngte (siehe Anhang A4-2-1 und A4-2-2).

4.3 Methodenvergleich zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte

Zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte ist es notwendig, fehlerhafte und unplausible Ertragsmesspunkte der Ertragskartierung zu eliminieren. In der Literatur sind einige Ansätze zur Datenfilterung bekannt, die jedoch dazu führen können, valide Ertragsmesspunkte fälschlicherweise herauszufiltern. Deshalb wurde ein Ertragsfilter entwickelt und für alle Ertragskarten einheitlich angewandt.

4.3.1 Ertragsfilter

Für die Filterung der Rohertragskarten hat sich keine standardmäßige Prozedur durchgesetzt. Gründe hierfür liegen in uneinheitlichen Datenformaten und der unterschiedlichen Datenstruktur verschiedener Systeme der Hersteller. In den meisten Filteransätzen (s. Tab. 2-3) kommen globale und lokale Schwellenwerte zum Einsatz, die jedoch bei Streifenversuchen, wie auf dem Versuchsschlag „550“, zur Eliminierung von „richtigen“ Ertragsmesspunkten führen können. Deshalb wurde für die Bereinigung der Ertragskarten der Praxisbetriebe ein herstellungsunabhängiger Filteransatz entwickelt, der schematisch dargestellt wird. Dieser basiert z.T. auf Techniken aus den Arbeiten von Moore (1997), NOACK (2006) und SHEARER (1999) sowie auf eigenen Untersuchungen (s. Abb. 4-16).

Vorbereitung der Ertragskarte

Für die Ertragskartenbearbeitung müssen die Koordinaten in ein kartesisches Koordinatensystem transformiert werden und zusätzliche Datenspalten an die bestehende Shape-Datei der Ertragskarte eingefügt werden. Angelehnt an NOACK (2006: 35) wird der Fahrtrichtungswinkel für jeden Ertragsmesspunkt ermittelt. Zur Berechnung des Fahrtrichtungswinkel (γ) werden fortlaufend Dreiecke zwischen drei aufeinanderfolgende Ertragsmesspunkte aufgespannt. Mit Hilfe des Kosinussatzes (s. F. 4-3) können bei drei bekannten Seitenlängen eines Dreieckes die Innenwinkel berechnet werden, gleichbedeutend mit dem Fahrtrichtungswinkel (γ) in Abb. 4-13.

$$\cos \gamma = \frac{c^2 - a^2 - b^2}{-2 \times a \times b} \quad \text{F. 4-3}$$

Durch die Änderungen des Fahrtrichtungswinkels können die Druschspuren zuverlässig erkannt werden. NOACK (2006: 37) verwendet als kritischen Grenzwert einen Winkel von 150° , der jedoch bei den Bereinigungen der Ertragskarten als zu stringent erschien und plausible Ertragsmesspunkte eliminierte. Für die Bereinigung von Ertragskarten hat sich ein Winkel von 135° als geeigneter erwiesen.

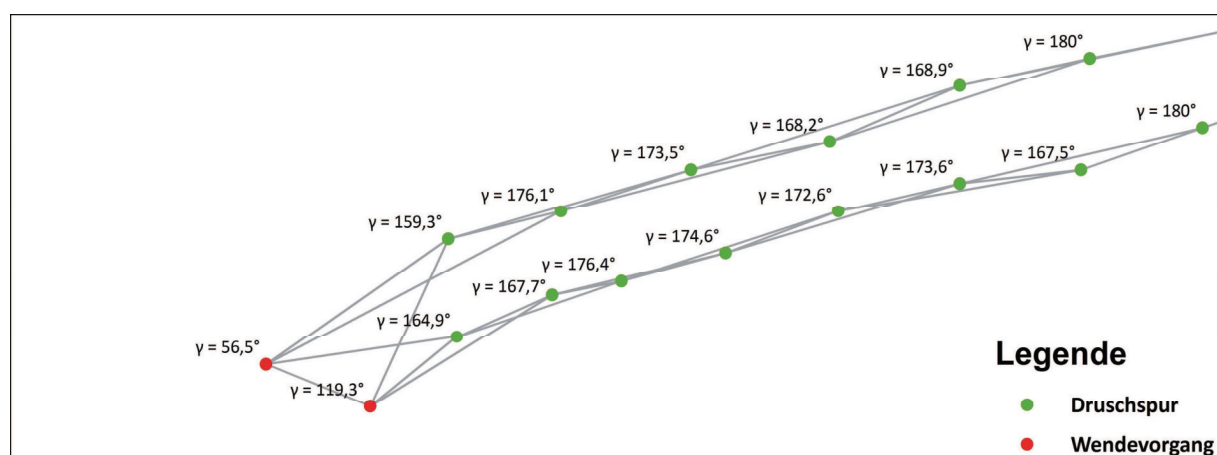


Abb. 4-13: Beispiel zur Erkennung eines Wendevorganges durch den Fahrtrichtungswinkel (γ)

Nach der Filterung der Rohdaten ist eine Feuchtigkeitskorrektur des Ertrags nach SHEARER et al. (1999: 8) mit folgender Formel vorzunehmen:

$$Y_{fi} = Y_{ni} \times \frac{100\% - M_{ni}}{100\% - M_m} \quad \text{F. 4-4}$$

mit

Y_{fi}	-	Feuchtigkeitsbereinigter Ertrag (t/ha ⁻¹) an der Stelle i
Y_{ni}	-	Gemessener Rohertrag (t ha ⁻¹) an der Stelle i
M_{ni}	-	Gemessene Kornfeuchte (in %) an der Stelle i
M_m	-	Basisfeuchte (in %) der Druschfrucht (z.B. Winterweizen: 14 %, Winterraps: 9%)

Essentiell für die Filterung fehlerbehafteter Ertragspunkte ist die Erkennung der Füll- und Entleerungsphasen des Dreschwerks, z.B. durch Anschnitte oder Ausfahrten aus einer Druschspur. In diesen Phasen sind die Erträge stark verzerrt und repräsentieren nicht den tatsächlichen Ertrag. Nach MOORE (1997: 102) sind 35 Sekunden der Füllungs- und ca. 10 Sekunden (1997: 120) der Entleerungsphasen mit Fehlern behaftet.

Die Umsetzung der Erkennung dieser Phasen erfolgt mit der ersten Plausibilitätsprüfung. Dazu werden neben dem ermittelten Fahrtrichtungswinkel (\mathbf{y}) als weitere Kriterien der Ertrag (\mathbf{Y}), die Geschwindigkeit (\mathbf{V}) und die Kornfeuchte (\mathbf{M}) als direkte Kenngrößen aus der Rohertragskarte verwendet. Falls bei einer Kenngröße der kritische Grenzwert erreicht wird, wird der Datensatz bei der Plausibilitätsprüfung als fehlerhaft markiert. Da die Aufnahmezeit der Hersteller bekannt ist (z.B. Claas 2- und 5-Sekundenintervall je Ertragsmesspunkt), kann die Füllphase von 35 s durch eine logische Abfrage der Folgepunkte erkannt werden. Die Erkennung der Entleerungsphase (**T-ID**) erfolgt anhand einer Abfrage der Druschspur für den betrachteten Datensatz mit dem Datensatz, der 10 Sekunden später dokumentiert wurde. Sind beide Druschspuren identisch, befindet sich der Ertragspunkt in einer Druschspur, während bei nichtidentischen Druschspuren von einer Entleerungsphase ausgegangen werden kann. Als kritische Ertragsmessungen gelten zudem der Teil- und Keilflächendrusch, der manuell durch den Fahrer des Mähdreschers dokumentiert werden muss. Dieser kann durch eine prozentuale stufenförmige Unterteilung der Schnittbreite des Vorsatzes die aktuelle Schnittbreite dokumentieren. Durch die subjektive Beurteilung können fehlerhafte Messungen nicht ausgeschlossen werden. Deshalb werden die mit Teilflächendrusch (**T**) markierten Ertragsmessungen komplett gelöscht. Alle Datensätze, die innerhalb eines Zeitraumes von 35 Sekunden auf einen fehlerhaften Datensatz folgen, werden als Füllungsphase erkannt und eliminiert.

Die zweite Plausibilitätsprüfung testet die Datensätze auf Unregelmäßigkeiten, die nicht automatisiert durch logische Abfragen gefiltert werden können. Es erfolgt eine Sichtprüfung der Datensätze, nachdem die beiden folgenden Algorithmen die Datensätze durchlaufen: Im ersten Algorithmus werden die Erträge zweier aufeinanderfolgender Ertragsmesspunkte verglichen. Steigt das Verhältnis über 50 %, werden die Ertragsmesspunkte im GIS überprüft. Damit können fehlerhafte Messungen eliminiert werden. Ein Beispiel dazu ist in der Abb. 4-14 dargestellt.

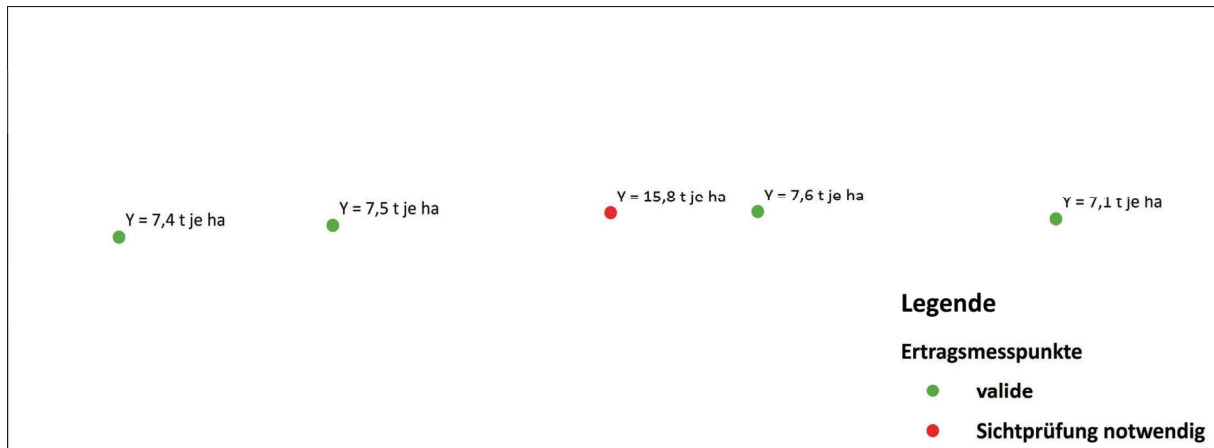


Abb. 4-14: Beispiel eines Ertragsausreißers

Schwieriger gestaltet sich die Erkennung von Ertragsmessungen, die tatsächlich als Keil- oder Teilflächendrusch beerntet worden, jedoch nicht vom Fahrer als solche markiert wurden. Dazu wird mit einem zweiten Algorithmus die Flächenleistung je Stunde (P in $ha\ h^{-1}$) geprüft. Abschnitte des Teilbreiten- und Keildrusches zeigen oft sehr hohe Flächenleistungen gegenüber normalen Abschnitten des Mähdrusches. Ein Beispiel für die Beerntung von Teilflächen, die nicht durch den Fahrer als solche markiert wurden, ist in der Abb. 4-15 dargestellt. Auffallend sind insbesondere die abweichende Distanz zur benachbarten Druschspur sowie der deutlich geringere Ertrag gegenüber den benachbarten Ertragspunkten. Mithilfe des Ansatzes der Prüfung lokaler Schwellenwerte könnte das Problem gelöst werden, allerdings könnten valide Ertragspunkte (z.B. durch Stickstoffsteigerungsversuche stark beeinflusste Parzellen) fälschlicherweise entfernt werden.

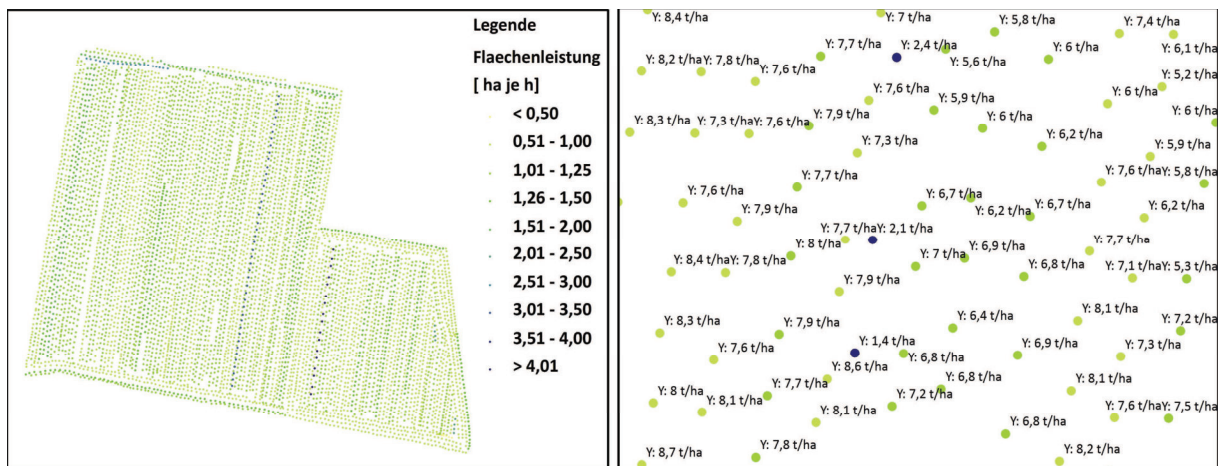


Abb. 4-15: Beispiel eines Teilbreitendrusches mit fehlender Markierung im Rohdatensatz

In der Abb. 4-16 ist die Vorgehensweise der Ertragsfilterung schrittweise grafisch zusammengefasst.

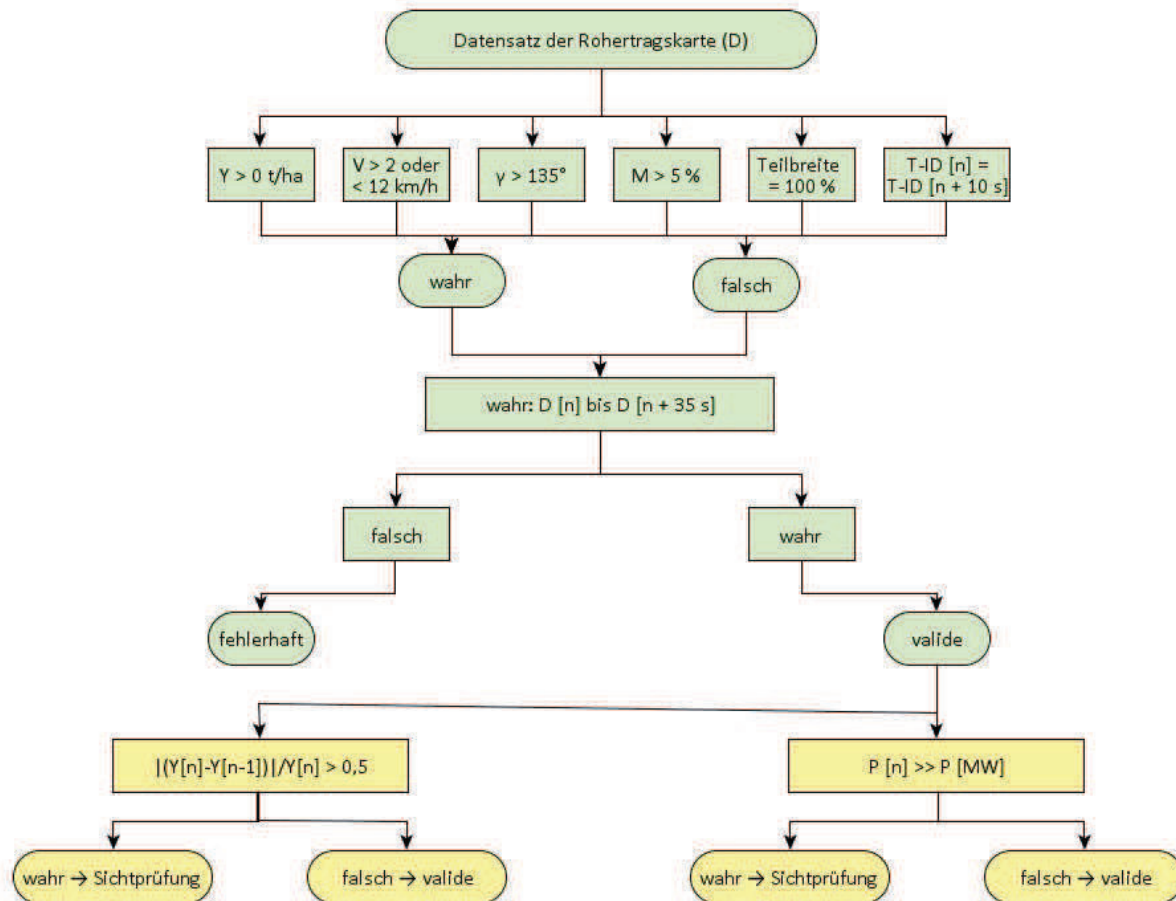


Abb. 4-16: Schema zur Eliminierung fehlerhafter und unplausibler Ertragsmesspunkte (grün - Plausibilitätsprüfung I, gelb - Plausibilitätsprüfung II)

4.3.2 Vergleich von vier Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte

Der Vergleich der Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte erfolgt an zwei Praxis schlägen für die seit dem Jahr 1999 bzw. 2000 Ertragskarten aufgezeichnet wurden. Am Beispiel des Versuchsschlag „550“ in Görzig besteht die Einzigartigkeit, dass für drei Erntejahre (1999, 2003 und 2006) jeweils Körnermais angebaut wurde der mit einem Mähdrescher beerntet wurde. Damit können einerseits Fehlerquellen durch den Einsatz mehrerer Mähdrescher ausgeschlossen werden und andererseits wird der Einfluss unterschiedlicher Fruchtarten auf die Ertragskartierung vermieden. Die Methoden sind in den Kapitel 3.4.1.1 bis 3.4.1.3 ausführlich beschrieben.

4.3.2.1 Versuchsschlag „550“ am Standort Görzig

Datengrundlage

Aus der Tab. 4-8 geht ein deutlicher Jahreseffekt der Ertrags- und Witterungsdaten hervor. Der Witterungsverlauf des Erntejahres 1999 ähnelt dem eines standorttypischen Witterungsverlaufes, während für die Erntejahre 2003 und 2006 hingegen eine extreme Trockenheit über die Vegetationsperiode festzustellen ist. Dies resultiert in deutlich geringeren mittleren Erträgen mit Ertragsdifferenzen von bis zu $2,8 \text{ t ha}^{-1}$.

Tab. 4-8: Übersicht statistischer Kennzahlen der Erträge und Witterung der Erntejahre

Erntejahr	1999	2003	2006
Ertragsdaten (in t ha⁻¹)			
Mittelwert	7,45	5,27	4,68
Median	7,42	5,17	4,41
s	1,24	1,30	1,86
min	2,06	0,63	0,10
P _{5%}	5,50	3,32	2,08
P _{95%}	9,75	7,62	8,43
max	11,40	10,17	10,25
Witterungsdaten (mm)			
jährl. Niederschlagsmenge	506	423	465
davon in Vegetationsperiode von April bis Juli	249	156	157

Die unterschiedlichen Witterungsverläufe wirken auf den Vegetationsverlauf und prägen die markanten Häufigkeitsverteilungen der Ertragsdaten (Abb. 4-17). Für die beiden trockenen Erntejahre resultieren linksgipflige Verteilungen mit einer breiten Spannweite. Eine geringere Spannweite mit einer annähernd normalverteilten Häufigkeitsverteilung ist für das Erntejahr 1999 zu beobachten.

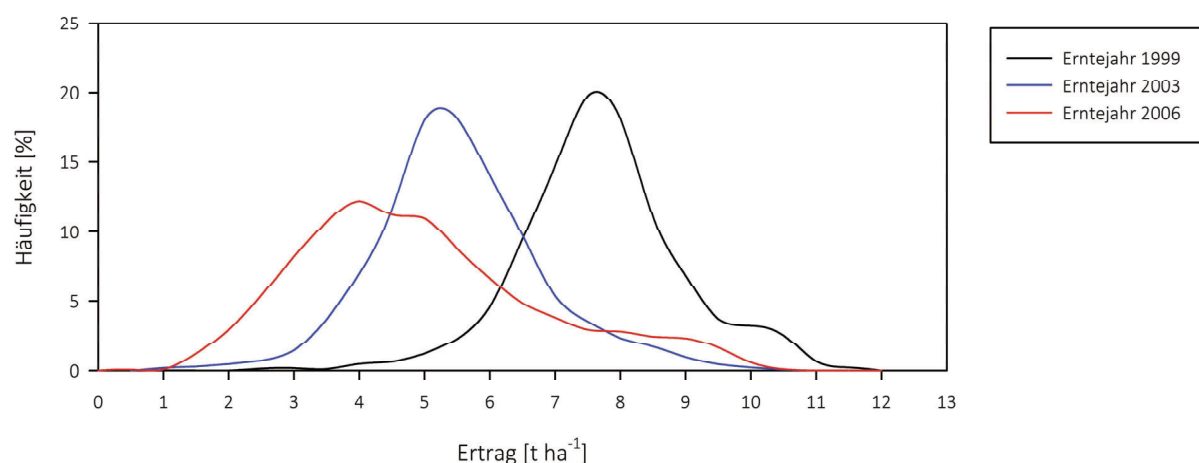


Abb. 4-17: Häufigkeitsverteilungen der interpolierten Körnermaiserträge für die Erntejahre 1999, 2003 und 2006

Mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test, Cramer-von-Mises-Test und dem Anderson-Darling-Test ist es möglich, die Häufigkeitsverteilungen auf Kongruenz mit der Normalverteilung zu prüfen. Die Ergebnisse der Tests sind im Anhang A4-3-2-1 ausführlich dargestellt und führen zur Verwerfung der Nullhypothese, dass die Häufigkeitsverteilungen normalverteilt sind ($p < 0,01$).

Klassifizierungen der Methoden

Der Vergleich der Methoden zeigt, dass die Methodik nach BLACKMORE et al. (2003) die von den anderen Methoden (BLACKMORE, 2000 Fall 1 und Fall 2; SCHNEIDER, 2009) als stabil eingestufte Hohertragszone als instabil ausweist. Deutlichere Differenzen zwischen allen Methoden ergeben sich für die Klassifizierungen der Niedrigertragszone als zeitlich stabil oder instabil (Abb. 4-18).

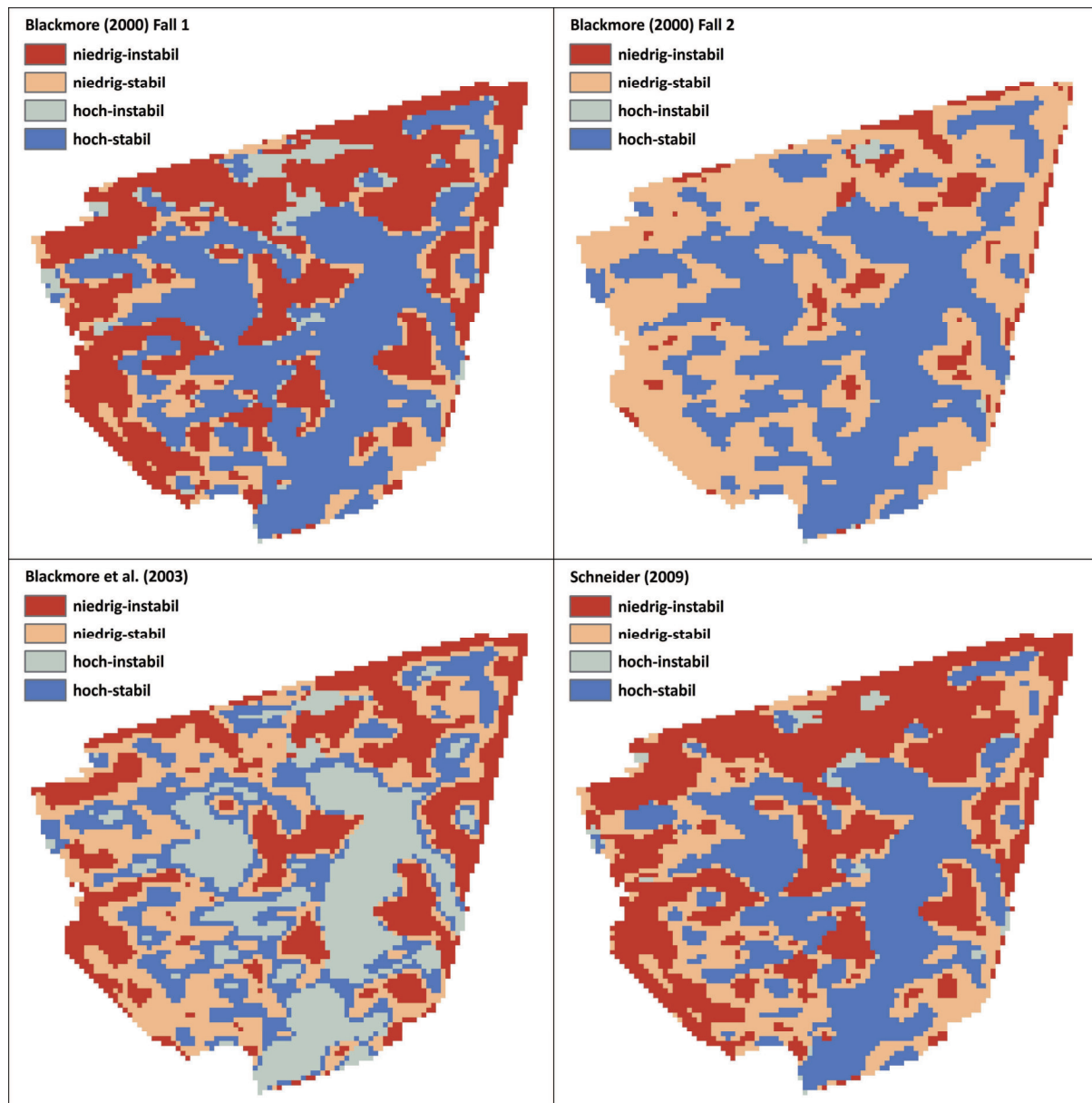


Abb. 4-18: Klassifizierte Ertragszonen der untersuchten Methoden am Versuchsschlag „550“

Alle vier untersuchten Methoden kommen auf 18,9 ha (29,6 %) zu übereinstimmenden Klassifizierungen der Ertragszonen. Der paarweise Vergleich der Methoden zeigt, dass die von SCHNEIDER (2009) und BLACKMORE (2000) vorgeschlagenen Methoden die größten Übereinstimmungen besitzen. Geringste Übereinstimmungen zeigen sich im weiteren Vergleich mit der von BLACKMORE et al. (2003) entwickelten Methode (Tab. 4-9).

Tab. 4-9: Übereinstimmungsmatrix der Methoden der mehrjährigen Ertragskarte am Versuchsschlag „550“

Übereinstimmung der Methoden (in %)	BLACKMORE (2000) Fall 1	BLACKMORE (2000) Fall 2	BLACKMORE et al. (2003)	SCHNEIDER (2009)
BLACKMORE (2000) Fall 1	100,0	60,8	56,7	80,7
BLACKMORE (2000) Fall 2		100,0	56,2	79,5
BLACKMORE et al. (2003)			100,0	65,6
SCHNEIDER (2009)				100,0

Signifikante Korrelationen sind zwischen allen untersuchten Methoden nachweisbar (Tab. 4-10).

Tab. 4-10: Korrelationsmatrix der Methoden der mehrjährigen Ertragskarte am Versuchsschlag „550“

Korrelationskoeffizient r (nach Spearman)	BLACKMORE (2000) Fall 1	BLACKMORE (2000) Fall 2	BLACKMORE et al. (2003)	SCHNEIDER (2009)
BLACKMORE (2000) Fall 1	1	0,91***	0,87***	0,92***
BLACKMORE (2000) Fall 2		1	0,87***	0,83***
BLACKMORE et al. (2003)			1	0,73***
SCHNEIDER (2009)				1

***signifikant verschieden von Null mit $p < 0,001$

Mit dem Friedman-Test können verbundene verteilungsunabhängige Stichproben varianzanalytisch untersucht werden. Dazu wird im ersten Schritt mit dem Chi-Quadrat-Test (X^2 -Test) die Hypothese untersucht, ob Unterschiede global zwischen den Methoden bestehen. Ist das Ergebnis signifikant, können paarweise Vergleiche zwischen den Methoden mit dem Tukey-Test vorgenommen werden.

Das Ergebnis des X^2 -Test zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen den Methoden ($p < 0,001$). In der Tab. 4-11 sind die Ergebnisse des paarweisen Vergleiches der Methoden aufgeführt.

Tab. 4-11: Ergebnisse des Friedman-Tests am Versuchsschlag „550“ (paarweiser Vergleich mit Tukey-Test)

Friedman-Test	BLACKMORE (2000) Fall 1	BLACKMORE (2000) Fall 2	BLACKMORE et al. (2003)	SCHNEIDER (2009)
BLACKMORE (2000) Fall 1		**	**	**
BLACKMORE (2000) Fall 2			**	**
BLACKMORE et al. (2003)				*
SCHNEIDER (2009)				

*signifikant verschieden mit $p < 0,05$, **signifikant verschieden mit $p < 0,01$

Das Gesamtergebnis des Friedman-Tests zeigt, dass zwischen den Ergebnissen der untersuchten Methoden hochsignifikante Unterschiede bestehen.

Sensitivitätsanalyse

Für die Sensitivitätsanalyse werden die Rasterzellen untersucht, deren durchschnittlicher jährlicher Ertrag zu den höchsten und niedrigsten Erträgen gehört. Anhand der extremen Erträge können die Methoden damit auf ihre Richtigkeit und ihre Zielsetzung, stabil hohe und stabil niedrige Ertragszonen sicher zu identifizieren, geprüft werden. Die Tabelle 4-12 enthält die Ergebnisse der Methoden für die jeweiligen Klassifizierungen.

Folgende Kombinationen sind in der Tabelle 4-12 numerisch angegeben:

- 10 – stabile Hohertragszone
- 20 – instabile Hohertragszone
- 30 – stabile Niedrigertragszone
- 40 – instabile Niedrigertragszone

Tab. 4-12: Klassifizierungen der Rasterzellen mit den zehn niedrigsten und den zehn höchsten Durchschnittserträgen des Versuchsschlags „550“

ID	Y ₁₉₉₉ *	Y ₂₀₀₃ *	Y ₂₀₀₆ *	BLACKMORE (2000) Fall 1	BLACKMORE (2000) Fall 2	BLACKMORE et al. (2003)	SCHNEIDER (2009)
1	10,8	9,9	9,5	10	10	20	10
2	10,7	10,0	9,8	10	10	20	10
3	10,4	9,2	9,9	10	10	20	10
4	11,3	9,8	9,5	10	10	20	10
5	11,4	9,4	9,6	10	10	20	10
6	11,1	9,3	9,4	10	10	20	10

ID	Y ₁₉₉₉ *	Y ₂₀₀₃ *	Y ₂₀₀₆ *	BLACKMORE (2000) Fall 1	BLACKMORE (2000) Fall 2	BLACKMORE et al. (2003)	SCHNEIDER (2009)
7	11,3	10,0	9,4	10	10	20	10
8	11,3	9,3	9,5	10	10	20	10
9	10,6	9,6	9,8	10	10	20	10
10	10,7	9,3	9,6	10	10	20	10
...					...		
6365	2,4	1,2	1,3	40	30	40	40
6366	2,2	0,9	1,3	40	30	40	40
6367	2,4	0,6	1,3	40	40	40	40
6368	2,3	0,9	1,1	40	40	40	40
6369	2,1	0,8	1,1	40	40	40	40
6370	2,2	1,1	1,3	40	30	40	40
6371	2,7	1,3	0,6	40	40	40	40
6372	2,6	1,3	0,8	40	40	40	40
6373	2,8	1,1	1,1	40	40	40	40
6374	4,0	0,6	0,2	40	40	40	40

*Y - Ertrag in t ha⁻¹ der Rasterzelle i

Bis auf die von BLACKMORE et al. (2003) vorgestellte Methodik, kategorisieren alle Methoden die Rasterzellen mit den höchsten Erträgen als stabile Hohertragszonen. Jedoch klassifizieren alle Methoden nahezu alle Rasterzellen mit den niedrigsten Erträgen als instabile Niedrigertragszonen. Damit zeigt sich, dass die Methoden an den Randbereichen an ihre Grenzen stoßen. Die inhaltliche Fragestellung, jährliche Ertragsmuster auf ihre Konstanz zu überprüfen und zu identifizieren, ist mit den von den Autoren entwickelten Methoden nur bedingt möglich.

4.3.2.2 Versuchsschlag „Lange Winde“ am Standort Warnstedt

Datengrundlage

Für den Praxisschlag „Lange Winde“ stehen Ertragskarten seit dem Erntejahr 2000 zur Verfügung. Nicht alle können jedoch verwendet werden, da sie entweder unvollständig oder nicht einheitlich kalibriert worden sind und zu großen Interpolationsfehlern führen. Zur Erstellung der mehrjährigen Ertragskarte kann auf die Ertragskarten von sieben Erntejahren mit jeweils Winterweizen als angebaute Fruchtart zurückgegriffen werden. Damit ist die Voraussetzung für die Methodik von BLACKMORE (2000) Fall 1 erfüllt, die eine Fruchtart über den Untersuchungszeitraum als notwendige Vorbedingung verlangt (s. Tab. 4-13).

Tab. 4-13: Übersicht der Ertragsdaten und Witterungsdaten des Versuchsstandortes „Lange Winde“

Erntejahr	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Fruchtart ¹	WW	WW	ER	WW	RA	WW	WW	ER	WW	RA	WW	WW
Verwendbarkeit ²	j	j	n ^{*,**}	j	n [*]	n [*]	j	n ^{**}	j	n [*]	j	j
Ertragsdaten (t ha⁻¹)												
Mittelwert	6,38	7,03		5,35			6,34		8,66		8,00	5,65
Median	6,50	7,24		5,40			6,38		8,68		8,16	5,66
s	0,92	1,19		0,97			0,77		1,71		1,20	1,37
min	1,86	2,13		1,65			2,97		3,10		2,12	0,57
P _{5%}	4,70	4,58		3,50			5,04		5,71		5,73	3,38
P _{95%}	7,69	8,59		6,89			7,50		11,30		9,72	7,86
max	9,54	11,44		8,01			9,57		13,65		11,68	10,47
Witterungsdaten												
Jahresdurchschnitt	474	569	732	376	600	606	448	802	597	575	797	418
Vegetationsperiode (April - Juli)	151	202	279	147	311	253	213	323	275	230	262	156

¹WW - Winterweizen, ER - Erbsen, RA - Raps; ²j - ja, n - nein; *fehlerhafte Kalibrierung, **kein vollständiger Datensatz

In der Abb. 4-19 sind die Verläufe der Häufigkeitsverteilungen der Erntejahre dargestellt. Alle Verteilungen sind signifikant verschieden von der Normalverteilung ($p < 0,001$) getestet nach dem Kolmogorow-Smirnow-Test, Cramer-von-Mises-Test und dem Anderson-Darling-Test. Die ausführlichen Ergebnisse der deskriptiven Statistik und der Tests auf Normalverteilung sind im Anhang A4-3-2-2 enthalten.

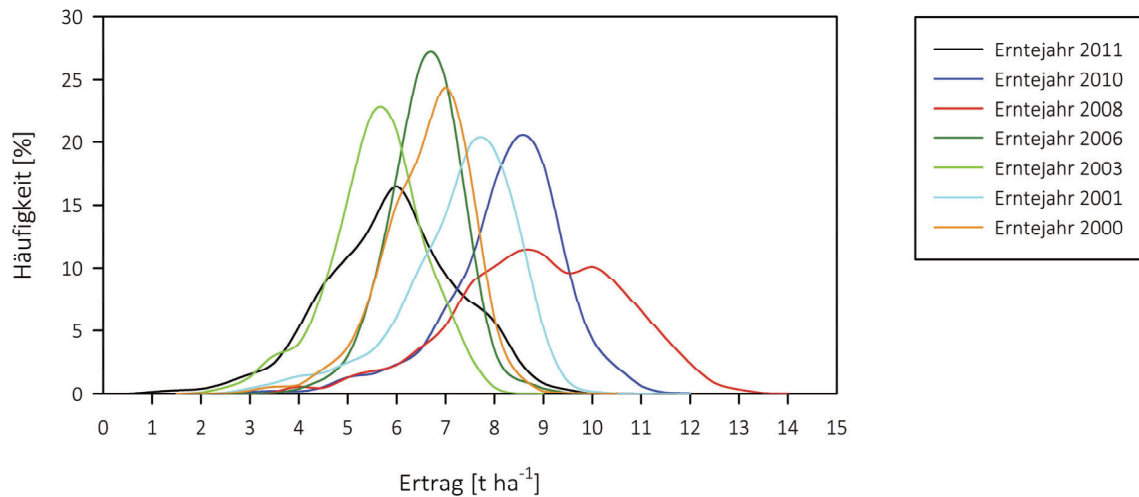


Abb. 4-19: Häufigkeitsverteilungen der interpolierten Absoluterträge für die untersuchten Erntejahre

Klassifizierungen der Methoden

Die Methoden kommen bei den Klassifizierungen der Rasterzellen zu widersprüchlichen Ergebnissen. Beide Methoden von BLACKMORE (2000) Fall 1 und Fall 2 sowie die Methode von SCHNEIDER (2009) stufen weniger als 6 % der Rasterzellen als instabil ein. Im Gegensatz dazu kommt die Methode von BLACKMORE et al. (2003) zu deutlich höheren Anteilen instabiler Ertragszonen (Tab. 4-14).

Tab. 4-14: Ergebnisse der Klassifizierung der Methoden

Methode	Ertragszone			
	hoch-stabil	hoch-instabil	niedrig-stabil	niedrig-instabil
BLACKMORE (2000) Fall 1	56,0	0,2	41,5	2,3
BLACKMORE (2000) Fall 2	56,4	0,0	43,0	0,6
BLACKMORE et al. (2003)	36,0	24,5	19,8	19,7
SCHNEIDER (2009)	70,2	1,9	24,1	3,8

Aus der Abb. 4-20 geht die sehr gute Identität zwischen den BLACKMORE-Methoden (2000) Fall 1 und Fall 2 hervor.

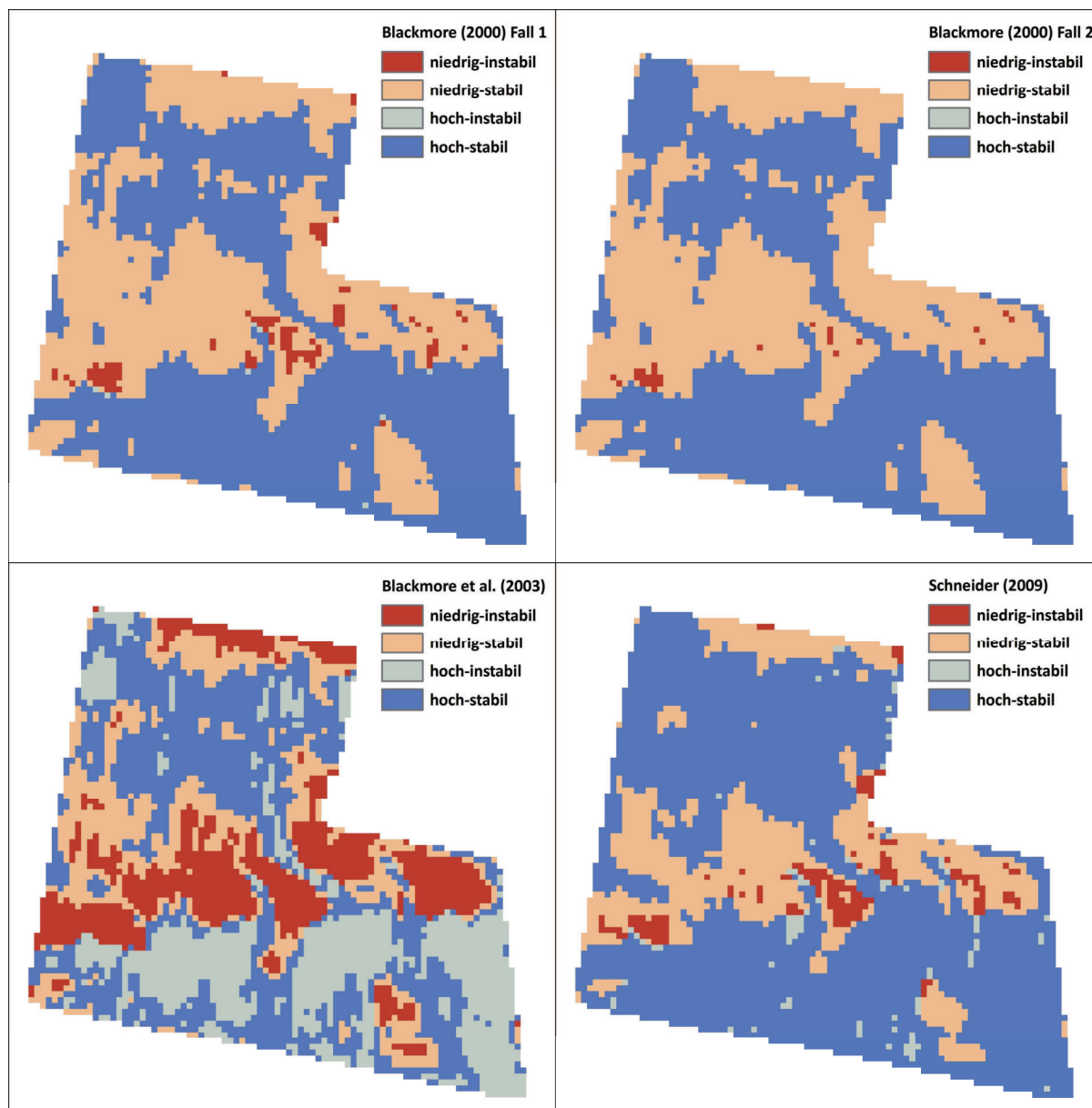


Abb. 4-20: Ertragszonen der untersuchten Methoden am Versuchsschlag „Lange Winde“

Trotz deutlicher Differenzierungen zwischen den Methoden, kommen alle Methoden auf 40,2 % der Flächen zu identischen Ergebnissen (Tab. 4-15). Die geringsten Übereinstimmungen ergeben sich für die paarweisen Vergleiche mit der Methodik von BLACKMORE et al. (2003).

Tab. 4-15: Übereinstimmungsmatrix der Klassifizierungen der untersuchten Methoden am Versuchsschlag „Lange Winde“

Übereinstimmung (in %)	BLACKMORE (2000) Fall 1	BLACKMORE (2000) Fall 2	BLACKMORE et al. (2003)	SCHNEIDER (2009)
BLACKMORE (2000) Fall 1	100,0	96,7	54,1	81,2
BLACKMORE (2000) Fall 2		100,0	52,4	79,7
BLACKMORE et al. (2003)			100,0	49,3
SCHNEIDER (2009)				100,0

Alle Korrelationen zwischen den Methoden sind signifikant verschieden von Null ($p < 0,001$). Im Vergleich zu den Ergebnissen vom Versuchsschlag „550“ in Görzig sind sie jedoch etwas schwächer (Tab. 4-16).

Tab. 4-16: Korrelationsmatrix der Methoden am Versuchsschlag „Lange Winde“

Korrelationskoeffizient r (nach Spearman)	BLACKMORE (2000) Fall 1	BLACKMORE (2000) Fall 2	BLACKMORE et al. (2003)	SCHNEIDER (2009)
BLACKMORE (2000) Fall 1	1	0,97***	0,78***	0,71***
BLACKMORE (2000) Fall 2		1	0,78***	0,70***
BLACKMORE et al. (2003)			1	0,76***
SCHNEIDER (2009)				1

***signifikant verschieden von Null mit $p < 0,001$

Das Resultat des Friedman-Tests zeigt, dass zwischen den Ergebnissen der Methoden signifikante Unterschiede bestehen ($p < 0,001$). Im paarweisen Vergleich (Tukey-Test) der Methoden sind alle Kombinationen signifikant verschieden mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,01$, außer zwischen den Methoden von BLACKMORE (2000) Fall 1 und Fall 2 (Tab. 4-17).

Tab. 4-17: Ergebnisse des paarweisen Vergleichs am Versuchsschlag „Lange Winde“

Friedman-Test	BLACKMORE (2000) Fall 1	BLACKMORE (2000) Fall 2	BLACKMORE et al. (2003)	SCHNEIDER (2009)
BLACKMORE (2000) Fall 1		n.s.	**	**
BLACKMORE (2000) Fall 2			**	**
BLACKMORE et al. (2003)				**
SCHNEIDER (2009)				

**signifikant verschieden von Null mit $p < 0,01$

Das Gesamtergebnis des Friedman-Tests zeigt, dass auch für den Versuchsschlag „Lange Winde“ die Methoden zu keinem einheitlichen Gesamtergebnis führen. Leichte Vorteile sind für die Methoden von BLACKMORE (2000) Fall 1 und Fall 2 zu beobachten, die zu ähnlichen Resultaten führen.

Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse wird ähnlich wie am Versuchsschlag „550“ an den Rasterzellen mit den zehn niedrigsten und den zehn höchsten Durchschnittserträgen über den Untersuchungszeitraum durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Methoden BLACKMORE (2000) Fall 1 und Fall 2 sowie SCHNEIDER (2009) nur die Hohertragszonen als stabil einstufen, die Niedrigertragszonen jedoch überwiegend als instabil bewerten. Die Methodik von BLACKMORE et al. (2003) klassifiziert alle Rasterzellen als instabil. Eine sichere und richtige Klassifizierung stabiler Ertragszonen ist mit den untersuchten Methoden am Beispiel der Sensitivitätsanalyse widerlegt worden (Tab. 4-18).

Tab. 4-18: Klassifizierungen der Rasterzellen mit den zehn niedrigsten und den zehn höchsten Durchschnittserträgen des Versuchsschlags „Lange Winde“

ID	Y2000	Y2001	Y2003	Y2006	Y2008	Y2010	Y2011	Blackmore 2000 Fall 1	Blackmore 2000 Fall 2	Blackmore 2003	Schneider
1	7,6	8,5	7,0	7,8	11,8	10,8	8,9	10	10	20	10
2	7,5	8,5	6,9	7,4	11,6	11,3	8,4	10	10	20	10
3	8,0	8,1	7,1	7,6	12,0	10,9	7,8	10	10	20	10
4	8,4	8,6	6,9	7,9	11,7	9,7	6,9	10	10	20	10
5	7,6	8,9	6,5	7,6	11,3	9,5	8,6	10	10	20	10
6	7,6	8,9	6,4	7,5	11,5	9,5	8,4	10	10	20	10
7	8,6	8,2	6,9	7,1	11,4	10,6	8,7	10	10	20	10
8	7,2	8,2	7,0	7,9	11,7	10,6	8,4	10	10	20	10
9	7,3	8,1	7,1	7,3	11,5	11,4	8,4	10	10	20	10
10	8,9	8,0	7,4	8,2	10,5	9,6	8,0	10	10	20	10
4601	2,3	2,1	3,4	3,4	4,0	4,3	1,4	40	40	40	40

ID	Y2000	Y2001	Y2003	Y2006	Y2008	Y2010	Y2011	Blackmore 2000 Fall 1	Blackmore 2000 Fall 2	Blackmore 2003	Schneider
4602	2,9	2,9	3,1	3,6	3,8	4,4	1,8	30	30	40	30
4603	2,8	2,7	2,9	3,5	3,9	4,7	1,8	30	30	40	40
4604	2,9	2,5	2,2	3,8	5,2	4,1	0,8	40	40	40	40
4605	3,5	2,9	2,8	3,4	3,3	4,4	1,4	30	30	40	40
4606	1,9	3,0	2,6	4,0	3,2	4,7	1,5	40	40	40	40
4607	2,8	2,6	2,0	4,3	3,4	4,5	1,5	40	40	40	40
4608	3,9	2,4	2,2	3,2	4,0	2,7	0,9	40	40	40	40
4609	3,5	2,5	2,2	3,0	4,2	2,7	0,6	40	40	40	40
4610	1,9	2,7	2,2	4,0	3,1	4,3	1,0	40	40	40	40

4.3.2.3 Abschließende theoretische Anmerkungen zu den Methoden

An den beiden vorgestellten Versuchsschlägen „550“ und „Lange Winde“ konnte gezeigt werden, dass die untersuchten Methoden auf Basis einer identischen Datengrundlage zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte zu signifikanten Unterschieden führen. Deshalb werden im Folgenden die von den Autoren in ihren Originalarbeiten formulierten Ziele zitiert und mit den implizit formulierten Zielstellungen ihrer Berechnungsalgorithmen verglichen. Es soll damit geprüft werden, ob die inhaltlich formulierten Zielsetzungen in entsprechend richtige Berechnungsalgorithmen umgesetzt wurden (Tab. 4-19).

Tab. 4-19: Formulierte Ziele der Autoren

Quelle	Ziel
BLACKMORE, 2000	„The data were combined into two maps, which characterised the spatial and temporal variability recorded over those years.“, S. 37
BLACKMORE et al., 2003	„... to identify the spatial and temporal trends.“, S. 455
SCHNEIDER, 2009	„ ... anhand von Ertragskarten eine Aussage über die zeitliche Stabilität von Flächen [Rasterzellen] gemacht werden kann.“, S. 44.

Die Autoren verfolgen die gleichen Zielsetzungen, räumliche Ertragsmuster auf ihre zeitliche Konstanz zu prüfen. Eine wichtige Bedingung, die zur Beantwortung der in Tab. 4-19 formulierten Hypothesen berücksichtigt werden muss, sind die jährlichen Fluktuationen der Durchschnittserträge, die durch biotische und abiotische Faktoren hervorgerufen werden. Messbar und nachweisbar sind diese Fluktuationen sowohl durch die jährlichen Veröffentlichungen der statistischen Landesämter als auch durch jährliche betriebs- und schlagspezifische Vergleiche. Die Tab. 4-20 gibt einen Überblick der Durchschnittserträge für Winterweizen von betriebsinternen Vergleichen einer nichtrepräsentativen Umfrage von drei Betrieben wieder. Als Beispiel der Veröffentlichungen des statistischen Bundesamts sind die Durchschnittserträge für Wintergerste, Winterweizen und Winterraps im Anhang A4-3-2-3 angegeben.

Tab. 4-20: Betriebsinterne Schlagvergleiche der durchschnittlichen Winterweizenerträge (t ha⁻¹)

Betrieb	Schlagbezeichnung	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Leithold*	Am Kuhberg	8,99			7,19		9,74
Leithold*	Westring		8,32		9,71		8,85
Leithold*	Ponitz	9,71		7,87		9,51	
Winter**	Neue Häuser	7,97			8,74		
Winter**	Wiese Baalsdorf		9,62			7,22	
Winter**	Schafstall			9,44			9,01
Diemar***							
Diemar***							
Diemar***							

*LEITHOLD, 2012, ** WINTER, 2012, ***DIEMAR, 2012

Untermauert wird die jährliche Fluktuation der Durchschnittserträge durch die Tab. 4-8 und Tab. 4-13. Eine weitere Besonderheit, die in den Ertragsdaten enthalten ist, sind die jährlichen schlagindividuellen Ausprägungen der Ertragsmuster. Deren Häufigkeitsverteilungen sind in der Regel nicht normalverteilt (s. Abb. 4-11 und 4-17).

BLACKMORE 2000 - Methode

Fall 1: Auswertung mehrerer Ertragskarten für eine Fruchtart

Grundlage der theoretischen Überlegungen sind die Berechnungsalgorithmen der Formeln 3-1 und 3-2. Mit beiden Formeln werden der Mittelwert und die Standardabweichung aus den jährlichen Erträgen für die spezifische Rasterzelle berechnet. BLACKMORE (2000) unterstellt in der Formel implizit, dass die sich jährlich ausbildenden Erträge einer Rasterzelle um einen Ziel- (oder Soll-)wert einpendeln sollten. Träfe dies für eine Rasterzelle zu, müsste es auch für alle übrigen Rasterzellen zutreffen. Der Autor schließt damit mögliche Ertragsschwankungen zwischen den Jahren aus.

Die Verwendung des Variationskoeffizienten als Kriterium der zeitlichen Stabilität beachtet zudem nicht die pflanzenbauliche Fachlichkeit. BLACKMORE (2000) definiert einen Schwellenwert von 30 %. Bei einem Durchschnittsertrag von 10 t ha^{-1} beträgt die Grenze der Standardabweichung 3 t ha^{-1} , damit die Rasterzelle als zeitlich stabil gilt. Hingegen darf der Wert der Standardabweichung nur $0,3 \text{ t ha}^{-1}$ annehmen, wenn der Mittelwert der Rasterzelle 1 t ha^{-1} entspricht. Fälschlicherweise würde sich für Hohertragszonen ein zu breiter Ertragskorridor ergeben, der unter den Gesichtspunkten der bedarfsgerechten Ausbringung von Düngemitteln, Pflanzenschutz und evtl. Saatgut nicht akzeptabel ist.

Die formulierte Hypothese kann mit dieser Methodik nicht beantwortet werden.

Fall 2: Auswertung mehrerer Ertragskarten unterschiedlicher Fruchtarten

Durch die Standardisierung der Fruchtarten mit der Formel 3-3 auf den Mittelwert, erfolgt die Berechnung der Kriterien für das Ertragsniveau und der zeitlichen Stabilität mit den Formeln 3-4 und 3-5 auf einem Relativniveau. Durch diesen Schritt löst sich BLACKMORE (2000) von dem Bezug auf einen absoluten Ziel- (oder Soll-)wert. Damit erlaubt BLACKMORE (2000) implizit jährliche Fluktuationen der absoluten Erträge in den Rasterzellen, ohne dass sich dabei die relativen Bezüge ändern dürfen. Allerdings setzt die Formel 3-5 Häufigkeitsverteilung der Ertragsdaten eines einheitlichen Typs voraus, sonst ergibt sich ein verfälschender Effekt bedingt durch die unterschiedlichen Formen der Verteilungen. Weiterhin zeigt sich durch die Sensitivitätsanalysen in den Kapiteln 4.3.2.1 und 4.3.2.2, dass Rasterzellen mit den niedrigsten Erträgen fälschlicherweise als instabil eingestuft werden. Die Ursache liegt wiederum in der Verwendung des Variationskoeffizienten als Kriterium der zeitlichen Stabilität.

Die formulierte Hypothese kann mit dieser Methodik nur unter bestimmten Voraussetzungen beantwortet werden.

BLACKMORE et al. 2003 - Methode

In der Formel 3-6 berechnen BLACKMORE et al. (2003) die zeitliche Varianz der Rasterzellen, indem die Abweichung des jährlichen Ertrags der Rasterzellen von dem jährlichen Durchschnittsertrag des Schlages subtrahiert wird. Mit diesem Berechnungsalgorithmus werden Rasterzellen „bestraft“, die

einen über- oder unterdurchschnittlichen Ertrag aufweisen. Die Sensitivitätsanalysen verdeutlichen diesen Sachverhalt, da Rasterzellen mit den höchsten und niedrigsten Erträgen als instabil eingestuft werden. Bei dieser Methodik führen zudem positive und negative Abweichungen vom Ertragsdurchschnitt zu gleichen Ergebnissen. Das heißt, Zonen mit den jährlich höchsten Erträgen würden gleichgesetzt werden mit Zonen, deren Erträge starke Ertragsdifferenzen aufweisen. Jedoch ist die Konstanz beider Rasterzellen verschieden.

Mit den Algorithmen dieser Methodik verfehlen die Autoren das Ziel, Ertragskarten und Ertragszonen auf stabile Muster zu prüfen.

SCHNEIDER (2009) - Methode

Trotz der Standardisierung der jährlichen Naturalerträge auf die einheitliche Basis der Getreideeinheiten unterstellt SCHNEIDER (2009) implizit mit der Formel 3-8, dass die Naturalerträge sich einem Ziel- (oder Soll-)wert annähern sollten. Mögliche jährliche Ertragsschwankungen werden damit ausgeschlossen. Auch für die Methodik von SCHNEIDER (2009), die als Kriterium der zeitlichen Stabilität den Variationskoeffizienten verwendet, gilt die oben angeführte Kritik.

Auch hier ist anzumerken, dass die von der Autorin vorgestellte Methodik nicht die vorab formulierte These beantworten kann.

4.3.2.4 Zwischenfazit – Fehlerhafte Einordnung „richtig-stabiler“ Ertragszonen als „instabile“

Die von den Autoren formulierten Hypothesen decken sich nicht mit den implizit formulierten Hypothesen ihrer entwickelten Berechnungsalgorithmen. Einerseits setzen sie in den Ertragsdaten für verschiedene Fruchtarten Häufigkeitsverteilungen gleichen Typs voraus, die jedoch in den wenigsten Fällen nachweisbar sind. Andererseits führt die Verwendung des Variationskoeffizienten als Kriterium für die zeitliche Variabilität dazu, dass die zulässige Spanne der Varianz mit steigendem Ertrag zunehmen darf. Damit wird auch die fachliche Zielstellung der mehrjährigen Ertragskarte, bedarfsgerecht Betriebsmittel auszubringen, verfehlt. Als Fazit kann geschlussfolgert werden, dass die vorgestellten Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte nicht geeignet sind.

Im anschließenden Kapitel wird eine eigene Methodik zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte vorgestellt und anhand eines simulierten Beispiels auf eine richtige Klassifizierung geprüft.

4.3.3 Verteilungsunabhängige Methode zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte

Für die Überprüfung von Ertragskarten mehrerer Erntejahre und unabhängig von Fruchtarten müssen folgende Bedingungen berücksichtigt werden:

- 1 Die interjährlichen Ertragsschwankungen dürfen bei der Bewertung der intrajährlichen Ausprägungen der Ertragsmuster keinen Einfluss haben, beide Effekte müssen voneinander getrennt werden.
- 2 Die Konstanz der intrajährlichen Ertragsmuster ist zur Erstellung der mehrjährigen Ertragskarte relevant. Sie soll eine Antwort darauf geben können, ob Rasterzellen im Untersuchungszeitraum konstant hohe, durchschnittliche oder niedrige Erträge aufweisen.
- 3 Für den Vergleich der intrajährlichen Ausprägung der Ertragsmuster müssen die Formen der Häufigkeitsverteilungen Beachtung finden. Ein Bezug auf eine statistische Kenngröße erscheint im Hinblick auf die Ergebnisse der vorangehenden Kapitel nicht sinnvoll. Dies kann

dazu führen, dass durch extreme Formen der Häufigkeitsverteilungen eine scheinbare zeitliche Variabilität suggeriert wird und falsche Schlussfolgerungen gezogen werden.

4.3.3.1 Kriterium „Ertragsniveau“

Für die Ertragsdaten der Einzeljahre erfolgt eine Transformation der intervallskalierten Skala zu einer Ordinalskala mit der Formel 4-5.

$$y_{it} \rightarrow x_{it} \quad \text{F. 4-5}$$

mit

$$\begin{aligned} y_{it} &- \text{Ertrag der Rasterzelle } i \text{ im Erntejahr } t \\ x_{it} &- \text{Zugeordneter Rang der Rasterzelle } i \text{ im Erntejahr } t \end{aligned}$$

Im zweiten Schritt werden die absoluten Ränge relativiert mit der Formel 4-6.

$$R_{it} = \frac{x_{it}}{x_{i-max_t}} \times 100 \quad \text{F. 4-6}$$

mit

$$\begin{aligned} R_{it} &- \text{Relativrang des Ertrags der Rasterzelle } i \text{ im Erntejahr } t \\ x_{i-max_t} &- \text{Maximalrang im Erntejahr } t \end{aligned}$$

Die Berechnung der Relativränge ist ein methodischer Fehler der Statistik. Ordinalskalierte Daten dürfen nur in ihrer Reihenfolge geordnet werden, aber keinen Rechenoperationen unterliegen. Die grundlegende Eigenschaft der Ordinalskala ist die fehlende Interpretierbarkeit der Distanz zwischen den Rängen. Als Beispiel können hierfür die Schulnoten angeführt werden. Die Note 1 ist z.B. besser als die Note 2, aber nicht doppelt besser als die Note 2 (LORENZ, 1996: 13). Für die Ertragsdaten sind die Differenzen zwischen den Rängen jedoch messbar. Die Auswertung der Versuchsschläge „Lange Winde“ und „550“ zeigen, dass 99,8 % der Differenzen kleiner als $0,009 \text{ t ha}^{-1}$ sind. Die größten Differenzen zwischen zwei Rängen sind in den Hohertragsbereichen feststellbar, die maximale Differenz beträgt $0,45 \text{ t ha}^{-1}$. Für die insgesamt 51.380 untersuchten Ertragspunkte konnte eine durchschnittliche Differenz zwischen den Rängen von $1,67 \text{ kg ha}^{-1}$ gefunden werden.

Um die Hypothese der Stabilität der Ertragszonen zu beantworten, ist es erforderlich, unabhängig von der Form der Häufigkeitsverteilung, die höchsten, mittleren und niedrigsten Ertragszonen zuverlässig zu bestimmen. Die Abb. 4-21 verdeutlicht für den Versuchsschlag „550“ die Abhängigkeit von der Form der Häufigkeitsverteilung. Im feuchten Erntejahr 1999 weisen die 25 % der höchsten Erträge einen Absolutertrag von $8,11 \text{ t ha}^{-1}$ und mehr aus, während für die trockenen Erntejahre die Grenze bei ca. $6,00 \text{ t ha}^{-1}$ liegt.

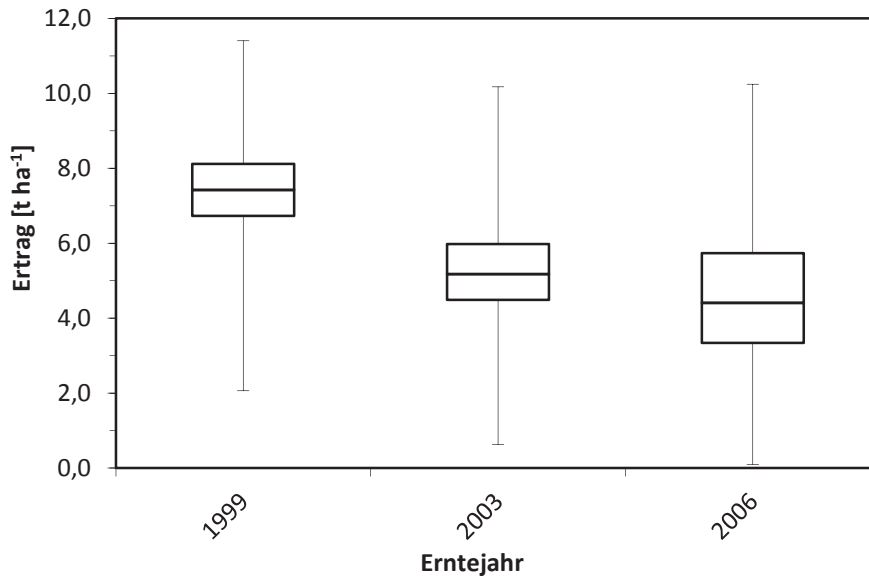


Abb. 4-21: Boxplot Darstellungen der Körnermaiserträge des Versuchsschlages „550“

Durch die Transformation in ordinalskalierte Daten werden die Häufigkeitsverteilungen auf eine Gleichverteilung standardisiert. Damit können unterschiedliche Verteilungsformen verglichen werden. Für den mehrjährigen Vergleich wird das mittlere Ertragsniveau \bar{R}_i jeder Rasterzelle i mit der Formel 4-7 ermittelt.

$$\bar{R}_i = \frac{\sum_{t=1}^{t=n} R_{it}}{n} \quad \text{F. 4-7}$$

Für den Vergleich der vorgestellten Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte von BLACKMORE (2000), BLACKMORE et al. (2003) und SCHNEIDER (2009) wird eine ähnliche Klassifizierung in Hoch- und Niedrigertragszone vorgenommen. Die Grenzen der Ertragszonen und der zeitlichen Stabilität sind in der Tab. 4-21 aufgeführt.

4.3.3.2 Kriterium „zeitliche Stabilität“

Die zeitliche Stabilität der Erträge der Rasterzellen wird durch die Standardabweichung der Relativränge z_i mit der Formel 4-8 ermittelt.

$$z_i = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{t=n} (R_{it} - \bar{R}_i)^2}{n-1}} \quad \text{F. 4-8}$$

Als Grenze der zeitlichen Stabilität wird 16 % getestet (s. Tab. 4-21).

Tab. 4-21: Klassengrenzen des Ertragsniveaus und der zeitlichen Stabilität für den Vergleich der vorgestellten Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte

Bezeichnung der Ertragszone	Ertragsniveau	Stabilitätskriterium
hoch - stabil	$\bar{R}_i > 50\%$	$z_i < 16\%$
hoch - instabil	$\bar{R}_i > 50\%$	$z_i > 16\%$
niedrig - stabil	$\bar{R}_i < 50\%$	$z_i < 16\%$
niedrig - instabil	$\bar{R}_i < 50\%$	$z_i > 16\%$

4.3.4 Validierung der untersuchten Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte anhand eines simulierten Schlagbeispiels

Die Validierung der vorgestellten Methoden nach BLACKMORE (2000), BLACKMORE et al. (2003) und SCHNEIDER (2009) und der eigens entwickelten Methodik erfolgt an einem simulierten Beispiel. Um die richtige Vorgehensweise der Klassifizierungen zu überprüfen, wurde für das simulierte Schlagbeispiel angenommen, dass nur stabile Ertragszonen vorhanden sind. Die Erträge unterscheiden sich deutlich im absoluten Niveau, die relativen Beziehungen für jedes Erntejahr sind gleich. Weiterhin unterscheiden sich die Formen der Häufigkeitsverteilungen sehr deutlich, so dass die typischen Witterungsverläufe eines trockenen, mittleren und feuchten Erntejahres berücksichtigt werden.

4.3.4.1 Datengrundlage des simulierten Schlagbeispiels

Das simulierte Beispiel zeichnet sich durch extrem unterschiedliche Formen der Häufigkeitsverteilungen für fünf Erntejahre aus. Ihre Ausprägungen sind in der Abb. 4-22 dargestellt. Simuliert wurden fünf Ertragskarten einer Fruchtart mit jeweils 10.000 Ertragspunkten.

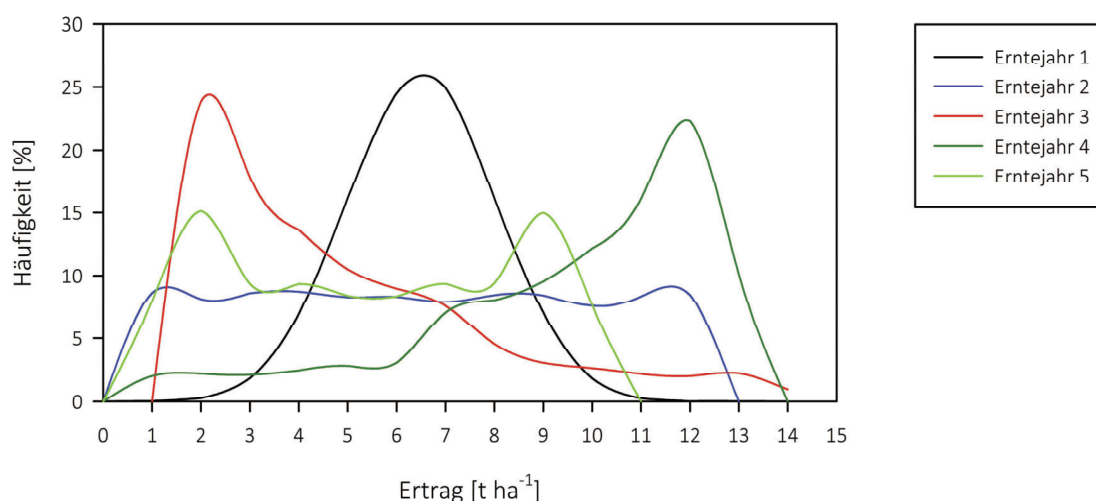


Abb. 4-22: Häufigkeitsverteilungen der fünf Erntejahre für das simulierte Schlagbeispiel

In der Tab 4-22 sind die statistischen Kennzahlen der simulierten Ertragskarten enthalten. Jahreseffekte werden durch die Differenzen der mittleren Erträge simuliert.

Tab. 4-22: Statistische Kennzahlen des simulierten Schlagbeispiels (in t ha⁻¹)

Erntejahr	1	2	3	4	5
Mittelwert	6,01	5,96	4,45	9,02	4,98
Median	6,01	5,92	3,58	9,89	4,98
s	1,49	3,48	2,97	2,97	2,91
min	0,01	0,00	1,18	0,00	0,37
P _{5%}	3,57	0,57	1,31	2,40	0,68
P _{95%}	8,44	11,44	11,07	12,16	9,27
max	12,01	12,00	13,47	12,29	9,59

Die Abb. 4-23 zeigt die räumliche Verteilung der jährlichen Ertragskarten, deren Klasseneinteilung einer äquidistanten Legende folgt. In Nord-Süd-Richtung verläuft ein abnehmender räumlicher Trend für die Ertragsdaten.

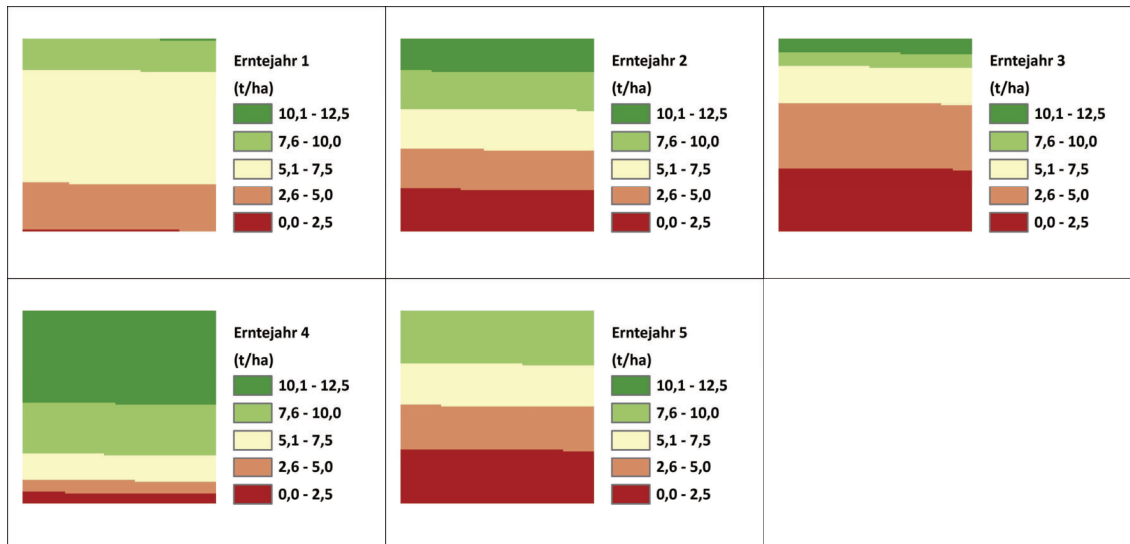


Abb. 4-23: Darstellung der jährlichen simulierten Ertragskarten

Zusammenfassend dargestellt sind der mittlere Ertrag und die Standardabweichung der Rasterzellen über fünf Erntejahre (Abb. 4-24).

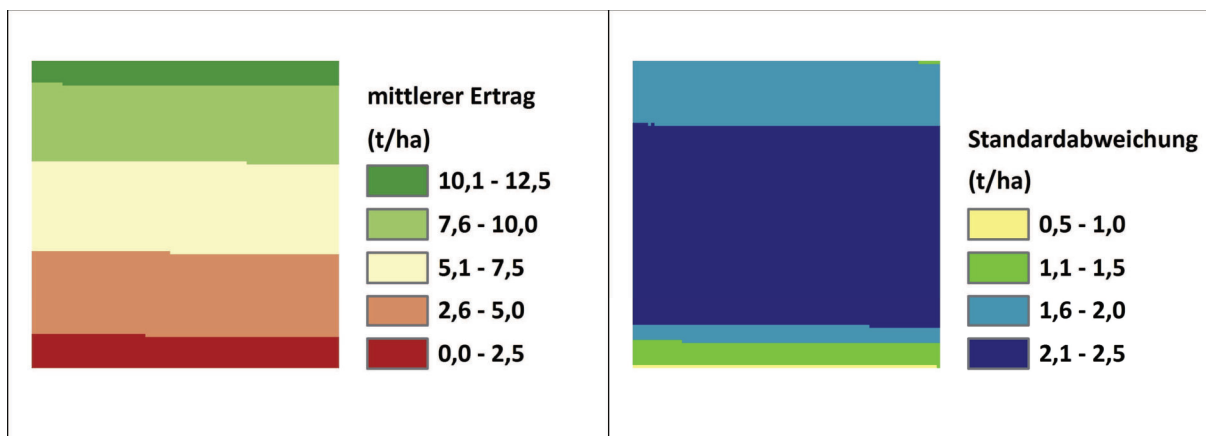


Abb. 4-24: Darstellung des mittleren mehrjährigen Ertrags und dessen Standardabweichung

4.3.4.2 Klassifizierungen der Methoden

Trotz der vollkommenen Stabilität der Ertragszonen kommen die untersuchten Methoden zu unterschiedlichen Resultaten. Mit 97,4 % falsch eingestufte Rasterzellen schneidet die von SCHNEIDER (2009) entwickelte Methode am schlechtesten ab. Ähnlich kritisch zu bewerten sind mit 81,2 % und 65,0 % als fälschlicherweise instabil eingestufte Rasterzellen die Methoden nach BLACKMORE et al. (2003) und BLACKMORE (2000) Fall 1. Nur die Methodik nach BLACKMORE (2000) Fall 2 stuft 28,4 % der Rasterzellen als instabil ein. Damit unterstreicht die Analyse die inhaltliche Divergenz zwischen den formulierten Zielen aus Tab. 4-19 und den entwickelten Berechnungsalgorithmen der Autoren. Die entwickelte verteilungsunabhängige Methodik (Y (Rang)) kommt zu einer vollständigen stabilen Einstufung der untersuchten Rasterzellen der simulierten Erntejahre.

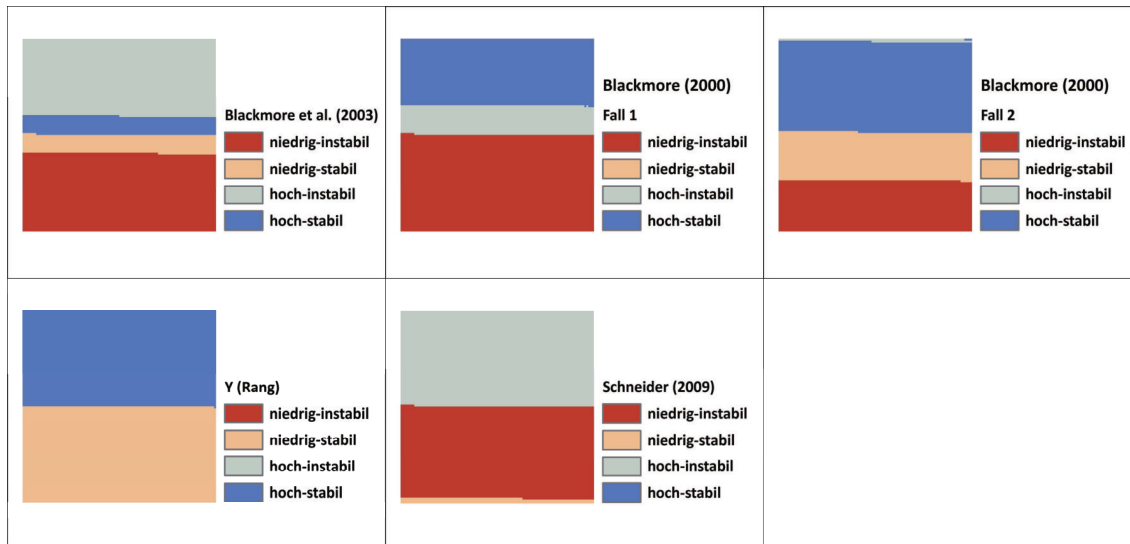


Abb. 4-25: Klassifizierungen der Methoden für das simulierte Schlagbeispiel

Mit der Korrelationsanalyse können signifikante Zusammenhänge mit $r_s > 0,89$ zwischen den Methoden festgestellt werden. Es zeigt sich, dass der Korrelationskoeffizient zur Beurteilung eines Methodenvergleiches nur bedingt geeignet ist (Tab. 4-23).

Tab. 4-23: Korrelationsmatrix zwischen den Methoden am simulierten Schlagbeispiel

Korrelationskoeffizient r (nach Spearman)	BLACKMORE (2000) Fall 1	BLACKMORE (2000) Fall 2	BLACKMORE et al. (2003)	SCHNEIDER (2009)	Y (Rang)
BLACKMORE (2000) Fall 1	1	0,89***	0,93***	0,94***	0,95***
BLACKMORE (2000) Fall 2		1	0,89***	0,90***	0,92***
BLACKMORE et al. (2003)			1	0,92***	0,93***
SCHNEIDER (2009)				1	0,99***
Y (Rang)					1

***signifikant verschieden von Null mit $p < 0,001$

Tabelle 4-24 enthält für die untersuchten Methoden die paarweisen Übereinstimmungen. Im Vergleich zu den beiden Versuchsschlägen „550“ und „Lange Winde“ sind die paarweisen Übereinstimmungen des simulierten Schlagbeispiels am schlechtesten.

Tab. 4-24: Übereinstimmungsmatrix der Methoden am simulierten Schlagbeispiel

Übereinstimmung der Methoden (in %)	BLACKMORE (2000) Fall 1	BLACKMORE (2000) Fall 2	BLACKMORE et al. (2003)	SCHNEIDER (2009)	Y (Rang)
BLACKMORE (2000) Fall 1	100,0	60,5	46,2	62,3	35,0
BLACKMORE (2000) Fall 2		100,0	45,9	25,8	70,2
BLACKMORE et al. (2003)			100,0	78,6	18,7
SCHNEIDER (2009)				100,0	2,6
Y (Rang)					100,0

4.3.5 Zwischenfazit

Durch die Analyse mehrerer Ertragskarten von zwei Versuchsschlägen konnten für die vorgestellten Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte große Differenzen für die Klassifizierungen der Ertragszonen festgestellt werden. Schwächen zeigen die Methoden insbesondere für Niedrigertragszonen. Gründe liegen in der Verwendung des Variationskoeffizienten als Stabilitätskriterium und der fehlenden Berücksichtigung unterschiedlicher Ausprägungen der Häufigkeitsverteilungen der Ertragsdaten. Die vom Autor entwickelte verteilungsunabhängige Methodik zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte berücksichtigt beide Einflussgrößen. An einem simulierten Schlagbeispiel,

dass einerseits extrem unterschiedliche Häufigkeitsverteilungen der Ertragsdaten vorweist und andererseits vollkommen stabile Ertragszonen beinhaltet, erfolgt der Nachweis der richtigen Klassifizierungen der Ertragszonen.

Für alle Methoden ist die Klassifizierung der zeitlichen Stabilität und des Ertragsniveaus von Ertragszonen zu einer Gesamtkarte generell als kritisch zu beurteilen. Klassengrenzennahe Ertragspunkte sind sich ähnlicher als klassengrenzenferne Ertragspunkte, die durch eine Klassifizierung mit willkürlichen Schwellenwerten egalisiert werden. Zur weiteren Nutzung einer mehrjährigen Ertragszone, z.B. für die Ertragsprognose, erscheint die Verwendung der unklassifizierten Daten sinnvoller. So könnten die Informationen zum Ertragsniveau und zur zeitlichen Stabilität als zwei zusätzliche Eingangsvariablen für ein Ertragsprognosemodell als Grundlage dienen.

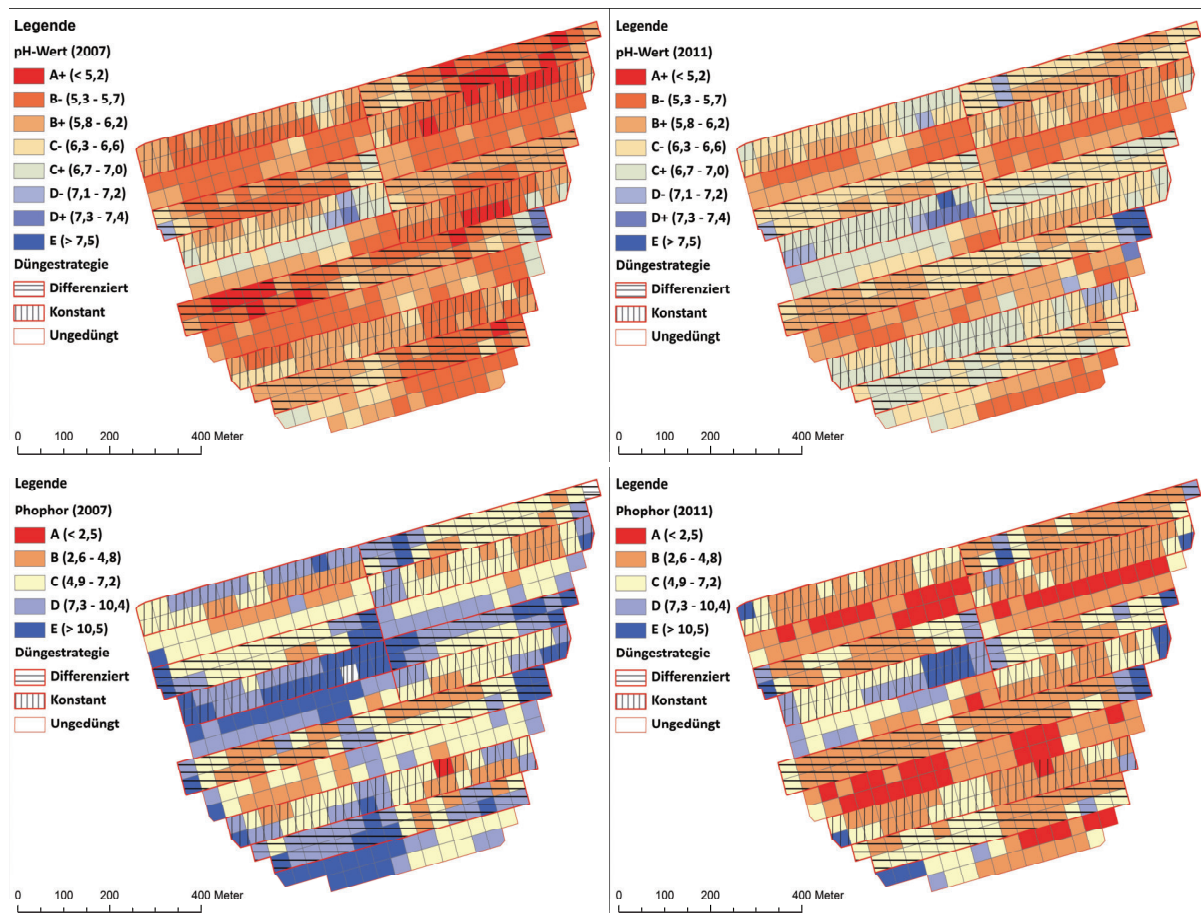
4.4 Ökomischer Vergleich zwischen hochaufgelösten und herkömmlichen Bodenbeprobungen

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse der hochaufgelösten Bodenbeprobungen des Verissensors und der herkömmlichen Bodenbeprobungen vorgestellt. Auf dem Versuchsschlag „550“ erfolgte die herkömmliche Bodenbeprobung im Jahr 2011, in dem auch die Beprobung mit dem Verissensor stattfand. Für die Vergleiche zwischen den hochaufgelösten und herkömmlichen Bodenbeprobungen auf Basis unterschiedlicher Heterogenitätsindikatoren wurden die herkömmlichen Bodenbeprobungen nach der beschriebenen Methodik aus Kap. 3.3.4 simuliert.

4.4.1 Versuchsschlag „550“ am Standort Görzig

4.4.1.1 Ergebnisse der hochaufgelösten herkömmlichen Bodenbeprobungen der Jahre 2007 und 2011

Die Abbildung 4-26 zeigt die Entwicklung der Nährstoffe Phosphor, Kalium und Magnesium sowie die Entwicklung des pH-Werts unter dem Einfluss unterschiedlicher Düngevarianten im Zeitraum von 2007 bis 2011. Für die Klassifizierungen der Nährstoffe wurden die Grenzen der Gehaltsklassen nach den gesetzlichen Richtwerten der Empfehlungen für die Bundesländer Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt für die Bodengruppe IV mit einem Humusgehalt von weniger als 4 % (VON WULLFEN et al., 2007: 12ff) übernommen. Auffallend sind sowohl die deutlichen Strukturen, die sich in beiden Jahren herauskristallisieren, als auch die kleinräumigen Variabilitäten für den pH-Wert, Phosphat- und Kaliumgehalt (Abb. 4-26).



Fortsetzung der Abb. 4-26 auf nächster Seite

Fortsetzung der Abb. 4-26

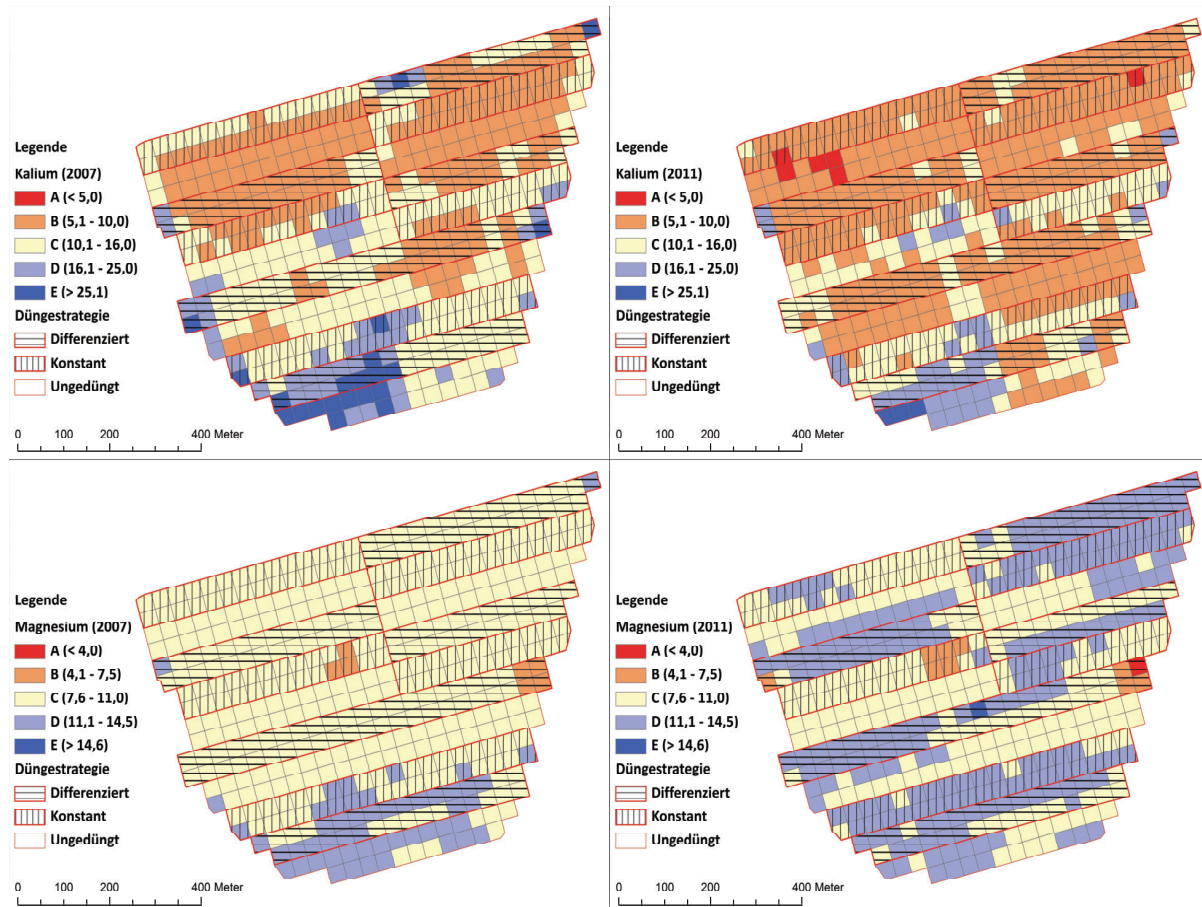


Abb. 4-26: Ergebnisse der Bodenbeprobungen der Jahre 2007 und 2011 der Nährstoffe Phosphor, Kalium und Magnesium (jeweils in mg Nährstoff je 100 g Boden) sowie des pH-Werts

Die Ergebnisse der Bodenbeprobungen zeigen zwei Effekte: Innerhalb der Ergebnisse beider Jahre bestehen starke Beziehungen zwischen dem pH-Wert und Phosphor sowie zwischen Phosphor und Kalium mit Korrelationskoeffizienten von $r = 0,54$ bis $r = 0,79$ ($p < 0,001$). Als weitere Effekte zeigen sich zwischen den Ergebnissen beider Jahre sehr gute Korrelationen für die Ergebnisse einzelner Nährstoffe mit Korrelationskoeffizienten in einem Bereich zwischen 0,66 und 0,86 ($p < 0,001$), trotz des Einflusses der unterschiedlichen Düngungsstrategien (Tab. 4-25).

Tab. 4-25: Korrelationsmatrix der Ergebnisse der Bodenbeprobungen am Versuchsschlag „550“

Korrelationskoeffizient r (nach Pearson), n = 448	pH (2007)	P (2007)	K (2007)	Mg (2007)	pH (2011)	P (2011)	K (2011)	Mg (2011)
pH (2007)	1	0,79 ***	0,43***	-0,24***	0,70 ***	0,70***	0,44***	-0,58***
P (2007)		1	0,61 ***	-0,10**	0,53***	0,85 ***	0,58***	0,49***
K (2007)			1	0,43***	0,33***	0,44***	0,86 ***	-0,02*
Mg (2007)				1	-0,20***	-0,23***	0,31***	0,66 ***
pH (2011)					1	0,67 ***	0,38***	-0,35***
P (2011)						1	0,54 ***	-0,51***
K (2011)							1	-0,06*
Mg (2011)								1

* nicht signifikant, ** signifikant verschieden von Null mit $p < 0,05$, *** signifikant verschieden von Null mit $p < 0,001$

Durch die teilflächenspezifische bedarfsgerechte Düngung in der differenzierten Düngungsstrategie sollten sich stark unter- und übertersorgte Zonen mit fortschreitender Versuchsdauer den Zielnährstoffgehalt annähern. In der ungedüngten Variante dürften an allen Beobachtungspunkten die Nähr-

stoffgehalte auf einen Grenzwert nahe Null sinken. Für die konstante Variante sollten die relativen Niveauunterschiede an den Beobachtungspunkten erhalten bleiben. Zur Prüfung der beschriebenen zu erwartenden Entwicklungen der Nährstoffgehalte dient der Korrelationskoeffizient. In der differenzierten und ungedüngten Variante sollten abnehmende Korrelationskoeffizienten zu beobachten sein, während in der konstanten Variante die Korrelationskoeffizienten auf einem ähnlichen Niveau verbleiben sollten.

Die zugrunde liegende Theorie wird in der Abb. 4-27 verdeutlicht. Insbesondere sollte der pH-Wert in der ungedüngten Variante im hohen pH-Wert Bereich stärker sinken als im niedrigen pH-Wert Bereich. Ursache hierfür sind verschiedene Pufferungsbereiche des Bodens, mit Hilfe derer der Boden durch Ionenaustauschprozesse ein Absinken des pH-Wertes kompensieren kann. Nach LÜTKE ENTRUP und OEHMICHEN (2006: 166) können für folgende pH-Wert Bereiche Puffer definiert werden, die durch den hauptsächlichsten Austausch der angeführten Ionen geprägt sind: pH > 6,2: Karbonatpuffer, pH von 5,0 bis 8,0: Phosphatpuffer, pH von 5,0 bis 6,2: Silikatpuffer, pH von 4,2 bis 5,0: Austauschpuffer, pH < 4,2: Aluminiumpuffer. Die größte Bedeutung für das Pufferungsvermögen des Bodens kann dabei dem Austauschpuffer (SCHMALFUSS, 1958: 94) und dem Aluminiumpufferbereich (MATSCHULLAT et al., 1997: 41) zugeschrieben werden, die dafür sorgen, dass sich der pH-Wert bei 4,0 stabilisiert (ROWELL, 1997: 267). Neben den angeführten Pufferungsbereichen gibt es den Eisenpufferungsbereich, der bei pH-Werten von 3,8 und weniger eintritt, der allerdings vermehrt im forstwirtschaftlichen Bereich eine bedeutsame Rolle spielt (MATSCHULLAT et al., 1997: 42). Das gesamte Pufferungsvermögen des Bodens ist abhängig von der Bodenart und dem Humusgehalt (ROWELL, 1997: 267).

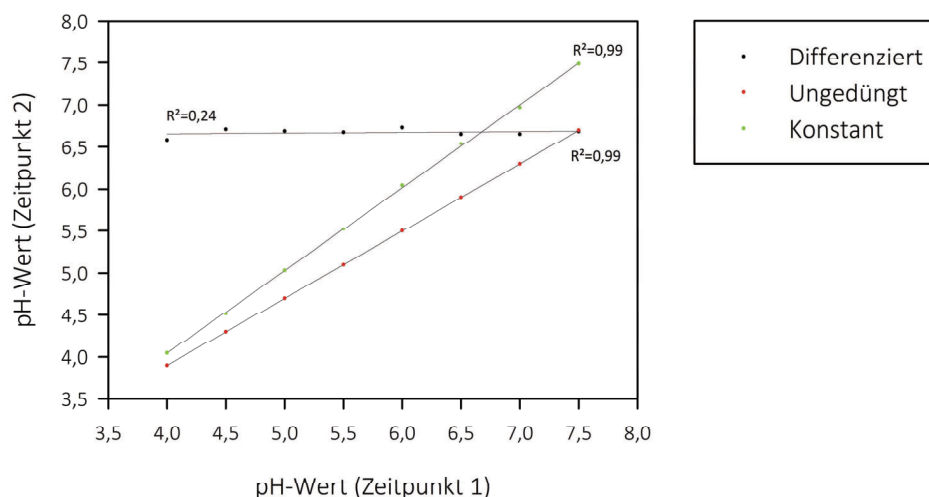


Abb. 4-27: Theorie der Entwicklung der Korrelationskoeffizienten durch unterschiedliche Düngungsstrategien

Zwischen der differenzierten Düngungsstrategie und den anderen Düngungsstrategien sind signifikante Unterschiede für die Korrelationskoeffizienten, mit Ausnahme für Kalium, nachweisbar (Tab. 4-26). Für den beobachteten Versuchszeitraum von vier Jahren sind nur geringe Differenzen festzustellen, die mit zunehmender Versuchsdauer deutlich ausgeprägter ausfallen sollten.

Tab. 4-26: Korrelationskoeffizienten (r) des pH-Wertes und der Grundnährstoffe der Düngungsstrategien der Jahre 2007 und 2011 am Versuchsschlag „550“

Düngungsstrategie	Anzahl	r_{pH}	r_{P}	r_{K}	r_{Mg}
Differenziert	159	0,75 ^a	0,85 ^a	0,80 ^a	0,62 ^a
Konstant	142	0,87 ^b	0,91 ^b	0,81 ^a	0,72 ^b
Ungedüngt	147	0,86 ^b	0,91 ^b	0,94 ^b	0,76 ^b

Gleiche Buchstaben kennzeichnen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsgliedern, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, $\alpha = 0,05$

Zu Beginn des Versuches konnten zwischen den Varianten keine signifikanten Unterschiede für den pH-Wert und den Phosphor-, Kalium- sowie Magnesiumgehalt festgestellt werden. In dem darauffolgenden Versuchszeitraum kam es zu einer signifikanten Nährstoffentwicklung in allen Varianten. Die Ergebnisse der Bodenbeprobung im Jahr 2011 zeigen signifikante Unterschiede zwischen der ungedüngten Variante und der konstanten sowie differenzierten Variante für den pH-Wert und den Phosphor- und Magnesiumgehalt. Zwischen der differenzierten und der konstanten Variante können keine signifikanten Nährstoffentwicklungen nachgewiesen werden. In der ungedüngten Variante erhöhten sich trotz unterlassener Düngung der pH-Wert und der Magnesiumgehalt leicht (Abb. 4-28).

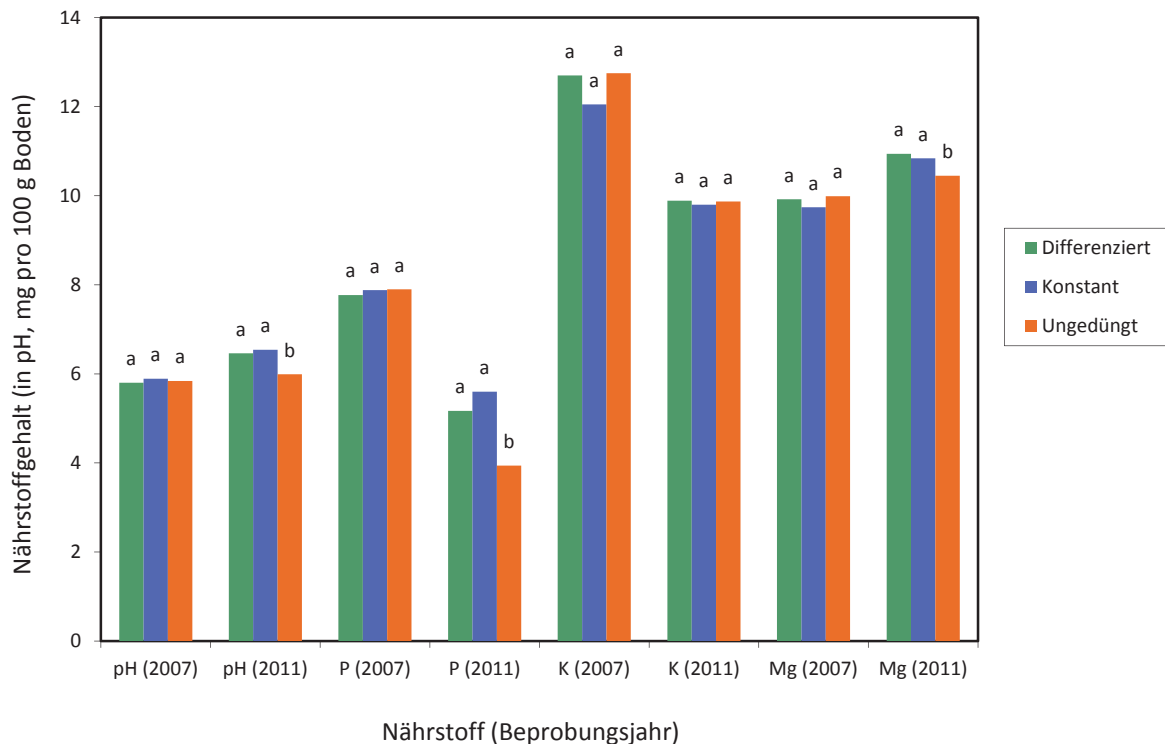


Abb. 4-28: Effekte der Düngevarianten auf die Entwicklung der Nährstoffgehalte von 2007 bis 2011 (gleiche Buchstaben - nicht signifikant, verschiedene Buchstaben - signifikant)

Die Entwicklung der Variationskoeffizienten der Düngungsstrategien zeigt für die differenzierte Variante eine Homogenisierung des pH-Werts und des Phosphat- und Kaliumgehalts. In den anderen Varianten stiegen die Variationskoeffizienten deutlich an, was einer steigenden Heterogenität entspricht (s. Tab. 4-27).

Tab. 4-27: Entwicklung der Variationskoeffizienten der Düngungsstrategien am Versuchsschlag „550“

Variationskoeffizienten (%)	Differenziert			Konstant			Ungedüngt		
	2007	2011	Δ	2007	2011	Δ	2007	2011	Δ
pH-Wert	7,8	4,5	-3,3	8,3	6,0	-2,3	7,2	8,0	0,8
Phosphat	48,3	44,3	-4,0	54,6	61,6	7,0	44,9	57,1	12,2
Kalium	43,9	37,4	-6,5	33,7	38,3	4,6	54,0	50,3	-3,7
Magnesium	11,1	13,4	2,3	9,3	13,7	4,4	9,9	9,7	-0,2

Die Kosten beider Beprobungen belaufen sich auf 15.406 € (234,13 € ha⁻¹) im Jahr 2007 und 8.672 € (131,79 € ha⁻¹) im Jahr 2011, wovon ca. 56 % für die Bodenentnahme und GPS-Dokumentation sowie 44 % für die Bodenanalyse zu veranschlagen sind. Die große Differenz zwischen beiden Jahren ergibt sich aus der Umstellung des Beprobungsrasters von 25 x 25 m im Jahr 2007 auf ein 36 x 36 m-Raster im Jahr 2011.

Die Kosten der Bodenbeprobungen setzen sich zusammen aus:

- GPS-Dokumentation und Bodenentnahme: 7,90 € Probe⁻¹ (AGRI CON, 2011)
- pH-Wert Analytik: 2,50 € Probe⁻¹ (LAUE, 2010)
- Phosphor, Kalium, Magnesium: 4,60 € Probe⁻¹ (AGRI CON, 2011)
- Erstellung Nährstoffkarten: 300 € als Fixbetrag (AGRI CON, 2011)

4.4.1.2 Ergebnisse der hochaufgelösten Bodenbeprobungen des Verissensors der Jahre 2011 und 2012

Die Ergebnisse der Beprobungen des Verissensors werden nach dem entwickelten Algorithmus (s. Kap. 4.1.3) an die Ergebnisse nach der Labormethode angepasst. Einen Überblick der Kalibrierungen und deren Fehlermaße gibt Tab. 4-28.

Tab. 4-28: Ergebnisse der angepassten pH-Messungen nach dem entwickelten Algorithmus zur Kalibrierung des Verissensors

Beprobungsjahr	2011		2012	
Kennziffer	Rohdaten	kalibrierte Daten	Rohdaten	kalibrierte Daten
n		958		1235
fehlerbehaftet		150 (15,7%)		102 (8,3 %)
verbleibend		808		1133
n ha ⁻¹		13,6 ¹		19,1 ¹
Kalibrierproben		21		30
Kalibrierfunktion	pH _{KALIBRIERT} = 1,646 x pH _{VERIS} - 4,672		pH _{KALIBRIERT} = 1,224 x pH _{VERIS} - 2,183	
pH _{MIN}	5,71	4,98	4,62	3,77
pH _{MW}	7,03	6,83	7,03	6,51
pH _{MAX}	7,92	8,06	7,90	7,49
s	0,38	0,53	0,42	0,49
r _{PEARSON} ²		0,92		0,95
r _{CCC} ²	0,70	0,92	0,65	0,95
ME ²	0,40	-0,05	-0,66	-0,02
MAE ²	0,43	0,23	0,66	0,20
RMSE ²	0,52	0,30	0,70	0,25

¹Nettobeprobungsfläche: 59,3 ha, ²bezogen auf Laborergebnisse

Mit der Kalibrierung der Rohdaten nach dem entwickelten Algorithmus können deutliche Fehlerminderungen erzielt werden. Der durchschnittliche Fehler (ME) kann auf ein minimales Niveau gesenkt wer-

den, der aussagekräftigere durchschnittliche absolute Fehler (MAE) erreicht nach der Kalibrierung Werte um 0,2 pH-Einheiten. Deutliche Verbesserungen können für die Übereinstimmung auch durch den r_{ccc} festgestellt werden. Mit pH-Wert Spannen zwischen 3,1 und 3,7 pH-Einheiten sowie Standardabweichungen von ca. 0,5 pH-Einheiten zeichnen sich für den Versuchsschlag „550“ sehr heterogene Verteilungen für den pH-Wert in beiden Untersuchungsjahren ab.

Nach den Bodenbeprobungen der herkömmlichen Methodik konnten wiederkehrende räumliche Strukturen zwischen den Beprobungsjahren 2007 und 2011 festgestellt werden (s. Tab. 4-25). Für die Sensorbeprobungen der Jahre 2011 und 2012 sollten ähnliche Strukturen für den pH-Wert zu beobachten sein. Beide Beprobungen werden auf ihre Reproduzierbarkeit der räumlichen Strukturen mit einer Korrelationsanalyse geprüft. Dazu werden die Beprobungspunkte der beiden Jahre auf einheitliche Raster (15 x 15 m) interpoliert. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,71 ($p < 0,001$) bestehen zwischen den beiden Zeitpunkten der Untersuchungen starke räumliche Strukturen. Der durchschnittliche pH-Wert von 6,5 im Jahr 2012 ist um ca. 0,3 pH-Einheiten geringer als im Beprobungsjahr 2011 mit einem pH-Wert von 6,8 (s. Tab. 4-28). In der Abb. 4-29 sind die Beprobungsergebnisse des Verissensors dargestellt.

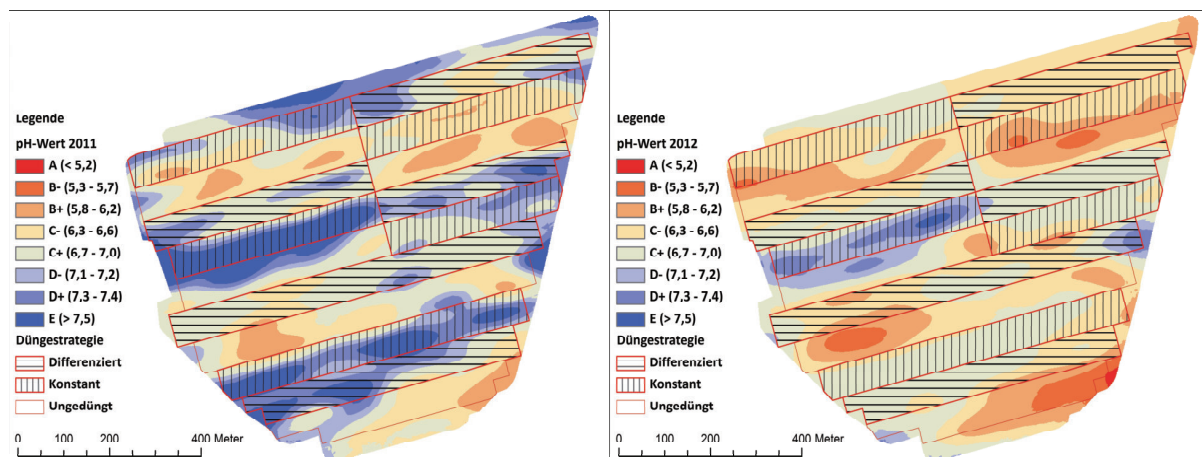


Abb. 4-29: Ergebnisse der Beprobungen des Verissensors in den Jahren 2011 und 2012

Aus der Abb. 4-29 wird die heterogene Verteilung des pH-Wertes innerhalb der Parzellen deutlich.

4.4.1.3 Ergebnisse des Vergleichs zwischen dem Verissensor und der herkömmlichen Bodenbeprobung im Jahr 2011

Im Jahr 2011 wurden nach der herkömmlichen Methodik und mit dem Verissensor hochaufgelöste Bodenbeprobungen durchgeführt. Damit können beide Verfahren unter Feldbedingungen verglichen werden. Die pH-Wert Verteilungen sind in der Abb. 4-30 dargestellt.

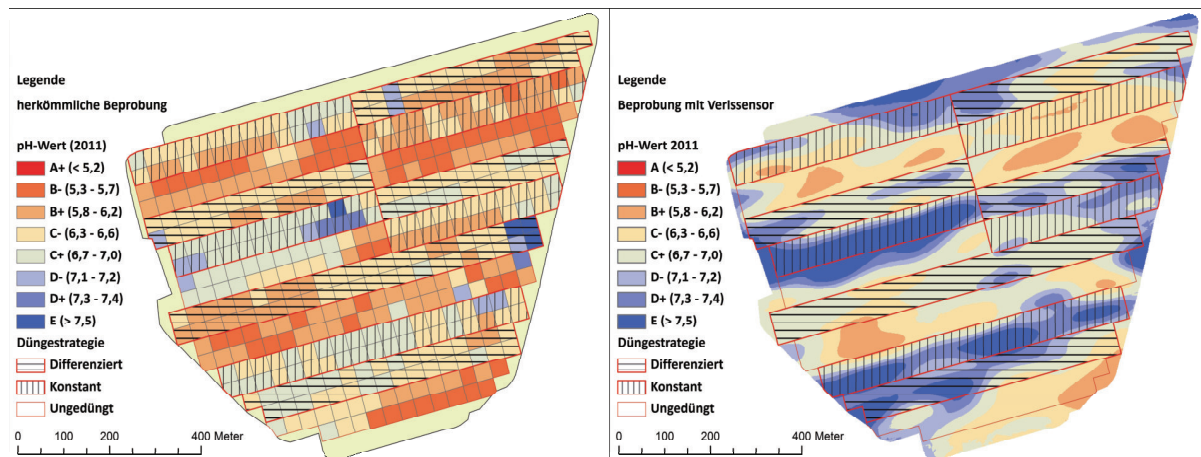


Abb. 4-30: Vergleich der herkömmlichen Bodenbeprobung mit den Ergebnissen des Verissensors

Für den Vergleich beider Methoden müssen die Ergebnisse des Verissensors auf das einheitliche Raster der Labormethodik interpoliert werden. Beide Methoden korrelieren mit einem $r = 0,81$ ($p < 0,001$) sehr gut miteinander. Dagegen zeigen der mittlere Fehler mit 0,50 pH-Einheiten und der mittlere absolute Fehler mit 0,52 pH-Einheiten zwischen beiden Methoden die eindeutige Tendenz, dass der Verissensor tendenziell zu hohe pH-Werte misst.

Als Gründe hierfür kommen die unterschiedliche Entnahmetiefe und die unterschiedliche Vorgehensweise der Bodenentnahme als Misch- oder Einzelprobe in Betracht. Nicht zu vernachlässigen ist zudem die kleinräumige pH-Heterogenität innerhalb des Entnahmeradius der Mischprobe. Die Untersuchungen zeigen, dass innerhalb eines Radius von 9 Metern um den Mittelpunkt einer Rasterzelle eine maximale pH-Spanne von bis zu 1,15 pH-Einheiten beobachtet werden können (nicht dargestellt).

4.4.1.4 Ertrags-pH-Beziehungen nach der Boundary-Line Methode

Für die Auswertungen der Ertrags-pH-Beziehungen dienen die Ertragskarten der Erntejahre 2011 und 2012 sowie die Sensorbeprobungen der jeweiligen Jahre als Grundlage. Die Ertrags- und pH-Wert-Karten wurden auf ein einheitliches Raster von 10 x 10 m interpoliert.

Untersuchungsjahr 2011

In der Abbildung 4-31 sind die Ergebnisse der interpolierten pH-Wert -Karte des Verissensors und der Ertragskarte (Fruchtart: Winterraps) dargestellt. Die Ertragskennzahlen sind in der Tab. 4-29 enthalten. Der durchschnittliche Ertrag ist in der konstanten Variante mit ca. $3,1 \text{ t ha}^{-1}$ am geringsten, den höchsten durchschnittlichen Ertrag erzielt die differenzierte Variante mit ca. $3,6 \text{ t ha}^{-1}$.

Tab. 4-29: Ertragskennzahlen Raps 2011

Kennziffer	Ungedüngt	Konstant	Differenziert	Gesamt ¹
n	1.893	1.806	2.026	6.117
Y_{MIN}^2	0,39	0,29	0,35	0,29
Y_{MW}^2	3,23	3,06	3,55	3,28
Y_{MED}^2	3,06	2,90	3,39	3,09
Y_{MAX}^2	7,62	6,78	7,37	7,62
Y_s^2	1,14	1,25	1,32	1,26

¹enthält zusätzlich 392 Beobachtungen außerhalb der Versuchsfläche, ²in t ha^{-1}

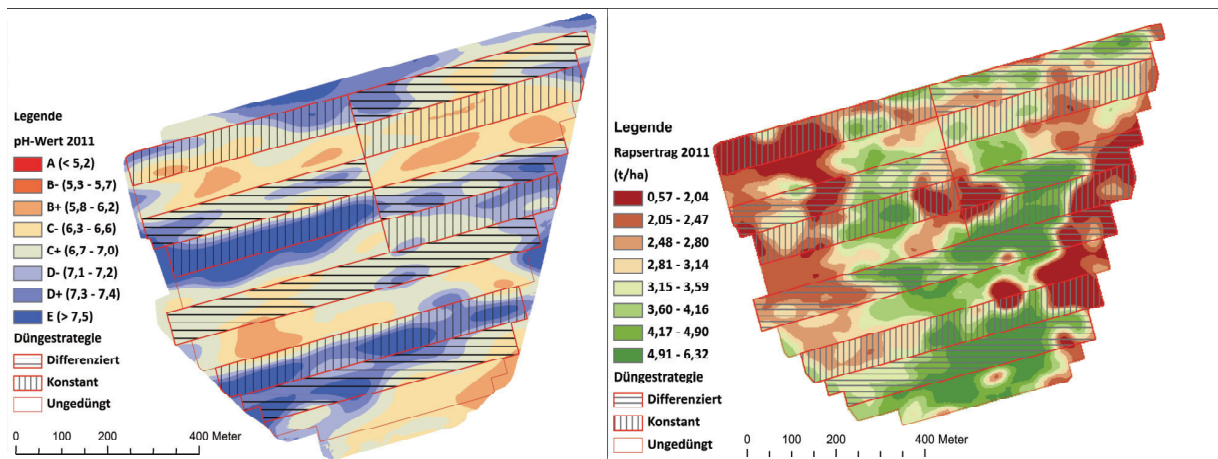


Abb. 4-31: Interpolierte pH-Wert-Karte des Verissensors und Ertragskarte aus dem Jahr 2011

Wie im Streudiagramm (Abb.4-32) ersichtlich, hat der pH-Wert keinen limitierenden Einfluss auf den Ertrag. Die Punktwolke zeigt keine typischen Muster auf, die auf einen Ertragseinfluss des pH-Werts hindeuten. Erst nach Anwendung der Boundary-Line-Methode wird anhand der Grenzlinie deutlich, dass pH-Werte in suboptimalen Bereichen den Ertrag beeinflussen. Der optimale pH-Wert Bereich für Raps liegt zwischen 6,5 und 7,4 pH-Einheiten und entspricht damit den Gehaltsklassen C und D. Der Relativertrag sinkt in den Gehaltsklassen B und E auf ca. 50 % bzw. 40 % des Maximalertrags.

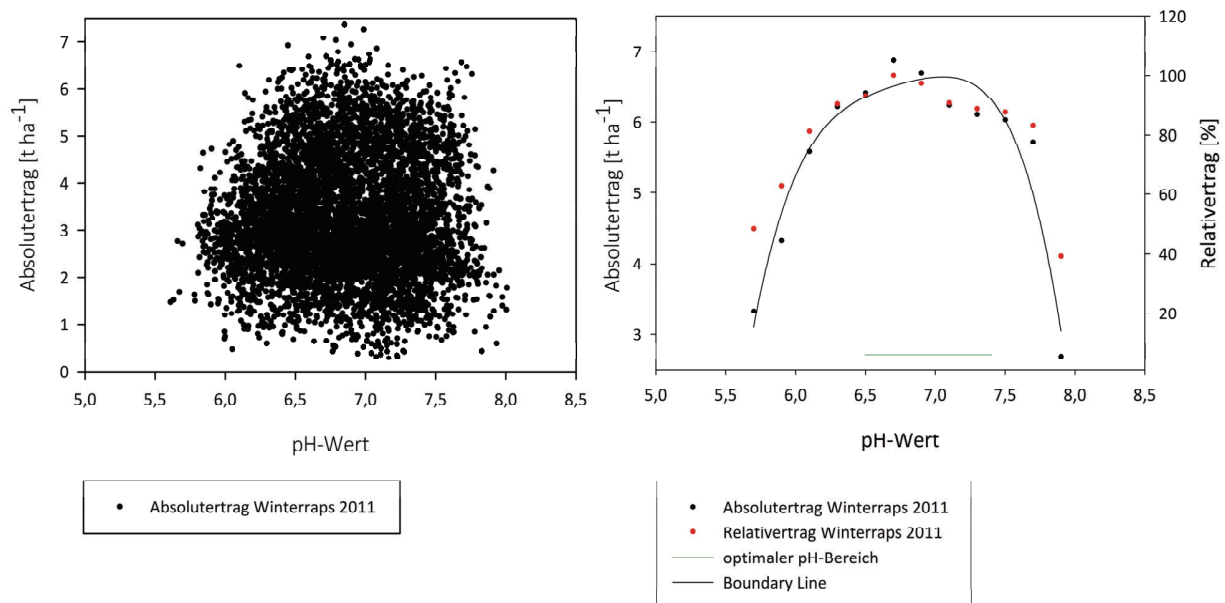


Abb. 4-32: Darstellung der Ertrags-pH-Beziehung im Streudiagramm und der Ergebnisse der Boundary-Line-Methode für das Jahr 2011

Der Vergleich der Ergebnisse der Boundary-Line Methode zwischen den Varianten zeigt für den optimalen pH-Wert Bereich kein einheitliches Bild. Während für die ungedüngte und differenzierte Variante der optimale pH-Wert Bereich zwischen ca. 6,5 und 7,0 pH-Einheiten liegt, ist dieser für die konstante Variante in einem Bereich zwischen 7,0 und 7,5. In allen Varianten können in der Gehaltsklasse B stark sinkende Erträge beobachtet werden, die z.T. 25 % erreichen (Abb. 4-33).

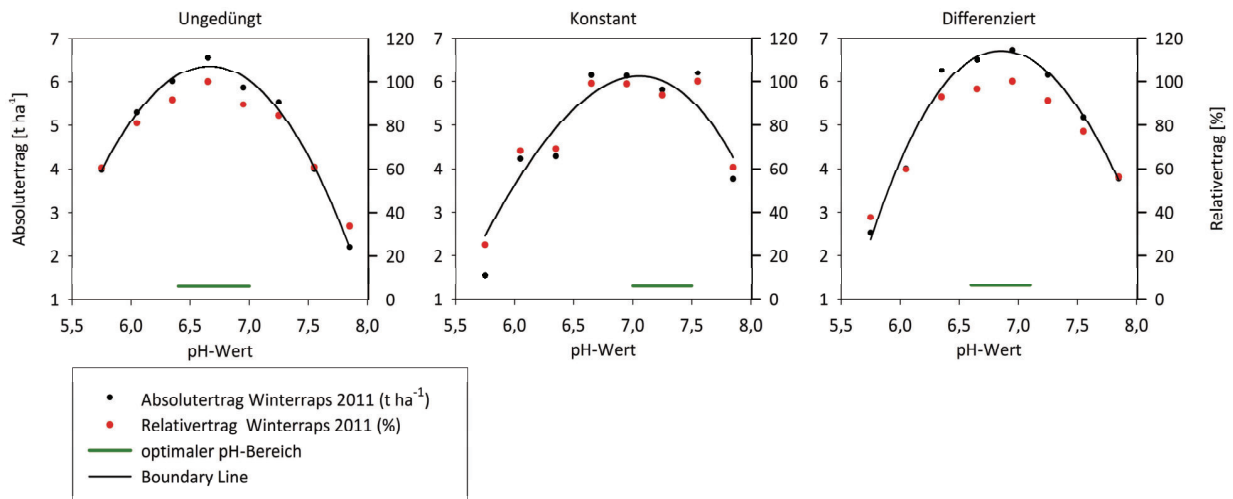


Abb. 4-33: Ergebnisse der Boundary-Line-Methode innerhalb der Varianten des Versuchsschlages „550“ im Jahr 2011

Untersuchungsjahr 2012

Eine Differenzierung der Erträge durch die unterschiedlichen Varianten ist für die angebaute Fruchtart Winterweizen im Jahr 2012 nicht feststellbar. Der Vergleich der Standardabweichungen der Erträge aus dem Jahr 2011 und 2012 zeigt für Winterweizen eine deutlich geringere Variabilität als für Winterweizen (Tab. 4-30).

Tab. 4-30: Ertragskennzahlen Winterweizen 2012

Kennziffer	Ungedüngt	Konstant	Differenziert	Gesamt ¹
n	1.893	1.806	2.026	6.117
Y _{MIN} ²	5,98	4,73	5,02	4,73
Y _{MW} ²	10,16	10,15	10,28	10,16
Y _{MED} ²	10,23	10,27	10,44	10,28
Y _{MAX} ²	12,35	12,24	12,20	12,35
Y _s ²	0,68	0,87	0,87	0,83

¹Enthält n = 392 Beobachtungen außerhalb der Versuchsfläche, ²ln t ha⁻¹

Die räumlichen Ausprägungen der pH-Wert-Verteilung und der Ertragskarte ist in der Abb. 4-34 enthalten.

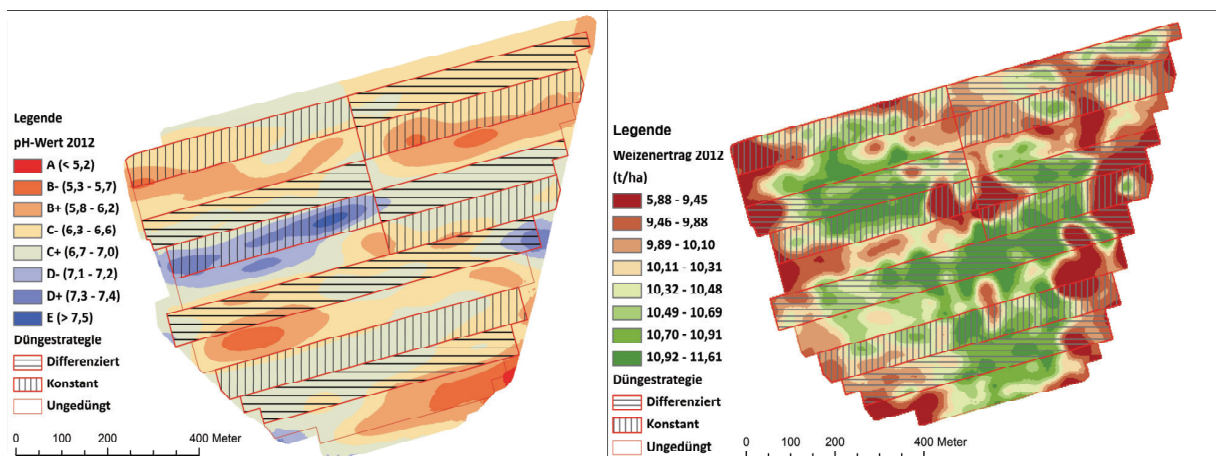


Abb. 4-34: Interpolierte pH-Wert-Karte des Verissensors und Ertragskarte aus dem Jahr 2012

Für Winterweizen kann aus der Punktwolke (Abb. 4-35) ein negativer Einfluss des pH-Wertes auf den Ertrag im hohen pH-Wert Bereich erwartet werden. Die Analyse der Boundary-Line-Methode zeigt, dass in der Gehaltsklasse E der Ertrag auf ca. 50 % sinkt, während die Erträge der Gehaltsklassen B und D nur um ca. 5 bis 10 % sinken. Erst in der Gehaltsklasse A sinkt der Ertrag auf ca. 80 % vom Maximalertrag. Auffallend ist der breite optimale pH-Wert Bereich für den Winterweizen von 5,6 bis 7,1 pH-Einheiten.

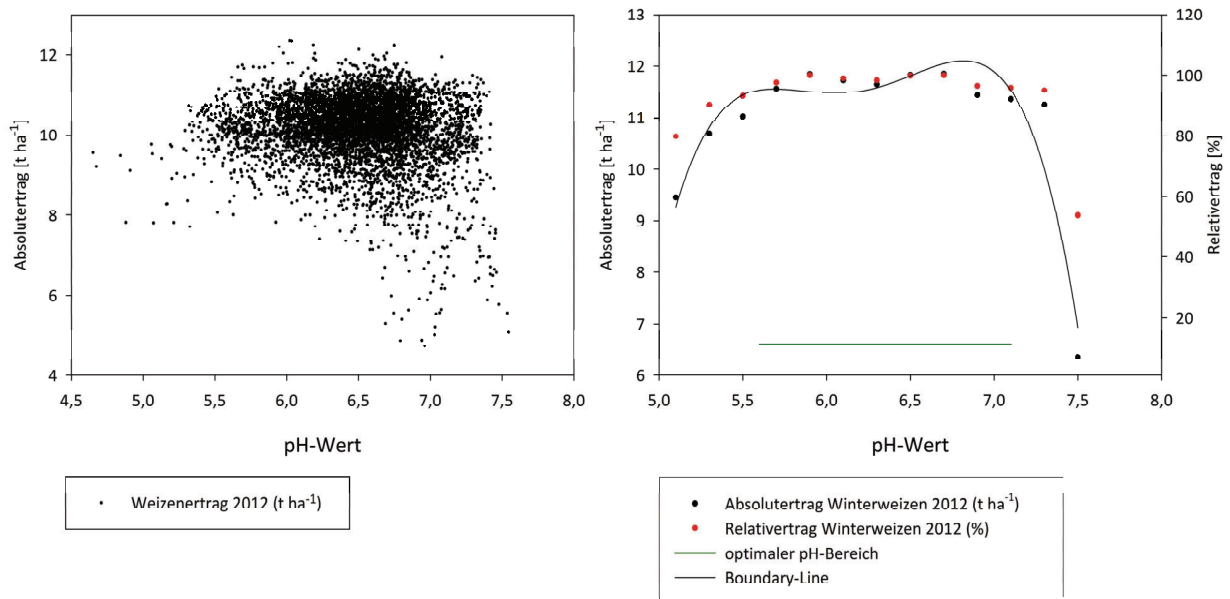


Abb. 4-35: Darstellung der Ertrags-pH-Beziehung im Streudiagramm und der Ergebnisse der Boundary-Line-Methode für das Jahr 2012

Zwischen den Varianten kann für den optimalen pH-Wert Bereich eine breite Übereinstimmung zwischen einem pH-Wert von 5,9 bis 6,7 gefunden werden. In der konstanten Variante schließt der optimale pH-Wert Bereich die Gehaltsklasse D mit ein. Der Einfluss des pH-Wertes zeigt generell eine geringere Wirkung auf den Winterweizenenertrag als auf den Rapsenertrag im Jahr 2011 (Abb. 4-36).

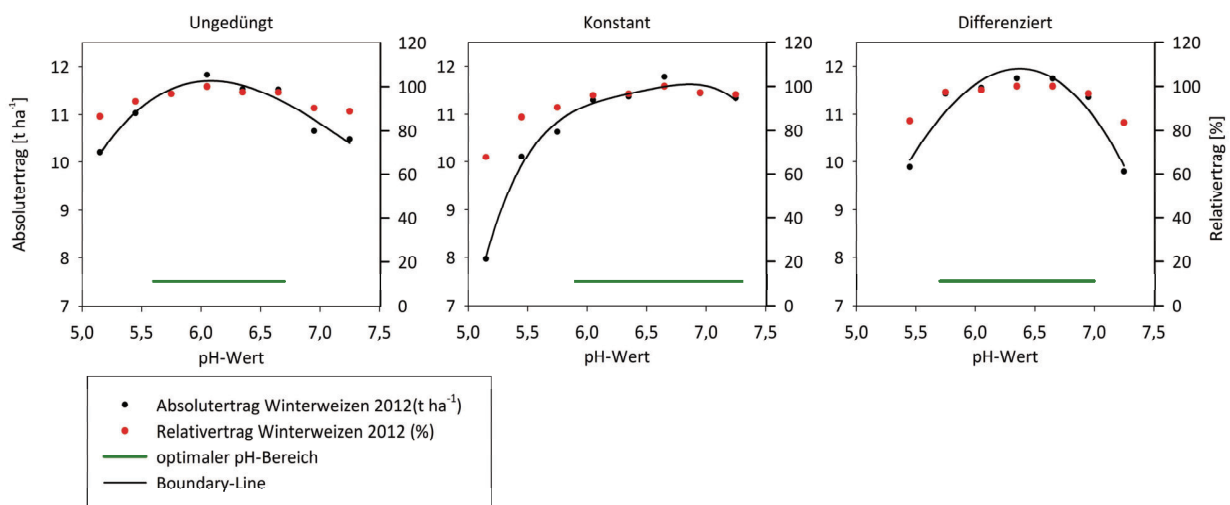


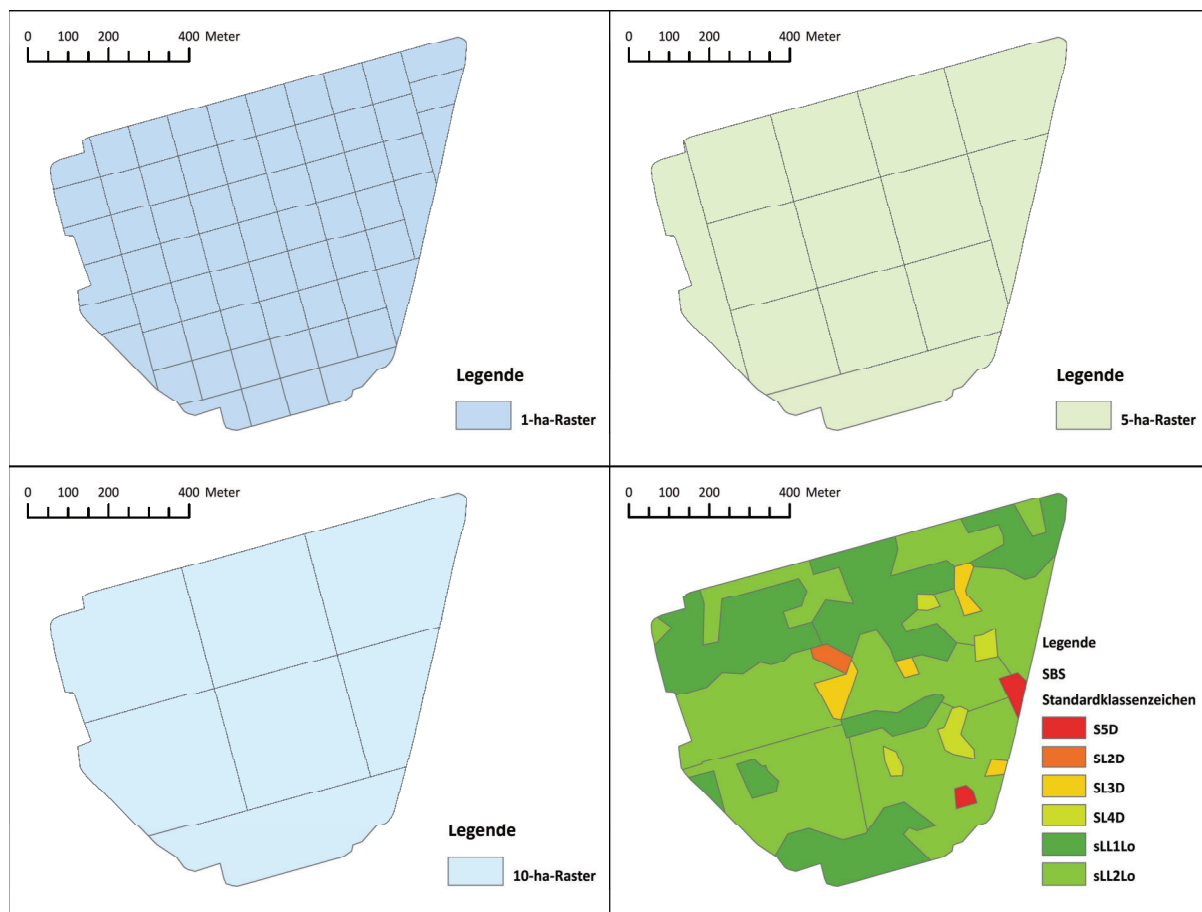
Abb. 4-36: Ergebnisse der Boundary-Line-Methode innerhalb der Varianten des Versuchsschlages „550“ im Jahr 2012

4.4.1.5 Klassifizierung homogener Teilflächen auf Basis der Heterogenitätsindikatoren

Nach KAPE et al. (2009: 9) und VDLUFA (2000: 6) können zur Abgrenzung homogener Teilflächen eines Schlages verschiedene Heterogenitätsindikatoren zu Grunde gelegt werden. Dazu wird in dem ökonomischen Vergleich geprüft, ob die Abgrenzung durch die Indikatoren auch zu homogenen Nährstoffzonen führt. Folgende Merkmale werden als Heterogenitätsindikatoren geprüft:

- Zonierungen nach den Standardklassenzeichen der Bodenschätzung (**SBS**)
- Starre 1-ha-, 5-ha- und 10-ha-Raster (**1 ha, 5 ha, 10 ha**)
- Teilflächen nach homogenen Zonen der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens (**EC**)
- Teilflächen nach homogenen Zonen der mehrjährigen Ertragskarte auf Basis von drei Ertragskarten nach der Methodik von BLACKMORE (2000) Fall 2 (**Y (Rel)**, s. Kap. 3.4.1.1) und der vorgestellten Methodik im Kap. 4.3.3 (**Y (Rang)**)
- Teilflächen nach höhenhomogenen Zonen (**Höhe**)
- Teilflächen nach TWI-homogenen Zonen (**TWI**)

Die Einteilung der Teilflächen nach den o.g. Heterogenitätsindikatoren ist in der Abb. 4-37 zusammengefasst dargestellt. Als Grundlage für die Untersuchungen zum ökonomischen Vergleich der verschiedenen Beprobungsverfahren dienen die Ergebnisse der Bodenbeprobung aus dem Jahr 2007.



Fortsetzung der Abb. 4-37 auf nächster Seite

Fortsetzung der Abb. 4-37

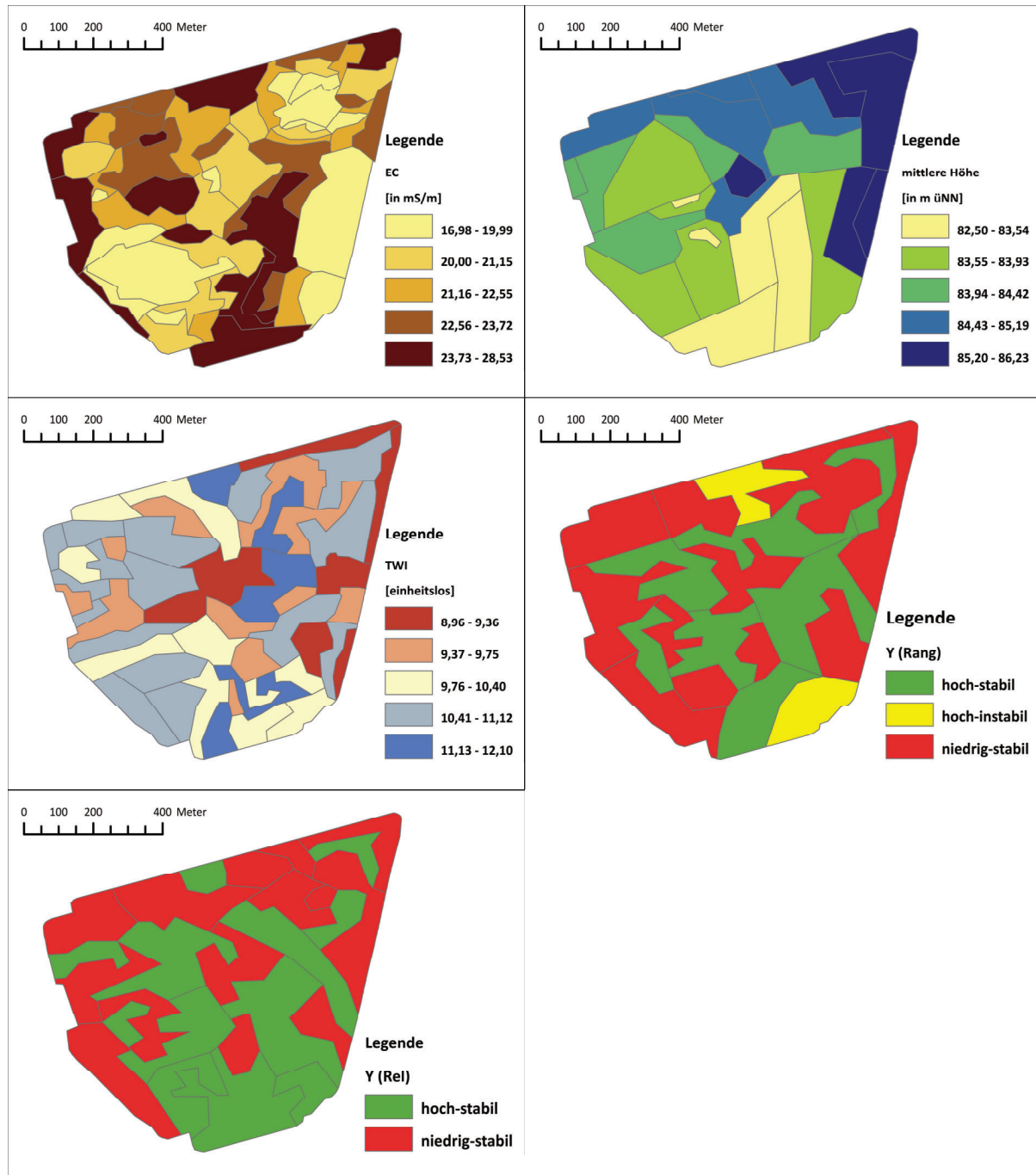


Abb. 4-37: Einteilungen von Teilflächen nach verschiedenen Heterogenitätsindikatoren

Die Kosten für die Erhebung bzw. den Bezug der Heterogenitätsindikatoren unterscheiden sich z.T. sehr stark. Während die Einteilung der starren Muster ohne notwendige Zusatzkosten für das Kartenmaterial verbunden ist, fallen für den Bezug der Höhendaten Kosten in Höhe von $0,30 \text{ € ha}^{-1}$ an (MENTZEL, 2011). Zur Erstellung der Karten nach dem höhenbasierten TWI sind fundierte GIS-Kenntnisse und spezielle GIS-Programme notwendig. Es ist daher zu erwarten, dass die Erstellung der Karten nach dem TWI von Dienstleistungsunternehmen übernommen wird. Dazu wird ein Betrag von 5 € ha^{-1} angenommen. Für die Kartierung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens fallen ca. $6 \text{ bis } 8 \text{ € ha}^{-1}$ an (HERBST, 2004a: 3.2-38). Digitale Karten der Bodenschätzung sind für die meisten Bundesländer in den Landesämtern für Vermessung der Bundesländer erhältlich. Die Kosten für deren Bereitstellung

stehen zum heutigen Zeitpunkt nicht fest (HARTMANN, 2012), nach HERBST (2004c: 3.2-26) sind ca. 10 € ha⁻¹ zu veranschlagen.

Zur Erstellung mehrjähriger Ertragskarten werden aus mehreren Erntejahren die GPS-kartierten Ertragskarten benötigt. Deren Kosten belaufen sich auf jährlich 8 bis 13 € ha⁻¹ (HERBST, 2004b: 3.2-74). Zusätzlich fallen einmalig die Kosten für die Erstellung der mehrjährigen Karten an, die von einem Dienstleistungsunternehmen durchgeführt werden (5 € ha⁻¹).

4.4.1.6 Annahmen für den ökonomischen Vergleich

Neben den in Kap. 3-6 getroffenen Annahmen und Grundlagen für den ökonomischen Vergleich wird die betriebsspezifische Fruchtfolge mit den Zielerträgen von PÖSE (2013) übernommen. Eine Szenarien-Berechnung auf Basis von Durchschnittserträgen der amtlichen Statistik wäre fehlerbehaftet, weil deren Erträge durch heterogene teilflächenspezifische pH-Wert Verteilungen beeinflusst sein könnten. Die Produktpreise werden als dreijähriges Preismittel von HAMM et al. (2013) und BEIL (2010, 2011, 2012) abgeleitet. Für den Phosphatpreis wird der dreijährige Durchschnittspreis aus den monatlichen Veröffentlichungen der AMI (2010 bis 2013) in den wöchentlich erscheinenden Ausgaben der BAUERNZEITUNG (2010 bis 2013) berechnet. In der Tabelle 4-31 sind die Kalkulationsgrundlagen zusammengefasst, die Grundlagen für die dreijährigen Durchschnittspreise für Phosphat und Kalk sind im Anhang A3-6-2 enthalten.

Tab. 4-31: Kalkulationsgrundlagen für die Szenario-Berechnungen

<i>Fruchtarten</i>	Erwarteter Zielertrag (in dt ha ⁻¹)	Reinnährstoffgehalt (in %)	Dreijähriger Preis (in € t ⁻¹)	Dreijähriger Preis (€ kg ⁻¹ -Nährstoff)	Quelle
Sommergerste	65	-	19,89	-	[1] S. 51, Tab. 2.1.10
Wintergerste	85	-	15,69	-	[1] S. 51, Tab. 2.1.10
Winterraps	45	-	34,94	-	[1] S. 54, Tab. 2.2.2.
Winterroggen	90	-	19,17	-	[1] S. 51, Tab. 2.1.10
Winterweizen	90	-	18,45	-	[1] S. 51, Tab. 2.1.10
Zuckerrüben	700	-	4,40	-	[2], [3], [4] je S. 33
Düngerart					
Triple superphosphat	-	20,00	434,22	2,165	[5]
Kohlensaurer Kalk (85 % CaCO ₃)	-	47,60	21,33	0,045	[5]

[1] HAMM et al. (2013), [2] BEIL (2010), [3] BEIL (2011), [4] BEIL (2012), [5] AMI (2010 - 2013) in BAUERNZEITUNG (2010 - 2013)

Für den sechsjährigen Untersuchungszeitraum wird als Fruchtfolge übernommen:

Winterweizen – Wintergerste – Winterraps – Winterweizen – Winterraps – Winterweizen

4.4.1.7 Ökonomischer Vergleich

Der ökonomische Vergleich wird im folgenden Kapitel detailliert nach den Verfahrenskosten, den fehlallokierten Kalkkosten, dem entgangenen Nutzen des Phosphateffekts und dem entgangenen Nutzen durch die zu erwartenden Ertragsdepressionen vorgestellt. Abschließend wird in einer Gesamtanalyse das jährliche Potential einer hochaufgelösten Bodenbeprobung mit dem pH-Sensor ermittelt. Als weitere Verfahren, in Kap. 4.4.1.3. nicht mit angeführt, wird der Verzicht auf eine Kalkung und eine einheitliche Kalkung geprüft. Durch die Gesetzgebung (DÜV, 2017) sind beide Verfahren zwar nicht erlaubt, jedoch soll der potentiell entgangene Nutzen durch die Phosphat- und Ertragseffekte aufgezeigt werden.

Verfahrenskosten

Die Verfahrenskosten für den Einsatz des pH-Sensors werden mit 20 € ha⁻¹ angesetzt, die das Dienstleistungsunternehmen Agri Con GmbH kalkuliert hat (SCHNEIDER, 2010). Aus der folgenden Kostenkalkulation geht hervor, dass eine Eigenmechanisierung ab einem jährlichen Einsatzumfang von 1.116 ha zu einem ökonomischen Vorteil führt. Bei einem Untersuchungsturnus von sechs Jahren müssten 6.696 ha beprobt werden, um gegenüber den Dienstleister ökonomische Vorteile zu erzielen. Die Kalkulationsgrundlage für die fixen Kosten (AfA, Zinsanspruch, Reparaturkosten) und der variablen Kosten (Personalaufwand, Kosten für die Straßen- sowie Feldfahrt) enthält die Tabelle 4-32. Mit den allgemeinen Verbrauchskosten in Höhe von 0,30 € ha⁻¹ werden die Kosten für die pH-Elektroden und den weiteren Verschleißteilen (Scheibenseche, Probeentnahmeschuh, Kalibrierflüssigkeiten) abgebildet (Tab. 4-32).

Tab. 4-32: Kostenkalkulation für den Verissensor

Z1		Anschaffungspreis (€)	25.000,00
Z2		Restwert (€)	0,00
Z3	Fixe Kosten	Abschreibungszeit (a)	6,00
Z4		AfA (€ a ⁻¹)	4.166,67
Z5		Zinsanspruch (€ a ⁻¹)	917,40
Z6		Reparaturkosten (€ a ⁻¹)	500,00
Z7		Zwischensumme fixe Kosten (€ a⁻¹)	5.584,07
Z8	Variable Kosten	Allgemeine Verbrauchskosten (€ ha ⁻¹)	0,30
Z9		Kosten Straßenfahrt (€ km ⁻¹)	0,60
Z10		Kosten Feldfahrt (€ km ⁻¹)	2,00
Z11		Personalkosten (€ h ⁻¹)	50,00
Z12	Kalkulationsgrundlagen	Bedarf Feldfahrt (km ha ⁻¹)	0,50
Z13		Bedarf Straßenfahrt (km ha ⁻¹)	2,00
Z14		Messzeit (h ha ⁻¹)	0,25
Z15		Zwischensumme variable Kosten (€ ha⁻¹)	14,40
Z16	Kosten (€ ha ⁻¹)	Kalkulierter Feldeinsatz (ha)..... 500	26,17
Z17		750	22,45
Z18		1.000	20,58
Z19		2.000	17,79
Z20		3.000	16,86
Z21		4.000	16,40
Z22		5.000	16,12
Z23		10.000	15,56

¹BRANDES und ODENING, 1992: 43, Erläuterung zur Kostenkalkulation: siehe Anhang A4-4-1-7

Die Verfahrenskosten für die Zoneneinteilung, Begehung, Entnahme und Analytik der Bodenproben nach den untersuchten Heterogenitätsindikatoren unterscheiden sich deutlich. Für das 10-ha-Raster fallen die geringsten Kosten mit 1,14 € ha⁻¹ an. Nur die beiden Verfahren „ohne Kalkung“ (0,00 € ha⁻¹) und „einheitliche Kalkung“ (0,24 € ha⁻¹) weisen geringere Kosten aus, sie dürften allerdings in der Praxis keine Anwendung finden. Für Verfahren, deren Datengrundlage für den Heterogenitätsindikator einmalig erhoben werden muss, liegen die Kosten in einem Bereich von 2,68 € ha⁻¹ (Höhe) und zwischen 10 bis 15 € ha⁻¹ (SBS, TWI, EC). Deutlich höhere Kosten entstehen für die Ansätze nach der Klassi-

fizierung der mehrjährigen Ertragskarten mit ca. 40 € ha⁻¹. In etwa 80 % der Kosten müssen hierbei für die Beschaffung des Datenmaterials aufgewendet werden.

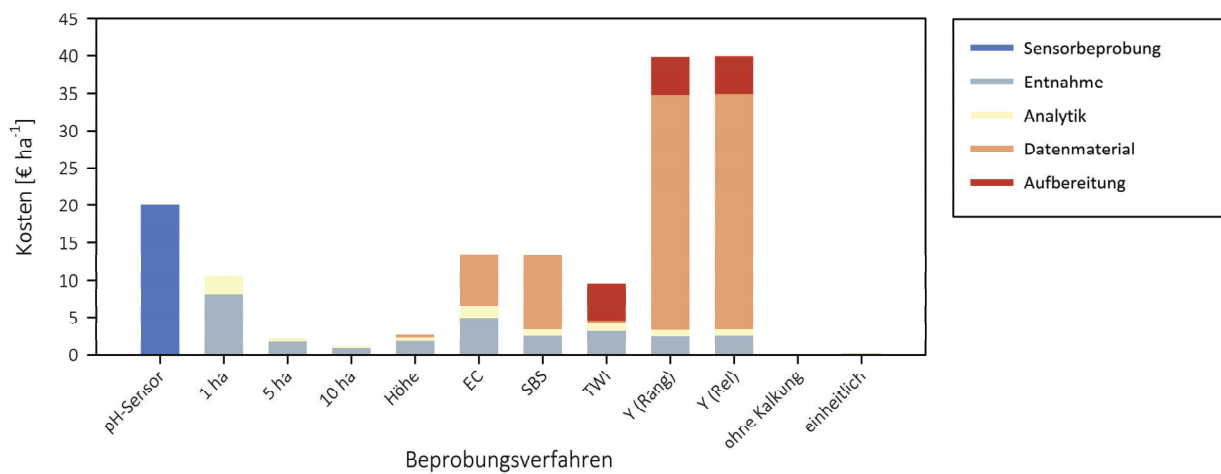


Abb. 4-38: Verfahrenskosten der Klassifizierungen der untersuchten Heterogenitätsindikatoren

Fehlallokierte Kalkkosten

Die Düngempfehlungen der untersuchten Beprobungsverfahren ergeben Gesamtmengen, die um ca. 10 % von der optimal verteilten Gesamtmenge von 253 t CaO nach dem hochaufgelösten Raster des pH-Sensors abweichen. Es zeigt sich, dass die starren Raster (1 ha, 5 ha, 10 ha) und das nach der Leitfähigkeit klassifizierte Verfahren zu einer Überdüngung der Flächen neigen und die weiteren Verfahren zu einer Unterdüngung der Flächen. Der Anteil der über- und unterdüngten Flächen liegt zwischen 78 % (TWI) und 91 % (10 ha). Fehlallokierte Kalkkosten, berechnet aus den zu viel gedüngten Kalkmengen bewertet mit dem Kalkpreis, fallen zwischen 26 € ha⁻¹ (TWI) und 55 € ha⁻¹ (10 ha) an (Tab. 4-33).

Tab. 4-33: Fehlallokierte Kalkkosten der Verfahren

z.	Kenngroße	pH-Sensor	1 ha	5 ha	10 ha	Höhe	EC	SBS	TWI	Y (Rang)	Y (Rel)	Ohne Kalkung	Einheitlich
1	CaO (t)	252,62	257,67	275,07	281,32	248,37	255,90	242,64	236,11	244,86	249,68	0,00	236,97
2	CaO (t ha ⁻¹)	3,83	3,91	4,18	4,27	3,77	3,88	3,68	3,58	3,72	3,79	0,00	3,60
3	CaO-Preis (€ t ⁻¹)						44,81						
4	CaO-Kosten (€ ha ⁻¹) ¹	171,83	175,27	187,10	191,35	168,94	166,55	165,04	160,60	166,55	169,83	0,00	161,19
5	Überdüngte Fläche (ha)	0,00	29,00	32,92	33,80	26,24	27,88	25,48	22,82	27,88	29,38	0,00	25,95
6	Überdüngte Menge (t)	0,00	51,45	74,42	81,63	57,28	55,36	57,39	37,81	55,36	60,62	0,00	60,56
7	Unterdüngte Fläche (ha)	0,00	27,56	26,34	26,16	32,50	30,90	30,91	28,61	30,90	29,71	56,41	34,76
8	Unterdüngte Menge (t)	0,00	46,37	51,94	52,90	61,52	63,15	67,34	54,50	63,15	63,63	252,59	76,18
9	Fehlallokierte Kalkkosten (€ ha ⁻¹) ²	0,00	35,00	50,62	55,52	38,96	37,65	39,04	25,72	37,65	41,24	0,00	41,19

¹[22xZ3], ²[23xZ6]/65,88 ha

Phosphat-Ausgleichsdüngung

Durch die optimale Verteilung der Kalkmengen nach dem pH-Sensor sind für dieses Verfahren keine Phosphatfestlegungen zu erwarten, der Phosphateffekt wird vollständig ausgenutzt. Den höchsten

entgangenen Nutzen verzeichnen die ungedüngte Variante mit 203 € ha⁻¹, das starre 10-ha-Raster (72 € ha⁻¹) und die einheitlich gedüngte Variante mit ca. 70 € ha⁻¹. Den geringsten entgangenen Nutzen verzeichnen die Verfahren der Leitfähigkeit (43 € ha⁻¹), TWI (47 € ha⁻¹) und dem starren 1-ha-Raster mit 49 € ha⁻¹ (Abb. 4-39).

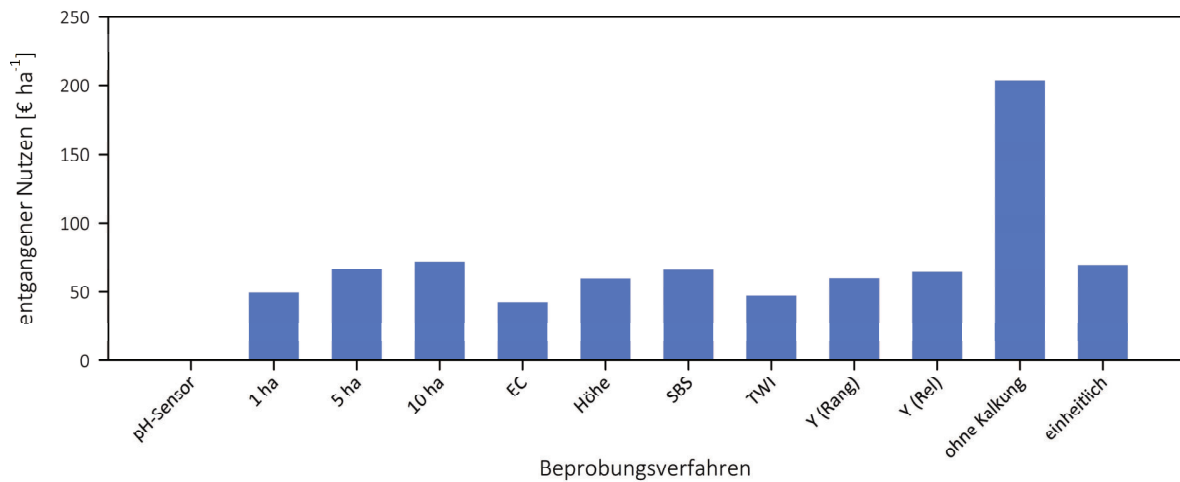


Abb. 4-39: Entgangener Nutzen des Phosphateffektes für den Versuchsschlag „550“

Ertragsdepressionen

In der Abb. 4-40 sind die Ergebnisse der Ertragsdepressionen infolge einer suboptimalen Kalkverteilung für den sechsjährigen Untersuchungszeitraum dargestellt. Die Ergebnisse zeigen die jährliche Entwicklung der Ertragsdepressionen für die Verfahren über den Fruchtfolgezeitraum für den *Average-Case*. Die Min-/Max-Grenzen kennzeichnen die Ergebnisse der *Worst-Case*- und *Best-Case*-Szenarien.

Erwartungsgemäß sind die durch die natürliche Bodenversauerung ausgelösten Ertragsdepressionen in der ungedüngten Variante am stärksten. Der mittlere entgangene Nutzen kann für den Untersuchungszeitraum auf einen Betrag von ca. 1.107 € ha⁻¹ beziffert werden. Auch unter der optimalen Verteilung des Kalkes nach dem pH-Sensor muss ein entgangener Nutzen von 80 € ha⁻¹ erwartet werden. Ursächlich hierfür ist zum einen die zeitliche Entwicklung der pH-Werte auf das optimale Niveau bis zum zweiten Jahr (s. Abb. 4-33) und zum anderen sinken die pH-Werte auf ungedüngten Teilflächen durch fortschreitende natürliche Bodenversauerung über den sechsjährigen Untersuchungszeitraum auf die Gehaltsklasse B. Beide Effekte verursachen ca. 75 % des entgangenen Nutzens. Nach dem hochaufgelösten Raster können die geringsten mittleren entgangenen Nutzen für die Verfahren basierend auf der Leitfähigkeit (182 € ha⁻¹), dem starren 1-ha-Raster (188 € ha⁻¹) sowie dem Raster basierend auf dem TWI mit 212 € ha⁻¹ für den Untersuchungszeitraum beobachtet werden. Die Ergebnisse der *Worst-Case*- und *Best-Case*-Szenarien zeigen, dass unter optimalen oder kritischen Bedingungen deutliche Effekte der Ertragsdepressionen erwartet werden können (Abb. 4-40).

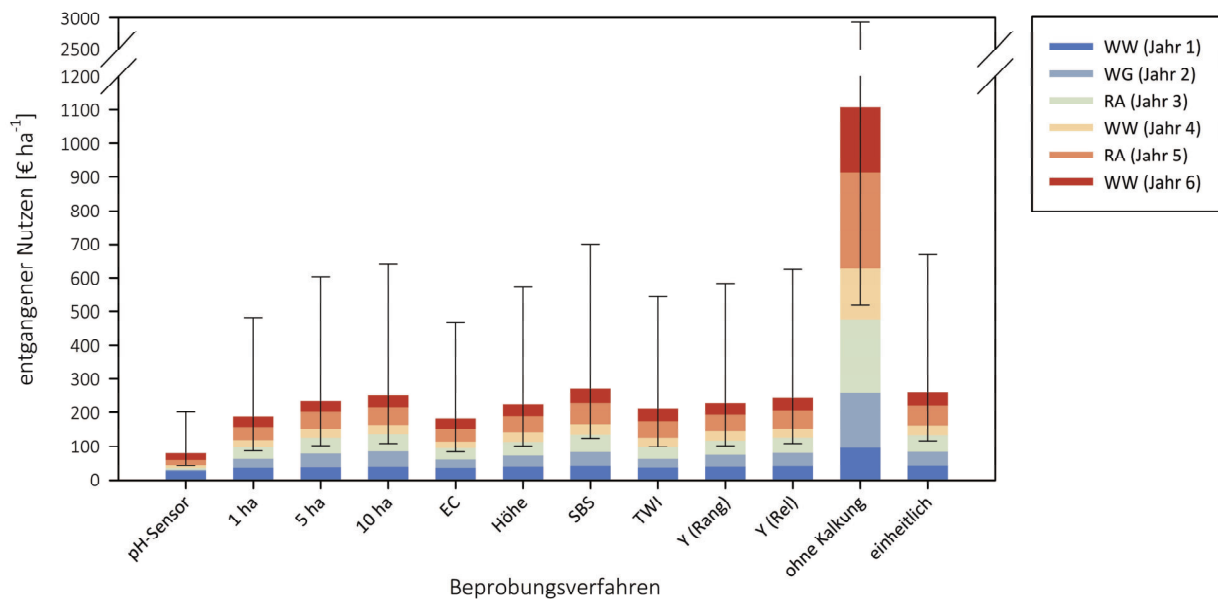


Abb. 4-40: Entgangener Nutzen durch Ertragsdepressionen für den Versuchsschlag „550“

Gesamtbewertung und Potential hochaufgelöster Bodenbeprobungen

Die jährlichen Gesamtkosten und der jährliche entgangene Nutzen belaufen sich auf einen Betrag von ca. $17 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für das Beprobungsverfahren des pH-Sensors. Bei Unterlassung der Kalkung beziffern sich die Kosten und der entgangene Nutzen auf $218 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Davon werden 84 % durch die zu erwartenden mittleren Ertragsdepressionen hervorgerufen. Für die einheitliche Kalkdüngung fallen $62 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ an, die im Vergleich zu den Verfahren der Bodenschätzung ($65 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), der Y (Rel) ($65 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), dem starren 10-ha-Raster ($63 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), der Y (Rang) ($61 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und dem starren 5-ha-Raster mit $59 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf einem ähnlichen Niveau liegt. Eindeutige Vorteile erzielen das Verfahren basierend auf der Leitfähigkeit mit jährlichen Kosten und entgangenem Nutzen von $45 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und das starre 1-ha-Raster mit $47 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Bei allen Verfahren besitzen die mittleren zu erwartenden Ertragsdepressionen den größten Anteil an den jährlichen Kosten und dem entgangenem Nutzen mit ca. 62 - 85 % (Abb. 4-41).

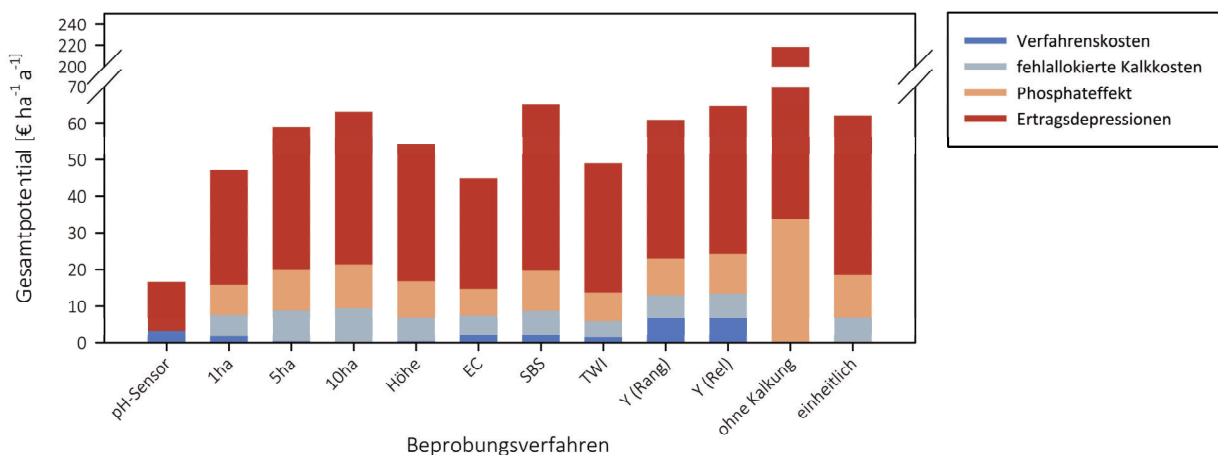


Abb. 4-41: Gesamtkosten und entgangener Nutzen für den Versuchsschlag „550“

Das Potential der hochaufgelösten Bodenbeprobung mit dem pH-Sensor kann aus der Differenz der jährlichen Kosten und des entgangenen Nutzens der untersuchten Verfahren ermittelt werden. Der Vergleich zeigt, dass das ökonomische Potential zwischen $28 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $48 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ liegt, der Durchschnitt liegt bei $40 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Ausgenommen von der Potentialberechnung ist die Variante ohne Kalkung, da diese in der Praxis keine Anwendung findet. Deren Differenz zur hochaufgelösten Beprobung beträgt $202 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

4.4.1.8 Ergebnisse zur Homogenisierung der Nährstoffzonen durch die Klassifizierung homogener Zonen der Heterogenitätsindikatoren

KAPE et al. (2009: 7) beschreiben in dem Verfahren zur Bodenprobenentnahme, repräsentative Teilflächen anhand eines Heterogenitätsindikators innerhalb eines Feldes abzugrenzen um auf homogen versorgte Nährstoffzonen schließen zu können. Dieses Ziel wird mit Hilfe der Methodik nach FRIDGEN et al. (2000) untersucht, die angewandte Methode ist in Kapitel 3.5.3 beschrieben. Sollte die Abgrenzung durch die Heterogenitätsindikatoren zu homogenen Nährstoffzonen führen, dann müssten die Varianzen der Zonen minimal sein. Aus der Abb. 4-42 gehen für den pH-Wert und den Phosphat-, Kalium- und Magnesiumgehalt die Variabilitäten innerhalb der gebildeten Zonen der Heterogenitätsindikatoren hervor. Um die Ergebnisse der Nährstoffe für die Heterogenitätsindikatoren besser vergleichen zu können, wird die Variabilität des gesamten Feldes, entsprechend einer Zone, als 100 % betrachtet. Die Verfahren basierend auf der EC, dem TWI und dem starren 1-ha-Raster können durch ihre Klassifizierungen die Variabilität innerhalb der Zonen um ca. 50 % für alle Nährstoffe senken. Typisch für diese Verfahren ist eine hohe Anzahl von Zonen.

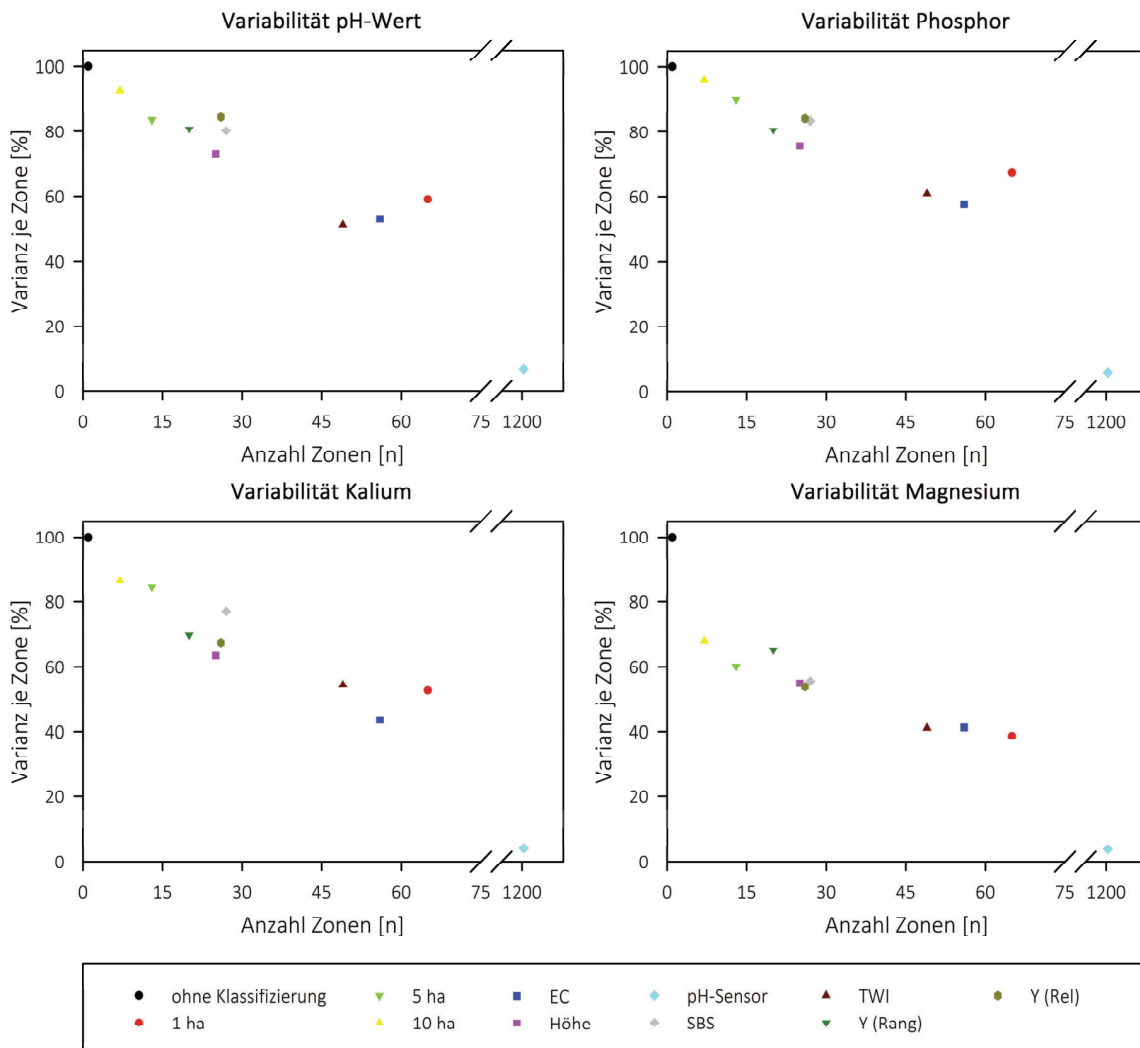


Abb. 4-42: Variabilität der Nährstoffe innerhalb der Zonen nach den vorgeschlagenen Klassifizierungen der Heterogenitätsindikatoren

4.4.1.9 Zwischenfazit

Für den Versuchsschlag „550“ können durch die hochaufgelösten Bodenbeprobungen der Jahre 2007 und 2011 heterogene, räumlich wiederkehrende Muster für die untersuchten Nährstoffe beobachtet werden. Der Prozess der Homogenisierung durch eine angepasste Düngungsstrategie in der „Precision-Farming“-Variante verläuft langsam. Dadurch werden für die Erfolgskontrolle einer differenzierten Düngung mehrere Wiederholungsbeprobungen in den Folgejahren mit ähnlichen Beprobungsdichten notwendig. Der einzigartige Vergleich der hochaufgelösten Bodenbeprobung nach der herkömmlichen Labormethodik und des pH-Sensors zeigt, dass die räumlichen Strukturen der pH-Wert Verteilung mit dem Sensor gemessen werden können. Die Differenz der Ergebnisse beider Methoden darf jedoch nicht unerwähnt bleiben. Im ökonomischen Vergleich der untersuchten Beprobungsverfahren zeigt sich vor allem der hohe Einfluss suboptimaler pH-Werte auf den Ertrag, die zu hohen ökonomischen Ertragsdepressionen führen. Dieser hohe Einfluss wird von den Ergebnissen der Boundary-Line-Methode unterstützt. Das Gesamtpotential des Einsatzes des pH-Sensors gegenüber herkömmlichen Verfahren liegt in einem Bereich zwischen $28 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $48 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

4.4.2 Ergebnisse der Praxisflächen

Die Untersuchungen zum ökonomischen Vergleich zwischen hochaufgelösten und herkömmlichen Bodenbeprobungen erfolgen für die Praxisschläge gesamtlich. In der Tab. 4-34 sind die verfügbaren Datengrundlagen der Heterogenitätsindikatoren der Standorte enthalten. Obwohl die Betriebe z.T. schon mehr als drei Jahre eine Ertragskartierung nutzen, können nicht alle Ertragskarten verwendet werden. Die Gründe hierfür liegen in unvollständigen Ertragskarten (Althen) oder einer zu geringen Anzahl an Ertragskarten (Dennheritz, Krosigk, Rieder).

Tab. 4-34: Verfügbare Heterogenitätsindikatoren der Standorte

Standort (Schlag)	1 ha	5 ha	10 ha	Ertragskartierung seit (nutzbare Jahre)	Höhe	Leitfähigkeit	Bodenschätzung
Althen							
110	x	x	x	2008 (1)	x	x	-
Dennheritz							
Lange Welle	x	x	x	2012 (1)	x	x	-
Kuhberg	x	x	x	2012 (1)	x	x	-
Maststall	x	x	x	2012 (1)	x	x	-
Krosigk							
Deutsches Feld	x	x	x	2008 (2)	x	x	x
Warnstedt							
Lange Winde	x	x	x	2000 (8)	x	x	x
Rieder	x	x	x	2011 (1)	x	x	x
Starsiedel							
Dölzig I	x	x	x	-	x	x	-
Dölzig II	x	x	x	-	x	x	-

- nicht vorhanden, x - vorhanden

4.4.2.1 Teilflächenabgrenzungen mit Hilfe der Heterogenitätsindikatoren

Die Anzahl der gebildeten Zonen anhand der Heterogenitätsindikatoren unterscheidet sich zwischen den Verfahren sehr deutlich. Während bei den starren 5-ha- und 10-ha-Verfahren eine bewusst geringere Probendichte gewählt wird, unterscheiden sich die Probendichten zwischen den Verfahren basierend auf den Heterogenitätsindikatoren sehr deutlich. Die höchsten Probendichten werden für das EC-Raster ($0,63 \text{ n ha}^{-1}$) sowie für das TWI-Raster mit $0,45 \text{ n ha}^{-1}$ beobachtet. Mit Probendichten von ca. $0,25 \text{ n ha}^{-1}$ führen die Raster nach der Bodenschätzung, der Höhe und den Ertragskarten zu den geringsten Probendichten (Tab. 4-35).

Tab. 4-35: Anzahl der Zonen und Probendichten der Heterogenitätsindikatoren

Versuchsschlag	Kennziffer	Beprobungsverfahren										
		1 ha	5 ha	10 ha	EC	Höhe	SBS	TWI	Y (Rang)	Y (Rel)	ohne Kalkung	einheitlich
110	Anzahl ¹	39	8	4	22	9		16			1	1
	Probendichte ²	1,03	0,21	0,11	0,58	0,24		0,42			0,03	0,03
Kuhberg	Anzahl ¹	26	6	3	22	5		15			1	1
	Probendichte ²	1,04	0,24	0,12	0,88	0,20		0,60			0,04	0,04
Maststall	Anzahl ¹	11	2	1	8	5		6			1	1
	Probendichte ²	0,80	0,15	0,07	0,58	0,36		0,44			0,07	0,07
Lange Welle	Anzahl ¹	33	6	3	14	13		14			1	1
	Probendichte ²	1,18	0,21	0,11	0,50	0,46		0,50			0,04	0,04
Deutsches Feld	Anzahl ¹	118	27	13	54	18	43	21			1	1
	Probendichte ²	1,01	0,23	0,11	0,46	0,15	0,37	0,18			0,01	0,01

Versuchsschlag	Kennziffer	Beprobungsverfahren										
		1 ha	5 ha	10 ha	EC	Höhe	SBS	TWI	Y (Rang)	Y (Rel)	ohne Kalkung	einheitlich
Lange Winde	Anzahl ¹	38	10	5	24	7	11	9	14	9	1	1
	Probendichte ²	0,84	0,22	0,11	0,53	0,15	0,24	0,20	0,31	0,20	0,02	0,02
Rieder	Anzahl ¹	66	15	8	40	9	15	18			1	1
	Probendichte ²	1,00	0,23	0,12	0,61	0,14	0,23	0,27			0,02	0,02
Dölzig I	Anzahl ¹	21	4	2	13	4		14			1	1
	Probendichte ²	1,09	0,21	0,10	0,67	0,21		0,72			0,05	0,05
Dölzig II	Anzahl ¹	24	4	2	19	5		17			1	1
	Probendichte ²	1,07	0,18	0,09	0,84	0,22		0,75			0,04	0,04
Mittel	Probendichte ²	1,01	0,21	0,10	0,63	0,24	0,28**	0,45	0,31*	0,20*	0,04	0,04

*n=1; **n=3, ¹ in n, ² in n ha⁻¹

4.4.2.2 Ergebnisse der hochaufgelösten Bodenbeprobungen des Verissensors

Insgesamt werden die Ergebnisse von 13 Feldversuchen mit einer Fläche von 415,42 ha vorgestellt. Dafür wurden 7.998 pH-Wert Messungen durchgeführt, wovon ca. 8,0 % durch fehlerhafte Messungen und 1,2 % aufgrund von GPS-Fehlern und Störungen während der Bodenprobenahme eliminiert werden mussten.

4.4.2.2.1 Ergebnisse der Kalibrierungen

In den ersten beiden Versuchsjahren 2010 und 2011 erfolgten die Kalibrierungen nach dem in Kapitel 4.1.3 vorgestellten Algorithmus. Zur Kalibrierung wurden nichtidentische Bodenproben von Messstellen des Verissensors entnommen und im Labor analysiert (s. Tab. 4-36, Z16 bis Z18). Im Anschluss wurden die Ergebnisse der Laboranalytik dem entsprechenden Messwert des Verissensors zugeordnet. Für diese Art der Kalibrierung konnten sehr unterschiedliche Qualitäten festgestellt werden. Die Korrelationskoeffizienten zwischen den Labor- und Sensormessungen sind mit einem Signifikanzniveau von $p < 0,05$ bis $p < 0,001$ signifikant verschieden von Null. Dagegen können für die Kalibrierungen mit identischen Bodenproben höchstsignifikante Zusammenhänge ($p < 0,001$) zwischen beiden Messverfahren beobachtet werden, mit Ausnahme der Kalibrierung des Versuchsschlag „110“ im Jahr 2011 mit einem $r = 0,77$ bei einem p-Wert von 0,003 (Tab. 4-36).

Alle Kalibrierungen führen zu deutlichen Verbesserungen der Übereinstimmungen der Ergebnisse der Labormethodik und den Ergebnissen der kalibrierten Werte des Verissensors. Während die Korrelationskoeffizienten nach Pearson (Z35 und Z41 in Tab. 4-36) durch die Kalibrierung unverändert bleiben, zeigen die Konkordanz-Korrelationskoeffizienten nach LIN (1989) deutliche Verbesserungen der kalibrierten Daten (Z42). Die Vorteilhaftigkeit der Kalibrierungen wird durch die Reduzierungen der Fehlermaße (ME, MAE und RMSE) untermauert (Tab. 4-36).

Tab. 4-36: Überblick der Kalibrierungen von Messungen auf den Praxisanschlägen

Z	Standort	Althen			Dennheritz			Krosigk			Warnstedt			Starsiedel	
		110°	110	110	Lange Weile	Maststall	Kuhberg°	Deutsches Feld	Deutsches Feld	Deutsches Feld	Lange Winde	Rieder	Dölzig I°	Dölzig II°	
1	Schlagbezeichnung	14.10.2010	13.09.2011	14.08.2012	24.07.2011	25.07.2011	06.08.2011	20.09.2011	22.09.2011	16.09.2011	15.09.2011	19.10.2010	19.10.2010		
2	Beprobungszeitpunkt	37,77	37,77	40,66	28,08	13,75	25,01	116,27	116,27	45,31	65,99	19,35	22,52		
3	Größe	35,06	34,91	36,61	24,29	10,42	21,73	46,83	3,56	42,40	62,10	17,35	21,43		
4	Gesamtgröße (ha)	635	569	968	564	172	314	844	545	709	1062	355	447		
5	Beprobungsfläche (ha)	8	12	60	30	1	61	70	41	39	29	50	184		
6	Anzahl Messungen (n)	0	5	11	14	0	4	7	1	0	14	0	0		
7	Rohdaten	627	552	897	520	171	249	764	461	670	1025	305	263		
8	fehlerbehaftet	16,60	14,61	22,01	18,52	12,44	9,96	6,57	3,96	14,79	15,53	15,76	11,68		
9	manuelle Eliminierung	17,88	15,81	24,45	21,41	16,41	11,46	16,31	129,49	15,80	16,51	17,58	12,27		
10	verbleibend ¹														
11	Probendichte I (n ha ⁻¹) ²														
12	Probendichte II (n ha ⁻¹) ³														
13	Laborproben														
14	Kalibrierung	9	4	6	9	5	5	10	8	12	7	7	6		
15	Validierung	29	8	9	23	6	4	12	8	13	5	0	0		
16	Kalibrierfunktion (pH _{KALIBRIERT} = a + b x pH _{PERSONEN})														
17	a	-0,66	-0,96	-2,85	-3,59	0,46	-4,02	-1,00	-1,51	-1,71	-1,59	-2,52	3,03		
18	b	1,03	1,03	1,29	1,45	0,87	1,51	1,03	1,09	1,13	1,15	1,22	0,37		
19	Deskriptive Statistik Labordaten														
20	pH _{MIN}	5,60	6,36	5,48	4,81	5,40	5,63	5,09	5,26	4,42	6,10	3,80	5,20		
21	pH _{MW}	6,54	6,58	6,58	5,91	6,24	6,36	6,14	6,05	5,98	6,96	5,83	5,65		
22	pH _{MAX}	7,50	6,91	7,25	7,53	7,54	7,01	7,32	7,27	7,44	7,41	7,50	6,00		
23	s	0,28	0,19	0,50	0,60	0,64	0,39	0,74	0,56	0,91	0,43	1,54	0,31		
24	Deskriptive Statistik Rohdaten														
25	pH _{MIN}	6,48	7,10	6,58	5,81	6,32	6,48	5,89	6,13	5,65	6,69	5,17	5,87		
26	pH _{MW}	6,90	7,41	7,27	6,54	6,90	6,92	6,89	6,93	7,21	7,36	6,87	6,97		
27	pH _{MAX}	7,17	7,67	7,88	7,51	8,15	7,31	8,05	7,78	7,99	8,01	8,29	8,02		
28	s	0,27	0,18	0,37	0,39	0,54	0,27	0,70	0,48	0,48	0,40	1,18	0,89		
29	Deskriptive Statistik kalibrierte Daten														
30	pH _{MIN}	5,99	6,34	5,64	4,81	5,95	5,76	5,06	5,17	4,69	6,13	3,80	5,20		
31	pH _{MW}	6,42	6,66	6,54	5,88	6,46	6,43	6,10	6,04	6,46	6,90	5,88	5,71		
32	pH _{MAX}	6,80	6,93	7,33	7,27	7,54	7,01	7,29	6,97	7,35	7,66	7,61	6,20		
33	s	0,18	0,19	0,48	0,57	0,47	0,41	0,72	0,53	0,55	0,46	1,45	0,41		
34	Qualität Rohdaten														
35	r _{PEARSON}	0,52 ***	0,77 **	0,93 ***	0,93 ***	0,94 ***	0,69 *	0,97 ***	0,89 ***	0,98 ***	0,90 ***	0,98 ***	0,95 **		
36	r _{CC}	0,21 **	0,07 *	0,38 ***	0,47 ***	0,55 ***	0,26 ^{ns}	0,61 ***	0,35 ***	0,66 ***	0,60 ***	0,71 **	0,17 ^{ns}		
37	ME	0,36	0,82	0,69	0,64	0,66	0,56	0,75	0,66	0,83	0,40	0,93	1,32		
38	MAE	0,37	0,82	0,69	0,64	0,66	0,56	0,75	0,88	0,83	0,40	0,93	1,32		
39	RMSE	0,43	0,83	0,72	0,69	0,70	0,62	0,77	0,92	0,84	0,44	1,08	1,43		
40	Qualität Kalibrierung														
41	r _{PEARSON}	0,52	0,77	0,93	0,93	0,94	0,69	0,97	0,89	0,98	0,90	0,98	0,95		
42	r _{CC}	0,41 ***	0,71 **	0,92 ***	0,93 ***	0,93 ***	0,68 *	0,96 ***	0,89 ***	0,98 ***	0,89 ***	0,98 ***	0,90 ***		
43	ME	0,13	0,08	0,04	0,03	0,22	0,06	0,04	0,00	0,01	0,05	0,09	0,03		
44	MAE	0,19	0,10	0,15	0,17	0,28	0,25	0,14	0,18	0,14	0,16	0,16	0,07		
45	RMSE	0,27	0,14	0,21	0,21	0,33	0,30	0,19	0,25	0,17	0,20	0,25	0,10		

¹keine Kalibrierung mit Ergebnissen von identischen Bodenproben, ²[Z10/Z4], ³[Z10/Z5], * signifikant verschieden von Null mit p < 0,05, ** s. v. von Null mit p < 0,01, *** s. v. von Null mit p < 0,001, ^{ns} nicht signifikant verschieden von Null

4.4.2.2.2 Ergebnisse der pH-Wert Messungen und Kalkbedarf

Von den neun untersuchten Praxisschlägen zeigen drei keinen oder nur einen geringen Kalkbedarf an. Die grafischen Darstellungen der Verteilungen des pH-Wertes der Versuchsschläge sind in den Abbildungen Anhang A4-4-2-2-2a bis m enthalten. Auf Flächen, die einen höheren Kalkbedarf zeigen („Lange Welle“, „Lange Winde“, „Deutsches Feld“, „Dölzig I“), ist eine ausgeprägte Differenzierung des pH-Wertes festzustellen. Den höchsten Kalkbedarf zeigen mit einem durchschnittlichen CaO-Bedarf von 3,17 t ha⁻¹ und 3,14 t ha⁻¹ die Versuchsschläge „Dölzig II“ und „Deutsches Feld“. Die weiteren Versuchsschläge weisen einen mittleren bis geringen durchschnittlichen CaO-Bedarf von 2,58 t ha⁻¹ („Dölzig I“), 1,66 t ha⁻¹ („Lange Welle“), 1,37 t ha⁻¹ („Lange Winde“) und 0,84 t ha⁻¹ („Maststall“) auf. Keinen Kalkbedarf zeigen die Versuchsschläge „Kuhberg“, „Rieder“ und „110“ auf.

Ein überwiegender Teil der Ergebnisse der simulierten Bodenbeprobungen nach den Klassifizierungen der Heterogenitätsindikatoren führt zu empfohlenen CaO-Mengen, die unter denen des notwendigen CaO-Bedarfs liegen. Insbesondere zeigt sich für die starren Raster, dass mit einer sinkenden Beprobungsdichte auch die empfohlenen Kalkmengen sinken (Tab. 4-37).

Tab. 4-37: Notwendige und empfohlene CaO-Mengen nach Klassifizierung der Heterogenitätsindikatoren (in t ha⁻¹)

Versuchsschlag	pH-Sensor	1 ha	5 ha	10 ha	EC	Höhe	SBS	TWI	Y (Rang)	Y (Rel)	ohne Kalkung	einheitlich
110	0,08	0,08	0,00	0,00	0,05	0,03		0,07			0,00	0,00
Kuhberg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00			0,00	0,00
Maststall	0,84	0,72	0,50	0,50	0,86	0,60		0,87			0,00	1,00
Lange Welle	1,66	1,56	1,70	1,60	1,33	1,51		1,50			0,00	1,60
Deutsches Feld	3,14	3,11	2,90	3,28	3,17	3,13	2,92	2,96			0,00	3,00
Lange Winde	1,37	1,03	1,11	0,90	1,13	1,26	1,63	1,08	1,31	1,47	0,00	0,60
Rieder	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00
Dölzig I	2,57	2,53	2,74	1,36	2,37	2,51		2,57			0,00	2,00
Dölzig II	3,18	3,25	3,28	3,25	3,16	3,20		3,18			0,00	3,00

In der Abb. 4-43 sind die mittleren über- und unterdüngten Flächen und Mengen (in %) mit ihren Min-/Max-Werten für die Klassifizierungen der Heterogenitätsindikatoren über alle Versuchsschläge dargestellt. Mit zunehmender Beprobungsdichte können Vorteile anhand der überdüngten Fläche und der unterdüngten Menge festgestellt werden. Das mittlere Niveau ist bei beiden Merkmalen relativ konstant, allerdings sinken die Spannen für die untersuchten Verfahren. Keine klaren Vorteile ergeben sich bei den unterdüngten Flächen und den überdüngten Mengen. Für die Ergebnisse der Zonierungen der Bodenschätzung besteht jedoch die Tendenz einer zu hohen CaO-Gabe. Eine Bewertung der Anteile der über- und unterdüngten Flächen und Mengen zeigt, dass eine Klassifizierung nach einem Heterogenitätsindikator zu keinen wesentlichen Verbesserungen gegenüber starren Beprobungsmustern führt (Abb. 4-43).

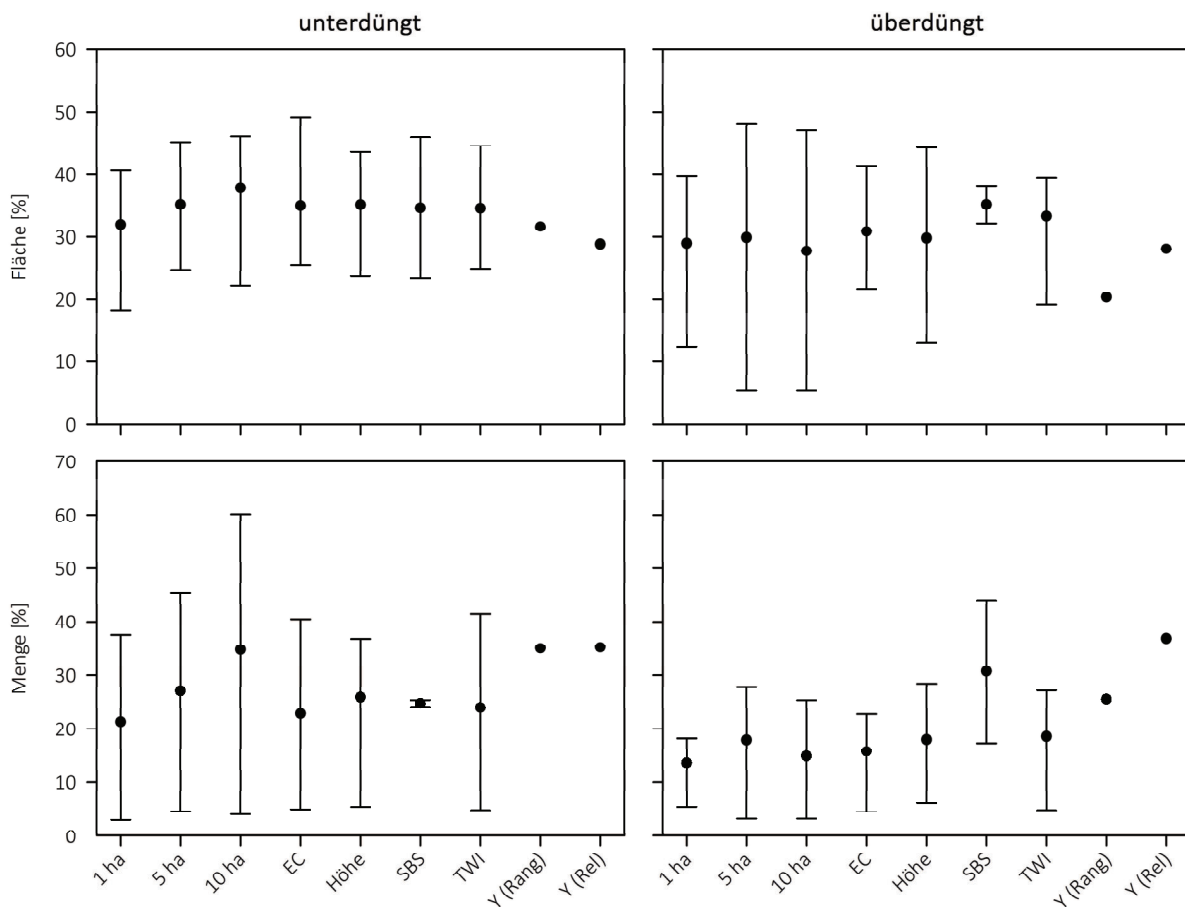


Abb. 4-43: Anteil der über- und unterdüngten Flächen und Mengen (in %) nach den Empfehlungen der untersuchten Beprobungsverfahren

4.4.2.2.3 Ergebnisse kleinräumiger Intensivbeprobungen

Während der Feldmessungen mit dem Verissensor zeichneten sich Areale mit einer sehr ausgeprägten kleinräumigen Variabilität des pH-Wertes ab. Die vorgestellten Beispiele stammen von den Versuchsschlägen „Lange Winde“ und „Deutsches Feld“.

Auf dem Versuchsschlag „Lange Winde“ wurden in der Intensivbeprobung 46 pH-Wert Messungen mit dem Verissensor auf einer Fläche von 0,48 ha durchgeführt. Dies entspricht einer Beprobungsdichte von 96 Proben je ha. Innerhalb der Fläche differenzierte sich der pH-Wert um 1,5 pH-Wert Einheiten von 5,9 bis 7,4 pH-Einheiten. Der durchschnittliche pH-Wert von ca. 6,9 pH-Einheiten würde bei einer einheitlichen Beprobung zu der Entscheidung führen, keinen Kalk auszubringen. Der CaO-Bedarf variiert allerdings zwischen 0 und ca. 3,6 t ha⁻¹. Mehrfach können Differenzen von einer pH-Einheit zwischen zwei Messpunkten gemessen werden, deren Abstand zwischen 8 und 20 m liegt. Messfehler können ausgeschlossen werden, da die ausgeprägten Zonen eines niedrigen und hohen pH-Wertes quer zur Fahrtrichtung liegen. Sollte ein Messfehler mit einem Drift gemäß des Effektes des „Rosa Rauschens“ vorliegen (s. Kap. 2.5.3), würden zwei Beobachtungen sichtbar. Einerseits würden an geografisch nahe beieinander liegenden Probenahmepunkte, die aber zeitlich nicht unmittelbar hintereinander beprobt worden sind, größere Diffe-

renzen sichtbar. Andererseits würden sich die Nährstoffzonen mit der Fahrtrichtung ausprägen (Abb. 4-44).

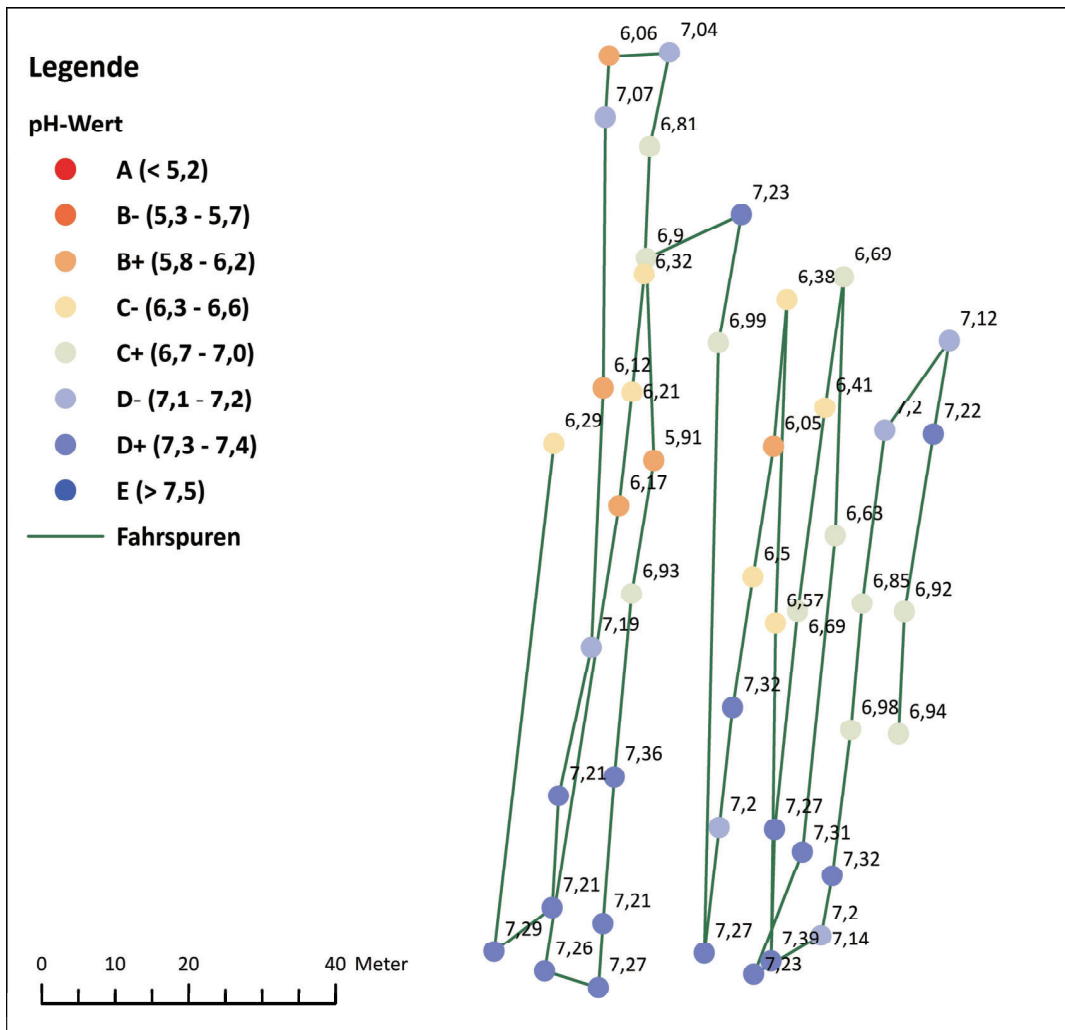


Abb. 4-44: Ergebnisse der Intensivbeprobung „Lange Winde“

In der Abb. 4-45 sind die Ergebnisse der Intensivbeprobung für den Versuchsschlag „Deutsches Feld“ dargestellt. Auf einer Fläche von 0,95 ha wurden 134 Beprobungen mit dem Verissensor durchgeführt (Beprobungsdichte: 141 n ha⁻¹). Die Spanne zwischen dem kleinsten und größten pH-Wert beträgt 1,7 pH-Einheiten (pH_{MIN}: 5,4, pH_{MAX}: 7,1). Auch hier kristallisieren sich Areale mit niedrigen und hohen pH-Werten heraus, die zu CaO-Gaben von 0 bis ca. 6,6 t ha⁻¹ führen würden. Mit einem durchschnittlichen pH-Wert von ca. 6,4 pH-Einheiten wäre für die gesamte Fläche nur ein geringer CaO-Bedarf von 0,6 t ha⁻¹ festgestellt worden (Abb. 4-45).

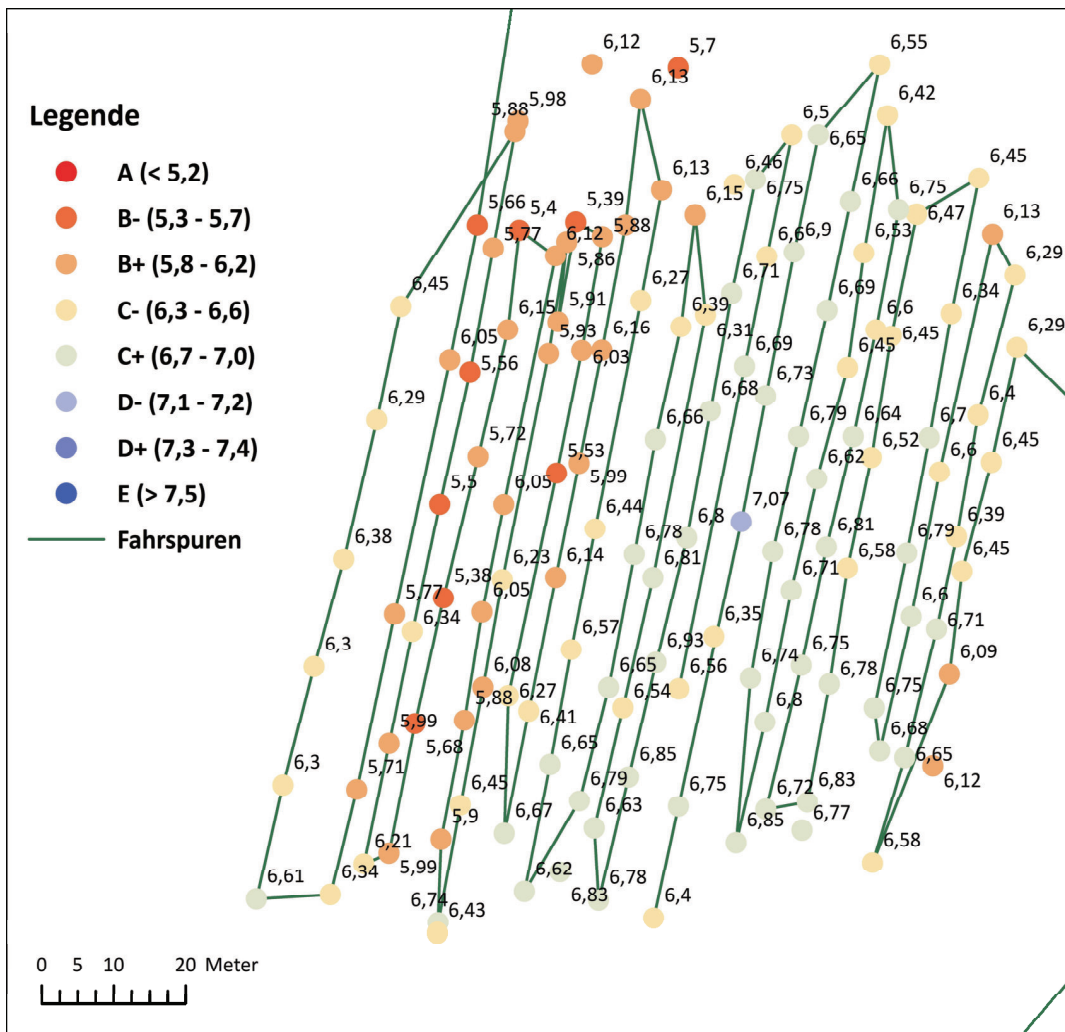


Abb. 4-45: Ergebnisse der Intensivbeprobung „Deutsches Feld“

4.4.2.2.4 Ertrags-pH-Beziehungen der Praxisstandorte

Zur Auswertung der Ertrags-pH-Beziehung dienen die Versuche der Standorte Warnstedt und Dennheritz. Von den anderen Standorten Althen, Krosigk und Starsiedel liegen keine oder nur unvollständige Ertragsdaten vor. Die Versuchsschläge Lange Winde, Lange Welle und Kuhberg wurden im Herbst 2011 mit dem Verissensor beprobt (Tab. 4-36). Zur Auswertung werden die Ertragsdaten je nach Verfügbarkeit aus den Jahren 2010 bis 2012 verwendet, da die kleinräumige Variabilität des pH-Wertes relativ stabil ist (s. Kap. 4.4.1.2) und keine starken Veränderungen innerhalb eines Jahres beobachtet werden können. Die Auswertung erfolgt nach der Vorgehensweise im Kapitel 3.5.1.4. Die Abbildungen 4-46 und 4-48 stellen die pH-Wert-Verteilungen und die Ertragskarten der Versuchsschläge dar.

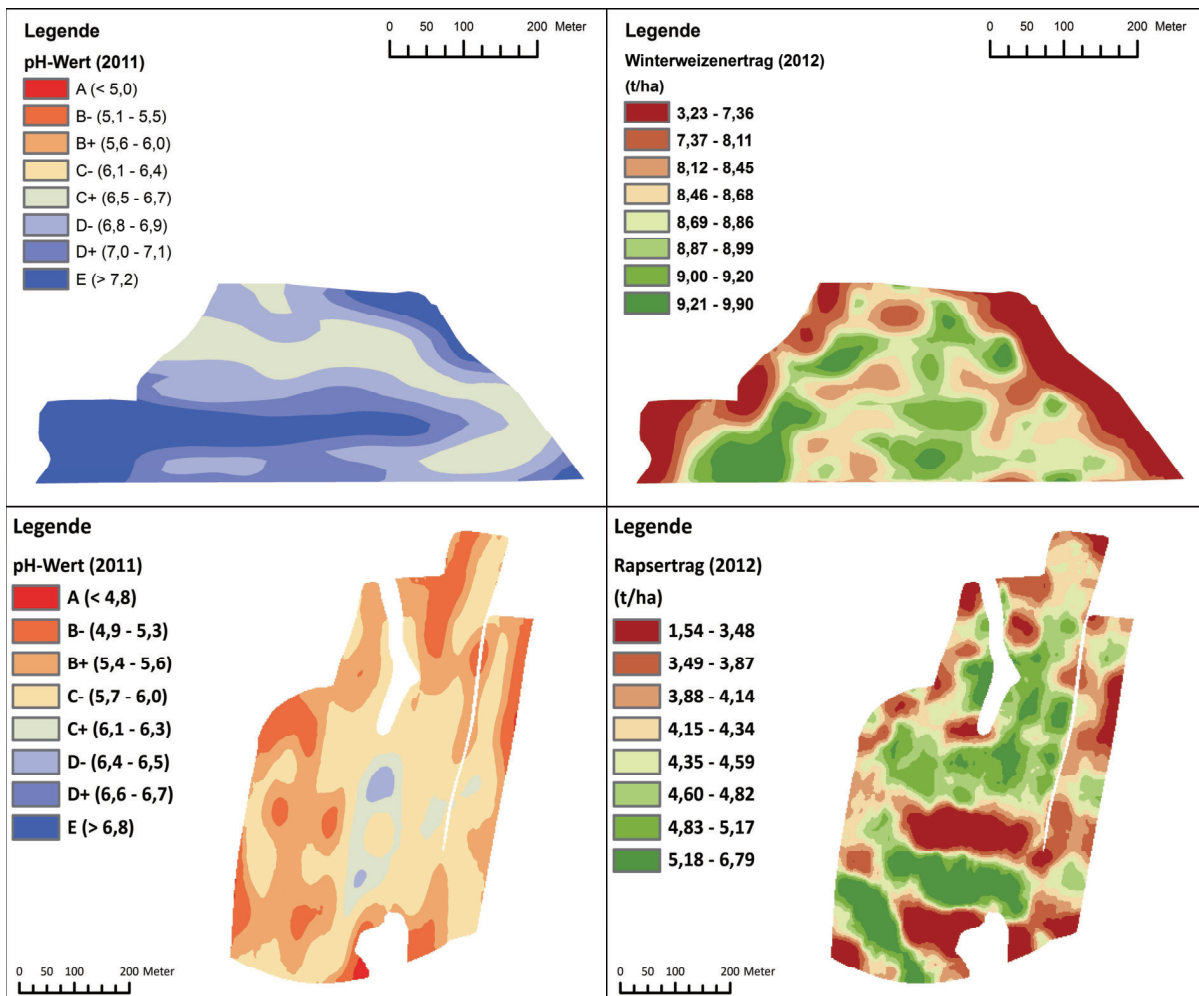


Abb. 4-46: pH-Wert-Karten (2011) und Ertragskarten (2012) der Versuchsschläge „Kuhberg“ (oben) und „Lange Welle“ (unten)

Die beobachteten Ertrags-pH-Beziehungen für Winterrapss und Winterweizen unterscheiden sich durch die unterschiedlichen pH-Wert-Verteilungen sehr deutlich. Auf dem Versuchsschlag „Kuhberg“ differieren die pH-Werte überwiegend zwischen den Gehaltsklassen C, D und E, während für den Versuchsschlag „Lange Welle“ hauptsächlich die Gehaltsklassen B und C überwiegen.

Die stärksten Ertragsdepressionen treten auf dem Versuchsschlag „Kuhberg“ in den Randbereichen des pH-Wertes mit einem Rückgang um 25 % bei einem mittleren pH-Wert von 6,1 (untere Gehaltsklasse C) und 33 % in der Gehaltsklasse E auf. Der optimale pH-Wert Bereich (6,7 bis 7,2) umfasst für Winterweizen neben der Gehaltsklasse C auch teilweise die Gehaltsklasse B und D. Die Ertrags-pH-Beziehung für den Versuchsschlag „Lange Welle“ zeigt eine starke Ausprägung. Das Ertragsmaximum liegt bei einem pH-Wert von 5,4 und entspricht damit der Gehaltsklasse B. Der Ertragsrückgang ist unterhalb des Maximums deutlich stärker und geht bis auf 59 % zurück als oberhalb des Maximums mit einem Ertragsrückgang auf 77 %. Der optimale pH-Wert Bereich erstreckt sich von 5,3 bis 6,0 über die Gehaltsklassen B und C (Abb. 4-47).

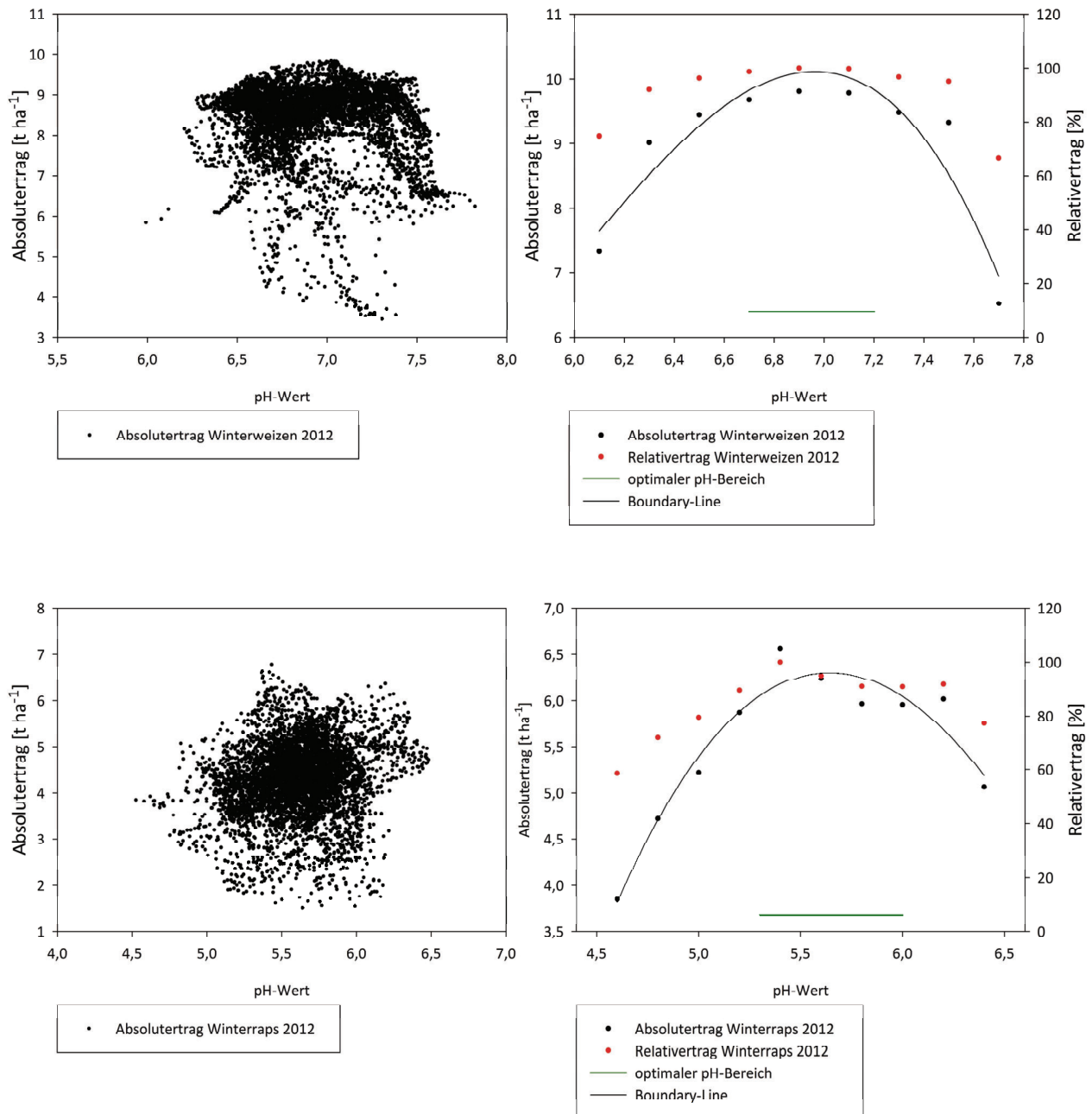


Abb. 4-47: Darstellung der Ertrags-pH-Beziehung im Streudiagramm (links) und der Ergebnisse der Boundary-Line-Methode (rechts) für die Versuchsschläge „Kuhberg“ (oben) und „Lange Welle“ (unten)

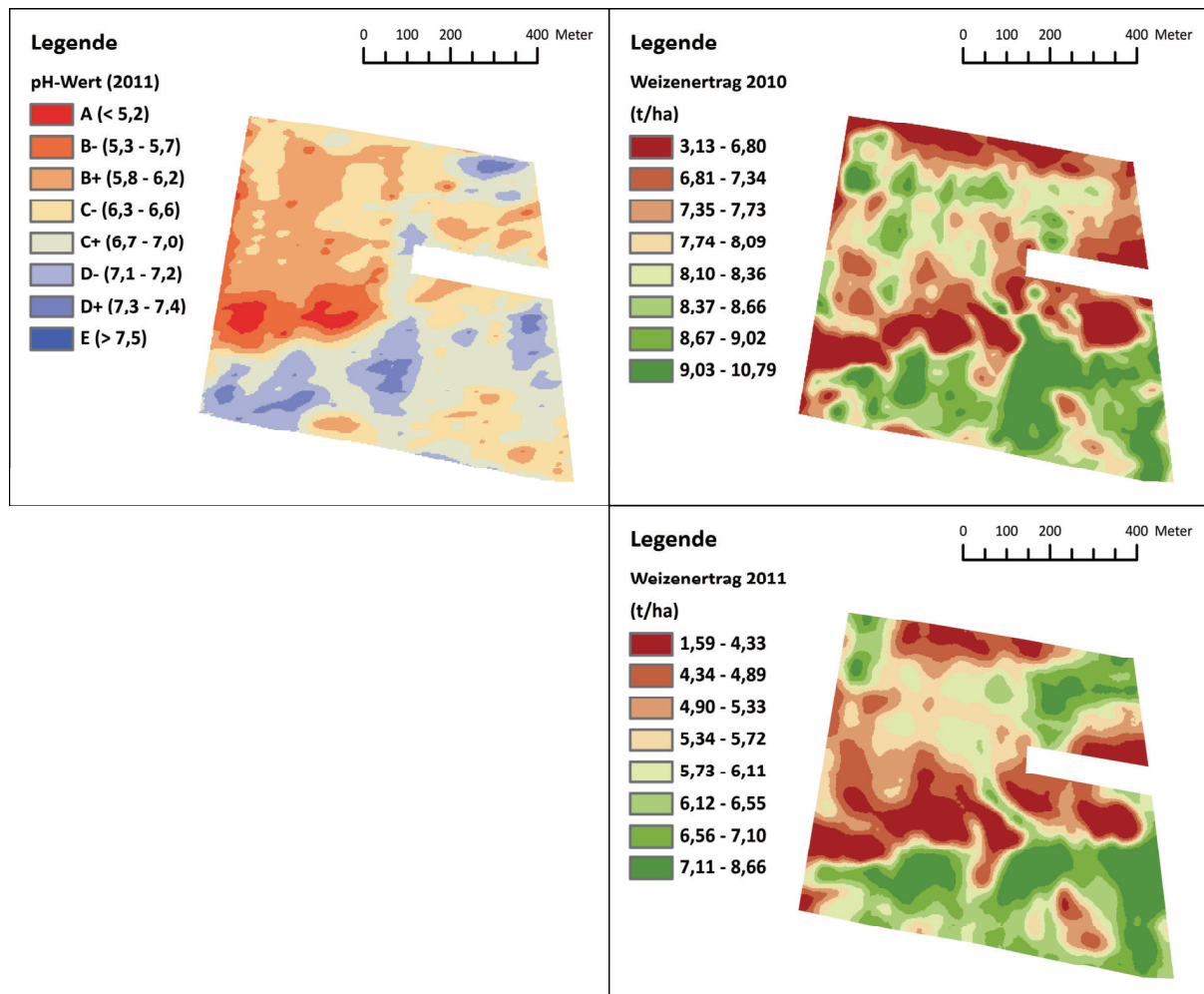


Abb. 4-48: pH-Wert-Karte (2011) und Ertragskarten der Erntejahre 2010 und 2011 des Versuchsschlages „Lange Winde“

In den untersuchten Erntejahren 2010 und 2011 wurde Winterweizen auf dem Versuchsschlag „Lange Winde“ angebaut. Die Analyse der Verläufe der Grenzlinienfunktionen zwischen dem Ertrag und dem pH-Wert führen zu ähnlichen Ergebnissen. Die relativen Ertragswirkungen im pH-Wert Bereich der Gehaltsklassen A und B fallen im Jahr 2011 deutlicher aus als 2010. Die geringsten relativen Erträge verzeichnet die Gehaltsklasse A im Jahr 2011 mit 59 % und im Jahr 2010 mit 74 %. In der Gehaltsklasse D gehen die Erträge in beiden Jahren auf 88 % zurück. Für beide Jahre können fast identische optimale Bereiche zwischen 6,4 und 7,0 beobachtet werden, die damit der Gehaltsklasse C zuzuordnen sind (Abb. 4-49).

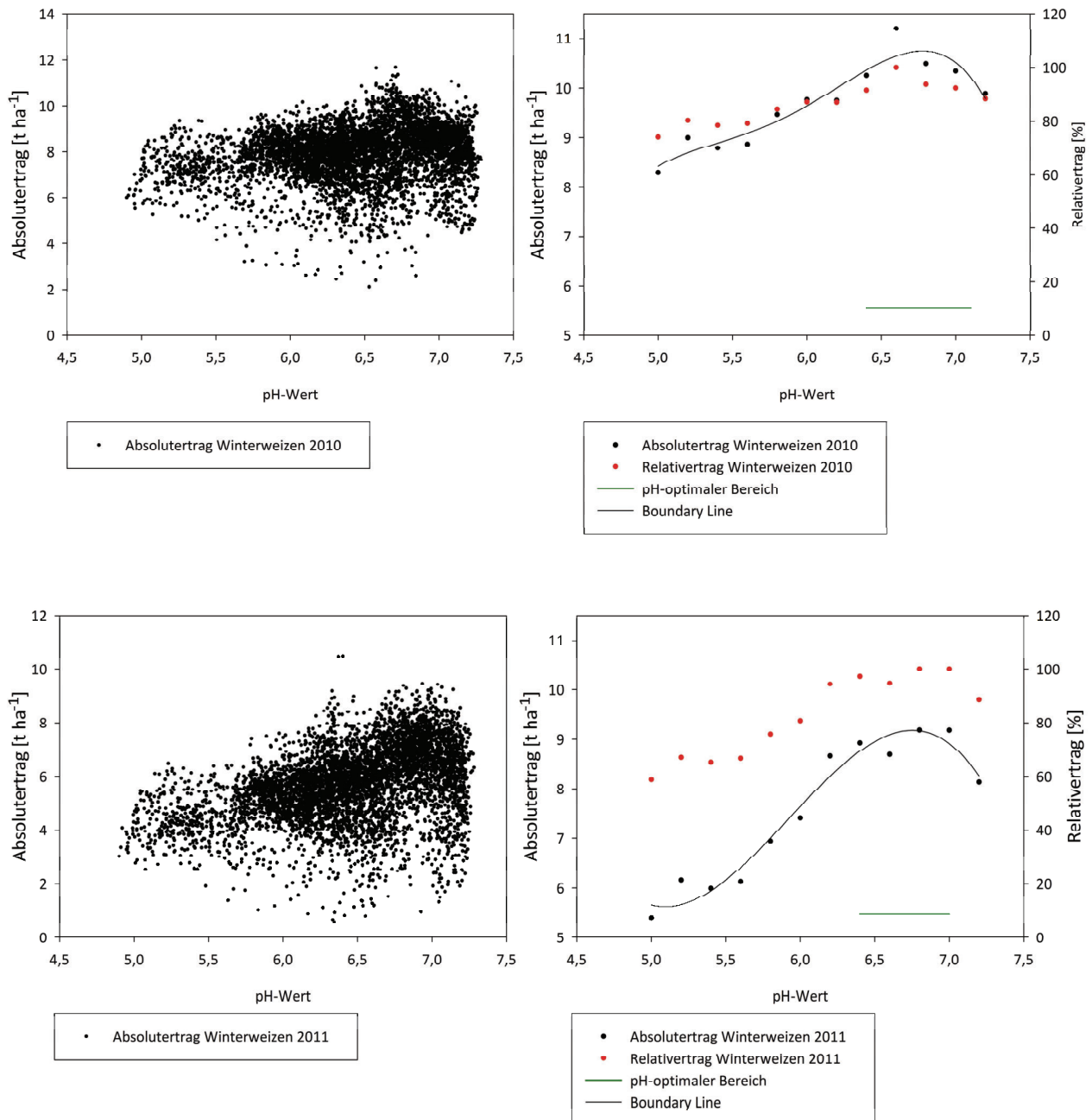


Abb. 4-49: Darstellung der Ertrags-pH-Beziehung im Streudiagramm (links) und der Ergebnisse der Boundary-Line-Methode (rechts) für den Versuchsschlag „Lange Winde“

Zusammenfassend können für die untersuchten vier Praxisschläge mit sehr unterschiedlichen Ausgangsversorgungen des pH-Wertes und der pH-Wert-Verteilung starke Ertragsdepressionen für Winterweizen beobachtet werden.

4.4.2.2.5 Ökonomischer Vergleich

Für den ökonomischen Vergleich werden die Annahmen über die zu erwartenden Zielerträge an die vorliegenden Standortbedingungen angepasst (Tab. 4-38). Die Produkt- und Faktorpreise werden aus Tab. 3-5 übernommen.

Tab. 4-38: Erwartete Zielerträge unter Berücksichtigung der standörtlichen Gegebenheiten

Fruchtarten	Erwarteter Zielertrag (in dt ha ⁻¹)		
	Bodengruppe 2	Bodengruppe 3	Bodengruppe 4
Sommergerste	50	60	65
Wintergerste	65	80	85
Winterraps	38	42	45
Winterroggen	70	80	90
Winterweizen	70	80	85
Zuckerrüben	600	650	700

Quelle: persönliche Befragung der Betriebsleiter Leithold (2013), Pöse (2013), Winter (2012)

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Praxisschläge wird eine einheitliche Fruchtfolge simuliert. Die Anteile der Fruchtarten der sechsjährigen Fruchtfolge werden aus dem statistischen Jahrbuch für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMELV, 2012: 98) mit den prozentual höchsten Anteilen im Erntejahr 2012 übernommen (s. Anhang A4-4-2-2-4). Silomais findet aufgrund der regionalen Preisbildung keine Berücksichtigung, wie auch Körnermais, der auf dem Standort Dennheritz nicht anbauwürdig ist. Folgende Fruchtfolge wird in der Simulation angenommen:

Zuckerrüben – Winterweizen – Wintergerste – Winterraps – Winterroggen – Sommergerste

Verfahrenskosten

Die Verfahrenskosten der Heterogenitätsindikatoren liegen im Durchschnitt auf einem vergleichbaren Niveau wie die Ergebnisse aus Kap. 4.4.1.6. Größere Unterschiede zwischen den Standorten ergeben sich innerhalb der Heterogenitätsindikatoren für die Verfahren basierend auf dem TWI, dem 1 ha-Raster und der Leitfähigkeit mit einer maximalen Differenz von ca. 5,60 € ha⁻¹ (Abb. 4-50). Dies ist auf die unterschiedlichen Probedichten der Heterogenitätsindikatoren zurückzuführen (Kap. 4.4.2.1).

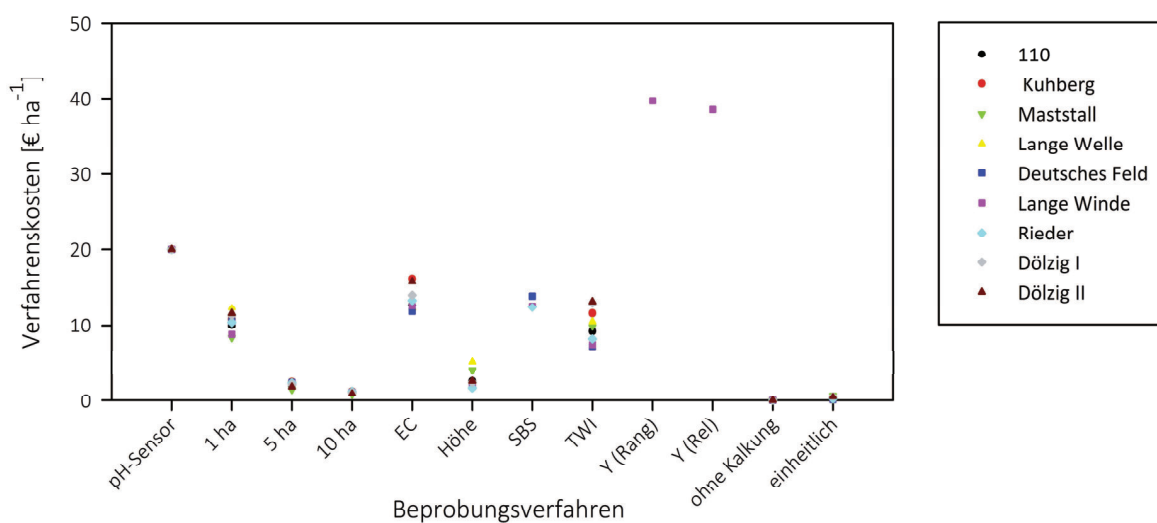


Abb. 4-50: Verfahrenskosten der Heterogenitätsindikatoren der untersuchten Praxisschläge

Fehlallokierte Kalkkosten

Die fehlallokierten Kalkkosten sind zusammenfassend über alle Standorte und Heterogenitätsindikatoren in Abb. 4-51 dargestellt. Gemäß der Annahme, dass der pH-Sensor die „tatsächliche“ pH-Wert-Verteilung misst, führt eine entsprechende Kalkapplikation zu keinen über- und unterdüngten Flächen und Mengen. Folglich fallen keine fehlallokierten Kalkkosten an. Für die Versuchsschläge „Kuhberg“, „Rieder“ (je 0,00 € ha⁻¹) und „110“ (0,58 € ha⁻¹) fallen aufgrund des geringen Kalkbedarfs ebenfalls keine oder nur marginal fehlallokierte Kalkkosten an. Für alle Versuchsschläge, die einen höheren Kalkbedarf zeigen, schneiden das 1-ha- und das EC-Raster mit 14,65 € ha⁻¹ und 15,82 € ha⁻¹ mit den geringsten fehlallokierten Kalkkosten ab. Die höchsten fehlallokierten Kalkkosten können im Mittel für eine einheitliche Düngung mit 23,28 € ha⁻¹ sowie für das SBS-Raster mit 30,55 € ha⁻¹ fehlallokiert Kalkkosten ermittelt werden, wobei für das letztere nur zwei Beobachtungen mit einem ausreichenden Kalkbedarf zur Verfügung stehen.

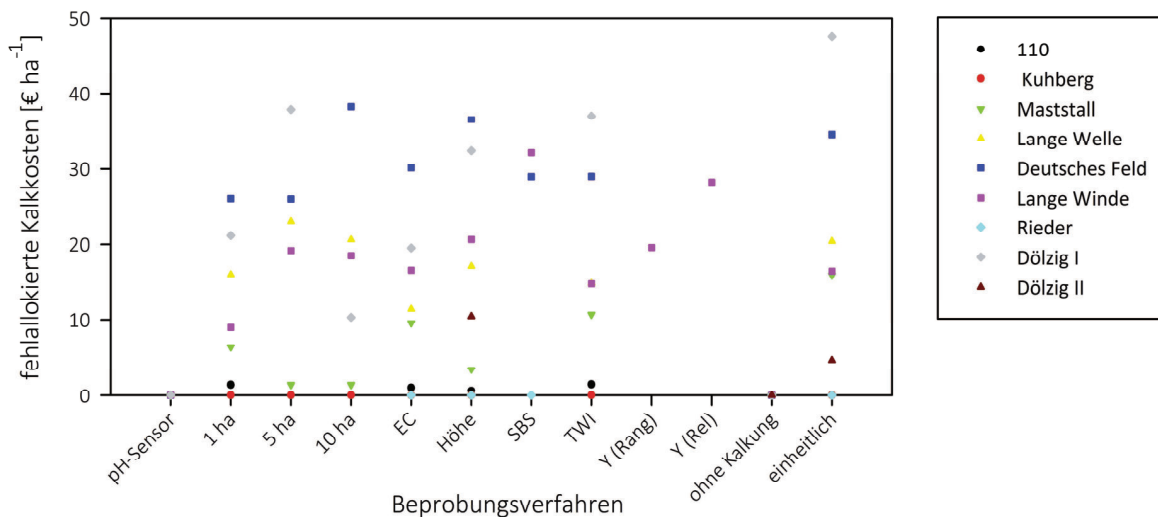


Abb. 4-51: Fehlallokierte Kalkkosten der Heterogenitätsindikatoren der untersuchten Praxisschläge

Entgangener Nutzen des Phosphateffektes

Für die Versuchsschläge „Rieder“ und „Kuhberg“ zeigen sich über alle untersuchten Beprobungsverfahren sehr hohe entgangene Nutzen für den Phosphateffekt. Die Ursache liegt in der hohen Kalkversorgung während des Messzeitpunktes. Durch die versauernd wirkenden Faktoren, die im Modell mit einer jährlichen pH-Absenkung von 0,1 pH-Einheiten berücksichtigt werden, sinkt der pH-Wert flächendeckend auf ein Niveau, das zu dem hohen entgangenen Nutzen führt. Deutliche Unterschiede zwischen den Beprobungsverfahren zeigen sich für die Versuchsschläge „Dölzig I“ und „Lange Winde“. Der entgangene Nutzen kann durch den Einsatz des pH-Sensors minimiert werden, wohingegen mit eine einheitliche Kalkung oder der Unterlassung der Kalkung im 10-ha-Raster der größte entgangene Nutzen des Phosphateffektes zu verzeichnen ist. Beide Versuchsschläge weisen bei einem mittleren Kalkbedarf eine kleinräumige pH-Heterogenität aus (Abb. 4-52).

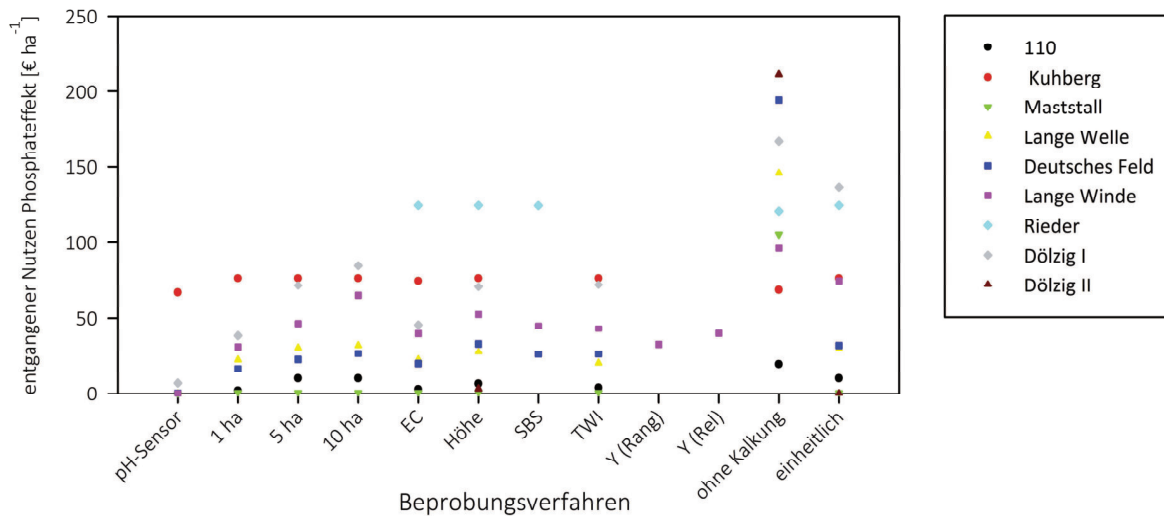


Abb. 4-52: Entgangener Nutzen durch den Phosphateffekt der untersuchten Praxisschläge

Entgangener Nutzen durch Ertragsdepressionen

In den Abb. 4-53 bis 4-55 sind die Ergebnisse der Szenariorechnungen der untersuchten Beprobungsverfahren über alle Versuchsschläge des simulierten Fruchtfolgezeitraums enthalten. Wie in Kap. 4.4.1.6. können auch für den pH-Sensor Ertragsdepressionen beobachtet werden. Als Ursachen sind wiederum die ersten beiden Umsetzungsjahre bei schlechten Ausgangssituationen der Kalkversorgung sowie die suboptimale Entwicklung des pH-Wertes im fünften und sechsten Jahr bei einer optimal versorgten Ausgangssituation ohne Kalkbedarf verantwortlich. Für die Schläge ohne Kalkbedarf („Rieder“, „Kuhberg“) können keine ökonomischen Vorteile für den pH-Sensor festgestellt werden. Deren hohe Kalkversorgung führt bei allen Beprobungsverfahren durch hohe Ertragsdepressionen zu einem hohen entgangenen Nutzen. Für diese Standorte können nur durch versauernd wirkende Faktoren Ertragssteigerungen erwartet werden.

Der Vergleich aller untersuchten Beprobungsverfahren im „Average-Case“ zeigt, dass der ökonomische Vorteil für den Einsatz des pH-Sensors auf dem Versuchsstandort „Dölzig I“ mit einem mittleren Kalkbedarf sein Maximum mit 312 € ha^{-1} erreicht. Bei einer weiteren Zunahme des Kalkbedarfes („Dölzig II“, „Krosig“) bleibt der ökonomische Vorteil auf einem vergleichbaren Niveau wie bei „Lange Welle“ und „Lange Winde“ mit einem mittleren Kalkbedarf. Über alle Standorte schneiden neben dem pH-Sensor mit dem geringsten entgangenen Nutzen bei den Ertragsdepressionen das starre 1-ha-Raster (mit 189 € ha^{-1}) sowie das EC-Raster (mit 196 € ha^{-1}) ab, verglichen im „Average-Case“. Neben einer einheitlichen Kalkung (256 € ha^{-1}) bzw. der Unterlassung der Kalkung (640 € ha^{-1}) schneidet das starre 10-ha-Raster mit dem höchsten entgangenen Nutzen durch Ertragsdepressionen mit 240 € ha^{-1} ab. Die Verfahren mit drei Beobachtungen (SBS) und einer Beobachtung (Y (Rang) und Y (Rel)) tendieren ebenfalls zu sehr hohen Ertragsdepressionen. Die Szenariorechnungen zeigen zudem, dass durch die unsicheren pH-Ertrags-Beziehungen deutliche Unterschiede des entgangenen Nutzens innerhalb der Beprobungsverfahren beobachtet werden können. Die relativen Unterschiede zwischen den Verfahren bleiben in den Szenarien erhalten. Beispielsweise beträgt der entgangene Nutzen über alle Standorte für den pH-Sensor im Best-Case-Szenario 86 € ha^{-1} , während im Worst-Case-Szenario ca. 262 € ha^{-1} zu veranschlagen sind.

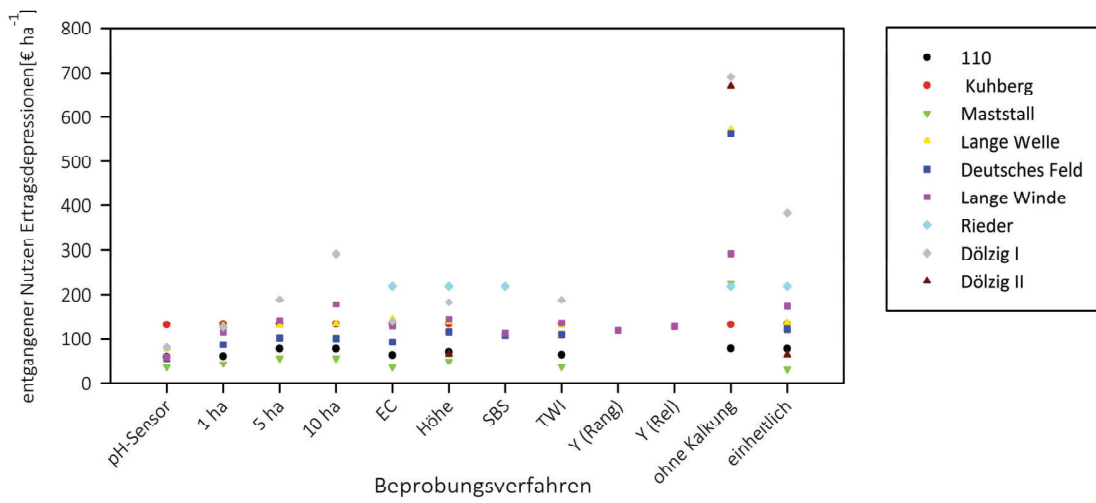


Abb. 4-53: Entgangener Nutzen durch Ertragsdepressionen der Versuchsschläge im Szenario „Best-Case“

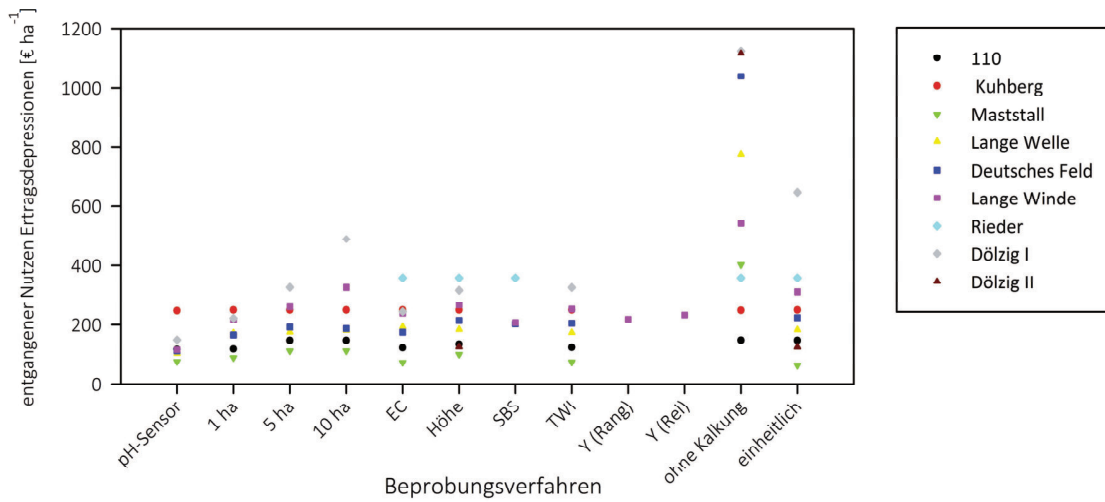


Abb. 4-54: Entgangener Nutzen durch Ertragsdepressionen der Versuchsschläge im Szenario „Average-Case“

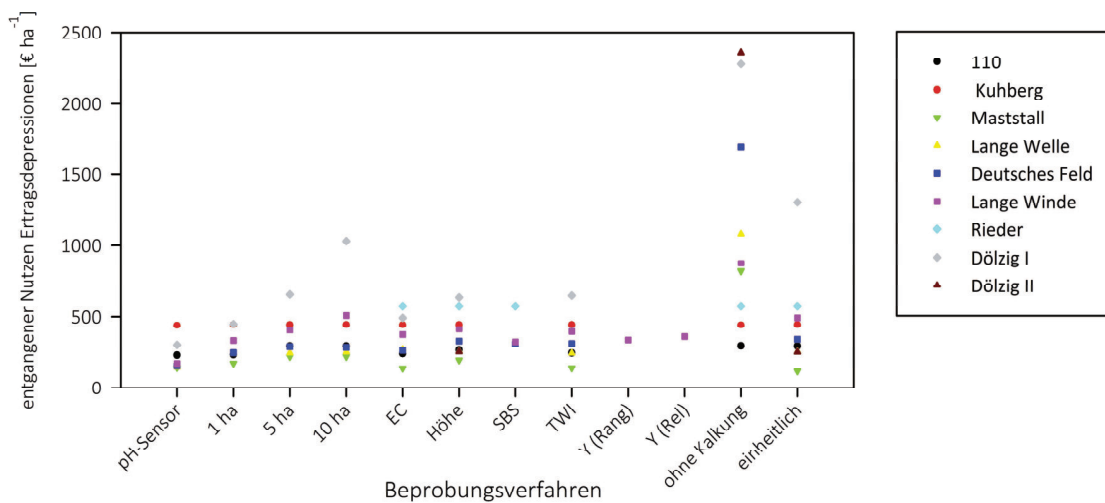


Abb. 4-55: Entgangener Nutzen durch Ertragsdepressionen der Versuchsschläge im Szenario „Worst-Case“

Zusammenfassung ökonomischer Vergleich

In der Abb. 4-56 sind die jährlichen Kosten und der jährlich entgangene Nutzen aus den vorangestellten Abschnitten enthalten. Für den entgangenen Nutzen durch die Ertragsdepressionen wird dabei das Szenario „Average-Case“ mit den mittleren pH-Wert-Ertragswirkungen in die Zusammenfassung einbezogen. Die Versuchsschläge „Rieder“ und „Dölzig I“ weisen über alle Beprobungsverfahren mit ca. 82 € ha⁻¹ a⁻¹ und ca. 89 € ha⁻¹ a⁻¹ die höchsten jährlichen Effekte auf. Für „Rieder“ bestehen keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Beprobungsverfahren (80 € ha⁻¹ a⁻¹ bis 83 € ha⁻¹ a⁻¹), während für „Dölzig I“ der pH-Sensor ca. 30 € ha⁻¹ a⁻¹ und die Unterlassung der Kalkung ca. 215 € ha⁻¹ a⁻¹ verursachen. Die hohe Kalkversorgung in Verbindung mit einer homogenen pH-Wert-Verteilung führen sowohl für den Versuchsschlag „Rieder“ als auch für die gut versorgten Standorte „Kuhberg“ und „110“ zu geringen Unterschieden zwischen den untersuchten Beprobungsverfahren. Eine Unterlassung der Kalkung führt im Durchschnitt zu jährlichen Kosten und entgangenem Nutzen von ca. 127 € ha⁻¹ a⁻¹. Mit dem Einsatz des pH-Sensors fallen über alle Standorte im Durchschnitt ca. 33 € ha⁻¹ a⁻¹ jährliche Kosten und entgangener Nutzen an.

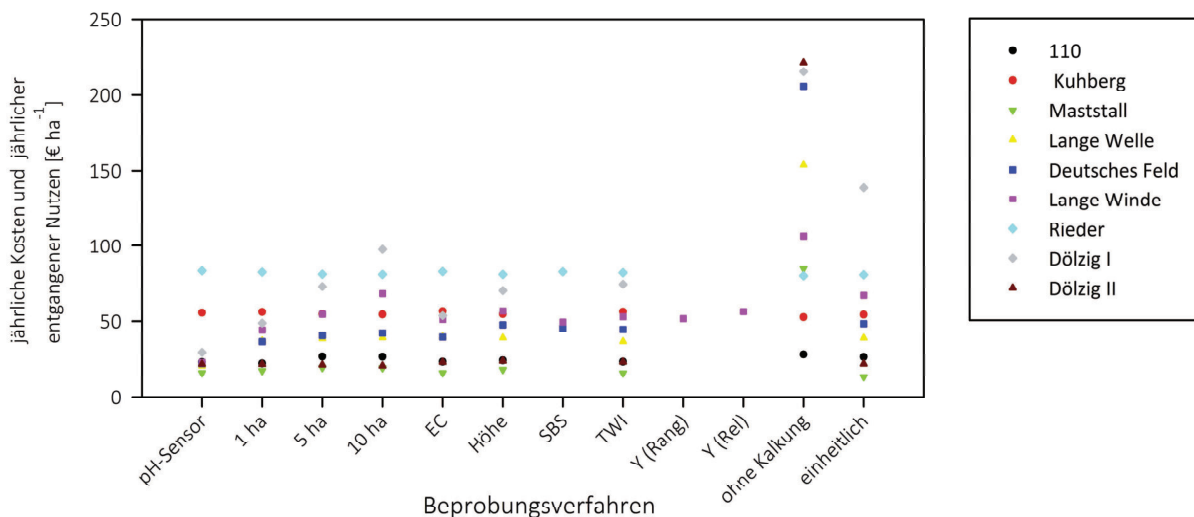


Abb. 4-56: Jährliche Kosten und jährlich entgangener Nutzen der untersuchten Beprobungsverfahren

Die prozentualen Zusammensetzungen der jährlichen Kosten und des jährlich entgangenen Nutzens sind für die untersuchten Beprobungsverfahren zusammenfassend für alle Standorte in der Tab. 4-39 dargestellt. Mit einem Anteil von ca. 10 % sind die Verfahrenskosten für den pH-Sensor und der auf Ertragskarten basierenden Verfahren am höchsten. Die Anteile der fehlallokierten Kalkkosten und des entgangenen Nutzens durch den Phosphateffekt liegen in einem Bereich zwischen 0 bis 8 % sowie zwischen 11 bis 18 %. Den größten Anteil verursachen mit ca. 69 bis 84 % die Ertragsdepressionen. Über alle Standorte beträgt der jährliche ökonomische Vorteil des Einsatzes des pH-Sensors zwischen 8 bis 95 € ha⁻¹ a⁻¹, im Durchschnitt sind es ca. 24 € ha⁻¹ a⁻¹. Jedoch zeigt der Vergleich auf Versuchsschlagebene auch, dass z.B. für den Standort „Rieder“ der Einsatz des pH-Sensor im Mittel ca. 2 € ha⁻¹ a⁻¹ an ökonomischem Nachteil gegenüber allen anderen untersuchten Beprobungsverfahren aufweist. Ökonomische Nachteile für den Einsatz des Verissensors sind zu erwarten, wenn keine kleinräumigen pH-Heterogenitäten vorliegen.

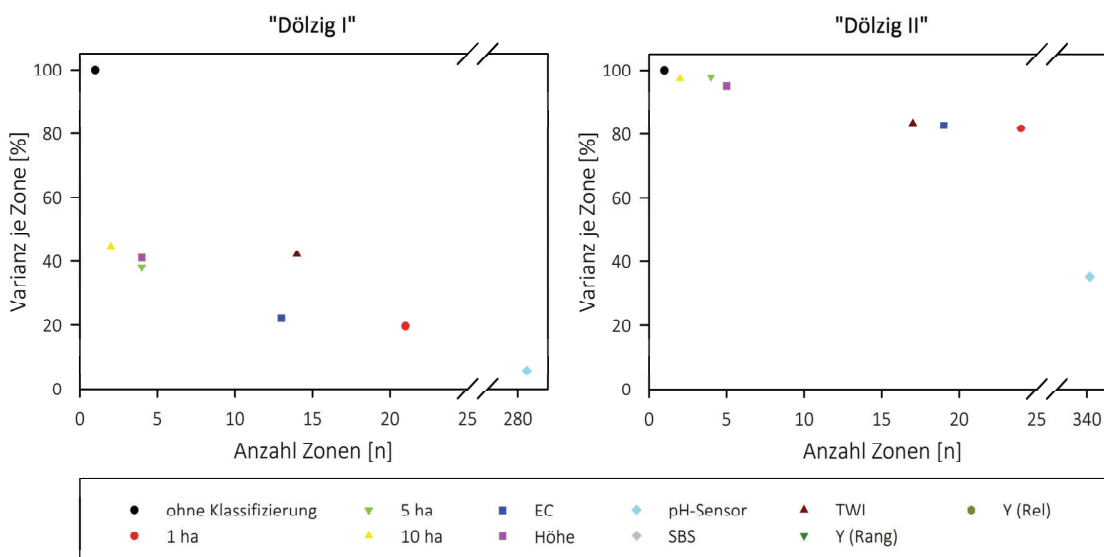
Tab. 4-39: Zusammenfassung der Versuchsschläge

Kenngröße	pH-Sensor	1 ha	5 ha	10 ha	Y (Rel)*	Y (Rang)*	TWI	SBS**	Höhe	EC	Ohne	Einheitlich
Prozentualer Anteil der Verfahrenskosten ¹	10,22	4,28	0,79	0,36	11,41	12,82	3,66	3,64	1,00	5,25	0,00	0,11
Prozentualer Anteil der fehlallokierten Kalkkosten ¹	0,00	4,07	4,92	3,71	8,36	6,31	4,74	5,75	4,87	4,15	0,00	4,76
Prozentualer Anteil des entgangenen Nutzens durch den Phosphateffekt ¹	11,03	14,17	15,56	15,58	11,69	10,47	14,97	18,34	15,84	14,23	16,38	16,47
Prozentualer Anteil des entgangenen Nutzens durch die Ertragsdepressionen ¹	78,76	77,49	78,73	80,34	68,54	70,40	76,63	72,27	78,29	76,37	83,62	78,65
Mittlere jährliche Kosten und entgangener Nutzen ²	32,63	40,63	45,44	49,80	56,33	51,63	45,36	59,08	46,07	42,83	127,55	54,33
Ökonomischer Vorteil des pH-Sensors²		8,01	12,82	17,17	23,71	19,00	12,74	26,45	13,44	10,21	94,92	21,70

¹in %, ²in € ha⁻¹ a⁻¹, *n=1, **n= 3

4.4.2.2.6 Ergebnisse zur Homogenisierung der Nährstoffzonen durch die Klassifizierung homogener Zonen der Heterogenitätsindikatoren

Die Auswertung zur Homogenisierung der Nährstoffzonen durch die Klassifizierung anhand der Heterogenitätsindikatoren erfolgt nach der Methode aus Kap. 3.5.3. Aus den Abbildungen der pH-Variabilitäten (s. Abb. 4-57) gehen die positiven Effekte einer hochaufgelösten Bodenbeprobung mit dem pH-Sensor hervor. Für die herkömmlichen Verfahren zeigt sich, dass mit einer steigenden Anzahl von Zonen, die pH-Variabilität innerhalb der gebildeten Zonen abnimmt. Dabei sind die Verfahren basierend auf einem Heterogenitätsindikator nicht im Vorteil. Das starre 1-ha-Verfahren schneidet außer auf dem Versuchsschlag „Maststall“ mit den geringsten pH-Variabilitäten am besten ab. Die Variabilität für den Verissensor ergibt sich methodisch bedingt aus der Annahme, dass als kleinstmöglich bewirtschaftbare Parzelle ein Raster von 36 x 36 m angenommen wird.



Fortsetzung der Abb. 4-57 auf der nächsten Seite

Fortsetzung der Abb. 4-57

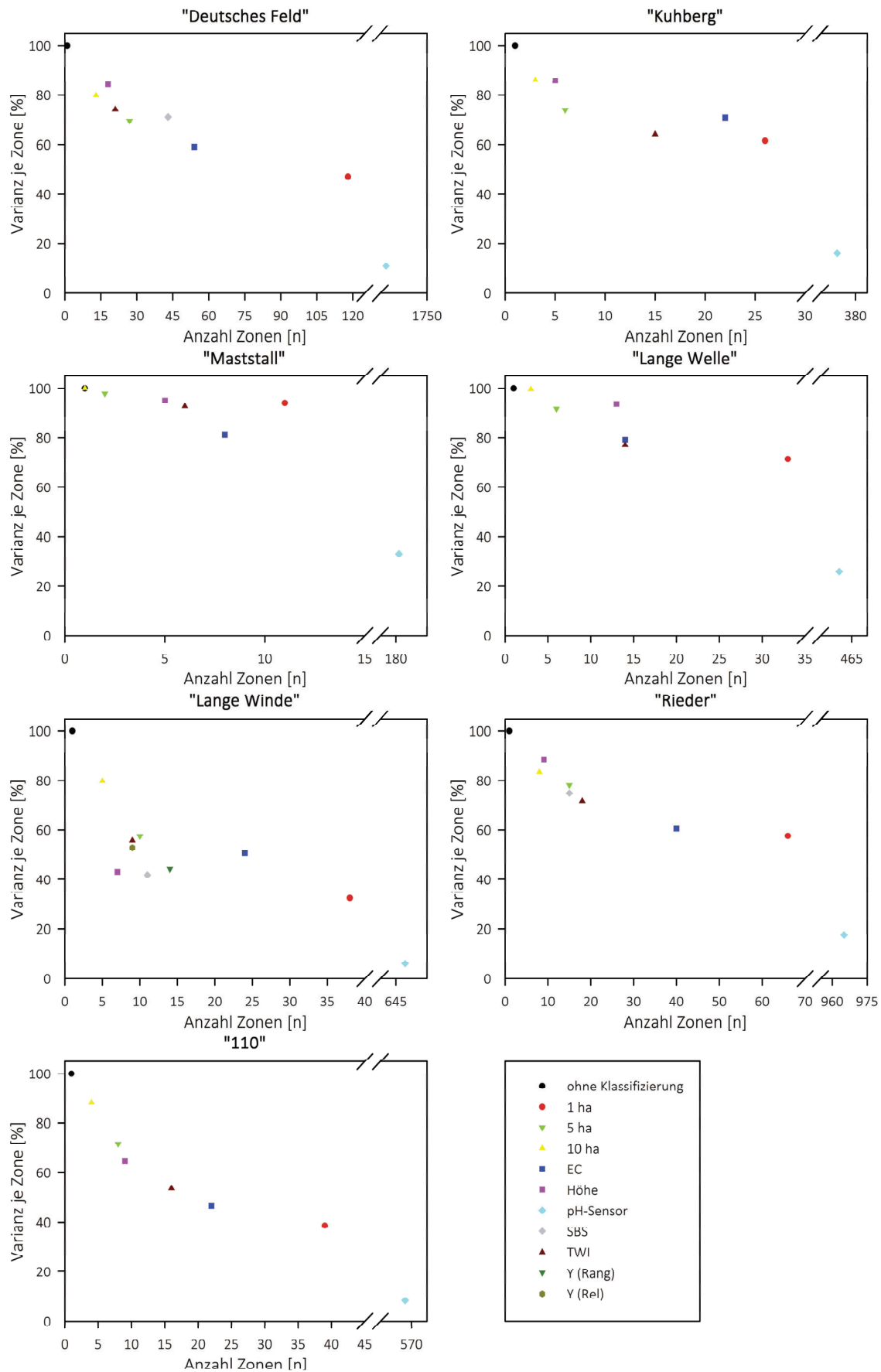


Abb. 4-57: pH-Variabilität der Versuchsschläge in Abhängigkeit von der Anzahl der Zonen

4.4.2.3 Zwischenfazit

Die Ergebnisse der Praxis schläge konnten den in Kap. 4.1 vorgestellten Ansatz der Kalibrierung der Messergebnisse des pH-Sensors mit identischen Bodenproben durch Verbesserungen der Konkordanz und Verringerungen der Fehlermaße stärken. Im anschließenden ökonomischen Vergleich der verschiedenen Beprobungsverfahren auf Basis „starrer“ und „intelligenter“ Raster kristallisieren sich keine eindeutigen Vorteile für die „intelligenten“ Raster heraus. Die empfohlenen Kalkmengen liegen z.T. unter den notwendigen Mengen. Durch die Verwendung eines Heterogenitätsindikators können die fehlallokierten Mengen und Flächen nur im geringen Maße reduziert werden. Der Anteil des entgangenen Nutzens durch die Nichtausnutzung des Phosphateffektes und der Vermeidung von Ertragsdepressionen führen zu erheblichen monetären Nachteilen der herkömmlichen Beprobungsverfahren gegenüber des pH-Sensors. In Intensivuntersuchungen mit Beprobungsdichten von bis zu 141 n ha⁻¹ können kleinräumige pH-Variabilitäten festgestellt werden. Das Ziel einer Bodenbeprobung, basierend auf einem Heterogenitätsindikator nährstoffhomogene Zonen abzugrenzen, wird anhand der Ergebnisse der Untersuchungen verfehlt. Nur mit einer zunehmenden Probendichte, unabhängig vom Heterogenitätsindikator, sinkt die pH-Variabilität innerhalb der gebildeten Zonen.

Mit Hilfe der *Boundary-Line*-Methode konnten auf Basis von Ertragskarten und hochaufgelösten pH-Wert-Karten deutliche Ertragseffekte in suboptimalen pH-Wert-Bereichen festgestellt werden. Die Methodik unterscheidet sich dabei von den üblichen Methoden der Versuchsauswertung, da nicht alle Beobachtungen in die statistischen Auswertungen einbezogen werden. Deshalb erscheinen die gefundenen Ergebnisse in einer deutlichen Ausprägung, die unter einer üblichen Auswertung geringer ausgefallen wären.

5 Diskussion

Zur Beurteilung der untersuchten Ziele der Arbeit werden in den folgenden Kapiteln die Ergebnisse unter Aspekten der pflanzenbaulichen Fachlichkeit und Wirtschaftlichkeit diskutiert. Wagner (2004: 6-31) beschreibt die Determinanten der Wirtschaftlichkeit des Precision Farmings. Dazu leisten die beobachteten Ergebnisse einen wichtigen Beitrag zum Faktor „Effizienz des Precision Farmings“.

5.1 Bewertung der Methoden zur Ermittlung des pH-Wertes mit Hilfe des Verissensors und der Labormethodik

Als grundlegende Voraussetzung für die Verwendung der Ergebnisse des pH-Sensors musste die Messqualität in Bezug auf die herkömmliche Labormethodik bewertet werden. Bei beiden Methoden können für das Gesamtverfahren ähnlich große Fehleranteile quantifiziert werden, die jedoch unterschiedliche Ursachen haben. Während bei dem pH-Sensor die Kalibrierung der Ergebnisse an die Ergebnisse der Labormethodik mit dem höchsten Fehleranteil verbunden ist, geht bei der herkömmlichen Methodik der höchste Anteil des Gesamtfehlers von der Wiederholgenauigkeit der Analyse aus. Dies widerspricht den Ergebnissen von Ringversuchen für die Labormethode (ZIMMERMANN, 2006: 7; MUNZERT et al., 2007: 725ff), die den Fehler im Labor als gering einstufen und den höchsten Anteil am Gesamtfehler in der Bodenprobenentnahme sehen. Ein Grund für die Unterschätzung des Laborfehlers könnte in der Verfahrensweise der Ringversuche liegen, die vom Dachverband der Laboranstalten VDLUFA organisiert werden. Die teilnehmenden Laboranstalten melden sich zur Teilnahme an einem Ringversuch an und bekommen die aufbereiteten Proben für die Analyse zugeschickt (BREUER et al., 2007: 3). Aufbereitete Proben treten jedoch im alltäglichen Geschäft der Labore nicht oder nur selten auf. Damit sind die normalen Umgebungsbedingungen verletzt und könnten zu den gegensätzlich beobachteten Ergebnissen geführt haben.

Anhand von Monte-Carlo-Simulationen (Kap. 4.1.6) konnte gezeigt werden, dass die Fehlerkomponenten zu starken Abweichungen führen können. Damit liegt die Entscheidung über die Bevorzugung einer Methode an der Risikoaversion des Anwenders. Möchte der Anwender sehr starke Abweichungen vermeiden und stuft diese als sehr hoch ein, wird er das Verfahren des Verissensors bevorzugen. Ein Anwender, der die starken Abweichungen als gering bewertet und der der Präzision eine höhere Beachtung schenkt, bevorzugt die Labormethode. Bei dieser Bewertung bleiben andere Faktoren, wie z.B. die unterschiedlichen Probenahmedichten unberücksichtigt.

Die erheblichen Differenzen zwischen der Labor- und Sensormethodik von Ergebnissen an identischen Bodenproben erfordern eine Anpassung der Ergebnisse des Verissensors an die Ergebnisse der Labormethodik. Diese Erkenntnis gewinnen auch ADAMCHUK et al. (2005); ADAMCHUK et al. (2007); ADAMCHUK et al. (2011); BORCHERT und PRALLE (2011); BORCHERT et al. (2010); JONJAK (2011); KRAMER et al. (2011); OLFS et al. (2010); OLFS et al. (2012a); OLFS et al. (2012b); RODRIGUES et al. (2012); SCHIRRMANN et al. (2011); STAGGENBORG et al. (2007) und THIEME (2009) aus ihren Untersuchungen. Mit einem abnehmenden pH-Wert nehmen die Differenzen zu, die auf den Einsatz des Extraktionsmittels bei der Labormethode zurückzuführen sind. Dabei werden latent gebundene Wasserstoffionen im Kationenaustausch in die Lösung abgegeben und bewirken eine pH-Wert Absenkung von bis zu 0,50 pH-Einheiten (ROWELL, 1997: 277). Für die Anpassung wurde ein Algorithmus zur Kalibrierung mit ausgewählten Laborproben entwickelt, der jedoch damit auch den Fehler der Wiederholungsgenauigkeit der Labormethodik mit in den Gesamtverfahrensfehler des Verissensors einfließen lässt. Die Entwicklung eines eigenen Kalibrieransatzes ist notwendig, da in Studien anderer Autoren mit einer ähnli-

chen Fragestellung zur Genauigkeit zwischen beiden Methoden **nichtidentische Bodenproben** (ADAMCHUK et al., 2007; ADAMCHUK et al., 2011; BORCHERT und PRALLE, 2011; BORCHERT et al., 2011; JONJAK, 2011; KRAMER et al., 2011; LUND et al., 2004; LUND et al., 2005; OLFS und TRAUTZ, 2009; OLFS et al., 2010; SCHIRRMANN et al., 2011; STAGGENBORG et al., 2007; THIEME, 2009) und/oder keine **intensivere Überprüfung** zwischen beiden Methoden bei Untersuchungen an identischen Bodenproben (BORCHERT und PRALLE, 2011; BORCHERT et al., 2010; LUND et al., 2004) erfolgte. Bei der Verwendung nicht-identischer Bodenproben kann eine Messdifferenz zwischen beiden Methoden durch die Kalibrierung, den Interpolationsfehler und durch die kleinräumige Heterogenität des pH-Wertes verursacht werden. Im Kapitel 2.3.1 wurden Studien vorgestellt, die eine hohe kleinräumige Variabilität des pH-Wertes nachweisen. So sei nur auf das Ergebnis von BIANCHINI und MALLARINO (2002: 1361) verwiesen, die nachweisen konnten, dass der pH-Wert innerhalb von sechs Metern um bis zu zwei pH-Einheiten differenziert. Keine intensivere Überprüfung bedeutet, dass eine Bewertung anhand des Korrelationskoeffizienten erfolgte und auf aussagekräftigere Fehlermaße verzichtet wurde. Für einen Methodenvergleich ist zwar eine erste Beurteilung anhand des Korrelationskoeffizienten sinnvoll, jedoch sollte dieser bei den Messungen einer Zielgröße durch zwei Methoden immer hoch sein und die Abhängigkeit der Stärke vom Wertebereich beachtet werden (BLAND und ALTMAN, 1986: 308). SCHIRRMANN et al. (2011: 582ff) berücksichtigen in ihren Untersuchungen verstärkt Fehlermaße und die Problematik der Kalibrierung zweier Methoden und kommen dem vorgestellten Algorithmus sehr nahe. Der Vergleich des entwickelten Kalibrieransatzes mit Vorschlägen anderer Autoren zeigt mit den geringsten Fehlermaßen die Vorteilhaftigkeit des Verfahrens. Dieser Vorteil wird auch damit erreicht, dass die höchste Anzahl an Kalibrierproben benötigt wird und identische Bodenproben verwendet wurden. Die deutliche Verbesserung der Anpassungen durch die Verwendung identischer Bodenproben wird anhand des Vergleiches der Ergebnisse aus den ersten Feldversuchen im Jahr 2010 mit nichtidentischen Bodenproben und denen der folgenden Feldversuche im Jahr 2011 deutlich.

ADAMCHUK et al. (2011: 300) erscheint es als sinnvoll, keine schlagspezifische Kalibrierung vorzunehmen. Diese Schlussfolgerung basiert auf Untersuchungen von drei Praxisschlägen und steht im Gegensatz zu den ermittelten Ergebnissen sowie den Resultaten von SCHIRRMANN et al. (2011: 590). In den Untersuchungen von ADAMCHUK et al. (2007: 148) führen schlagspezifische Verschiebungen der Ergebnisse des Verissensors an die Ergebnisse der Labormethode mit fünf nichtidentischen Bodenproben zu den besten Anpassungen gegenüber einer Anpassung mit einer einheitlichen Regression. Dabei werden zwei wichtige methodische Fehler begangen. Zum einen wird die Bewertung anhand von interpolierten, nichtidentischen Bodenproben vollzogen und schließt damit den Interpolationsfehler sowie die kleinräumige Variabilität des pH-Wertes mit ein. Andererseits werden die acht Stichproben (jede Stichprobe besteht aus fünf Validierproben je Schlag) zu einer Gesamtstichprobe zusammengelegt und verletzen damit die Voraussetzungen der Korrelationsanalyse. Dieser von SACHS (2003: 509) beschriebene Effekt der Inhomogenitätskorrelationen, kann auch bei den Untersuchungen von OLFS und TRAUTZ (2009: 3) sowie OLFS et al. (2012b: 5) beobachtet werden. Der Effekt beruht auf der Zusammenfassung von Teilmassen, deren unterschiedliche Lage der Punktwolken zu einer hohen Korrelation führt, die bei einer Unterscheidung der Teilmassen jedoch geringer wäre.

In der Gesamtbetrachtung können im Wesentlichen zwei Punkte festgehalten werden:

- Durch den hohen Aufwand der intensiven schlagspezifischen Kalibrierung (siehe Kapitel 4.4.2.2.1) wird eine präzise Anpassung der Ergebnisse des pH-Sensors an die Laborergebnisse erreicht.
- Die ermittelten Fehleranteile der Labormethode sind im Vergleich zu den Literaturangaben deutlich größer.

5.2 Bewertung der hochaufgelösten Bodenbeprobungen gegenüber den herkömmlichen Verfahren der Bodenbeprobungen

Der Vergleich von intensiven Bodenuntersuchungen nach der herkömmlichen Methodik im 36-m-Raster und dem Verissensor aus dem Jahr 2011 auf dem Versuchsschlag „550“ stellt im Rahmen aller Untersuchungen mit den Verissensor eine Einzigartigkeit dar. Wie auch die Untersuchungen im Methodenvergleich für den pH-Sensor erhöhte pH-Werte gegenüber den Ergebnissen der Labormethodik zeigen, spiegeln die Ergebnisse der Untersuchungen auf dem Versuchsschlag „550“ Ähnliches wider. Trotz der Kalibrierung verbleibt eine zu hohe mittlere Differenz (ME) von 0,50 pH-Einheiten. Als Ursachen kommen die unterschiedlichen Vorgehensweisen für die Bodenentnahme als Misch- und Einzelprobe sowie unterschiedliche Entnahmetiefen in Betracht. Gerade unter nichtwendenden Bewirtschaftungsbedingungen sind mit einer zunehmenden Beprobungstiefe ansteigende pH-Wert Gradienten zu beobachten (BROWN et al., 2008: 636; LIEBHARD, 1993: 307), die für den pH-Sensor zu geringeren pH-Werten führen sollten als die Ergebnisse der Labormethodik. Als eine weitere Ursache kann die zeitliche Differenz zwischen beiden Beprobungen angeführt werden, deren Einfluss jedoch eher gering eingeschätzt wird, da beide Untersuchungen im Abstand etwa eines Monats erfolgten. SEEBOLDT (1983: 26) berichtet für den Untersuchungszeitraum von Anfang Mai bis Ende September von einem abnehmenden Trend von bis zu 0,3 pH-Einheiten, gemessen auf einer ortstreuen Fläche von einem Quadratmeter. Neben den angeführten Ursachen ist die kleinräumige Variabilität des pH-Wertes als ein weiterer Einflussfaktor zu berücksichtigen. Trotz der hohen mittleren pH-Wert Differenz beider Verfahren kann eine ähnliche räumliche Struktur für den pH-Wert festgestellt werden. Der Vergleich der Verfahrenskosten beider Verfahren führt mit einer Differenz von ca. 110 € ha⁻¹ zur ökonomischen Vorteilhaftigkeit des pH-Sensors.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf der ökonomischen Bewertung der kleinräumigen Erfassung des pH-Wertes mithilfe des pH-Sensors im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahren. Die Bewertung erfolgte anhand einer Modellrechnung über einen Fruchtfolgezeitraum von sechs Jahren, wobei die Verfahrenskosten, die räumliche Variabilität des pH-Wertes, Nährstoffwechselwirkung zwischen dem pH-Wert und dem Phosphorgehalt sowie die Ertragsdepressionen infolge einer suboptimalen pH-Wert Entwicklung als Determinanten einfließen. Die Wahl der Funktion der Ertrags-pH-Beziehung stellt aufgrund einer unsicheren und zumeist unzureichenden Datengrundlage eine Schwierigkeit dar, die auch von BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2000: 69) diskutiert wird. Im Gegensatz zu Untersuchungen vorangegangener Studien von ADAMCHUK (2000), BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2000) sowie OLFS et al. (2012a), wurde bei der Modellierung der Ertrags-pH-Beziehungen eine Szenarienrechnung mit quadratischen Ertrags-pH-Beziehungen durchgeführt. Anhand einer Literaturrecherche wurden Ergebnisse von Ertrags-pH-Beziehungen extrahiert (Kapitel 2.1), einheitlich aufbereitet (s. Anhang A2-1 bis Anhang A2-1-6) und als prozentuale quadratische Ertrags-pH-Funktionen dargestellt. Als Szenarien wurden geringe, mittlere und hohe Ertragsdepressionen modelliert, um für die erwarteten Ertragsdepressionen einen breiten Ergebnisraum darzustellen. In den folgenden Kapiteln werden die kleinräumige Variabilität des pH-Wertes und das damit

verbundene Potential hochaufgelöster Bodenbeprobungen sowie der ökonomische Vergleich zwischen den hochaufgelösten und herkömmlichen Bodenbeprobungen diskutiert.

5.2.1 Kleinräumige pH-Variabilität

Für die neun untersuchten Praxis schläge lagen vor Beginn der Feldversuche keine Informationen zur kleinräumigen Heterogenität und der Versorgungsstufe des pH-Wertes vor. Sechs Schläge zeigten einen erheblichen Kalkbedarf und sieben Schläge wiesen kleinräumige pH-Wert Variabilitäten aus, die innerhalb von weniger als 100 Metern mehr als eine Gehaltsklasse betrug. Anhand dieser Ergebnisse und den Ergebnissen der Intensivbeprobungen wird deutlich, dass der pH-Wert standortunabhängig sehr kleinräumig differenzieren kann und bestätigt die Ergebnisse von BIANCHINI und MALLARINO (2002: 1361), BROUDER et al. (2002: 441), LAUZON et al. (2005: 527) sowie SEEBOLDT (1983: 22ff). Ähnliche Ergebnisse konnten ADAMCHUK et al. (2008: 299) für drei Praxis schläge beobachten. Alle drei Schläge wiesen eine hohe räumliche Variabilität aus, die mit dem Verissensor zuverlässig aufgedeckt werden konnte. Auch BORCHERT et al. (2010: 515) und JONJAK (2011: 44) stellten auf neun bzw. fünf Praxis schlägen eine kleinräumige Variabilität des pH-Wertes fest, die einen Vorteil des Einsatzes des Verissensors belegen. Bei Arbeitsbreiten von 18 bis 24 m sind der Kalkausbringung beim Management der Kleinräumigkeit des pH-Wertes Grenzen gesetzt (ADAMCHUK et al., 2008: 300). In den eigenen Untersuchungen wurden die kleinstmöglich bewirtschaftbaren Parzellen auf eine Rastergröße von 36 x 36 m festgelegt, die sich aus dem kleinsten gemeinsamen Leitlinienabstand von 36 m ergeben. Da die Arbeitsbreiten zur Kalkapplikation mit bis zu 12 m jedoch deutlich geringer sind, wäre eine kleinere Wahl der Rastergröße realitätsnäher gewesen. Eine geringere Rastergröße hätte jedoch einer Verneunfachung der Stichprobe entsprochen und einen erheblich höheren Rechenaufwand im GIS bzw. bei den anschließenden Modellierungen zur Folge gehabt.

Die Ursachen der kleinräumigen Variabilität können sehr vielfältig sein und zeigen zudem keine Einheitlichkeit. Als Beispiel dienen die Ergebnisse von VIEIRA und MOLIN (2001: 492) sowie LÓPEZ-FANDO und PARDO (2009: 280), die unter Direktsaatbedingungen abnehmende und zunehmende pH-Gradienten mit einer zunehmenden Beprobungstiefe feststellten. Historisch langjährige Bewirtschaftungsunterschiede, die durch Schlagzusammenlegungen verloren gingen sowie wechselnde Bodeneigenschaften können ebenso einen starken Einfluss haben. SEEBOLDT (1983: 23) verweist darauf, dass die kleinräumige Variabilität des pH-Wertes von der Bodenart unabhängig ist.

In den Intensivuntersuchungen konnte der pH-Sensor wiederholt die kleinräumige Variabilität nachweisen und sich damit als geeignetes Instrument zur Bestimmung des pH-Wertes beweisen. Diese Beobachtung deckt sich mit den in der Literatur beobachteten Ergebnissen. ADAMCHUK et al. (2011: 299) weisen für den pH-Wert eine starke räumliche Struktur nach. Die Unabhängigkeit der kleinräumigen Variabilität von der Schlaggröße können BORCHERT et al. (2011: 515) und OLFS et al. (2012b: 5) feststellen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Notwendigkeit höherer Beprobungsdichten besteht, diese jedoch mit den herkömmlichen Beprobungsverfahren durch zu hohe Verfahrenskosten nicht realisierbar sind. Der Einsatz des pH-Sensors steigert bei deutlich geringeren Stückkosten je Probe die Beprobungsdichte um ein Vielfaches und schließt die Diskrepanz der steigenden Beprobungskosten bei einer zunehmenden Beprobungsdichte.

5.2.2 Effekte der Verfahrenskosten und die ökonomische Wirkung

In der Modellrechnung wurde mit einheitlichen Verfahrenskosten für den Einsatz des pH-Sensors von 20 € ha⁻¹ kalkuliert, die vom Projektpartner Agri Con GmbH (SCHNEIDER, 2010) vorgegeben wurden. Die Kalkulation der Verfahrenskosten unter Berücksichtigung des zeitaufwendigen Kalibrierprozesses führt zu einem jährlichen Einsatzumfang von 1.116 ha, bei der 20 € ha⁻¹ unterschritten werden. Darin sind jedoch weder Entwicklungs- und Markteinführungskosten noch eine Gewinnmarge (als Risikoaufschlag) enthalten, die von der Agri Con GmbH in der Kalkulation möglicherweise berücksichtigt wurden. Der in Kapitel 2.4 gegebene Literaturüberblick zu den Untersuchungen des Verissensors zeigt, dass sich nur wenige Arbeiten mit der ökonomischen Bewertung des Sensors beschäftigen. Schwerpunkte der Untersuchungen sind Vergleiche zwischen den Ergebnissen des pH-Sensors zur herkömmlichen Methodik der Bodenbeprobung sowie Untersuchungen zur kleinräumigen Heterogenität des pH-Wertes. BORCHERT UND PRALLE (2011: 32ff) kalkulierten Beprobungskosten des Verissensors in Abhängigkeit der Schlaggröße und der jährlichen Auslastung von 7,78 (100 ha Schlag) bis 69,67 € ha⁻¹ (3 ha Schlag). Ausschlaggebend für die hohen Beprobungskosten kleinerer Schläge sind Mindestzeitaufwände für Rüst- und EDV-Arbeiten auf dem Feld sowie für die Datenverarbeitung und die Erstellung der Applikationskarte, die einen Fixkostencharakter haben. Erst ab einer Schlaggröße von 12 ha werden die Beprobungskosten durch die erwarteten Mehrerträge gedeckt und die Sensorbeprobung ist wirtschaftlich. Nach der Kostenkalkulation von ADAMCHUK (2000: 83, s. Kap. 2.4) läge der Rasterabstand bei ca. 9 Metern mit einer Beprobungsdichte von 247 n ha⁻¹, bei der Beprobungskosten von 20 € ha⁻¹ erreicht würden. Beide Kostenkalkulationen unterscheiden sich deutlich bezüglich ihrer Annahmen. ADAMCHUK (2000: 81ff) kalkuliert mit sehr geringen Faktorpreisen für Diesel mit 0,20 € l⁻¹ und Lohn mit 8,36 € h⁻¹ sowie mit einer Lebensdauer der Elektroden von 30.000 Messungen. Weiterhin sind keine Kosten für die Kalibrierung mit Referenzproben im Labor eingeplant. Abschließend sei noch auf die täglichen Leistungen verwiesen, die zwischen den Autoren sehr stark differieren. Die tägliche Leistung beträgt bei OLFS et al. (2012a: 3) ca. 50 ha d⁻¹, bei ADAMCHUK (2000: 88) ca. 110 ha d⁻¹ und ist mit ca. 200 ha d⁻¹ bei ERICKSON (2004: 2) am höchsten. Aus den eigenen Untersuchungen können nach den Tabellen 4-28 und Tab. 4-36 die täglichen Leistungen nicht extrahiert werden, da für die Beprobungen keine Zeitmessungen stattfanden. Mit einer maximalen täglichen Leistung von 59,1 ha bzw. 62,1 ha liegen sie jedoch an der unteren Grenze der Angaben aus der Literatur.

Kritisch sind die kalkulierten Verfahrenskosten der Heterogenitätsindikatoren zu bewerten. Die Kosten wurden vollständig der Bodenbeprobung zugeschrieben, obwohl sich mit der teilflächenspezifischen Applikation für die Aussaat, Bodenbearbeitung oder den Pflanzenschutz weitere Nutzungsmöglichkeiten ergeben. Deshalb dürften für diese Verfahren erhebliche Einsparpotentiale zu generieren sein. Weiterhin sollten auch die Kosten der Komponenten für die Ertragskartierung durch den technischen Fortschritt gesunken sein, sodass weitere Kosteneinsparungen möglich sind.

5.2.3 Effekte der Nährstoffumverteilungen und die ökonomische Wirkung

Aus den Vergleichen zwischen den hochaufgelösten und den herkömmlichen Bodenbeprobungen geht hervor, dass Einsparungen an Kalkdünger durch den Einsatz des pH-Sensors nicht erwartet werden können. Die von ERICKSON (2004: 2) angeführten Kalkeinsparungen von ca. 0,8 t CaO ha⁻¹ können auf keinem Versuchsschlag beobachtet werden. ADAMCHUK et al. (2011: 299) wiesen für die Kalkapplikationskarten auf drei Versuchsschlägen basierend auf den Ergebnissen des pH-Sensors die besten Anpassungen für die notwendigen Kalkmengen gegenüber den Applikationskarten der herkömmlichen Methodik nach. Die Ergebnisse des Kapitels 4.4 zeigen vielmehr, dass die herkömmlichen Ver-

fahren zu geringeren Gesamtmengen tendieren. Ähnliche Ergebnisse berichten auch SCHIRRMANN et al. (2011: 593): Die geringste Kalkmenge würde bei einer einheitlichen Beprobung empfohlen, die zudem stark versauerte Zonen mit zu geringen Kalkmengen versorgt. Aussagekräftiger sind jedoch die Anteile der über- und unterdüngten Mengen und Flächen (s. Abb. 4-43). Hier kristallisieren sich weder Vorteile für die starren noch für die intelligenten Raster heraus. Eine leichte Tendenz zeigt sich darin, dass die Anteile der fehlallokierten Mengen und Flächen mit einer zunehmenden Beprobungsdichte sinken. Die Ergebnisse von STÉPHIEN et al. (2013: 65) bestätigen diese Tendenz. Im ökonomischen Vergleich verdeutlicht sich die Tendenz mit den geringsten fehlallokierten Kalkkosten für das 1-ha-Raster und das EC-Raster. Auffallend ist der große Anteil fehlallokierter Kalkkosten für das Raster basierend auf den Ergebnissen der Bodenschätzung. Trotzdem wird diese Art der Bodenbeprobung von HINCK (2010: 204) und der VDLUFA (2000a: 6) empfohlen. Bei HINCK (2010: 203) könnte jedoch der Effekt der zunehmenden Beprobungsdichte einen höheren Einfluss auf die Verbesserung des Ergebnisses genommen haben als die Orientierung der Rastereinteilung an den Grenzen der Zonen der Bodenschätzung. Die herkömmliche Bodenbeprobung wurde auf einer Versuchsfläche von 15 ha mit zwei Proben durchgeführt, während die Einteilung nach der Bodenschätzung auf fünf Proben basierte. BIANCHINI und MALLARINO (2002: 1365) schlussfolgern -nach deutlichen Kalkeinsparungen von ca. 60 % durch eine teilflächenspezifische Kalkausbringung- dass diese einer einheitlichen Kalkung überlegen ist. Das Ergebnis einer intensiven herkömmlichen Bodenbeprobung (10 n ha^{-1}) kann durch intelligente Raster mit deutlich geringeren Beprobungskosten adäquat ersetzt werden.

Zusammenfassend kann für die Nährstoffumverteilung eine Abhängigkeit zur kleinräumigen Heterogenität des pH-Wertes und dem durchschnittlichen pH-Wert des Schläges gefunden werden: Je niedriger das Niveau des pH-Wertes, desto höher sind die benötigten Kalkmengen und die Anteile der suboptimal versorgten Zonen steigen. Mit einer zunehmenden räumlichen Variabilität des pH-Wertes führen abnehmende Beprobungsdichten ebenfalls zu höheren Anteilen an suboptimal versorgten Flächen und höheren Anteilen an fehlallokierten Kalkmengen (s. Tab. 4-33 und Abb. 4-48). Die Versuchsschläge 550, Deutsches Feld, Dölzig I, Lange Welle und Lange Winde zeigen diesen Effekt. Die Ergebnisse von STÉPHIEN et al. (2013: 64) bestätigen ebenfalls, dass die Anteile über- und unterdüngter Flächen mit einer abnehmenden Beprobungsdichte zunehmen.

5.2.4 Effekte der Nährstoffwechselwirkungen und die ökonomische Wirkung

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Kalksteigerungsversuchs auf dem Julius-Kühn-Feld zeigen die erwartete positive Wirkung der Kalkung auf den pH-Wert. Eine langfristige Unterlassung der Kalkung führt zu einem deutlichen Absinken des pH-Wertes. Frühere Ergebnisse der Untersuchungen auf dem Julius-Kühn-Feld von SCHMIDT et al. (2004: 31) zeigen, dass pH-Werte bis 4,5 gemessen werden konnten, die damit geringer waren als die beobachteten pH-Werte zwischen 5,2 und 5,4. Eine Differenzierung zwischen den CaO-Stufen zeichnet sich jedoch nicht eindeutig ab, am geringsten sind die Unterschiede zwischen den beiden höchsten CaO-Stufen. Die Ursache der Stagnation des pH-Wertes in der höchsten CaO-Stufe liegt in der vollständigen Neutralisation und einer geringen Akkumulation von Calciumcarbonat (MERBACH und DEUBEL, 2007: 42). Der beobachtete Effekt der Kalkung auf einen erhöhten Phosphorgehalt mit einem zunehmenden pH-Wert ist nur unter der P-Düngung nachweisbar. MERBACH und DEUBEL (2004: 42) weisen auf die Phosphatdynamik im Boden hin. Die P-Freisetzung erfolgt aus dem labilen P-Pool des Bodens, der durch eine P-Düngung überwiegend aus P-Sorptionsverbindungen an amorphen Aluminium- und Eisenoxiden sowie an Tonmineraloberflächen besteht (WERNER und TRIMBORN, 2008: 5ff). Bei Böden, die durch eine Kalkung in den optimalen Reaktionszustand gebracht werden, werden durch die Zufuhr von OH^- -Ionen potentielle Bindungsplätze

für P belegt und der relative P-Sättigungsgrad sowie die P-Konzentration in der Bodenlösung erhöht. Mit den Ergebnissen des erhöhten Phosphorgehaltes infolge eines zunehmenden pH-Wertes konnte die Faustregel nach KERSCHBERGER (1987: 319) bestätigt werden.

Durch die intensiven Bodenbeprobungen nach der herkömmlichen Methodik in den Jahren 2007 und 2011 auf dem Versuchsschlag 550 konnten auf Schlagebene positive Beziehungen zwischen dem pH-Wert und dem Phosphorgehalt nachgewiesen werden (s. Tab. 4-25). Ähnliche Ergebnisse beobachteten auch GEBBERS (2008: 56) sowie PONITKA und PÖBNECK (2008: 17). Eine positive Korrelation besteht zudem zwischen dem Phosphor- und Kaliumgehalt in beiden Jahren. Die Korrelationen für die Nährstoffgehalte zwischen den Ergebnissen beider Jahre führten zu hohen Korrelationskoeffizienten nach folgender abnehmender Reihenfolge: Phosphor > Kalium > pH-Wert > Magnesium. Damit bestehen trotz des Düngungsversuches mit unterschiedlichen Strategien starke räumlich- und zeitlich-stabile Muster. Diese grundlegenden Ergebnisse bestätigen die These der stabilen Muster der Grundnährstoffverteilung von PIERCE und NOWAK (1999:1ff) aus dem Kapitel 1.1 (S. 2). Durch die bekannten Entscheidungsregeln zur Grundnährstoffdüngung besteht damit für den Landwirt eine vollkommene Transparenz der Precision-Farming-Technologie „GPS-gestützte Bodenbeprobung“ die die hohe Akzeptanz in der *Preagro*-Umfrage (s. Kapitel 1) erklären könnte.

Bei Betrachtung der einzelnen Varianten wird die Theorie der abnehmenden Korrelationskoeffizienten (s. Abb. 4-27) bei einer teilflächenspezifischen Düngung bestätigt. Die Unterschiede zwischen der differenzierten Variante und den anderen Varianten sind zwar gering, aber signifikant. Eine schnelle Entwicklung kann jedoch auch nicht erwartet werden. Dies zeigen die Ergebnisse der Dauerdüngungsversuche auf dem Julius-Kühn-Feld mit vergleichbaren Standorteigenschaften. SCHMIDT et al. (2007: 30) berichten, dass in den ersten 15 Versuchsjahren die Differenzierung des pH-Wertes am stärksten war. Erst nach 45 Jahren war ein weiteres Absinken des pH-Wertes in den niedrigen CaO-Stufen zu beobachten.

Die Bewertung der Beziehung zwischen dem pH-Wert und Phosphor erfolgte im ökonomischen Vergleich nach der Faustregel von KERSCHBERGER (1987: 319). Diese gilt nach KERSCHBERGER (1987) nur für den sauren pH-Wert Bereich, für den ökonomischen Vergleich wurde sie jedoch auch für den alkalischen pH-Wert Bereich angenommen. Eine Festlegung von Phosphor findet unter alkalischen Bedingungen ($\text{pH} \geq 7,5$) statt (HOPKINS und ELLSWORTH, 2005: 88f; FIFA, 2006: 45), allerdings wurde diese nicht quantifiziert wie von KERSCHBERGER (1987). Durch den Einsatz des pH-Sensors können kleinräumige Heterogenitäten des pH-Wertes aufgedeckt werden und mit Hilfe der teilflächenspezifischen Kalkung kann ein optimaler pH-Wert Zustand erreicht werden. Der P-Effekt wird vollständig ausgenutzt und somit entsteht kein entgangener Nutzen durch P-Festlegungen. Der entgangene Nutzen ist bei Unterlassung der Kalkung erwartungsgemäß am höchsten. Zwischen den herkömmlichen Verfahren besteht mit einer zunehmenden Beprobungsdichte die Tendenz, dass der entgangene Nutzen durch den P-Effekt geringer wird. Kritisch an dieser Bewertung ist die ökonomische Beurteilung im zweiten Jahr, nach der vollständigen Wirksamkeit der Kalkung (Kap. 3.6.1). Untersuchungen von CIFU et al. (2004: 103) zeigen, dass durch die Kalkung schon im ersten Jahr die Aluminiumkonzentration ihr Minimum erreicht und im anschließenden Zeitraum wieder leicht ansteigt. Ein ähnlicher Verlauf könnte auch für die Phosphorkonzentration zu beobachten sein und somit die ökonomische Bewertung beeinflussen. Weiterhin ist die einmalige Bewertung des P-Effekts kritisch, da eine erhöhte P-Verfügbarkeit über den gesamten Untersuchungszeitraum zu erwarten sein sollte, wenngleich die Stärke des Effekts unterschiedlich ist. In den Felduntersuchungen von WEISZ et al. (2003: 320) stellen sich erst nach zwei Versuchsjahren die Ziel-pH-Werte ein und unterstützen damit die Annahme 3 des

ökonomischen Vergleichs der Verfahren zur Bodenbeprobung. Zusammenfassend verbleiben zwischen 43 bis 72 € ha⁻¹ entgangener Nutzen durch den P-Effekt, der durch den Einsatz des pH-Sensors vollständig vermieden werden konnte.

5.2.5 Effekte der Ertragssteigerung und die ökonomische Wirkung

Mit Hilfe der Boundary-Line-Methode konnte auf unterschiedlichen Standorten gezeigt werden, dass suboptimale pH-Werte zu deutlichen Ertragsrückgängen führen können. Auch für den nach KERSCHBERGER und MARKS (2007: 69) kalkanspruchslosen Winterweizen wurden sehr starke Ertragsrückgänge beobachtet. Mögliche Ursachen könnten die z.T. sehr breiten optimalen pH-Wert-Bereiche, die stärkeren Ertragsdepressionen in extremen pH-Wert Bereichen sowie die Methodik der Versuchsauswertung sein. Während die klassische statistische Versuchsauswertung nach der LS-Regression die mittleren Ertragsveränderungen bestimmt, könnte diese Vorgehensweise realisierte Erträge infolge eines Defizits anderer Einflussfaktoren (Stickstoff-, Phosphormangel, etc.) beinhalten, die nicht ausschließlich durch den pH-Wert verursacht wurden. Werden die Beobachtungen in Bezug zum pH-Wert gesetzt, würden fehlerhafte Schlussfolgerungen gezogen. Gerade für den pH-Wert ist es jedoch schwierig, den Einfluss auf den Ertrag zu bestimmen, da er kein Nährstoff im klassischen Sinne ist, sondern den Säuregrad im Boden widerspiegelt und damit über indirekte Prozesse Einfluss auf die Ertragsbildung nimmt. Die in Kapitel 2.1 angeführten Studien zeigen zum Beispiel, dass infolge eines sinkenden pH-Wertes die Aluminiumverfügbarkeit steigt und damit toxische Wirkungen auf die Fruchtarten einhergehen. Die Ergebnisse zeigen auch, dass für Raps stärkere Ertragsdepressionen in suboptimalen pH-Wert Bereichen beobachtet werden können als für Winterweizen und bestätigen die von SCHILLING (2000: 384) vorgeschlagene qualitative Einteilung in kalkanspruchsvolle und -lose Fruchtarten. Als sehr auffallend zeigt sich in den Untersuchungen, dass die Ertragsdepressionen im hohen suboptimalen pH-Wert Bereich der Gehaltsklassen D und E deutlich stärker zu beobachten sind als im geringeren pH-Wert Bereich der Gehaltsklassen A und B. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch SHATAR und MCBRATNEY (2004: 557) für die pH-Ertragsbeziehung mit Sorghum als Fruchtart. Da für die Gehaltsklassen D und E die Klassenbereiche sehr eng im VDLUFA-Standpunkt (VDLUFA, 2000b: 6) vorgegeben sind, sollte in den Klassenbeschreibungen des Standpunktes expliziter darauf hingewiesen werden, dass ähnliche Ertragsdepressionen zu erwarten sind wie in den Gehaltsklassen A und B. Ergebnisse von BIANCHINI und MALLARINO (2002), BROWN et al. (2008) sowie MERBACH et al. (1999), in deren Untersuchungen kein oder ein geringer Einfluss des pH-Wertes auf den Ertrag festgestellt werden konnte, könnten mit Anwendung der Boundary-Line Methodik zu anderen Schlussfolgerungen führen. Voraussetzung dafür ist jedoch eine ausreichende Anzahl von Beobachtungen, die z.B. bei Exaktversuchen wie bei MERBACH et al. (1999) nicht vorhanden sind.

Aus den Vergleichen der hochaufgelösten und herkömmlichen Bodenbeprobungen geht deutlich hervor, dass die Kosten, die durch Ertragsdepressionen infolge einer suboptimalen pH-Wert Entwicklung entstehen, in der Gesamtbewertung den höchsten Anteil haben. Mit Hilfe des pH-Wert Sensors können Ertragsdepressionen vermieden werden, auf dem Versuchsschlag „Dölzig I“ konnte der höchste ökonomische Vorteil festgestellt werden. Der Schlag weist eine hohe kleinräumige Variabilität des pH-Wertes bei einem mittleren Kalkbedarf auf. Ein höherer Kalkbedarf, z.B. auf den Versuchsschlägen „Deutsches Feld“ und „Dölzig II“ steigert den ökonomischen Vorteil nicht. Die Ursache hierfür könnte das Pufferungsvermögen im unteren pH-Bereich sein, das zu großräumigeren homogenen und niedrigen pH-Wert-Zonen auf beiden Versuchsschlägen führt. Diese können mittels der herkömmlichen Verfahren ausreichend abgebildet werden, weshalb ein ökonomischer Nachteil des pH-

Wert Sensors auf beiden Versuchsschlägen aufgrund der höheren Verfahrenskosten zu beobachten war.

Die Ertragsdepressionen könnten durch eine verbesserte Ausgangssituation der Kalkversorgung und durch eine Verkürzung des Beprobungsintervalls deutlich verringert werden. Folgen die pH-Werte der Entwicklung der Simulation, läge nach dem ersten Beprobungsintervall der pH-Wert fast flächendeckend auf einem einheitlichen Niveau. Ein weiterer Einsatz des pH-Sensors wäre bei einer Folgebeprobung aufgrund der zu hohen Verfahrenskosten gegenüber den herkömmlichen Verfahren nicht wirtschaftlich, da die kleinräumige Heterogenität des pH-Wertes durch eine teilflächenspezifische Kalkung egalisiert wurde.

Die simulierten Ertrags-pH-Beziehungen unterscheiden sich von den Ergebnissen der Untersuchungen von BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2000) sowie WANG et al. (2003). Zwischen beiden Studien gibt es ebenfalls deutliche Unterschiede, obwohl beide Körnermais untersuchten. WANG et al. (2003: 39) simulierten einen sehr breiten optimalen pH-Wert Bereich von zwei pH-Einheiten, in dem keine Ertragsdepressionen erwartet wurden. Die Ertragsdepressionen nahmen im niedrigen pH-Bereich stärker zu als bei BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2000: 60), die hingegen im hohen pH-Bereich keine Ertragsdepressionen erwarteten. BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2000: 60) simulierten einen geringen Ertragsrückgang von $0,1 \text{ t ha}^{-1}$ je $0,1 \text{ pH}$ -Wert Änderung. OLFS et al. (2012a: 3) erwarteten für den Einsatz des pH-Sensors pauschale Ertragssteigerungen von 2 % für Winterweizen und 5 % für Wintergerste. Neben diesen Ergebnissen und den vorgestellten Studien aus Kapitel 2.1 versuchen die simulierten Ertragsdepressionen mit den drei Szenarien einen breiten realitätsnahen Ergebnisraum abzubilden. Die Ergebnisse der Boundary-Line Methode unterstützen die Szenarienrechnungen, weisen jedoch auf einen anderen ähnlichen Verlauf der Ertragsfunktion in Form eines Polynoms 4. Grades hin. HALL (1983: 816) untersuchte die Wirtschaftlichkeit der Kalkung an Luzerne, Körnermais und Sojabohnen und prüfte verschiedene Ertragsfunktionen. Zwischen den unterschiedlichen Verläufen der Ertragsfunktionen bestanden Differenzen vor allem für den optimalen Bereich, die dazu führten, dass die empfohlenen Düngegaben teilweise höher waren als notwendig. Die damit verbundenen höheren Kosten von 30 bis $60 \text{ \$ acre}^{-1}$ ($74 \text{ bis } 148 \text{ \$ ha}^{-1}$) wurden nicht durch höhere Erträge gedeckt.

Die Simulationen erstrecken sich über einen Zeitraum von sechs Jahren und abstrahieren die natürlichen Prozesse der Bodenversauerung sehr stark mit der Annahme, dass die Unterlassung der Kalkung mit einer jährlichen Absenkung des pH-Wertes um $0,1 \text{ pH}$ -Einheiten einhergeht. Von einer jährlichen Absenkung des pH-Wertes um $0,1 \text{ pH}$ -Einheiten berichtet zwar auch ROWELL (1997: 271), dabei unberücksichtigt bleiben jedoch die verschiedenen Pufferungsbereiche der Böden. Insbesondere bei Erreichen des pH-Wertes im Aluminiumpufferbereich ($\text{pH} \leq 4,2$) mit einer hohen Pufferungskapazität kommt es zur Freisetzung von Al^{3+} -Ionen, die vorerst zu einer Stagnation der pH-Wert Absenkung führen (MATSCHULLAT et al., 1997: 41; ROWELL, 1997: 267). In den Simulationen werden die Pufferungsprozesse nicht berücksichtigt und führen bei den Versuchsschlägen „Lange Welle“ und „Dölzig I“ in der Variante „ohne Kalkung“ zu pH-Werten von bis zu $3,6 \text{ pH}$ -Einheiten. Mit einem Flächenumfang von $0,98 \text{ ha}$ von insgesamt $345,45 \text{ ha}$ Versuchsfläche ist dieser Effekt jedoch als gering einzustufen.

BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2000: 63) berücksichtigen eine fruchtartenspezifische jährliche Absenkung des pH-Wertes, die über den „Verbrauch“ von Kalk für Sojabohnen mit $0,34 \text{ t CaO ha}^{-1}$ und Körnermais mit $0,78 \text{ t CaO ha}^{-1}$ variiert. Die vollständige Kalkwirksamkeit wird bereits im ersten

Jahr erreicht. Alle anderen Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit der variablen Kalkausbringung wie Produkt- und Faktorpreise, Diskontierungszins, Ertragsfunktionen für Körnermais und Sojabohnen sowie Kosten für die Bodenbeprobung und Ausbringung werden konstant gehalten. Die Ergebnisse führen zu einem jährlichen ökonomischen Vorteil von bis zu 19,55 \$ ha⁻¹ (17,30 € ha⁻¹) für die teilflächenspezifische Kalkausbringung. In den Sensitivitätsanalysen wird jedoch auch deutlich, dass eine zunehmende Beprobungsdichte von 1 n ha⁻¹ zu 2,5 n ha⁻¹ mit der herkömmlichen Bodenbeprobung nicht wirtschaftlich ist. Kostenerhöhungen für die variable Ausbringung haben nur einen geringen Einfluss, da die Kalkung nur einmalig im vierjährigen Untersuchungszeitraum erfolgt. Auch Marktpreisschwankungen tragen nicht zum ökonomischen Nachteil der teilflächenspezifischen Düngung gegenüber einer schlageinheitlichen Düngung bei. Obwohl die Untersuchungen von BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2000) methodische Unterschiede mit der Einbeziehung des Diskontierungszinses und der Berücksichtigung der Mehrkosten durch eine variable Kalkausbringung aufweisen, kommen sie zu einem positiven Ergebnis für die teilflächenspezifische Kalkung. Die Gründe für den Verzicht der von BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2000) berücksichtigten Einflussfaktoren in der vorliegenden Arbeit werden kurz angeführt: Die Mehrkosten für die variable Ausbringung wurden von BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2000: 64) mit 6,56 € ha⁻¹ kalkuliert. In den vergangenen 15 Jahren sind durch den technischen Fortschritt die Kosten für die Komponenten der variablen Ausbringung deutlich gesunken. Der Stand aktueller Ausbringtechnik lässt eine variable Ansteuerung der Ausbringmenge standardmäßig zu. Zur Umsetzung der Ansteuerung wird ein Terminal und GPS-Technik benötigt, die jedoch auch für andere Anwendungen wie der teilflächenspezifischen Aussaat, automatischer Lenksysteme, Telemetrie und zur Datenaufzeichnung zur Dokumentation genutzt werden kann. Die üblichen zusätzlichen Kosten für eine teilflächenspezifische Kalkausbringung eines Lohnunternehmens liegen bei ca. 1,00 € ha⁻¹, was bei einem sechsjährigen Düngungsrythmus 0,16 € ha⁻¹ entspricht. Der Verzicht auf die Einbeziehung des Diskontierungszinses erfolgte aufgrund der Vielzahl der Modellannahmen, insbesondere der unsicheren Ertragserwartungen infolge einer suboptimalen pH-Wert Entwicklung. Deren Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit haben ein deutlich höheres Gewicht als der Einfluss eines Diskontierungszinses.

5.2.6 Gesamtbewertung

Der pH-Sensor führt durch eine neue Bodenentnahme und -analysetechnik zur Erfassung des pH-Wertes während der Überfahrt zu vielfach höheren Beprobungsdichten gegenüber herkömmlichen Verfahren. Damit wird es möglich, kleinräumige pH-Wert-Heterogenitäten aufzudecken. Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit der Bodenbeprobung sind die Verfahrenskosten, die Effektivität des Düngereinsatzes und die erwarteten Ertragssteigerungen infolge der Behebung kleinräumiger suboptimaler pH-Zustände. Daneben ist der Zeitraum der Düngplanung entscheidend. Einjährige Effekte sind hauptsächlich für schnellwirkende Dünger wie Stickstoff zu erwarten, mehrjährige Effekte können v.a. für die Grundnährstoffe erwartet werden. Eine ökonomische Bewertung von Verfahren der Bodenbeprobung erfordert deshalb eine Modellrechnung, die über den Zeitraum der Bodenbeprobung angelegt ist. In der vorliegenden Untersuchung wurde der gesetzlich vorgegebene Zeitraum von sechs Jahren als Beobachtungszeitraum zu Grunde gelegt. ADAMCHUK (2000) und OLFS et al. (2012a) kalkulierten die Wirtschaftlichkeit in einem Zeitraum von vier Jahren. Während OLFS et al. (2012a) mit pauschalen Ertragssteigerungen für die Fruchtarten im Untersuchungszeitraum rechnen, simulierte ADAMCHUK (2000: 73) teilflächenspezifische Ertragssteigerungen mit Ertragsfunktionen in Abhängigkeit des pH-Wertes auf Grundlage von Untersuchungen von BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2000: 60). Beide Untersuchungen basieren teilweise auf simulierten Feldbeispielen, um den Einfluss der Schlaggröße (nur bei OLFS et al., 2012a untersucht), der Bepro-

bungsdichte, der Düngungsstrategie (keine, einheitliche und variable Kalkung), der Ausgangsvorsorgung sowie der Variabilität des pH-Wertes (nur ADAMCHUK, 2000) zu bewerten. In der vorliegenden Arbeit wurden Ergebnisse von Messungen mit dem pH-Sensor auf Praxisschlägen als Grundlage des ökonomischen Vergleichs mit den herkömmlichen Verfahren der Bodenbeprobung verwendet. Die wichtigste Annahme, die erwarteten Ertragssteigerungen durch eine höhere Informationsdichte über die räumliche Verteilung des pH-Wertes mit einer gezielten Kalkapplikation zu steuern, wurde in einer Szenariorechnung auf Basis von Ergebnissen einer Literaturrecherche simuliert. Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass die Ertragssteigerungen sehr unterschiedlich ausfallen können, weshalb drei Szenarien mit geringen, mittleren und hohen Ertragssteigerungen simuliert wurden. Die weiteren fünf Annahmen sind im Kapitel 4.4.1.5 beschrieben. Der Vergleich der Modellrechnung mit der von ADAMCHUK (2000: 78ff) zeigt, dass viele Annahmen getroffen werden müssen und die Einflussfaktoren auf die Modelle sehr unterschiedlich sind, obwohl beide das Ziel haben, die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes des pH-Sensors zu bestimmen. Beide Modelle führen zu einer positiven Wirtschaftlichkeit des pH-Sensors mit einem jährlichen ökonomischen Vorteil zwischen $6,13 \text{ \$ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei ADAMCHUK (2000: 120) und über alle untersuchten Standorte der vorliegenden Arbeit von $8 \text{ bis } 95 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Einen hohen Anteil mit bis zu 80 % des jährlichen ökonomischen Vorteils verursachen die vermiedenen Ertragsdepressionen. Hierin liegt eine Schwäche des Modells der vorliegenden Arbeit. Das Modell geht davon aus, dass durch eine optimale Verteilung des Kalkes die suboptimalen pH-Wert Zonen behoben werden und eine Ertragssteigerung erwartet werden kann. Der sich einstellende Ertrag würde für den gesamten Schlag auf einem konstanten Niveau liegen. Andere ertragslimitierende Faktoren wie Nährstoffmangel, bodengebundene Eigenschaften oder dem Auftreten von Schädlingen und Krankheiten wurden nicht berücksichtigt. Neben diesen Faktoren ist maßgeblich auch der Witterungsverlauf ertragsbestimmend. Damit offenbart sich jedoch das generelle Problem des Precision Farming: Die Anzahl der Einflussfaktoren auf den Ertrag sowie deren Wechselwirkungen untereinander sind unbekannt. Würden diese Beziehungen funktional darstellbar sein, könnten präzisere Angaben zur Wirtschaftlichkeit von Precision Farming-Technologien getroffen werden. Die angenommenen Erträge wurden von den Betriebsleitern übernommen, um darauf aufbauend mit den relativen pH-Ertragsfunktionen die Ertragsentwicklungen unter den Bedingungen der verschiedenen Verfahren der Bodenbeprobung zu simulieren. Der gegenüber ADAMCHUK (2000: 120) deutlich höhere ökonomische Vorteil des pH-Sensors wird durch zwei Faktoren bestimmt: Im Simulationszeitraum von sechs Jahren entstehen in den letzten beiden Jahren durch die jährliche pH-Absenkung hohe Ertragsdepressionen. Mit einer Verkürzung auf vier Jahre könnte der entgangene Nutzen vermieden werden. Als zweiter maßgeblicher Faktor würde eine optimale und homogene Ausgangssituation bei der Kalkversorgung den Vorteil ebenfalls mindern. Auf dem Versuchsschlag „Rieder“, der eine homogene und hohe pH-Wert Versorgung aufweist, ist der Einsatz des pH-Sensors mit einem jährlichen ökonomischen Nachteil von $2 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gegenüber den herkömmlichen Verfahren nicht wirtschaftlich.

ADAMCHUK et al. (2003: 32) verweisen auf die vielfach höhere Beprobungsdichte des pH-Sensors, die trotz eines höheren Fehleranteils zu einer besseren Qualität der aktuellen Nährstoffverteilung führt. Für die Messungen mit Elektroden in erdfeuchten Bodenproben sollten jedoch weitere Informationen über die Nachlieferungen aus dem Pufferbereich einbezogen werden. Dies könnten beispielsweise Karten der Textur, der organischen Substanz oder der Kationenaustauschkapazität sein. Mit diesen Informationen könnten die Kalibrierungen für unterschiedliche Böden entfallen, wenn die Genauigkeit der Nachlieferung hinreichend präzise geschätzt werden kann. Sollte eine Kalibrierung für den pH-Sensor mit Laborproben entfallen, würden die Tagesleistungen steigen und der Einsatz auf kleineren Flächen wirtschaftlich vorteilhaft sein. Zwar wurden Stand-, Rüst- und Arbeitszeiten in der vorlie-

genden Arbeit nicht erfasst, jedoch zeigen die Ergebnisse von OLFS et al. (2012: 3), dass die für die Kalibrierungen notwendigen EDV-Arbeiten und manuelle Bodenprobenahme einen Fixkostencharakter je Schlag haben, sodass der Einsatz des pH-Sensors bei Schlaggrößen von weniger als 12 ha nicht wirtschaftlich ist.

5.3 Bewertung der Heterogenitätsindikatoren zur Abgrenzung homogener Teilflächen als Grundlage der Bodenbeprobung

Die Bewertung der Heterogenitätsindikatoren erfolgte in ökonomischen und statistischen Vergleichen. Zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte ist ein zweistufiger Prozess erforderlich, in dem zunächst unplausible Ertragsmesswerte eliminiert werden und danach eine mehrjährige Verrechnung erfolgt. Als Grundlage dienen die Ergebnisse der Ertragskartierungen aus verschiedenen Erntejahren, deren Rohdaten vor einer weiteren Verrechnung gefiltert werden müssen. Dazu wurde ein Filter angewendet, der verschiedene bekannte Ansätze von MOORE (1997), NOACK (2006) und SHEARER (1999) kombiniert. Zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte sind mehrere Methoden publiziert wurden. Die von BLACKMORE (2000) und BLACKMORE et al. (2003) vorgestellten Methoden sowie die von SCHNEIDER (2009) weiter entwickelte Methodik von BLACKMORE et al. (2003) dienen als Grundlagen des Vergleichs. Der Vergleich zeigt, dass die untersuchten Methoden bei einer identischen Datengrundlage zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Als Ursachen konnten die jahresbedingt verschiedenen Formen der Häufigkeitsverteilungen der Erntejahre identifiziert werden. Deshalb wurde eine eigene Methodik entwickelt, die unabhängig vom Verlauf der Häufigkeitsverteilungen eine Klassifizierung der mehrjährigen Ertragskarte vornimmt. Im Kapitel 5.3.1 werden die Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte diskutiert und anschließend wird im Kapitel 5.3.2 die Eignung der untersuchten Heterogenitätsindikatoren als Grundlage der Bodenbeprobung bewertet.

5.3.1 Bewertung der Methoden zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte

Die Analysen der Ergebnisse der Ertragskartierungen von den Versuchsschlägen 550 und Lange Winde zeigten unterschiedliche Verläufe der Häufigkeitsverteilungen in den Erntejahren. Diese führten für die Rasterzellen mit den höchsten und niedrigsten durchschnittlichen Erträgen dazu, dass mit dem Variationskoeffizienten als zeitliches Stabilitätskriterium Zonen als instabil eingestuft wurden, obwohl sie als zeitlich stabile Zonen einzuordnen wären. Der Variationskoeffizient wird von den Methoden BLACKMORE (2000: 40), BLACKMORE et al. (2003: 457) und SCHNEIDER (2009: 29) genutzt, dessen Verwendung als Stabilitätskriterium nur bedingt geeignet erscheint. Durch das Verhältnis der Streuung zum Mittelwert wird für einen zunehmenden Ertrag eine stärkere absolute Streuung möglich, ohne dabei den Stabilitätswert zu beeinflussen. Pflanzenbaulich bedeutet dies, dass für eine Niedrigertragszone mit einem durchschnittlichen Ertrag von 1 t ha^{-1} die jahrübergreifende Streuung $0,3 \text{ t ha}^{-1}$ betragen darf, während bei einer Hohertragszone mit einem Durchschnittsertrag von 10 t ha^{-1} die Streuung bis zu 3 t ha^{-1} betragen dürfte. Um pflanzenbaulich differenzierte Entscheidungen treffen zu können, sollte die Grenze jedoch einheitlich sein. LEITHOLD (2006: 143) schlägt für die zeitliche Stabilität eine Grenze von $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ vor, BLACKMORE et al. (2003: 457) empfehlen $1,0 \text{ t ha}^{-1}$. Die Klassifizierungen der Versuchsschläge 550 und Lange Winde nach den untersuchten Methoden von BLACKMORE (2000), BLACKMORE et al. (2003) und SCHNEIDER (2009) decken sich mit den Ergebnissen von ANUAR et al. (2008: 1395), BLACKMORE (2000: 44), BLACKMORE et al. (2003: 463), FOUNTAS et al. (2004: 9) und LEITHOLD (2006: 143). Während die Ergebnisse nach der Methodik von BLACKMORE et al. (2003), die auch als Grundlage für LEITHOLD (2006) dient, zu überwiegend instabilen Hoch- und Niedrigertragszonen tendieren, können für die Ergebnisse basierend auf den Methoden von BLACKMORE (2000) über-

wiegend stabile Hoch- und Niedrigertragszonen beobachtet werden. Dies zeigen auch die Ergebnisse von ANUAR et al. (2008), FOUNTAS et al. (2004) sowie GEMTOS et al. (2005). In den Arbeiten wurde teilweise die Hypothese geprüft, ob die mehrjährige Ertragskarte als Basis der Ertragsprognose dienen kann. Dazu stellt LEITHOLD (2006: 142) einen ausgleichenden bzw. glättenden Effekt des Ertrags über die Jahre fest und verwirft die These. GEMTOS et al. (2005: 8) stellen jedoch wiederkehrende Strukturen in den Ertragskarten fest. GEMTOS et al. (2008: 8) und LEITHOLD (2006: 144) schlussfolgern übereinstimmend, dass eine Ertragsprognose nur auf Basis einer mehrjährigen Ertragskarte nicht möglich ist. GEMTOS et al. (2008: 8) empfehlen, die mehrjährigen Ertragskarten als Eingangsvariable für Wachstumsmodelle zu nutzen, da die Komponente der zeitlichen Variabilität an der gesamten Ertragsvariabilität deutlich größer ist als die räumliche Variabilität.

In den Untersuchungen von STAFFORD et al. (1996: 112ff) sowie LARK und STAFFORD (1997: 111ff) wird ebenfalls auf die unterschiedlichen Verläufe der Häufigkeitsverteilungen der jährlichen Ertragskartierungen hingewiesen, die zur Komplexität der mehrjährigen Auswertung der Ertragskartierungen beitragen. Die Ergebnisse der Versuchsschläge 550 und Lange Winde zeigen deutlich, dass die räumlichen Ertragsdifferenzierungen zwischen den Jahren vorwiegend ähnlich sind, die Differenzen jedoch abhängig von der Häufigkeitsverteilung verschieden sind. In trockeneren Jahren konnten linksgipflige Verteilungen mit einer breiten Spannweite, in feuchten Jahren annähernd normalverteilte Ertragsdaten mit einer geringen Spanne beobachtet werden. Mit den Algorithmen von BLACKMORE (2000), BLACKMORE et al. (2003) und SCHNEIDER (2009) führen Auswertungen von Ertragsdaten, die unterschiedliche Formen der Häufigkeitsverteilungen aufweisen, methodisch bedingt zwangsläufig zu instabilen Zonen in mehrjährigen Ertragskarten, obwohl diese möglicherweise stabil sein könnten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die formulierten Ziele der Autoren (Tab. 4-19) nicht durch die vorgestellten Algorithmen beantwortet werden können. Die mehrjährige Ertragskarte sollte Aussagen über das **Ertragsniveau** und die **Stabilität** treffen. Anhand des simulierten Beispiels mit extremen Formen der Häufigkeitsverteilungen, die angelehnt wurden an die Formen von Häufigkeitsverteilungen in trockenen, normalen und feuchteren Erntejahren, konnte die Schwäche der Methoden, die starke Verteilungsabhängigkeit, aufgezeigt werden. Mit der Entwicklung einer verteilungsunabhängigen Methode konnte anhand des simulierten Beispiels gezeigt werden, dass stabile Ertragszonen basierend auf extremen Häufigkeitsverteilungen zuverlässig klassifiziert werden. Der „methodische Fehler“ der entwickelten Methodik, ordinalskalierte Daten aufgrund der fehlenden Interpretierbarkeit zwischen den Rängen Rechenoperationen zu unterziehen, wurde durch die Auswertung der Differenzen zwischen den Rängen analysiert. 99,8 % der Differenzen zwischen benachbarten Rängen betragen weniger als $0,0094 \text{ t ha}^{-1}$, die durchschnittliche Differenz lag bei $0,0017 \text{ t ha}^{-1}$. Mit der Bewertung der Differenzen erscheint der Nachteil des „methodischen Fehlers“ vertretbar, da die Vorteile der verteilungsunabhängigen Klassifizierung von räumlichen und zeitlichen Hoch- und Niedrigertragszonen überwiegen. Die Schlussfolgerung von GEMTOS et al. (2008: 8), mehrjährige Ertragskarten als Eingangsvariable in Wachstumsmodelle zu integrieren, wird durch die Ergebnisse deutlich unterstützt. Die Einflüsse und Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen abiotischen und biotischen Wachstumsfaktoren führen zu einer unterschiedlichen Ausprägung der jährlichen Ertragsmuster, die als überwiegend stabil für die untersuchten Standorte gelten.

5.3.2 Eignung der Heterogenitätsindikatoren als Grundlage der Bodenbeprobung

Die Prüfung der Eignung der Heterogenitätsindikatoren als Grundlage der Bodenbeprobung erfolgte anhand des ökonomischen Vergleichs sowie des Vergleiches der pH-Variabilitäten innerhalb der ab-

gegrenzten Teilflächen. Es zeigt sich, dass der Einfluss der Beprobungsdichte größer ist als die Wahl zwischen einem starren oder einem intelligenten Raster. Im ökonomischen Vergleich (Abb. 4-41 und Tab. 4-39) verursachen die Raster basierend auf der Leitfähigkeit und das starre 1-ha-Raster die geringsten Kosten gegenüber den anderen herkömmlichen Verfahren. Für die beiden Verfahren können auch die geringsten pH-Variabilitäten innerhalb der abgegrenzten Teilflächen beobachtet werden (Abb. 4-42 und Abb. 4-57). Die Variabilitäten für Phosphor, Kalium und Magnesium sinken ebenfalls innerhalb der Teilflächen bei einer zunehmenden Beprobungsdichte (Abb. 4-42). HINCK et al. (2010: 2), KAPE et al. (2009: 10) sowie die VDLUFA (2000a: 6) empfehlen die Bodenschätzung als Grundlage einer Teilflächenabgrenzung zur Bodenbeprobung zu nutzen. Die ökonomische Auswertung aller Standorte zeigt jedoch, dass dieses Vorgehen wirtschaftlich keine Vorteile bietet. Die Untersuchungen von HINCK et al. (2010) basieren auf dem Vergleich eines starren Rasters und dem Raster nach der Bodenschätzung mit unterschiedlichen Beprobungsdichten, sodass der Effekt nicht eindeutig auf die Bodenschätzung zurückzuführen ist. Ein Vergleich beider Raster müsste bei einer identischen Beprobungsdichte erfolgen. Dies gilt auch für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit, um den Einfluss der Beprobungsdichte auszuschließen und nur den Effekt der Rastereinteilung zu prüfen. Ähnliche Ergebnisse beobachten auch MALLARINO und WITTRY (2000: 6ff) mit einem Vergleich verschiedener Beprobungsverfahren basierend auf Heterogenitätsindikatoren. Keines der untersuchten Verfahren ist den anderen Verfahren überlegen. Als Ursache konnte die hohe kleinräumige Variabilität für Phosphor und Kalium sowie eine mittlere Variabilität für den pH-Wert identifiziert werden. Die geringsten Anteile an korrekt gedüngten Flächen weisen die schlageinheitliche Beprobung und die Beprobung basierend auf historischen Bodenkarten aus. Alle Verfahren tendieren dazu, zu geringe Düngemengen für Phosphor und Kalium auszuweisen (Kalk ist nicht angegeben). Dies bestätigen auch die Ergebnisse der Untersuchungen auf den Praxisflächen (Tab. 4-37). Um effiziente Strategien für die Bodenprobenahme auszuwählen, empfehlen MALLARINO und WITTRY (2000: 6ff) neben der Berücksichtigung der Kosten und des bisherigen Düngeregimes auch die Wirkung der Düngung.

Als Schlussfolgerung für die Bewertung der Bodenbeprobung auf Basis eines Heterogenitätsindikators lässt sich festhalten, dass einerseits die Probenanzahl durch eine homogene Verteilung des Heterogenitätsindikators minimiert werden soll, andererseits jedoch die kleinräumige Variabilität des pH-Wertes dies nicht ausreichend zulässt. Eine Empfehlung, die aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen gezogen werden kann ist, dass die Beprobungsdichte maximiert werden sollte, bevor die Auswahl zwischen einem intelligenten oder einem starren Raster erfolgt. Bei Wahl eines intelligenten Rasters sollte die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens oder der TWI berücksichtigt werden, da deren ökonomischer Vorteil im Vergleich zu den anderen Verfahren überwiegt.

6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, hochaufgelöste und herkömmliche Bodenbeprobungsverfahren einem ökonomischen Vergleich zu unterziehen. Dazu wurde eine von ADAMCHUK (2000) entwickelte Sensorplattform genutzt, die mit einer vielfach höheren Beprobungsdichte den pH-Wert misst als es mit der herkömmlichen Methodik möglich ist. In einer Szenarienrechnung wurden die Verfahrenskosten, die fehlallokierten Kalkkosten sowie der entgangene Nutzen durch eine verbesserte Phosphatverfügbarkeit und durch Ertragsdepressionen zwischen den herkömmlichen Verfahren der Bodenbeprobung und des pH-Sensors verglichen. Durch die verschiedenen Analyseverfahren der Methoden, ergaben sich Probleme bei der Vergleichbarkeit der Messergebnisse. Im ersten Teil der Arbeit erfolgten deshalb Untersuchungen zur Messgenauigkeit innerhalb und zwischen den Verfahren. In weiteren Untersuchungen wurde die Eignung der Heterogenitätsindikatoren als Grundlage für eine Rastereinteilung zur Bodenbeprobung geprüft.

Zur Ermittlung der Messgenauigkeiten nach der herkömmlichen Labormethodik und der Methodik des pH-Wert-Sensors wurden anhand identischer Bodenproben Untersuchungen durchgeführt. Damit können neben den Aussagen zur Genauigkeit innerhalb der Methoden auch Aussagen zur Genauigkeit zwischen beiden Methoden getroffen werden ohne dem Einfluss einer Mikrovariabilität zu unterliegen. Die Genauigkeit zwischen beiden Methoden ist zwingend notwendig, da die Entscheidungsregeln der Kalkung auf dem nach der Labormethodik ermittelten pH-Wert beruhen. Sowohl für die Labormethodik als auch für die Sensormethodik können Fehlerkomponenten beobachtet werden, die akzeptabel sind, jedoch von den Ergebnissen der Literaturrecherche z.T. abweichen. Die in der Literatur beschriebene zunehmende Differenzierung bei abnehmendem pH-Wert zwischen beiden Methoden konnte bestätigt werden. Die Ausprägung der Differenzierung ist jedoch schlagspezifisch. Zur Anpassung der Ergebnisse des pH-Wert-Sensors an die Ergebnisse der Labormethode wurde ein Ansatz entwickelt und geprüft, der im Vergleich zu Kalibrieransätzen anderer Autoren zu den besten Anpassungen führt. Die schlagspezifische Kalibrierung führt dazu, dass ein zeitlicher Mehraufwand für den Einsatz des pH-Wert-Sensors notwendig und der Einsatz v.a. auf kleineren Flächen ökonomisch unattraktiv wird. Im letzten Teil des Methodenvergleichs wurde der Einfluss der Fehlerkomponenten auf die resultierende Kalkmenge geprüft. Unter Berücksichtigung der beobachteten Häufigkeitsverteilungen für die Fehlerkomponenten erfolgte mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen die Bewertung beider Verfahren. Dabei zeigt sich, dass kein Verfahren eindeutige Vorteile erzielt. Zwar weist die Labormethode einen höheren Anteil von Ergebnissen um den erwarteten Zielwert auf, jedoch sind die Anteile von Ergebnissen in den kritischen Randbereichen auch größer als bei der Sensormethode. Unter Feldbedingungen konnten die beiden Methoden auf einem Langzeitversuch in Görzig verglichen werden. Es zeigte sich, dass durch die unterschiedlichen Entnahmetiefen und die Vorgehensweise der Bodenentnahme als Misch- und Einzelprobe der pH-Wert-Sensor trotz Kalibrierung tendenziell zu hohe pH-Werte misst.

Die Untersuchungen zum ökonomischen Vergleich erfolgten auf neun Praxisflächen über die vor der Bodenbeprobung keine Informationen zum pH-Wert-Status und der kleinräumigen pH-Wert-Heterogenität vorlagen. Drei Schläge zeigten keinen oder einen geringen Kalkbedarf auf, vier einen mittleren und zwei weitere Schläge einen hohen Kalkbedarf. Als Grundlage des ökonomischen Vergleichs dienten die hochauflösenden pH-Wert-Karten des pH-Sensors. Die Entnahmepunkte der Beanglinien des herkömmlichen Verfahrens wurden nach den Empfehlungen der guten fachlichen Praxis erstellt und anhand der hochauflösenden pH-Wert-Karten wurden die Bodenprobenergebnisse simuliert. Anschließend erfolgte der ökonomische Vergleich für einen Untersuchungszeitraum von

sechs Erntejahren. Diese Notwendigkeit ergibt sich einerseits aus der mehrjährigen Wirkung der Kalkdüngung und wird andererseits für die Bodenuntersuchungen gesetzlich vorgegeben. Zu diesem Zweck wurden die Verfahrenskosten, Nährstoffumverteilungen, flankierende Phosphoreffekte und erwartete Ertragsdepressionen berücksichtigt. Die Verfahrenskosten sind für den Einsatz des pH-Sensors für die Bodenbeprobung über den sechsjährigen Untersuchungszeitraum mit 20 € ha⁻¹ am höchsten. Nur Verfahren, die auf mehrjährigen Ertragskarten basieren, weisen noch höhere Kosten auf. In der Modellrechnung wurde jedoch unterstellt, dass die Ertragskarten ausschließlich für die Bodenbeprobung genutzt werden und eine weitere Nutzung, z.B. für den zielgerechteren Einsatz von Pflanzenschutz- und Düngemitteln, nicht erfolgt. Die fehlallokierten Kalkkosten wurden anhand der überdüngten Kalkmenge bewertet. Gegenüber den Ergebnissen des pH-Wert-Sensors ergaben sich ökonomische Nachteile von 15 € ha⁻¹ bis zu 55 € ha⁻¹ für die Bodenbeprobung nach den herkömmlichen Verfahren für den Untersuchungszeitraum. Die flankierenden Phosphoreffekte ergeben sich aus der Faustregel von KERSCHBERGER (1987), der mit einem steigenden pH-Wert hin zur optimalen Versorgung eine höhere Phosphatlöslichkeit nachweisen konnte. Dieser Gratiseffekt kann mit einer hochauflösenden Karte nach dem pH-Sensor optimal genutzt werden, wohingegen dies bei den herkömmlichen Verfahren, bedingt durch eine geringere Beprobungsdichte, nur teilweise möglich ist. Auf einem heterogenen und suboptimal versorgten Praxisschlag konnte für den pH-Sensor ein ökonomischer Vorteil des Phosphoreffekts von bis zu 80 € ha⁻¹ für den sechsjährigen Untersuchungszeitraum beobachtet werden. Je höher der pH-Wert Status zur Ausgangssituation jedoch war, desto geringer war auch der ökonomische Vorteil. Die Modellierung der erwarteten Ertragsdepressionen infolge einer suboptimalen Entwicklung des pH-Wertes gestaltete sich schwierig. Bekanntermaßen existieren kalkanspruchslose und kalkanspruchsvolle Kulturen, jedoch müssen auch die Ertragseffekte innerhalb der Kulturen berücksichtigt werden. Dabei zeigte sich, dass geringere und höhere Mehrerträge innerhalb einer Fruchtart erzielt werden konnten. Deshalb wurden die erwarteten Ertragsdepressionen in einer Szenarienrechnung mit geringen, mittleren und höheren Ertragseffekten (*Best-, Average-, Worst-Case*) abgebildet. Über den sechsjährigen Untersuchungszeitraum ergibt sich für den Einsatz des pH-Sensors ein ökonomischer Vorteil zwischen 80 € ha⁻¹ bis 260 € ha⁻¹ für den *Best-* bzw. *Worst-Case*. Unter den herkömmlichen Verfahren schneiden das 1-ha-Raster sowie die Raster basierend auf der Zonierung nach der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens und des Bodenfeuchteindex *Total Wetness Index (TWI)* am besten ab. Zusammenfassend verbleibt für den Einsatz des pH-Sensors ein jährlicher ökonomischer Vorteil von durchschnittlich 24 € ha⁻¹ a⁻¹. Für den Standort „Rieder“, der einen hohen pH-Wert-Status zur Ausgangssituation aufwies, konnte für den pH-Sensor ein ökonomischer Nachteil in Höhe von 2 € ha⁻¹ a⁻¹ nachgewiesen werden.

Als weiterer Schwerpunkt der Arbeit wurde die Eignung der Heterogenitätsindikatoren zur Zonierung der Probenflächen für die herkömmlichen Verfahren geprüft. Damit sollte festgestellt werden, ob die homogene Zonierung nach den Heterogenitätsindikatoren auch zu einer Homogenisierung der Nährstoffzonen führt. Neben den klassischen starren Rastern mit einer Beprobungsdichte von 1,0 bis 0,1 n ha⁻¹ wurden auch „intelligente“ Raster, basierend auf der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens, der Bodenschätzung, der geografischen Höhe, einem Bodenfeuchteindex (*TWI*) sowie mehrjährigen Ertragskarten, geprüft. Zur Erstellung einer mehrjährigen Ertragskarte wurde dabei eine Methodik entwickelt, die eine Schwachstelle bekannter Methoden eliminiert. Der Zweck einer mehrjährigen Ertragskarte ist die Abgrenzung von Zonen mit unterschiedlichem Ertragspotential. Die Schwierigkeit der Zusammenfassung mehrjähriger Ertragskarten besteht darin, dass durch die jahresbedingten Witterungseinflüsse auf den Ertrag, unterschiedliche Formen der Häufigkeitsverteilungen entstehen. In einer Sensitivitätsanalyse klassifizierte die entwickelte Methodik in den Randberei-

chen die Niedrig- und Hohertragszonen zuverlässig. Die Klassifizierungen auf Grundlage der Heterogenitätsindikatoren führten je nach Verfahren zu einer unterschiedlichen Anzahl von Zonen innerhalb der Versuchsflächen. Unter den intelligenten Rastern wiesen die Verfahren basierend auf der Leitfähigkeit sowie des Bodenfeuchteindex die meisten Zonen aus, jedoch führte der Einsatz der Heterogenitätsindikatoren nicht zu homogeneren Nährstoffzonen. Das starre 1-ha-Raster minimierte die Variabilitäten innerhalb der Zonen am stärksten. Die Beprobungsdichte hat einen deutlich größeren Einfluss auf die Minimierung der Nährstoffvariabilitäten als die Rasterung nach den Heterogenitätsindikatoren.

7 Literaturverzeichnis

- ADAMCHUK, V.I., 2000: Automated Mapping of Soil pH, Potassium and Mechanical Impedance for Site-Specific Management. *Dissertation*. West Lafayette, Indiana, USA.
- ADAMCHUK, V.I., A.K. JONJAK, C.S. WORTMANN, R.B. FERGUSON und C.A. SHAPIRO, 2011: Case studies on the accuracy of soil pH and lime requirement maps. In: STAFFORD, J.V. (Hrsg.): *Precision Agriculture (2011) – Proceedings of the 8th European Conference on Precision Agriculture*, 11.-14.7.2011, Prag, Tschechische Republik, Wageningen Academic Publishers, Niederlande. S. 289-301.
- ADAMCHUK, V.I., E.D. LUND, A. DOBERMANN und M. MORGAN, 2003: On-the-go mapping of soil properties using ion-selective electrodes. In: STAFFORD, J.V. und A. WERNER (Hrsg.): *Proceedings of the Fourth European Conference on Precision Agriculture*, 15.-18.6.2003, Berlin, Wageningen Academic Publishers, Niederlande. S. 27-33.
- ADAMCHUK, V.I., E.D. LUND, T. REED und R. FERGUSON, 2007: Evaluation of an on-the-go technology for soil pH mapping. In: *Precision Agriculture*, Vol. 8, Nr. 3. S. 139-149.
- ADAMCHUK, V.I., E.D. LUND, B. SETHURAMASAMYRAJA, M.T. MORGAN, A. DOBERMANN und D.B. MARX, 2005: Direct measurement of soil chemical properties on-the-go using ion-selective electrodes. In: *Computers and Electronics*, Vol. 48, Nr. 3. S. 272-294.
- ADAMCHUK, V.I., M.T. MORGAN und D.R. ESS, 1999: An automated sampling system for measuring soil pH. In: *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 42, Nr. 4. S. 885-892.
- ADAMCHUK, V.I., M.T. MORGAN und J.M. LOWENBERG-DEBOER, 2004: A Model for Agro-Economic Analysis of Soil pH-Mapping. In: *Precision Agriculture*, Vol. 5, Nr. 2. S. 111-129.
- AG BODEN, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. verbesserte und erweiterte Auflage. Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. Hannover.
- AGRI CON GMBH, 2011: Kostenvoranschlag zur hochaufgelösten Bodenbeprobung.
- AKIN, H. und H. SIEMES, 1988: Praktische Geostatistik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. Bonn und Aachen.
- AMI (Agrarmarkt Informations-Gesellschaft mbH), 2010 – 2013: Märkte und Preise. In: *Bauernzeitung*, Vol. 51-Vol. 54, verschiedene Ausgaben.
- ANUAR, A.R., K.J. GOH, T.B. HEOH und O.H. AHMED, 2008: Transforming Spatio-Temporal Yield Maps to Classified Management Zone Maps for Efficient Management of Oil Palm. In: *Applied Sciences*, Vol. 5, Nr. 10. S. 1392-1396.
- ARDAHANLIOGLU, O., T. OZTAS, S. EVREN, H. YILMAZ und Z. N. YILDIRIM, 2003: Spatial variability of exchangeable sodium, electrical conductivity, soil pH and boron content in salt- and sodium-affected areas of the Igdir plain (Turkey). In: *Arid Environments*, Vol. 54, Nr. 3. S. 495-503.
- ARC GIS, 2009: ArcGIS Desktop 9.3.1. ESRI, Redlands, Kalifornien, USA.

- BABLOCK, W. und H. PASSING, 1985: Application of statistical procedures in analytical instrument testing. In: *Automatic Chemistry/Clinical Laboratory Automation*, Vol. 7, Nr. 2. S. 74-79.
- BECK, A.D., J.P. ROADES und S.W. SEARCY, 1999: Post-Processing Filtering Techniques to Improve Yield Map Accuracy. In: *Proceedings ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting*. Toronto, Ontario, Kanada.
- BEIL, C., 2010: Geschäftsbericht für das Geschäftsjahr 2010 des Ringes Fränkischer Zuckerrübenanbauer e.V. Eigenverlag, Eibelstadt.
- BEIL, C., 2011: Geschäftsbericht für das Geschäftsjahr 2011 des Ringes Fränkischer Zuckerrübenanbauer e.V. Eigenverlag, Eibelstadt.
- BEIL, C., 2012: Geschäftsbericht für das Geschäftsjahr 2012 des Ringes Fränkischer Zuckerrübenanbauer e.V. Eigenverlag, Eibelstadt.
- BENKENSTEIN, H., M. BAUMECKER, H. PAGEL und W. KRÜGER, 2000: Bodenkennwerte und Erträge von Nährstoffmangelvarianten und nach temporärer Düngung von Mangelvarianten im Thyrower statischen Nährstoffmangelversuch. In: *Arch. f. Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, Vol. 45, Nr. 6. S. 523-538.
- BEVEN, K.J. und M.J. KIRKBY, 1979: A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. In: *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 24, Nr. 1. S. 43-69.
- BEZDICEK, D.F., T. BEAVER und D. GRANATSTEIN, 2003: Subsoil ridge tillage and lime effects on soil microbial activity, soil pH, erosion, and wheat and pea yield in the Pacific Northwest, USA. In: *Soil and Tillage Research*, Vol. 74, Nr. 1. S. 55-63.
- BIANCHINI, A.A. und A.P. MALLARINO, 2002: Soil-Sampling Alternatives and Variable-Rate Liming for a Soybean-Corn Rotation. In: *Agronomy Journal*, Vol. 94, Nr. 6. S. 1355-1366.
- BIAS, 2012: Bias für Windows. Version 9.17 – 02/2012, epsilon – Verlag, Frankfurt am Main.
- BIRRELL, S.J. und J.W. HUMMEL, 2000: Membrane selection and ISFET configuration evaluation for soil nitrate sensing. In: *Transactions of the ASAE*, Vol. 43, Nr. 2. S. 197-206.
- BLACK, B.A. und M.D. ABRAMS, 2003: Use of boundary-line growth patterns as a basis for dendroecological release criteria. In: *Ecological Applications*, Vol. 13, Nr. 6. S. 1733-1749.
- BLACKMORE, S., 2000: The interpretation of trends from multiple yield maps. In: *Computers and electronics in agriculture*, Vol. 26, Nr. 1. S. 37-51.
- BLACKMORE, S. und C.J. MARSHALL, 1996: Yield Mapping; Errors and Algorithms. In: Robert, P.C., R.H. Rust und W.E. Larson: *3rd International Conference on Precision Agriculture*, 23.-26.6.1996, Minneapolis, Minnesota, USA. S. 403-415.
- BLACKMORE, S. und M. MOORE, 1999: Remedial Correction of Yield Map Data. In: *Precision Agriculture*, Vol. 1, Nr. 1. S. 53-66.
- BLACKMORE, S., R.J. GODWIN und S. FOUNTAS, 2003: The analysis of Spatial and Temporal Trends in Yield Map Data over Six Years. In: *Biosystems Engineering*, Vol. 84, Nr. 4. S. 455-466.
- BLACKMORE, S., 2003: The role of yield maps in precision farming. *Dissertation*. Silsoe, England.

- BLANCO-MACÍAS, F., R. MAGALLANES-QUINTANAR, R.D. VALDEZ-CEPEDA, R. VÁZQUEZ-ALVARADO, E. OLIVARES-SÁENZ, E. GUTIÉRREZ-ORNELAS und J.A. VIDALES-CONTRERAS, 2009: Comparison between CND norms and boundary-line approach nutrient standards: *Opuntia ficus-indica* L. case. In: *Revista Chapingo Serie Horticultura*, Vol. 15, Nr. 2. S. 217-223.
- BLAND, J.M. und D.G. ALTMAN, 1986: Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. In: *Lancet*, Vol. 327, Nr. 8476. S. 307-310.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten), 2012: Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2012. 56. Auflage, Landwirtschaftsverlag, Münster Hiltrup. Bonn.
- BODSCHÄTZG, 2007: Gesetz zur Schätzung des landwirtschaftlichen Kulturbodens. Ausfertigungsdatum: 20.12.2007.
- BÖHNER, J. und T. SELIGE, 2006: Spatial Prediction of Soil Attributes using Terrain Analysis and Climate Regionalisation. In: BÖHNER, J., K.R. MCCLOY und J. STROBL (Hrsg.): *SAGA – Analysis and Modelling Applications (Göttinger Geografische Abhandlungen)*, Vol. 115. S. 13-28.
- BOLTON, E.F., V.A. DIRKS und J.W. AYLESWORTH, 1976: Some effects of alfalfa, fertilizer and lime on corn yield in rotations on clay soil during a range of seasonal moisture conditions. In: *Canadian J. of Soil Science*, Vol. 56, Nr. 1. S. 21-25.
- BONGIOVANNI, R., 1998: Economic Evaluation of Site-Specific Lime Management. *Masterarbeit*. West Lafayette, USA.
- BONGIOVANNI, R. und J. LOWENBERG-DEBOER, 2000: Economics of Variable Rate Lime in Indiana. In: *Precision Agriculture*, Vol. 2, Nr. 1. S. 55-70.
- BORCHERT, A. und H. PRALLE, 2011: Von der Veris MSP Kartierung zur Applikationskarte. In: *Abschlussworkshop 2011 „Kalkung auf den Punkt gebracht“*, 28.11.2011. Osnabrück.
- BORCHERT, A., D. TRAUTZ und H.-W. OLFS, 2010: Eignung des Online-Messverfahrens VERIS MSP zur Erfassung der räumlichen Variabilität von pH-Werten in Ackerböden: Validierung anhand von Labor- und Felduntersuchungen. In: *VDLUFA-Schriftenreihe 66*, 21.-24.09.2010, 122. VDLUFA-Kongress, Kiel. VDLUFA-Verlag, Darmstadt. S. 511-516.
- BORCHERT, A., D. TRAUTZ und H.-W. OLFS, 2011: Online-Erfassung der räumlichen Variabilität von pH-Werten in Ackerböden mit der Sensorplattform Veris MSP als Grundlage einer teilflächenangepassten Kalkapplikation. In: *Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft – Böden verstehen – Böden nutzen – Böden fit machen*, 3.-9. September 2011, Berlin.
- BOURENNAME, H., B. NICOULLAUD, A. COUTURIER und D. KING, 2001: Spatial Distribution of the temporal variance and effects of soil types and grain varieties on the wheat yield variability. In: GRENIER, G. und S. BLACKMORE (Hrsg.): *Third European Conference on Precision Agriculture – Vol. 2.*, 18.-20.6.2001, agro Montpellier, Montpellier, Frankreich. S. 761-766.
- BRANDES, W. und M. ODENING, 1992: Investition, Finanzierung und Wachstum in der Landwirtschaft. Ulmer-Verlag, Stuttgart. Göttingen.
- BREUER, J., U. HONSEL, E. JANßEN, R.O. KUCHENBUCH, M. LEITERER, M. MUNZERT, J. SCHÖNHERR, A. TRENKLE, W. ÜBELHÖR und S. UHLIG, 2007: Positionspapier des VDLUFA zur Planung, Durchführung und

Auswertung von Ringversuchen zur Methodenentwicklung. Darmstadt. S. 1-9.

- BROGE, N.H., M.H. GREVE und H. NEHMADHL, 2003: Estimating soil properties combining reflectance, topographical and conductivity data. In: WERNER, A. und A. JARFE (Hrsg.): *Proceedings of the Fourth European Conference on Precision Agriculture*, 15.-18.6.2003, Berlin, Wageningen Academic Publishers, Niederlande. S. 373-374.
- BRONSON, K.F., R.J. LASCANO, J.D. BOOKER, A.B. ONKEN, J.W. KEELING, T.L. ARCHER, S. MACHADO, E.D. BYNUM JR., D.M. NESMITH und H. LI, 2000: Grid soil sampling: comparisons of grid size with landscape- and soil texture-based sampling strategies in the southern plains. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture*, 16.-19.7.2000, Minneapolis, Minnesota, USA.
- BROUDER, S.M., B.S. HOFMANN und D.K. MORRIS, 2005: Mapping Soil pH: Accuracy of Common Soil Sampling Strategies and Estimation Techniques. In: *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 69, Nr. 2. S. 427-442.
- BROWN, T.T., R.T. KOENIG, D.R. HUGGINS, J.B. HARSH und R.E. ROSSI, 2008: Lime Effects on Soil Acidity, Crop Yield, and Aluminum Chemistry in Direct-Seeded Cropping Systems. In: *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 72, Nr. 3. S. 634-660.
- BÜHLMANN, P., E. PRETSCH und E. BAKKER, 1998: Carrier-Based Ion-Selective Electrodes and Bulk Optodes. 2. Ionophores for Potentiometric and Optical Sensors. In: *Chemical Reviews*, Vol. 98, Nr. 4. S. 1593-1687.
- CAHN, M.D., J.W. HUMMEL und B.H. BROUER, 1994: Spatial Analysis of Soil Fertility for Site-Specific Crop Management. In: *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 58, Nr. 4. S. 1240-1248.
- CAMBARDELLA, C.A., T.B. MOORMAN, T.B. PARKIN, D.L. KARLEN, J.M. NOVAK, R.F. TURCO und A.E. KONOPKA, 1994: Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. In: *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 58, Nr. 5. S. 1501-1511.
- CAMERON, D.R., M. NYBORG, J.A. TOOGOOD und D.H. LAVERTY, 1971: Accuracy of Field Sampling for Soil Tests. In: *Canadian Journal of Soil Science*, Vol. 51, Nr. 2. S. 165-175.
- CHANG, J., D. E. CLAY, C. G. CARLSON, D. MALO, S. A. CLAY, J. LEE und M. ELLSBURY, 1999: Precision Farming Protocols: Part 1. Grid Distance and Soil Nutrient Impact on the Reproducibility of Spatial Variability Measurements. In: *Precision Agriculture*, Vol. 1, Nr. 3. S. 277-289.
- CIFU, M., L. XIAONAN, C. ZHIHONG, H. ZHENGYI und M. WANSHU, 2004: Long-term effects of lime application on soil acidity and crop yields on a red soil in Central Zhejiang. In: *Plant and Soil*, Vol. 265, Nr. 1-2. S. 101-109.
- CONYERS, M.K. and B.G. DAVEY, 1990: The Variability of pH in acid soils of the Southern Highlands of New South Wales. In: *Soil Science*, Vol. 150, Nr. 4. S. 695-704.
- CORWIN, D.L. und R.E. LESCH, 2005: Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 46, Nr. 1-3. S. 1-10.
- CRAWLEY, M.J., A.E. JOHNSTON, J. SILVERTOWN, M. DODD, C. DE MAZANCOURT, M.S. HEARD, D.F. HENMAN und G.R. EDWARDS, 2005: Determinants of Species Richness in the Park Grass Experiments. In: *The American Naturalist*, Vol. 165, Nr. 2. S. 179-192.

- DA SILVA, J.R.M., 2006: Analysis of the Spatial and Temporal Variability of Irrigated Maize Yield. In: *Biosystems Engineering*, Vol. 94, Nr. 3. S. 337-349.
- DALGAARD, M. H. HAVE und H. NEHM DAHL, 2001: Soil clay mapping by measurement of Electromagnetic Conductivity. In GRENIER, G. und S. BLACKMORE (Hrsg.): *Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture – Volume I*, 18.-20.6.2001, agro Montpellier, Montpellier, Frankreich. S. 367-372.
- DEMMELE, M., 2001: Ertragsermittlung im Mähdrescher – Ertragsmessgeräte für die lokale Ertragsermittlung (DLG-Merkblatt 303). Freising. Hrsg.: Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft, Frankfurt am Main.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD), 2015: Klimadaten – online – frei. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. In: <http://www.dwd.de>, letzter Zugriff: 20.01.2015, Berlin.
- DIKER, K., D.F. HEERMANN und M.K. BRODAHL, 2004: Frequency Analysis of Yield for Delineating Yield Responses Zones. In: *Precision Agriculture*, Vol. 5, Nr. 5. S. 435-444.
- DIN ISO 11272, 2001: Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Trockenrohddichte. Beuth-Verlag. Berlin.
- DIN ISO 11274, 2001: Bodenbeschaffenheit des Wasserrückhaltevermögens. Beuth-Verlag. Berlin.
- DOBERS, E., 2002: Methoden der Standorterkundung als Grundlage des DPGS-gestützten Ackerbaus – Eine Fallstudie aus dem Lössgebiet des Mittleren Flämings. In: *Göttinger Bodenkundliche Berichte*, Nr. 115. Selbstverlag. Dissertation. Göttingen.
- DOMSCH, H. und A. GIEBEL, 2001: Electrical Conductivity of soils typical for the state of Brandenburg in Germany. In GRENIER, G. und S. BLACKMORE (Hrsg.): *Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture – Volume I*, 18.-20.6.2001, agro Montpellier, Montpellier, Frankreich. S. 373-378.
- DOMSCH, H. und M. SCHIRRMANN, 2009: Teilflächenspezifische Grunddüngung. In: *Bornimer Agrartechnische Berichte*, Nr. 72. Selbstverlag. Potsdam-Bornim.
- DUTTER, R., 1985: Geostatistik. In: LEHN, J., H. NEUNZERT und H. WACKER (Hrsg.): *Mathematische Methoden in der Technik – Band 2*. Teubner-Verlag, Stuttgart. Wien und Loeben.
- DÜNGEVERORDNUNG, 2017: Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis (Düngeverordnung - DüV). *Ausfertigungsdatum vom 26.5.2017*.
- EARL, R., J.C. TAYLOR, G.A. WOOD, I. BRADLEY, I.T. JAMES, T. WAINE, J.P. WELSH, R.J. GODWIN und S.M. KNIGHT, 2003: Soil Factors and their Influence on Within-field Crop Variability, Part I: Field Observation of Soil Variation. In: *Biosystems Engineering*, Vol. 84, Nr. 4. S. 425-440.
- ERICKSON, B., 2004: Field Experience Validates On-The-Go Soil pH Sensor. In: *Purdue Top Farmer Crop Workshop Newsletter, December 2004*, West Lafayette, Indiana, USA. S. 1-4.
- ESRI, 2001: ArcGIS™ Geostatistical Analyst: Powerful Exploration and Data Interpolation Solutions. ESRI, Redlands, Kalifornien, USA.
- EU-NITRATRICHTLINIE, 1991.

- FARINA, M.P.W., P. CHANNON und G.R. THIBAUD, 2000: A Comparison of Strategies for Ameliorating Subsoil Acidity: I. Long-Term Growth Effects. In: *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 64, Nr. 2. S. 646-651.
- FIFA (FERTILIZER INDUSTRY FEDERATION OF AUSTRALIA), 2006: Australian Soil Fertility Manual. 3. Auflage, CSIRO – Verlag, Collingwood.
- FISCHER, W.R. und G. SCHALLER, 1980: Ein Elektrodensystem zur Messung des Redoxpotentials im Kontaktbereich Boden/Wurzel. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, Vol. 143, Nr. 3. S. 344-348.
- FLORIN, M.J., A.B. MCBRATNEY und B.M. WHELAN, 2009: Quantification and comparison of wheat yield variation across space and time. In: *European Journal of Agronomy*, Vol. 30, Nr. 3. S. 212-219.
- FOLEY, J.A., N. RAMANKUTTY, K.A. BRAUMANN, E.S. CASSIDY, J.S. GERBER, M. JOHNSTON, N.D. MUELLER, C. O'CONNELL, D. K. RAY, P.C. WEST, C. BALZER, E.M. BENNETT, S.R. CARPENTER, J. HILL, C. MONFREDA, S. POLASKY, J. ROCKSTRÖM, J. SHEEHAN, S. SIEBERT, D. TILMANN und D.P.M. ZAKS, 2011: Solutions for a cultivated planet. In: *Nature*, Vol. 478, Nr. 7369. S. 337-342.
- FÖLSCH, M. und S. OTTER-NACKE, 2010: Mehr Präzision bei der Grunddüngung. In: CLAUPHEIM, W., L. THEUVSEN, A. KÄMPF und M. MORGENSTERN (Hrsg.): *Precision Agriculture Reloaded – informationsgestützte Landwirtschaft*, 24.-25.2.2010, 30. GIL – Tagung, Stuttgart. S. 69-72.
- FÖRSTER, B., 1997: Bodenorganismen und Standortfaktoren. In LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTENBERG (Hrsg.): *Handbuch Boden – Boden als Lebensraum für Bodenorganismen, bodenbiologische Standortklassifikation – Literaturstudie*. Eigenverlag, Karlsruhe.
- FÖRSTER, E. und F. EGERMAYER, 1966: Korrelations- und Regressionsanalyse – Ein Leitfaden für Ökonomen. Verlag Die Wirtschaft Berlin. Berlin.
- FOUNTAS, S., S. BLACKMORE, T. GEMTOS und A. MARKINOS, 2004: Trend Yield Maps in Greece and the UK. In: M. VLACHOPOULOU und MANOS, B. (Hrsg.): *Second International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food and Environment (HAICTA)*, 18.-20.3.2004, Thessaloniki, Griechenland. S. 309-319.
- FRAISSE, C.W., K.A. SUDDUTH, und N.R. KITCHEN, 2001: Delineation of Site-Specific Management Zones by Unsupervised Classification of Topographic Attributes and Soil Electrical Conductivity. In: *Transactions of the ASAE*, Vol. 44, Nr. 1. S. 155-166.
- FRANZEN, D.W., L.J. CIHACEK, V.L. HOFMAN und L.J. SWENSON, 1998: Topography-Based Sampling Compared with Grid Sampling in the Northern Great Plains. In: *Production Agriculture*, Vol. 11, Nr. 3. S. 364-370.
- FRANZEN, D.W. und T.R. PECK, 1995: Field Soil Sampling Density for Variable Rate Fertilization. In: *Production Agriculture*, Vol. 8, Nr. 4. S. 568-574.
- FREY, B. und M. KERSCHBERGER, 2009: Zur Wirtschaftlichkeit der Grunddüngung – Die Produktivität muss steigen. In: *Neue Landwirtschaft*, Vol. 20, Nr. 8. S. 50-51.
- FUENTES, J.P., D.F. BEZDICEK, M. FLURY, S. ALBRECHT und J.L. SMITH, 2006: Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. In: *Soil and Tillage Research*, Vol. 88, Nr. 1-2. S. 123-131.

- FRIEDMAN, S.P., 2005: Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 46, Nr. 1-3. S. 45-70.
- GEBBERS, R., 2008: Fehleranalyse im System der ortsspezifischen Grunddüngung. In: *Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG)*, Nr. 474. Dissertation. Berlin.
- GEBBERS, R. und V.I. ADAMCHUK, 2010: Precision Agriculture and Food Security. In: *Science*, Vol. 327, Nr. 2. S. 828-831.
- GEBBERS, R. und H. DOMSCH, 2007: YieldSweeper – Ein Programm zur Nachbearbeitung von Ertragsdaten im Precision Farming. In: BÖTTINGER, S., L. THEUVSEN, S. RANK und M. MORGENSTERN (Hrsg.): *Agrarinformatik im Spannungsfeld zwischen Regionalisierung und globaler Wertschöpfungskette*, 5.-7.3.2007, 27. GIL-Tagung. Hohenheim. S. 83-87.
- GEBBERS, R., E. LÜCK, M. DABAS und H. DOMSCH, 2009: Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale. In: *Near Surface Geophysics*, Vol. 7, Nr. 3. S. 179-190.
- GEMTOS, T.A., S. FOUNTAS, T. MARKINOS, S. BLACKMORE and J.R.M. DA SILVA, 2005: Trend yield maps in irrigated and rain fed crops. In: CEBECI, Z., A. SIDERIDIS, H. ONDER und S. CANKAYA (Hrsg.): *International Conference on Information Technologies in Agriculture, Food and Environment*, 12.-14.10.2005, Adana, Türkei.
- GILBERTSSON, M., 2001: On-The-Go Sensors measuring differences in soil Parameters – A comparison between a Conductivity sensor and a draft force sensor. In: GRENIER, G. und S. BLACKMORE (Hrsg.): *Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture – Volume I*, 18.-20.6.2001, agro Montpellier, Montpellier, Frankreich. S. 383-388.
- GODWIN, R.J. und P.C.H. MILLER, 2003: A Review of the Technologies for Mapping Within-field Variability. In: *Biosystems Engineering*, Vol. 84, Nr. 4. S. 393-407.
- GODWIN, R.J., G.A. WOOD, J.C. TAYLOR, S.M. KNIGHT und J.P. WELSH, 2003: Precision Farming of Cereal Crops: a Review of a Six Year Experiment to develop Management Guidelines. In: *Biosystems Engineering*, Vol. 84, Nr. 4. S. 375-391.
- GOY, S., 1928: Ueber die Kalkbedürftigkeit der Böden. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, Vol. 12, Nr. 5. S. 317-318.
- GRAF, T., 1988: Untersuchungen über die Bodenverschleppung in Dauerdüngungsversuchen. *Diplomarbeit*. Halle.
- GRENZDÖRFFER, G.J. und R.I.B. GEBBERS, 2001: Seven years of yield mapping – analysis and possibilities of multi year yield mapping data. In: GRENIER, G. und S. BLACKMORE (Hrsg.): *Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture – Volume I*, 18.-20.6.2001, agro Montpellier, Montpellier, Frankreich. S. 31-36.
- GRISSE, R.B., M. ALLEY, S. PHILLIPS und P. MCCLELLAN, 2009: Interpreting Yield Maps – „I gotta yield map – now what?“. In: *Veröffentlichung der Virginia State University*, Heft 442-509. S. 1-7.
- GROUVEN, U., R. BENDER, A. ZIEGLER und S. LANGE, 2007: Vergleich von Messmethoden. In: *Deutsche Medizinische Wochenschrift – Statistik*, Vol. 132. S. e69-e73.
- HAECKEL, R. und H. PASSING, 1985: Statistische Probleme beim Vergleich klinisch-chemischer Analyse-

- verfahren – Bericht über die Kleinkonferenz der Deutschen Gesellschaft für Klinische Chemie am 12. und 13. Januar 1984 in Bremen. In: *Clinical Chemistry / Clinical Biochemistry*, Vol 23, Nr. 5. S. 307-311.
- HALL, H.H., 1983: Economic Evaluation of Crop Response to Lime. In: *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 65, Nr. 4. S. 811-817.
- HAMM, L.-R., M. HEIM, J. WEIß und G. DORFNER, 2013: Landwirtschaftliche Erzeugerpreise in Bayern – Datensammlung für die Landwirtschaftsberatung. Hrsg: Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft. München.
- HANQUET, B., M. F. DESTAIN und M. FRANKINET, 2003: Management zones delineation using soil electrical conductivity and topographic attributes. In: WERNER, A. und A. JARFE (Hrsg.): *Proceedings of the Fourth European Conference on Precision Agriculture*, 15.-18.6.2003, Berlin, Wageningen Academic Publishers, Niederlande. S. 425-426.
- HARTMANN, K.-J., 2012: persönliche Auskunft am 26.11.2012, Halle.
- HARTMANN, K.-J., A. WITT, J. BOESS und H. DOMSCH, 2011: Bodenkundliche Interpretation der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit [ECa] mit Hilfe von Grablochbeschrieben der Bodenschätzung. In: *Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft – Böden verstehen – Böden nutzen – Böden fit machen*, 3.-9. September 2011, Berlin.
- HARTSTOCK, N.J., T.G. MUELLER, A.D. KARATHANASIS und P.L. CORNELIUS, 2001: The potential for enhancing Soil Surveys with Digital Terrain models and Electrical Conductivity in Kentucky. In GRENIER, G. und S. BLACKMORE (Hrsg.): *Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture – Volume I*, 18.-20.6.2001, agro Montpellier, Montpellier, Frankreich. S. 389-394.
- HBIRKOU, C., 2011: Heterogeneity of soil properties at the field-scale and spatial patterns of soil-borne pests and weeds. In: *Bonner Bodenkundliche Abhandlungen*, Band 51, Druckerei der Universität Bonn. Bonn.
- HEROLD, L., S. WAGNER, R. RIEDEL und M. BLÖDNER, 2001: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Bodenprobenahmetiefen und Probenahmeraster auf den Nährstoffgehalt des Bodens und die Höhe der Düngeempfehlungen für Grundnährstoffe. Hrsg.: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena.
- HERBST, R., 2004a: Leitfähigkeitsmessung mit dem EM 38. In: HUFNAGEL, J., R. HERBST, A. JARFE und A. WERNER (Hrsg.): *Precision Farming – Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis*, KTBL-Schrift 419. Landwirtschaftsverlag, Münster. Darmstadt. S. 3.2-37 bis 3.2-40.
- HERBST, R., 2004b: Ertragskartierung von Getreide. In: HUFNAGEL, J., R. HERBST, A. JARFE und A. WERNER (Hrsg.): *Precision Farming – Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis*, KTBL-Schrift 419. Landwirtschaftsverlag, Münster. Darmstadt. S. 3.2-73 bis 3.2-75.
- HERBST, R., 2004c: Bodenschätzung. In: HUFNAGEL, J., R. HERBST, A. JARFE und A. WERNER (Hrsg.): *Precision Farming – Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis*, KTBL-Schrift 419. Landwirtschaftsverlag, Münster. Darmstadt. S. 3.2-25 bis 3.2-28.
- HINCK, S., A. KIELHORN, A. MICHEL und H.-W. OLFS, 2010: Teilflächenspezifische Bodenprobenentnahme anhand des Klassenzeichens der Bodenschätzung (Anwendungsbeispiel). In: MÄRLANDER, B., O. CHRISTEN, S. V. TIEDEMANN, C. KENTER, A. DÜKER (Hrsg.): *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, Band 22, 53. Jahrestagung, 28.-30.9.2010, Hohenheim. S. 203-204.

- HOPKINS, B. und J. ELLSWORTH, 2005: Phosphorus availability with alkaline/calcareous soil. In: STEVENS, W. (Hrsg.): *Proceedings of Western Nutrient Management Conference*, Vol. 6, Salt Lake City, USA. S. 88-93.
- HUGGINS, D.R. und R.D. ALDERFER, 1994: Yield variability within a long-term corn management study: Implications for precision farming. In: ROBERT, P.C., R.H. RUST und W.E. LARSON (Hrsg.): *Proceedings of Site-Specific Management for Agricultural Systems: Second International Conference*, 27.-30.3.1994, Minneapolis, Minnesota. USA. S. 417-426.
- JENKS, G.F. und F.C. CASPALL, 1971: Error on chloropleth maps: definition, measurement, reduction. In: *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 61, Nr. 2. S. 217-244.
- JOHNSON, C.K., D.A. MORTENSEN, B.J. WIENHOLD, J.F. SHANAHAN und J.W. DORAN, 2003: Site-Specific Management Zones Based on Soil Electrical Conductivity in a Semiarid Cropping System. In: *Agronomy Journal*, Vol. 95, Nr. 2. S. 303-315.
- JOHNSON, R.M. und E.P. RICHARD JR., 2010: Variable-rate lime application in Louisiana sugarcane production systems. In: *Precision Agriculture*, Vol. 11, Nr. 5. S. 464-474.
- JONJAK, A.K., 2011: Analysis of Site-specific Adjustment Applied to On-The-Go Soil Sensing Data for Agronomic Use. *Master Thesis*. Lincoln, Nebraska.
- KACHANOSKI, R.G., E.G. GREGORICH und I.J. VAN WESENBEECK, 1988: Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic induction methods. In: *Canadian Journal of Soil Science*, Vol. 68, Nr. 4. S. 715-722.
- KAPE, H.-E., U. VON WULFFEN und M. ROSCHKE, 2009: Hinweise zur Probenahme von Boden, Pflanzen und Düngemitteln. Hrsg.: Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau des Landes Sachsen-Anhalt. Eigenverlag, Bernburg.
- KIM, H.-J., K.A. SUDDUTH und J.W. HUMMEL, 2009: Soil macronutrient sensing for precision agriculture. In: *Environmental Monitoring*, Vol. 11, Nr. 10. S. 1810-1824.
- KEEN, B. A. und W.B. HAINES, 1925: The evolution of a reliable dynamometer technique for use in soil cultivation experiments. In: *Journal of Agricultural Science*, Vol. 15, Nr. 3. S. 375-386.
- KERSCHBERGER, M., 1987: Einfluß des pH-Wertes auf den doppellaktatlöslichen P-Gehalt im Boden (DL-Methode). In: *Arch. f. Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, Vol. 31, Nr. 5. S. 313-319.
- KERSCHBERGER, M., 1993: Mittlere Ertragseinbußen durch unzureichende Kalkung. In: *Landwirtschaftsblatt Weser-Ems*, Vol. 140, Nr. 30. S. 24-28.
- KERSCHBERGER, M., 1996: Ermittlung optimaler Bodenreaktion auf dem Ackerland. In: *VDLUFA-Schriftenreihe 44*, 16.-21.09.1996, 108. VDLUFA-Kongress, Trier. VDLUFA-Verlag, Darmstadt. S. 591-594.
- KERSCHBERGER, M. 2012: Kalk für die Knollen. In: *ACKER plus*, Vol.2, Nr. 3. S. 18-21.
- KERSCHBERGER, M. und G. MARKS, 2007: Einstellung und Erhaltung eines standorttypischen optimalen pH-Wertes im Boden – Grundvoraussetzung für eine effektive und umweltverträgliche Pflanzenproduktion. In: *Berichte über Landwirtschaft*, Band 85, Heft 1. S. 56-77.

- KERSCHBERGER, M. und D. RICHTER (1982): Ermittlung optimaler pH-Werte und pH-Stufen der Ackerböden für die Pflanzenproduktion. In: *Arch. f. Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, Vol. 26, Nr. 3. S. 153-158.
- KERSCHBERGER, M. und D. RICHTER (1992): Untersuchungen zur Streuung der Bodenuntersuchungsergebnisse von pH, P, K, Mg auf großen Feldschlägen des Ackerlandes. In: *Arch. f. Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, Vol. 36, Nr. 3. S. 163-170.
- KLÖPFER, F., D. KOTTENRODT und C. WELTZIEN, 2001: Implementation and Acceptance of Precision Agriculture (PA) by farmers and agricultural Contractors within the research project „Preagro“. In: GRENIER, G. und S. BLACKMORE (Hrsg.): *Third European Conference on Precision Agriculture – Vol. 2.*, 18.-20.6.2001, agro Montpellier, Montpellier, Frankreich. S. 527-532.
- KOCH, R. und E. SPÖRL, 2007: Statistische Verfahren zum Vergleich zweier Messmethoden und zur Kalibrierung: Konkordanz-, Korrelations- und Regressionsanalyse am Beispiel der Augeninnendruckmessung. In: *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*, Vol. 224, Nr. 1. S. 52-57.
- KÖHLER, W., G. SCHACHTEL und P. VOLESKE, 2002: Biostatistik. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Gießen und Aachen.
- KOZAR, B., R. LAWRENCE und D.S. LONG, 2002: Soil Phosphorus and Potassium Mapping Using a Spatial Correlation Model Incorporating Terrain Slope Gradient. In: *Precision Agriculture*, Vol. 3, Nr. 4. S. 407-417.
- KRAMER, E., A. BORCHERT, R. GEBBERS, M. SCHIRRMANN, D. TRAUTZ, H.-W. OLFS und T. SCHATZ, 2011: Praktische Erfahrungen bei der Erfassung der räumlichen Variabilität von pH-Werten in Ackerböden durch das Online-Verfahren Veris MSP. In: LEITHOLD, G., K. BECKER, C. BROCK, S. FISCHINGER, A.-K. SPIEGEL, K. SPORY, K.-P. WILBOIS und U. WILLIGES (Hrsg.): *Es geht ums Ganze: Forschen im Dialog von Wissenschaft und Praxis, Beiträge zur 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau (Band 1)*. Verlag Dr. Köster, Berlin. S. 64-67.
- KRAUSE, O., R. WACKERNAGEL, U. HENKE und L. HEROLD, 1997: Varianten der Bodenprobenahme unter Nutzung der GPS-Technik – Eignung und Aussagekraft verschiedener DGPS-gestützter Bodenprobenahmetechnologien für eine teilschlagdifferenzierte Düngung. In: Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): *Thüringer Düngungstagung 1997 – Landwirtschaft und Landschaftspflege*, Themenblatt-Nr. 006_12_200/1997, Eigenverlag, Jena.
- KROMIDAS, S., 1999: Validierung in der Analytik. Wiley-VCH Verlag, Weinheim.
- KUMHÁLOVÁ, J., F. KUMHÁLA, M. KROULÍK und Š. MATĚJKOVÁ, 2011: The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. In: *Precision Agriculture*, Vol. 12, Nr. 6. S. 813-830.
- LAUE, U., 2010: persönliche Auskunft zur Laboranalytik.
- LAUZON J.D., I.P. O`HALLORAN, D.J. FALLOW, A. PETER VON BERTOLDI und D. ASPINALL, 2005: Spatial Variability of Soil Test Phosphorus, Potassium, and pH of Ontario Soils. *Agronomy Journal*, Vol. 97, Nr. 2. S. 524-532.
- LARK, R.M. und J.V. STAFFORD, 1997: Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield. In: *Annals of Applied Biology*, Vol. 130, Nr. 1. S. 111-121.
- LARSCHEID, G., B.S. BLACKMORE und M. MOORE, 1997: Management decisions based on yield maps. In:

- STAFFORD, J.V. (Hrsg.): *Precision Agriculture 1997 – Volume II Technology, IT and Management*, BIOS Scientific Publishers, Oxford. Silsoe, Großbritannien. S. 895-903.
- LE GOFF, T., J. BRAVEN, L. EBDON, N.P. CHILCOTT, D. SCHOLEFIELD und J.W. WOOD, 2002: An accurate and stable nitrate-selective electrode for the *in situ* determination of nitrate in agricultural drainage waters. In: *Analyst*, Vol. 127, Nr. 4. S. 507-511.
- LEHMANN, E., 2004: Aspekte der GPS-gestützten teilflächenspezifischen Bewirtschaftung in Mecklenburg-Vorpommern. In: LANDESFORSCHUNGSANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND FISCHEREI MECKLENBURG-VORPOMMERN – INSTITUT FÜR BETRIEBSWIRTSCHAFT (Hrsg.): Abschlussbericht Fo-Nr.: 55/01, Eigenverlag, Gülzow.
- LEITERER, M., K. ZIMMERMANN und H. JOBST, 1998: VDLUFA – Standpunkt „Qualitätsbewertung und Zulassung von Untersuchungsstellen für Boden und Klärschlamm gemäß AbfklärV vom 15.04.1992“. Hrsg.: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Eigenverlag, Darmstadt.
- LEITHOLD, P., 2006: Räumliche und zeitliche Analyse von Ertragskarten. In: WENKEL, K.-O., P. WAGNER, M. MORGENSTERN, K. LUZI und P. EISERMANN (Hrsg.): *Referate der 26. GIL-Tagung*, 6.-8.3.2006, Potsdam, S. 141-144.
- LEITHOLD, T., 2012, eigene Berechnungen.
- LEITHOLD, E., 2013, persönliche Auskunft am 14.9.2013, Dennheritz.
- LESCH, S.M., D.L. CORWIN und D.A. ROBINSON, 2005: Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 46, Nr. 1-3. S. 351-378.
- LEWANDOWSKI, I. und U. SCHMIDT, 2006: Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 112, Nr. 4. S. 335-346.
- LIEBHARD, P., 1993: Einfluß der Primärbodenbearbeitung auf pH-Wert, Calcium-, Phosphat- und Kaliumgehalt von Ackerböden im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 2). In: *Die Bodenkultur*, Vol. 44, Nr. 4. S. 303-315.
- LIN, L. I-K., 1989: A Concordance Correlation Coefficient to Evaluate Reproducibility. In: *Biometrics*, Vol. 45, Nr. 1. S. 255-268.
- LIST, U., 2013: persönliche Mitteilung. Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen. Dresden.
- LI, Y., Z. SHI und F. LI, 2007: Delineation of Site-Specific Management Zones Based on Temporal and Spatial Variability of Soil Electrical Conductivity. In: *Pedosphere*, Vol. 17, Nr. 2. S. 156-164.
- LIU, D.L., K.R. HELYAR, M.K. CONYERS, R. FISHER und G.J. POILE, 2004: Response of wheat, triticale and barley to lime application in semi-arid soils. In: *Field Crops Research*, Vol. 90, Nr. 2-3. S. 287-301.
- LISSE, H., 2003: GPS-gestützte Teilflächenbewirtschaftung. In: *RKL-Schrift 4.1.0*. S. 1123-1143.
- LÓPEZ-FANDO, C. und M.T. PARDO, 2009: Changes in soil chemical characteristics with different tillage

- practices in a semi-arid environment. In: *Soil and Tillage Research*, Vol. 104, Nr. 2. S. 278-284.
- LÓPEZ-GRANADOS, F., M. JURADO-EXPÓSITO, S. ATENCIANO, A. GARCÍA-FERRER, M. SÁNCHEZ DE LA ORDEN und L. GARCÍA-TORRES, 2002: Spatial variability of agricultural soil parameters in southern Spain. In: *Plant and Soil*, Vol. 246, Nr. 1. S. 97-105.
- LORENZ, R. J., 1996: Grundbegriffe der Biometrie. 4. Auflage, Gustav-Fischer-Verlag, Stuttgart. Tübingen.
- LORENZ, F. und J. BOESS, 2010: Das Potential des Bodens optimal nutzen mit der Hofbodenkarte. In: *Pressemitteilung „DLG-Feldtage vom 15.-17.6. 2010“*, Springe-Mittelrode.
- LOWENBERG-DEBOER, J. und S.M. SWINTON, 1997: Economics of Site-Specific Management in Agronomic Crops. In: PIERCE, F.J. und E.J. SADLER (Hrsg.): *The State of Site Specific Management for Agriculture*. ASA-CSSA und SSSA, Madison, USA. S. 369-396.
- LUCHIARI, A., J. SHANAHAN, D. FRANCIS, M. SCHLEMMER, J. SCHEPERS, M. LIEBIG, A. SCHEPERS und S. PAYTON, 2000: Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture*, 16.-19.7.2000, Minneapolis, Minnesota, USA.
- LÜCK, E. und R. GEBBERS, 2007: Evaluierung der Messmethoden zur Leitfähigkeitskartierung im Feldmaßstab – Abschlussbericht. Potsdam.
- LUND, E. D., K.L. COLLINGS, P.E. DRUMMOND und C.D. CHRISTY, 2004: Managing pH Variability with On-The-Go pH Mapping. In: *Proceedings of the Seventh International Conference on Precision Agriculture*, 23.-26.7.2004, Minneapolis, Minnesota, USA.
- LUND, E. D., V.I. ADAMCHUK, K.L. COLLINGS, P.E. DRUMMOND und C.D. CHRISTY, 2005: Development of soil pH and lime requirement maps using on-the-go soil sensors. In: J.V. STAFFORD (Hrsg.): *Precision Agriculture (2005) – Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture*, 9.-12.6.2005, Uppsala, Sweden, Wageningen Academic Publishers, Niederlande. S. 457-464.
- LÜTKE ENTRUP, N. und J. OEHMICHEN, 2006: Lehrbuch des Pflanzenbaus – Band 1: Grundlagen. 3. Auflage. Soest.
- MAHLER, R.L. und R.E. MCDOLE, 1987: Effect of Soil pH on Crop Yield in Northern Idaho. In: *Agronomy Journal*, Vol. 79, Nr. 4. S. 751-755.
- MALLARINO, A.P., 1996: Spatial Variability Patterns of Phosphorus and Potassium in No-Tilled Soils for Two Sampling Scales. In: *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 60, Nr. 5. S. 1473-1481.
- MALLARINO, A.P. und D.J. WITTRY, 2000: Identifying cost-effective soil sampling schemes for variable-rate Fertilization and Liming. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture*, 16.-19.7.2000, Minneapolis, Minnesota, USA.
- MARTH, C., 1995: Erfassung kleinräumiger pH-Heterogenität im Boden mit Hilfe von Antimon-Mikroelektrodenmatrices. In: *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme*, Reihe A, Band 126. Dissertation, Eigenverlag. Göttingen.
- MATHERON, G., 1971: The Theory of Regionalized Variables and Its Applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Nr.5, École Nationale Supérieure des Mi-

- nes de Paris. Frankreich. Letzter Zugriff: 23.02.2013, http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/public/MATHERON_Ouvrage_00167.pdf
- MATSCHULLAT, J., H.J. TOBSCHALL und H.-J. VOIGT, 1997: Geochemie und Umwelt – Relevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- MCKINION, J.M., J.L. WILLERS und J.N. JENKINS, 2010: Spatial analyses to evaluate multi-crop yield stability for a field. In: *Computers and Electronics*, Vol. 70, Nr. 1. S. 187-198.
- MERBACH, W. und A. DEUBEL, 2007: Die Dauerdüngungsversuche in Halle (Saale) – ein Überblick. Eigenverlag, Halle (Saale).
- MERBACH, W., L. SCHMIDT und L. WITTENMAYER, 1999: Die Dauerdüngungsversuche in Halle (Saale) – Beiträge aus der Hallenser Pflanzenernährungsforschung. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig.
- MENTZEL, S., 2011: persönliche Gebührenauskunft. Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt. Halle.
- MIČA, B., 1986: Einfluß von Calcium auf Gehalt und Ertrag an Trockensubstanz und Stärke bei Kartoffeln. In: *Starch – Stärke*, Vol. 38, Nr. 10. S. 342-345.
- MIRSCHER, W., R. WIELAND, K.-O. WENKEL, C. NENDEL und C. GUDDAT, 2014: YIELDSTAT – A spatial yield model for agricultural crops. In: *European Journal of Agronomy*, Vol. 52, Part A. S. 33-46.
- MOIR, J.L. und D.J. MOOT, 2010: Soil pH, exchangeable aluminium and lucerne yield responses to lime in a South Island high country soil. In: *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 72nd New Zealand Grassland Association Conference, 14.-18.11.2010, Lincoln, Neuseeland.
- MOLIN, J.P. und L.A.A. MENEGATTI, 2002: Methodology for identification, characterization and removal of errors on yield maps. In: *ASAE Annual International Meeting*. Chicago, Illinois, USA. Paper No.: 021168.
- MOORE, S.H. und M.C. WOLCOTT, 2000: Using Yield Maps to Create Management Zones in Field Crops. In: *Louisiana Agriculture – The Magazine of the Louisiana Agricultural Experiment Station*, Vol. 43, Nr. 3. S. 12-13.
- MOORE, I.D., P.E. GESSLER, G.A. NIELSEN und G.A. PETERSON, 1993: Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. In: *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 52, Nr. 2. S. 443-452.
- MOORE, I.D., R.B. GRAYSON und A.R. LADSON, 1991: Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. In: *Hydrological Processes*, Vol. 5, Nr. 1. S. 3-30.
- MOORE, M., 1998: An Investigation into the accuracy of yield maps and their subsequent use in crop management. *Dissertation*. Cranfield, Großbritannien.
- MORAL, F.J., J.M. TERRÓN und J.R. DA SILVA, 2010: Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. In: *Soil and Tillage Research*, Vol. 106, Nr. 2. S. 335-343.
- MULLA, D.J. und A.B. MCBRATNEY, 2002: Soil Spatial Variability. In: WARRICK, A.W. (Hrsg.): *Soil Physics Companion*, CRC Verlag, Boca Raton, USA. S. 343-374.

- MULLA, D.J., A.C. SEKELY und M. BEATTY, 2000: Evaluation of Remote Sensing and Targeted Soil Sampling for Variable Rate Application of Nitrogen. In: ISPA (International Society of Precision Agriculture, Hrsg.): *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*, 16-19.7.2000, Bloomington, Minnesota, USA. S. 1-15.
- MUNZERT, M., G. KIERLING, W. ÜBELHÖR, L. NÄTSCHER und K.-H. NEUBERT, 2007: Expanded measurement uncertainty of soil parameters derived from proficiency-testing data. In: *Plant Nutrition and Soil Science*, Vol. 170, Nr. 6. S. 722-728.
- MURANYI, A., B. SEELING, E. LADEWIG und A. JUNGK, 1994: Acidification in the Rhizosphere of Rape Seedlings and in Bulk Soil by Nitrification and Ammonium Uptake. In: *Plant Nutrition and Soil Science*, Vol. 157, Nr. 1. S. 61-65.
- NOACK, P., 2006: Entwicklung fahrspurbasierter Algorithmen zur Korrektur von Ertragsdaten im Precision Farming. *Dissertation*. München.
- OLFS, H.-W., A. BORCHERT, D. DABELT, G. RECKE und D. TRAUTZ, 2012a: Economic evaluation of a variable lime application strategy based on soil pH maps derived from on-the-go measurements under German conditions. In: ISPA (International Society of Precision Agriculture, Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Conference on Precision Agriculture*, 15.-18.7.2012, Indianapolis, Indiana, USA.
- OLFS, H.-W., A. BORCHERT und D. TRAUTZ, 2012b: Soil pH maps derived from on-the-go pH-measurements as basis for variable lime application under German conditions: concept development and evaluation in field trials. In: ISPA (International Society of Precision Agriculture, Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Conference on Precision Agriculture*, 15.-18.7.2012, Indianapolis, Indiana, USA.
- OLFS, H.-W., A. BORCHERT und D. TRAUTZ, 2010: Validation of on-the-go soil pH-measurements – primary results from germany. In: ISPA (International Society of Precision Agriculture, Hrsg.): *Proceedings of the 10th International Conference on Precision Agriculture*, 18.-21.7.2010, Denver, Colorado, USA.
- OLFS, H.-W. und D. TRAUTZ, 2009: Einsatz des VERIS MSP Systems zur Online-Erfassung der räumlichen Variabilität der pH-Werte in Ackerböden. In: *Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft – Böden – eine endliche Ressource*, 5.-13.9.2009, Bonn. S. 1-3.
- PASSING, H. und W. BABLOK, 1983: Application of statistical procedures in analytical instrument testing. In: *Automatic Chemistry/Clinical Laboratory Automation*, Vol. 7, Nr. 2. S. 74-79.
- PAGANI, A. und A.P. MALLARINO, 2012: Soil pH and Crop Grain Yield as Affected by the Source and Rate of Lime. In: *Soil Science Society of American Journal*, Vol. 76, Nr. 5. S. 1877-1886.
- PERALTA, N.R. und J.L. COSTA, 2013: Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 99. S. 218-226.
- PEREZ-QUEZADA, J.F., G.S. PETTYGROVE und R.E. PLANT, 2003: Spatial-Temporal Analysis of Yield and Soil Factors in Two Four-Crop-Rotation Fields in the Sacramento Valley, California. In: *Agronomy*, Vol. 95, Nr. 3. S. 676-687.

- PING, J.L. und A. DOBERMAN, 2005: Processing of Yield Map Data. In: *Precision Agriculture*, Vol. 6, Nr. 2. S. 193-212.
- PIERCE, F.J. und P. NOWAK, 1999: Aspects of Precision Agriculture. In: *Advances in Agronomy*, Vol. 67, Nr. 1. S. 1-85.
- POCKNEE, S., B.C. BOYDELL, H.M. GREEN, D.J. WATERS und C.K. KVEIN, 1996: Directed Soil Sampling. In: ROBERT P.C., R.H. RUST und W.E. LARSON (Hrsg.): *Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture*, 23.-26.6.1996, Minneapolis, Minnesota, USA. S. 159-168.
- PONITKA, J. und J. PÖRNECK, 2006: Untersuchungen zur Teilflächenbewirtschaftung – Untersuchungen zur Anwendung ausgewählter teilflächenspezifischer Bewirtschaftungsmethoden am Beispiel eines Auenstandortes der Elbe. In: *Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft*, Heft 18/2006, Eigenverlag, Dresden.
- PÖSE, G., 2013: persönliche Auskunft zur Ackerschlagkartei des Versuchschlags „Goerzig 550“.
- QUAAS, G., 2009: Vergleich makroökonomischer Modelle – Fehlermaße. Vorlesungsskript, www.georg-quaas.de/modellvergleich.pdf, letzter Zugriff am 8.5.2012. Leipzig.
- RANDS, M., 1995: The Development of an Expert Filter to Improve the Quality of Yield Mapping Data. unveröffentlichte Masterarbeit. Silsoe, England.
- REX, M., 2000: Auswirkungen langjähriger Anwendung von silikatischen Düngekalken auf Parameter der Bodenfruchtbarkeit. In: *VDLUFA-Schriftenreihe 55 – Teil 6 „Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit, Ökolandbau, Freie Themen“*, 19.-22.9.2000, 112. VDLUFA-Kongress, Stuttgart, VDLUFA-Verlag, Darmstadt. S. 211-219.
- RHODES, J.D. und R.D. INGVALSON, 1971: Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. In: *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 35, Nr. 1. S. 54-60.
- ROBERT, P.C., 2002: Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. In: *Plant and Soil*, Vol. 247, Nr. 1. S. 143-149.
- RODRIGUES, M.S., E.M. GIANELLO, B. MIJATOVIĆ, E.A. RIENZI, T.G. MUELLER und A. CASTRIGNANÒ, 2012: On-The-Go pH Sensor: An evaluation in a Kentucky field. In: ISPA (International Society of Precision Agriculture, Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Conference on Precision Agriculture*, 15.-18.7.2012, Indianapolis, Indiana, USA.
- RÖMBKE, J., 1997: Bodenorganismen und Standortfaktoren. In: RÖMBKE, J., L. BECK, B. FÖRSTER, H-C. FRÜND, F. HORAK, A. RUF, C. ROSCICZWESKI, M. SCHEURIG und S. WOAS (Hrsg.): *Boden als Lebensraum für Bodenorganismen bodenbiologische Standortklassifikation – Literaturstudie*, Eigenverlag, Karlsruhe. S. 42-150.
- ROSSEL, R.A.V., M. GILBERTSON, L. THYLEN, O. HANSEN, S. MCVEY und A.B. MCBRATNEY, 2005: Field measurements of soil pH and lime requirement using an on-the-go soil pH and lime requirement measurement system. In: Stafford, J.V. (Hrsg.): *Precision Agriculture (2005) – Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture*, 9.-12.6.2005, Uppsala, Sweden, Wageningen Academic Publishers, Niederlande. S. 511-519.
- ROSSEL, R.A.V. und C. WALTER, 2004: Rapid, quantitative and spatial field measurements of soil pH using an Ion Sensitive Field Effect Transistor. In: *Geoderma*, Vol. 119, Nr. 1-2. S. 9-20.

- RÖTSCHER, T., 2012: Aussagewert der Bodenschätzung für den Pflanzenbau – Möglichkeit der Ableitung von Ertragspotenzialzonen für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung aus digitalen Daten der Bodenschätzung, als Ergebnis der Auswertung mehrjähriger Ertragskartierung am Mähdrescher. *Dissertation*. Halle.
- ROWELL, D.L., 1997: *Bodenkunde – Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. Reading.
- SACHS, L., 1993: *Statistische Methoden 2 – Planung und Auswertung*. 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. Klausdorf.
- SACHS, L., 2003: *Angewandte Statistik*. 11. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. Klausdorf.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE, 2015: Bodenübersichtskarte Sachsen 1 : 400.000 (BÜK400).
In: <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/26191.htm#article26222> (letzter Zugriff: 20.01.2015), Dresden.
- SETHURAMASAMYRAJA, B., V. I. ADAMCHUK, A. DOBERMANN, D.B. MARX, D.D. JONES und G.E. MEYER, 2008: Agitated soil measurement method for integrated on-the-go mapping of soil pH, potassium and nitrate contents. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 60, Nr. 2. S. 212-225.
- SCHALLER, G. und W. R. FISCHER, 1981: Die Verwendung von Antimon-Elektroden zur pH-Messung in Böden. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, Vol. 144, Nr. 2. S. 197-204.
- SCHAUPPENLEHNER, T., 2008: Geostatistische Analysen zur Integration von Geländemodellen und Bodenschätzungsdaten für verbesserte digitale Bodenkarten am Beispiel einer alluvialen Landschaft. *Dissertation*. Wien.
- SCHILLING, G., 2000: *Pflanzenernährung und Düngung*. 4. Auflage, Ulmer-Verlag, Stuttgart. Halle.
- SCHIRRMANN, M., R. GEBBERS, E. KRAMER und J. SEIDEL, 2011: Soil pH Mapping with an On-The-Go Sensor. In: *Sensors*, Vol. 11, Nr.1. S. 573-598.
- SCHLIEPHAKE, W., 2011: Teilflächendüngung auf trockenen Standorten – Anforderungen an eine teilflächenspezifische N-Düngung unter besonderer Berücksichtigung einer umweltorientierten Nährstoffversorgung auf trockenen Standorten. In: *Schriftenreihe des Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie*, Heft 17/2011, Eigenverlag. Dresden.
- SCHMALFUSS, K., 1958: *Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 8. Auflage, S. Hirzel Verlag, Leipzig. Halle.
- SCHMERLER, J., 2001: Es rechnet sich. In: *Agrarmarkt*, Nr. 7. S. 26-29.
- SCHMIDT, F., 2001: Generation and analysis of digital terrain models for agricultural applications. In: GRENIER, G. und S. BLACKMORE (Hrsg.): *Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture*, 18.-20.6.2001, agro Montpellier, Montpellier, Frankreich. S. 109-113.
- SCHMIDT, F., 2003: Hochgenaue Digitale Geländemodelle – Untersuchungen zur Erstellung, Analyse und Anwendung in der Landwirtschaft. *Dissertation*. Rostock.
- SCHMIDT, L., L. WITTENMAYER, W. MERBACH und J. GARZ, 2004: Exkursionsführer zu den Dauerdüngungsversuchen auf dem Julius-Kühn-Versuchsfeld in Halle (Saale). Eigenverlag, Halle (Saale).

- SCHMIDT, U., H. THÖNI und M. KAUPENJOHANN, 2000: Using a boundary line approach to analyze N₂O flux data from agricultural soils. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Vol. 57, Nr. 2. S. 119-129.
- SCHMIDHALTER, U., T. SELIGE und J. BOBERT, 2004: Geophysikalische und fernerkundliche Ermittlung teilflächenspezifischer Ertragspotenziale auf der Grundlage des Wasserhaushaltes. In: KTBL (Hrsg.): *Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau*, Abschlussbericht – Verbundprojekt „pre agro“, 2004, Darmstadt. S. 239-291.
- SCHNEIDER, M., 2011: Ökonomische Potenziale von Precision Farming unter Risikoaspekten. *Dissertation*. Halle.
- SCHNEIDER, S., 2009: Ertragskarten im Precision Farming – zeitliche Stabilität verschiedener Standorte. *Diplomarbeit*. Halle.
- SCHNUG, E., J. HEYM und D.P. MURPHY, 1994: Boundary Line Determination Technique (BOLIDES). In: ROBERT, P.C., R.H. RUST und W.E. LARSON (Hrsg.): *Proceedings of Site-Specific Management for Agricultural Systems*, 27.-30.3.1994, Minneapolis, Minnesota, USA. S. 899-908.
- SEEBOLDT, M., 1983: Beitrag zur Quantifizierung von Beziehungen zwischen ausgewählten Bodenfruchtbarkeitskennziffern (BFK) und Verfahren zur Reproduktion der Bodenfruchtbarkeit auf sandigen Böden. *Dissertation*. Müncheberg (Mark).
- SHATAR, T.M. und A.B. MCBRATNEY, 2004: Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. In: *Agricultural Sciences*, Vol. 142, Nr. 5. S. 553-560.
- SHEARER, S.A., J.P. FULTON, S.G. MCNEILL, S.F. HIGGINS und T.G. MUELLER, 1999: Elements of Precision Agriculture: Basics of Yield Monitor Installation and Operation. In: *PA-1*, Kentucky Cooperative Extension Service, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA. S. 1-9.
- SILVA, C.A., A.C.C. BERNARDI, P.L.O.A. MACHADO, M.S.P. MEIRELLES und C.A.F.S. CARMO, 2001: Relationships between georeferenced soybean yield and soil fertility properties (Paraná State, Brazil). In: GRENIER, G. und S. BLACKMORE (Hrsg.): *Third European Conference on Precision Agriculture*, 18.-20.6.2001, agro Montpellier, Montpellier, Frankreich. S. 857-862.
- SMITH, H.F., 1938: An empirical law describing heterogeneity in the yields of agricultural crops. In: *Journal of Agricultural Science*, Vol. 28, Nr. 1. S. 1-23.
- SOIL ATLAS OF EUROPE, 2005: Additional Information – Glossary of soil terms. Hrsg.: European Soil Bureau Network, European Commission – Office for Official Publications of the European Communities. Luxemburg.
- SØRENSEN, R., U. ZINKO und J. SEIBERT, 2006: On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10, Nr. 1. S. 101-112.
- STAFFORD, J.V., B. AMBLER, R.M. LARK und J. CATT, 1996: Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. In: *Computers and Electronics*, Vol. 14, Nr. 2-3. S. 101-119.
- STAGGENBORG S., M. CARIGNANO und L. HAAG, 2007: Predicting Soil pH and Buffer pH In Situ with a Real-Time Sensor. In: *Agronomy Journal*, Vol. 99, Nr. 3. S. 854-861.
- STAUGAITIS, G., J. MAŽVILA und D. ŠUMSKIS, 2010: Spatial distribution of pH data on the digital maps as

- affected by different soil sampling methods. In: *Žemdirbystė=Agriculture*, Vol. 97, Nr. 3. S. 117-130.
- STAUGAITIS, G. und D. ŠUMSKIS, 2011: Spatial variability of soil pH as influenced by different soil sampling methods and geostatistical techniques. In: *Žemdirbystė=Agriculture*, Vol. 98, Nr. 3. S. 323-332.
- STEINMAYR, T., 2002: Fehleranalyse und Fehlerkorrektur bei der lokalen Ertragsermittlung im Mähdreher zur Ableitung eines standardisierten Algorithmus für die Ertragskartierung. *Dissertation*. München.
- STĘPHIEN, M., D. GOZDOWSKI und S. SAMBORSKI, 2013: A case study on the estimation accuracy of soil properties and fertilizer rates for different soil-sampling grids. In: *Plant Nutrition and Soil Science*, Vol. 176, Nr. 1. S. 57-68.
- TAYLOR, R.K., D.L. KASTENS und T.L. KASTENS, 2000: Creating Yield Maps from Yield Monitoring Data using Multi Purpose Grid Mapping (MPGM). In: *Proceedings of the fifth International Conference on Precision Agriculture and other Precision Resources Management*, 16.-20.7.2000, Minneapolis, Minnesota, USA.
- TAYLOR, J.C., G.A. WOOD, R. EARL und R.J. GODWIN, 2003: Soil Factors and their Influence on Within-field Crop Variability, Part II: Spatial Analysis and Determination of Management Zones. In: *Biosystems Engineering*, Vol. 84, Nr. 4. S. 441-453.
- THIEME, C., 2009: Validierung der ‚Veris Mobile Sensor Platform‘ zur kleinräumigen pH-Wert-Kartierung auf Ackerland. *Masterarbeit*. Eberswalde.
- THOMPSON, A.N., J.N. SHAW, P.L. MASK, J.T. TOUCHTON und D. RICKMAN, 2004: Soil Sampling Techniques for Alabama, USA Grain Fields. In: *Precision Agriculture*, Vol. 5, Nr. 4. S. 345-358.
- THYLEN, L., P.A. ALGERBO und A. GIEBEL, 2000: An Expert Filter Removing Erroneous Yielddata. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture*, 16.-20.7.2000, Minneapolis, Minnesota, USA.
- TILMAN, D., C. BALZER, J. HILL und B.L. BEFORT, 2011: Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 108, Nr. 50. S. 20260-20264.
- TIMLIN, D.J., Y. PACHEPSKY, V.A. SNYDER und R.B. BRYANT, 1998: Spatial and Temporal Variability of Corn Grain Yield on a Hillslope. In: *Soil Science Society of American Journal*, Vol. 62, Nr. 3. S. 764-773.
- TREUE, P., 2003: Potenziale und Grenzen teilflächenspezifischer N-Düngung in Schleswig-Holstein / Precision Agriculture. In: *Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung*, Nr. 29. *Dissertation*. Kiel.
- TLL, 2006: Getreideeinheitenschlüssel. Hrsg.: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena.
- ÜBELHÖR, W., S. GRIMM und U. KLINGENBERG, 2012a: Auswertung des länderübergreifenden Ringversuchs LÜRV – A – Boden – 2012 nach Fachmodul Abfall. Hrsg.: Landwirtschaftliches Technologiezentrum (LTZ) Augustenberg, Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUF) der Landwirtschaftsberatung Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein

- GmbH (LMS), 2. Auflage. Augustenberg und Rostock.
- ÜBELHÖR, W., H. HARTWIG und L. NÄTSCHER, 2012b: Aus Ringversuchen abgeleitete Messunsicherheiten von Parametern der Boden- und Substrat-Analytik. In: VDLUFA (Hrsg.): *Methodenbuch – Band I, Die Untersuchung von Böden – Anhang E5 Ermittlung von Messunsicherheiten*, 6. Teillieferung, Eigenverlag, Darmstadt.
- VDLUFA, 1991: *Methodenbuch – Band I, Die Untersuchung von Böden, Methode: A.5.1.1.. 4. Auflage*, Hrsg.: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Eigenverlag, Darmstadt.
- VDLUFA, 2000a: Standpunkt – Georeferenzierte Bodenprobenahme auf landwirtschaftlichen Flächen als Grundlage für eine teilflächenspezifische Düngung mit Grundnährstoffen. In: KAPE, H.-E. et al. (Hrsg.): *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten*, Eigenverlag, Darmstadt.
- VDLUFA, 2000b: STANDPUNKT – Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. In: KERSCHBERGER, M. et al. (Hrsg.): *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten*, Eigenverlag, Darmstadt.
- VERIS-TECHNOLOGIES, 2008: Betriebsanleitung – 2000XA, 3100, 3150 Soil EC Mapping Systems. Salinas, Kansas, USA.
- VIEIRA, S.R. und J.P. MOLIN, 2001: Spatial variability of soil fertility for Precision Agriculture. In: GRENIER, G. und S. BLACKMORE (Hrsg.): *Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture*, 18.-20.6.2001, agro Montpellier, Montpellier, Frankreich. S. 491-496.
- VON DETTEN, P., O. FAUDE und T. MEYER, 2008: Leitfaden zur statistischen Auswertung von empirischen Studien. Eigenverlag, Paderborn.
- VON WULFFEN, U., M. ROSCHKE und H.-E. KAPE, 2007: Richtwerte für die Untersuchung und Beratung sowie zur fachlichen Umsetzung der Düngeverordnung – Gemeinsame Hinweise der Länder Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt zur Umsetzung der novellierten Düngeverordnung (Stand: 01.04.2007). Hrsg.: Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau des Landes Sachsen-Anhalt, Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung – Referat Acker- und Pflanzenbau, Landwirtschaftliche Fachbehörde des Landes Mecklenburg-Vorpommern. Bernburg, Güterfelde, Rostock.
- VORBERG, D. und S. BLANKENBERGER, 1999: Die Auswahl statistischer Tests und Maße. In: *Psychologische Rundschau*, Vol. 50, Nr. 4. S. 157-164.
- WAGNER, P., 2004: Wirtschaftlichkeit von Precision Farming – Methoden und Möglichkeiten der Wirtschaftlichkeitsüberprüfung im landwirtschaftlichen Unternehmen. In: HUFNAGEL, J., R. HERBST, A. JARFE und A. WERNER (Hrsg.): *Precision Farming – Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis*, KTBL-Schrift 419, Landwirtschaftsverlag, Münster. Darmstadt. S. 6-31 bis 6-53.
- WANG, D., T. PRATO, Z. QIU, R.K. NEWELL und K.A. SUDDUTH, 2003: Economic and Environmental Evaluation of Variable Rate Nitrogen and Lime Application for Claypan Soil Fields. In: *Precision Agriculture*, Vol. 4, Nr. 1. S. 35-52.
- WEBB, R.A., 1972: Use of the Boundary Line in the Analysis of Biological Data. In: *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, Vol. 47, Nr. 2. S. 309-320.

- WEBSTER, R. und B.E. BUTLER, 1976: Soil Classification and Survey Studies at Ginninderra. In: *Australian Journal of Soil Research*, Vol. 14, Nr. 1. S. 1-24.
- WEBSTER, R. und M.A. OLIVER, 2007: *Geostatistics for Environmental Scientists*. 2. Auflage, John-Wiley & Sons – Verlag, Hoboken, New Jersey, USA.
- WEISZ, R., R. HEINIGER, J.G. WHITE, B. KNOX und L. REED, 2003: Long-Term Variable Rate Lime and Phosphorus Application for Piedmont No-Till Field Crops. In: *Precision Agriculture*, Vol. 4, Nr. 3. S. 311-330.
- WELLS, K.L. und V. CASE, 1995: Variability in Soil Testing. In: *Agronomy Notes*, Vol. 28, Nr. 9. S. 1-3.
- WERNER, W. und M. TRIMBORN, 2008: Potentiale zur Effizienzsteigerung in der Phosphor-Düngung. In: *Ressourcen schonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft*, Braunschweiger Nährstofftage vom 10.-11.11.2008, Braunschweig.
- WINTER, I., 2012: persönliche Auskunft am 10.9.2012, Althen.
- WOLLENHAUPT, N.C., D.J. MULLA und C.A. GOTWAY CRAWFORD, 1997: Soil Sampling and Interpolation Techniques for Mapping Spatial Variability of Soil Properties. In: PIERCE, F.J. und E.J. SADLER (Hrsg.): *The State of Site Specific Management for Agriculture*. ASA-CSSA und SSSA, Madison, USA. S. 19-53.
- WUSSOW, J., 2008: Julius Kühn – Biografie. Hrsg.: Museum für Haustierkunde „Julius Kühn“ Halle (Saale), Eigenverlag, Halle (Saale). S. 1-4.
- YOU DEN, W.J. und A. MEHLICH, 1937: Selection of efficient methods for soil sampling. In: *Contributions from Boyce Thompson Institute*, Vol. 9. S. 59-70.
- ZELLES, L., K. STEPPER und A. ZSOLNAY, 1990: The effects of lime on microbial activity in spruce (*Picea abies* L.) forests. In: *Biology and Fertility of Soils*, Vol. 9, Nr. 1. S. 78-92.
- ZHANG, N., M. WANG und N. WANG, 2002: Precision agriculture – a worldwide overview. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 36, Nr. 2-3. S. 113-132.
- ZIMMERMANN, K., 2006: Analytik zum Förderprogramm „Umweltschonender Anbau von Gemüse in Sachsen-Anhalt“ – Auswertung des Ringversuchs 2006. Hrsg.: Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau des Landes Sachsen-Anhalt, Eigenverlag, Bernburg.
- ZORN, W., 2001: Nährstoffmangel auf Praxisfeldern in Thüringen. In: Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): *Thüringer Düngungstagung 2000*, Heft 12/2001, Eigenverlag, Jena.
- ZORN, W., H. HEß und H. SCHRÖTER, 2007: Aktuelle Aspekte zur Düngungsstrategie bei Winterraps. 12. Thüringer Rapstag der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Pfiffelbach (<http://www.tll.de/ainfo/html/rapstag.htm>, letzter Zugriff: 11.01.2014), Jena.

8 Anhangsverzeichnis

- Anhang A2-1-1: Ergebnisse einer Literaturrecherche zur Auswirkung einer Kalkung oder Unterlassung der Kalkung auf den Ertrag von Ackerbaukulturen
- Anhang A2-1-2: pH-abhängige Sojabohnen- und Winterweizenerträge (entnommen aus: WEISZ et al., 2003: 320)
- Anhang A2-1-3: Ertragswirkungen einer Unterlassung der Kalkung (als grafische Darstellung, Datengrundlage: A2-1-1)
- Anhang A2-1-4: Ertragswirkungen einer Kalkung (als grafische Darstellung, Datengrundlage: A2-1-1)
- Anhang A2-2: Grundlagen der Entscheidungsregeln der Kalkdüngung (entnommen von: VON WULFFEN et al. (2007: 14ff)
- Anhang A2-4-1: Berechnungen der fixen und variablen Kosten für die Verfahren der Bodenbe-
probung nach ADAMCHUK (2007: 78ff)
- Anhang A3-1-2: Verrechnung der Nährstoffergebnisse von 27-m- auf 36-m-Pflegesystem
- Anhang A3-1-3: Standortbeschreibung der Wetterstationen der Praxisschläge
- Anhang A3-4-1-3: Getreideeinheitenschlüssel
- Anhang A3-6-2: Dreijährige Durchschnittspreise von Phosphat und Kalk
- Anhang A3-6-6-1: Ertragsfunktionen in Abhängigkeit der Bodengruppen
- Anhang A3-6-6-2: Mittlere zu erwartende Relativerträge und Grenzen der Relativerträge für kal-
kanspruchsvolle und kalkanspruchlose Fruchtarten (gültig für Bodengruppe II)
- Anhang A3-6-6-3: Mittlere zu erwartende Relativerträge und Grenzen der Relativerträge für kal-
kanspruchsvolle und kalkanspruchlose Fruchtarten (gültig für Bodengruppe III)
- Anhang A3-6-6-4: Mittlere zu erwartende Relativerträge und Grenzen der Relativerträge für kal-
kanspruchsvolle und kalkanspruchlose Fruchtarten (gültig für Bodengruppe
IV)
- Anhang A4-1-7: Ergebnisse der angepassten pH-Werte des Verissensors nach den verschiede-
nen Kalibrieransätzen sowie deren Bland-Altman-Plots
- Anhang A4-2: SAS-Auswertung Vorfrucht
- Anhang A4-2-1: SAS-Auswertung Sommergerste
- Anhang A4-2-2: SAS-Auswertung Ackerbohne
- Anhang A4-3-2-1: SAS-Auswertung für den Versuchsschlag „550“
- Anhang A4-3-2-2: SAS-Auswertung für den Versuchsschlag „Lange Winde“
- Anhang A4-3-2-3: Durchschnittserträge von Wintergerste, Winterweizen und Winterraps für
Deutschland
- Anhang A4-4-1-7: Erläuterung zur Kostenkalkulation für den Verissensor
- Anhang A4-4-2-2-2a: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „110“, Standort Althen zum Bepro-
bungszeitpunkt 14.10.2010
- Anhang A4-4-2-2-2b: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „110“, Standort Althen zum Bepro-
bungszeitpunkt 13.09.2011
- Anhang A4-4-2-2-2c: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „110“, Standort Althen zum Bepro-
bungszeitpunkt 14.08.2012
- Anhang A4-4-2-2-2d: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Deutsches Feld“, Standort Krosigk
zum Beprobungszeitpunkt 20. bis 22.09.2011
- Anhang A4-4-2-2-2e: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Kuhberg“, Standort Dennheritz
zum Beprobungszeitpunkt 06.08.2011
- Anhang A4-4-2-2-2f: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Maststall“, Standort Dennheritz
zum Beprobungszeitpunkt 22.07.2011
- Anhang A4-4-2-2-2g: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Maststall“, Standort Dennheritz
zum Beprobungszeitpunkt 25.07.2011
- Anhang A4-4-2-2-2h: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Lange Welle“, Standort Denn-
heritz zum Beprobungszeitpunkt 24.07.2011

- Anhang A4-4-2-2-2i: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Lange Winde“, Standort Warnstedt zum Beprobungszeitpunkt 16.09.2011
- Anhang A4-4-2-2-2j: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Rieder I“, Standort Warnstedt zum Beprobungszeitpunkt 15.09.2011
- Anhang A4-4-2-2-2k: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Rieder II“, Standort Warnstedt zum Beprobungszeitpunkt 15.09.2011
- Anhang A4-4-2-2-2l: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Dölzig I“, Standort Starsiedel zum Beprobungszeitpunkt 19.10.2010
- Anhang A4-4-2-2-2m: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Dölzig II“, Standort Starsiedel zum Beprobungszeitpunkt 19.10.2010
- Anhang A4-4-2-2-4: prozentualer Anteil der Fruchtarten innerhalb der Fruchtfolge der landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland

9 Anhang

Anhang A2-1-1: Ergebnisse einer Literaturrecherche zur Auswirkung einer Kalkung oder Unterlassung der Kalkung auf den Ertrag von Ackerbaukulturen

Quelle	Fruchtart	Unterlassung einer Kalkung			Auswirkung einer Kalkung		
		prozentuale Wirkungen untere Grenze	prozentuale Wirkungen Mittelwert	prozentuale Wirkungen obere Grenze	prozentuale Wirkungen untere Grenze	prozentuale Wirkungen Mittelwert	prozentuale Wirkungen obere Grenze
1	Sommergerste	-100%		-80%			
1	Silomais		-34%				
1	Kartoffeln		-22%				
2	Körnermais					14%	
3	Wintergerste					467%	
3	Weizen				95%		227%
3	Raps						38%
3	Körnermais					14%	
4	Wintergerste	-75%		-91%			
4	Triticale	-47%		-69%			
4	Weizen	-46%		-73%			
5	Kartoffeln					18%	
6	Sojabohnen				0%		12%
6	Körnermais				0%		24%
7	Körnermais				0%		2%
7	Sojabohnen				0%		0%
8	zusammengefasst				6%		9%
9	Winterweizen, Sojabohnen				s. Abb. A2.1.1		
10	zusammengefasst			-100%			
11	Kartoffeln				0%		0%
11	Sommergerste				0%		0%
11	Ackerbohnen		-5%				
11	Zuckerrüben		-10%				
12	Wintergerste				0%		0%
12	Winterweizen				0%		0%
12	Sommerweizen				0%		0%
13	Winterweizen					2%	
13	Wintergerste					5%	
14	Körnermais				2%	11%	25%
15	(a)	-50%		-30%			
15	(b)	-30%		-20%			
15	(c)	-20%		-10%			
15	(d)	-10%		0%			
16	Luzerne		-77%				
16	Körnermais	-84%		-30%			
16	Sojabohnen	-45%		-22%			
17	Rüben		-50%				
17	Sommergerste		-40%				
17	Wintergerste		-40%				
17	Mais		-30%				
17	Rotklee, Luzern		-25%				
17	Hafer		-20%				
17	Winterweizen		-15%				
17	Winterroggen		-15%				
17	Kartoffeln		-10%				
18	Kartoffeln		-5%				
18	Roggen		-6%				
18	Rotklee		-18%				
18	Sommergerste		-23%				
18	Futterrüben		-27%				
18	Zuckerrüben		-27%				
19	Kartoffeln	-30%		-10%			
20	Zuckerrohr				0%		17%

Quelle	Fruchtart	Unterlassung einer Kalkung		Auswirkung einer Kalkung		
		prozentuale Wirkungen untere Grenze	prozentuale Wirkungen Mittelwert	prozentuale Wirkungen obere Grenze	prozentuale Wirkungen untere Grenze	prozentuale Wirkungen Mittelwert
Ergebnisse beobachteter pH-abhängiger Ertragsfunktion						
		Funktion niedriger pH-Bereich		Funktion optimaler pH-Bereich		Funktion hoher pH-Bereich
21	Körnermais	$pH < 6,8; Y = -0,8287 + 0,5318 * pH - 0,0391 * pH^2$		$6,8 < pH < 7,5; Y = 0,98$		$pH > 7,5; Y = 0,98 - (pH - 7,5) / 10$
21	Sojabohnen	$pH < 6,8; Y = -0,751 + 0,5003 * pH - 0,0367 * pH^2$		$6,8 < pH < 7,5; Y = 0,95$		$pH > 7,5; Y = 0,95 - (pH - 7,5) / 10$
22	Körnermais	$pH < 6,8; Y = -6,89 + 4,42 * pH - 0,325 * pH^2$		$6,8 < pH < 7,5; Y = 8,15$		$pH > 7,5; Y = 8,15 * (1 - 0,1 * (pH - 7,5))$
22	Sojabohnen	$pH < 6,8; Y = -2,14 + 1,43 * pH - 0,105 * pH^2$		$6,8 < pH < 7,5; Y = 2,72$		$pH > 7,5; Y = 2,72 * (1 - 0,1 * (pH - 7,5))$
23	Körnermais	$2,9 < pH < 5,0; Y = 0,446 * pH - 1,31$		$5,0 < pH < 5,5; Y = 0,16 * pH + 0,12$		$5,5 < pH < 7,5; Y = 1,00$
(a)	Sommergerste, Winterraps, Ackerbohne, Leindotter, Zuckerrübe, Futterrübe, Luzerne					
(b)	Wintergerste, Triticale, Durum, Sommerweizen, Hafer, Sommerraps, Senf, Rotklee					
(c)	Winterweizen, Sommerroggen, Feldgras, Kartoffeln, Wiesenschwingel, Ölrettich, Wicken					
(d)	Winterroggen, Sonnenblume, Krambe, Öllein, Lupine, Erbse, Seradella					

Quellenverzeichnis

Nr.	Quelle
1	BENKENSTEIN, H., M. BAUMECKER, H. PAGEL und W. KRÜGER, 2000: Bodenkennwerte und Erträge von Nährstoffmangelvarianten und nach temporärer Düngung von Mangelvarianten im Thyrower statischen Nährstoffmangelversuch. In: <i>Arch. f. Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde</i> , Vol. 45, Nr. 6. S. 523-538.
2	BOLTON, E.F., V.A. DIRKS und J.W. AYLESWORTH, 1976: Some effects of alfalfa, fertilizer and lime on corn yield in rotations on clay soil during a range of seasonal moisture conditions. In: <i>Canadian J. of Soil Science</i> , Vol. 56, Nr. 1. S. 21-25.
3	CIFU, M., L. XIAONAN, C. ZHIHONG, H. ZHENGYI und M. WANSHU, 2004: Long-term effects of lime application on soil acidity and crop yields on a red soil in Central Zhejiang. In: <i>Plant and Soil</i> , Vol. 265, Nr. 1-2. S. 101-109.
4	LIU, D.L., K.R. HELYAR, M.K. CONYERS, R. FISHER und G.J. POILE, 2004: Response of wheat, triticale and barley to lime application in semi-arid soils. In: <i>Field Crops Research</i> , Vol. 90, Nr. 2-3. S. 287-301.
5	MičA, B., 1986: Einfluß von Calcium auf Gehalt und Ertrag an Trockensubstanz und Stärke bei Kartoffeln. In: <i>Starch – Stärke</i> , Vol. 38, Nr. 10. S. 342-345.
6	PAGANI, A. und A.P. MALLARINO, 2012: Soil pH and Crop Grain Yield as Affected by the Source and Rate of Lime. In: <i>Soil Science Society of American Journal</i> , Vol. 76, Nr. 5. S. 1877-1886.
7	BIANCHINI, A.A. und A.P. MALLARINO, 2002: Soil-Sampling Alternatives and Variable-Rate Liming for a Soybean-Corn Rotation. In: <i>Agronomy Journal</i> , Vol. 94, Nr. 6. S. 1355-1366.
8	REX, M., 2000: Auswirkungen langjähriger Anwendung von silikatischen Düngekalken auf Parameter der Bodenfertbarkeit. In: <i>VDLUFA-Schriftenreihe 55 – Teil 6 „Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit, Ökolandbau, Freie Themen“</i> , 19.-22.9.2000, 112. VDLUFA-Kongress, Stuttgart, VDLUFA-Verlag, Darmstadt. S. 211-219.
9	WEISZ, R., R. HEINIGER, J.G. WHITE, B. KNOX und L. REED, 2003: Long-Term Variable Rate Lime and Phosphorus Application for Piedmont No-Till Field Crops. In: <i>Precision Agriculture</i> , Vol. 4, Nr. 3. S. 311-330.
10	ZORN, W., 2001: Nährstoffmangel auf Praxisfeldern in Thüringen. In: <i>Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): Thüringer Düngungstagung 2000</i> , Heft 12/2001, Eigenverlag, Jena.
11	MERBACH, W., L. SCHMIDT und L. WITTENMAYER, 1999: Die Dauerdüngungsversuche in Halle (Saale) – Beiträge aus der Hallenser Pflanzenernährungsforschung. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig.
12	BROWN, T.T., R.T. KOENIG, D.R. HUGGINS, J.B. HARSH und R.E. ROSSI, 2008: Lime Effects on Soil Acidity, Crop Yield, and Aluminum Chemistry in Direct-Seeded Cropping Systems. In: <i>Soil Science Society of America Journal</i> , Vol. 72, Nr. 3. S. 634-660.
13	OLFS, H.-W., A. BORCHERT, D. DABELT, G. RECKE und D. TRAUTZ, 2012a: Economic evaluation of a variable lime application strategy based on soil pH maps derived from on-the-go measurements under German conditions. In: <i>ISPA (International Society of Precision Agriculture, Hrsg.): Proceedings of the 11th International Conference on Precision Agriculture</i> , 15.-18.7.2012, Indianapolis, Indiana, USA.
14	FARINA, M.P.W., P. CHANNON und G.R. THIBAUD, 2000: A Comparison of Strategies for Ameliorating Subsoil Acidity: I. Long-Term Growth Effects. In: <i>Soil Science Society of America Journal</i> , Vol. 64, Nr. 2. S. 646-651.
15	KERSCHBERGER, M. und G. MARKS, 2007: Einstellung und Erhaltung eines standorttypischen optimalen pH-Wertes im Boden – Grundvoraussetzung für eine effektive und umweltverträgliche Pflanzenproduktion. In: <i>Berichte über Landwirtschaft</i> , Band 85, Heft 1. S. 56-77.
16	HALL, H.H., 1983: Economic Evaluation of Crop Response to Lime. In: <i>American Journal of Agricultural Economics</i> , Vol. 65, Nr. 4. S. 811-817.
17	KERSCHBERGER, M., 1993: Mittlere Ertragseinbußen durch unzureichende Kalkung. In: <i>Landwirtschaftsblatt Weser-Ems</i> , Vol. 140, Nr. 30. S. 24-28.
18	SCHILLING, G., 2000: Pflanzenernährung und Düngung. 4. Auflage, Ulmer-Verlag, Stuttgart. Halle
19	KERSCHBERGER, M. 2012: Kalk für die Knollen. In: <i>ACKER plus</i> , Vol.2, Nr. 3. S. 18-21.
20	JOHNSON, R.M. und E.P. RICHARD JR., 2010: Variable-rate lime application in Louisiana sugarcane production systems. In: <i>Precision Agriculture</i> , Vol. 11, Nr. 5. S. 464-474

Nr.	Quelle
21	BONGIOVANNI, R. und J. LOWENBERG-DEBOER, 2000: Economics of Variable Rate Lime in Indiana. In: <i>Precision Agriculture</i> , Vol. 2, Nr. 1. S. 55-70.
22	ADAMCHUK, V.I., M.T. MORGAN und J.M. LOWENBERG-DEBOER, 2004: A Model for Agro-Economic Analysis of Soil pH-Mapping. In: <i>Precision Agriculture</i> , Vol. 5, Nr. 2. S. 111-129.
23	WANG, D., T. PRATO, Z. QIU, R.K. NEWELL und K.A. SUDDUTH, 2003: Economic and Environmental Evaluation of Variable Rate Nitrogen and Lime Application for Claypan Soil Fields. In: <i>Precision Agriculture</i> , Vol. 4, Nr. 1. S. 35-52.

Anhang A2-1-2: pH-abhängige Sojabohnen- und Winterweizenenerträge (entnommen aus: WEISZ et al., 2003: 320)

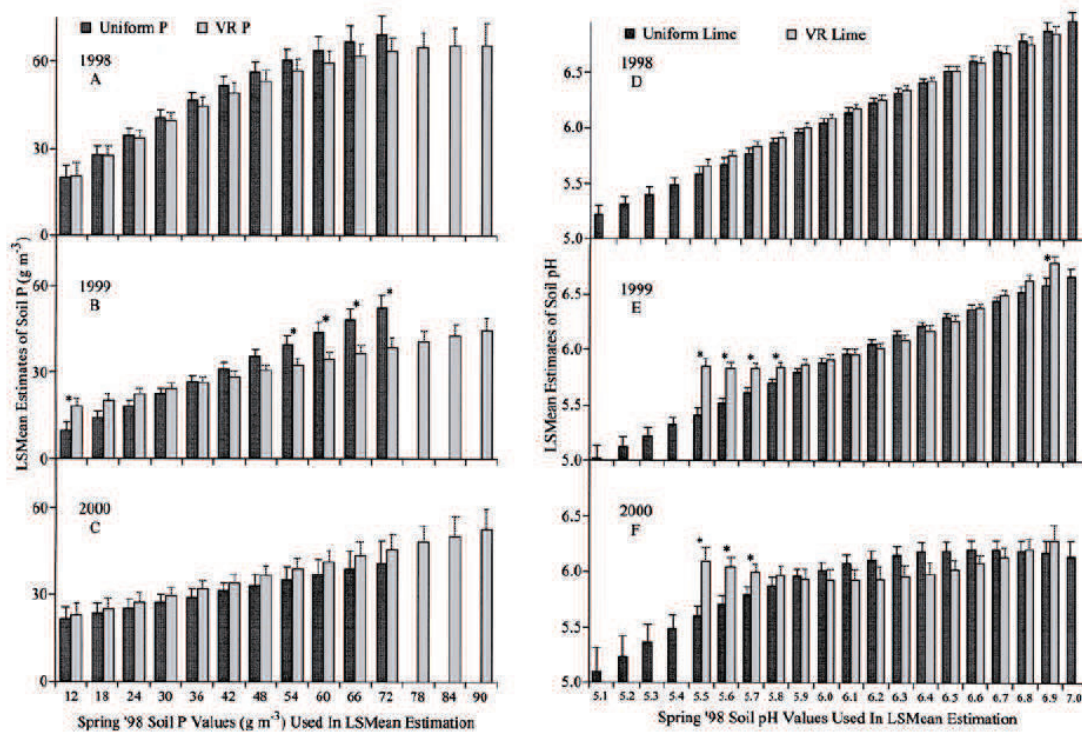
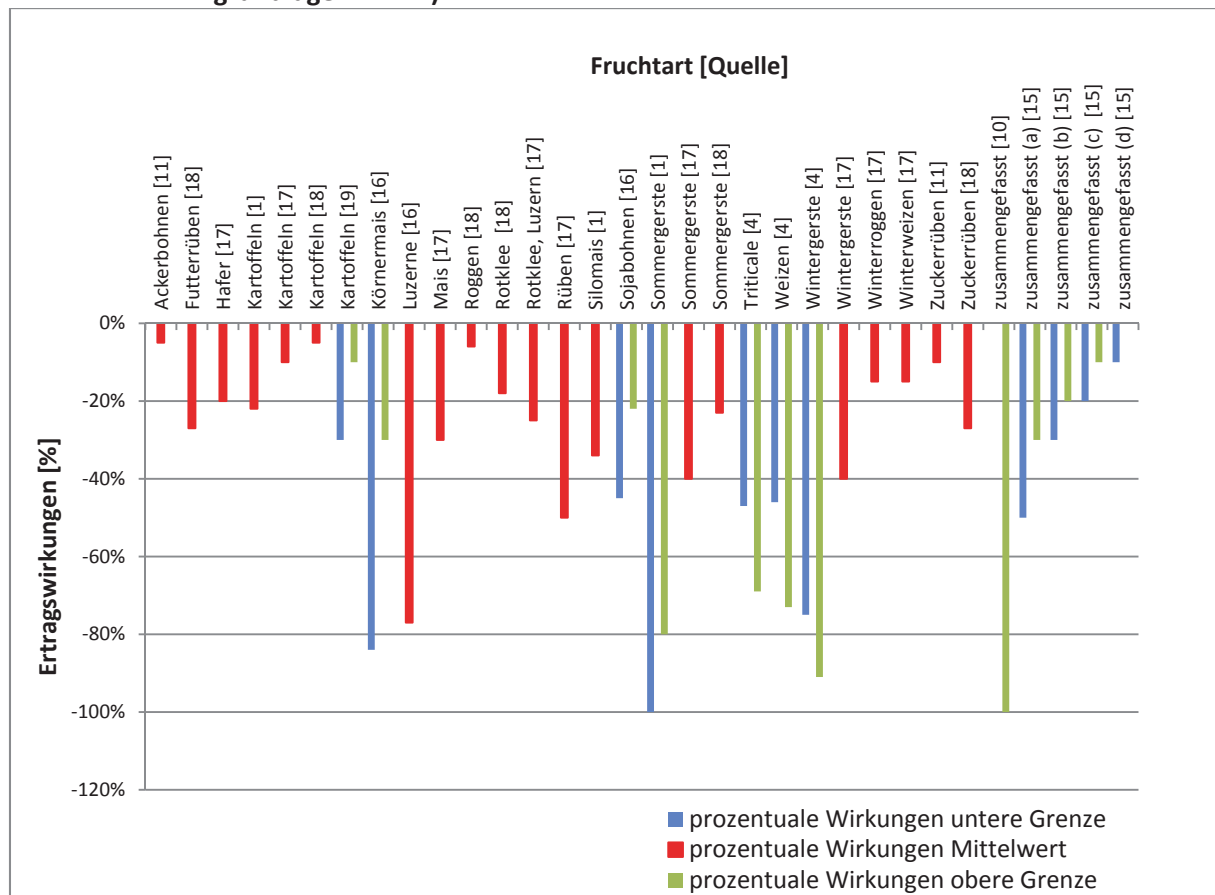
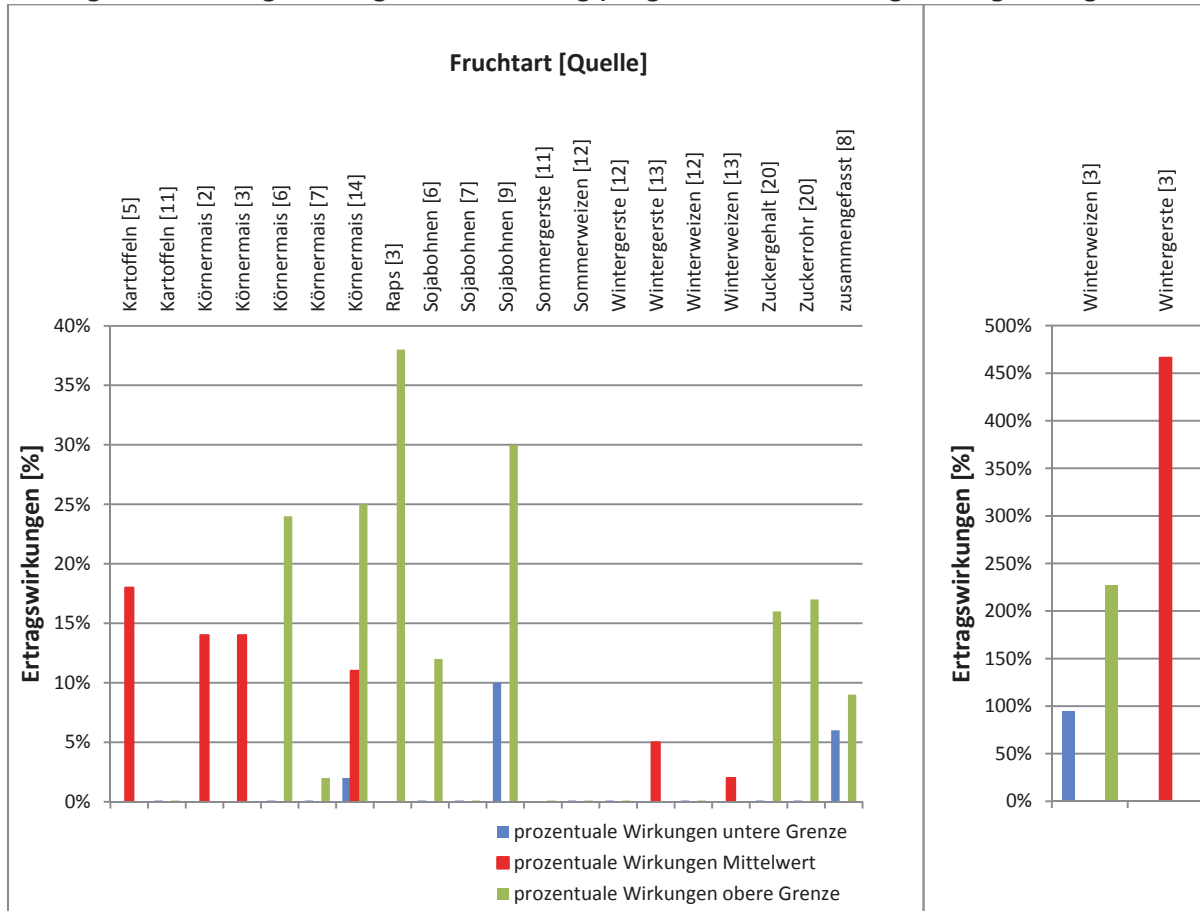


Figure 3. Fall 1998, Fall 1999 and Fall 2000 (A-C) P and (D-F) pH versus initial Spring 1998 soil test levels. Values shown are least square mean estimates from analysis of covariance using application method (uniform or VR) as a class variable, and initial Spring 1998 soil test level as the covariate. "*" indicates treatment means are statistically different at the 0.05 level of significance. Error bars are the standard error of the estimate. Least square means are shown only across the range of initial Spring 1998 soil test levels present in the data (see Table 4).

Anhang A2-1-3: Ertragswirkungen einer Unterlassung der Kalkung (als grafische Darstellung, Datengrundlage: A2-1-1)



Anhang A2-1-4: Ertragswirkungen einer Kalkung (als grafische Darstellung, Datengrundlage: A2-1-1)



Anhang A2-2: Grundlagen der Entscheidungsregeln der Kalkdüngung (entnommen von: VON WULFEN et al. (2007: 14ff))

Table 10: Kalkdüngungsbedarf von Ackerböden

pH-CaCl₂-Werte und jeweils dazu gehörige Kalkmengen in dt CaO/ha ¹zur Erreichung des optimalen pH-Bereiches

pH-Klasse	Humusgehalt							
	≤ 4,0 %		4,1 bis 8,0 %		8,1 bis 15,0 %		15,1 bis 30 %	
	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO
BG 1								
A	≤ 4,0	45	≤ 3,7	50	≤ 3,4	50	≤ 3,1	21
	4,1	42	3,8	46	3,5	47	3,2	19
	4,2	39	3,9	43	3,6	43	3,3	18
	4,3	36	4,0	39	3,7	39	3,4	16
	4,4	33	4,1	35	3,8	35	3,5	15
	4,5	30	4,2	32	3,9	31	3,6	13
B	4,6	27	4,3	28	4,0	28	3,7	12
	4,7	24	4,4	24	4,1	24	3,8	10
	4,8	22	4,5	21	4,2	20	3,9	9
	4,9	19	4,6	17	4,3	16	4,0	7
	5,0	16	4,7	13	4,4	13	4,1	6
	5,1	13	4,8	10	4,5	9	4,2	4
	5,2	10	4,9	6	4,6	5		
	5,3	7						
C	5,4 - 5,8	6	5,0 - 5,4	6	4,7 - 5,1	4	4,3 - 4,7	3
D	5,9 - 6,2	-	5,5 - 5,8	-	5,2 - 5,4	-	4,8 - 5,1	-
E	≥ 6,3	-	≥ 5,9	-	≥ 5,5	-	≥ 5,2	-

pH-Klasse	Humusgehalt							
	≤ 4,0 %		4,1 bis 8,0 %		8,1 bis 15,0 %		15,1 bis 30 %	
	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO
BG 2								
A	≤ 4,0	77	≤ 3,7	82	≤ 3,3	83	-	-
	4,1	73	3,8	78	3,4	78	≤ 3,0	31
	4,2	69	3,9	73	3,5	74	3,1	29
	4,3	65	4,0	69	3,6	69	3,2	27
	4,4	61	4,1	64	3,7	64	3,3	26
	4,5	57	4,2	60	3,8	60	3,4	24
	4,6	53	4,3	55	3,9	55	3,5	22
	4,7	49	4,4	51	4,0	51	3,6	20
	4,8	46	4,5	46	4,1	46	3,7	19
B	4,9	42	4,6	42	4,2	41	3,8	17
	5,0	38	4,7	37	4,3	37	3,9	15
	5,1	34	4,8	33	4,4	32	4,0	14
	5,2	30	4,9	28	4,5	27	4,1	12
	5,3	26	5,0	24	4,6	23	4,2	10
	5,4	22	5,1	19	4,7	18	4,3	8
	5,5	19	5,2	15	4,8	13	4,4	7
	5,6	15	5,3	10	4,9	9	4,5	5
	5,7	11						
C	5,8 - 6,3	10	5,4 - 5,9	9	5,0 - 5,5	8	4,6 - 5,1	4
D	6,4 - 6,7	-	6,0 - 6,3	-	5,6 - 5,9	-	5,2 - 5,5	-
E	≥ 6,8	-	≥ 6,4	-	≥ 6,0	-	≥ 5,6	-

pH-Klasse	Humusgehalt							
	≤ 4,0 %		4,1 bis 8,0 %		8,1 bis 15,0 %		15,1 bis 30 %	
	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO
BG 3								
A	≤ 4,5	87	≤ 4,2	89	≤ 3,8	90	≤ 3,3	33
	4,6	82	4,3	83	3,9	84	3,4	31
	4,7	77	4,4	77	4,0	78	3,5	29
	4,8	73	4,5	71	4,1	72	3,6	27
	4,9	68	4,6	66	4,2	66	3,7	25
	5,0	63	4,7	60	4,3	60	3,8	23
B	5,1	58	4,8	54	4,4	54	3,9	21
	5,2	53	4,9	48	4,5	48	4,0	19
	5,3	49	5,0	42	4,6	42	4,1	17
	5,4	44	5,1	36	4,7	35	4,2	15
	5,5	39	5,2	31	4,8	29	4,3	14
	5,6	34	5,3	25	4,9	23	4,4	12
	5,7	29	5,4	19	5,0	17	4,5	10
	5,8	25	5,5	13	5,1	11	4,6	8
	5,9	20					4,7	6
6,0	15							
C	6,1 - 6,7	14	5,6 - 6,2	12	5,2 - 5,8	10	4,8 - 5,4	5
D	6,8 - 7,1	-	6,3 - 6,7	-	5,9 - 6,2	-	5,5 - 5,8	-
E	≥ 7,2	-	≥ 6,8	-	≥ 6,3	-	≥ 5,9	-
BG 4								
A	≤ 4,5	117	≤ 4,2	115	≤ 3,8	109	≤ 3,3	39
	4,6	111	4,3	108	3,9	103	3,4	37
	4,7	105	4,4	102	4,0	97	3,5	35
	4,8	100	4,5	95	4,1	90	3,6	33
	4,9	94	4,6	89	4,2	84	3,7	31
	5,0	88	4,7	82	4,3	78	3,8	29
	5,1	82	4,8	75	4,4	71	3,9	27
	5,2	76	4,9	69	4,5	65	4,0	25
B	5,3	70	5,0	62	4,6	59	4,1	23
	5,4	65	5,1	55	4,7	52	4,2	21
	5,5	59	5,2	49	4,8	46	4,3	19
	5,6	53	5,3	42	4,9	40	4,4	17
	5,7	47	5,4	36	5,0	33	4,5	15
	5,8	41	5,5	29	5,1	27	4,6	13
	5,9	36	5,6	22	5,2	21	4,7	11
	6,0	30	5,7	16	5,3	14	4,8	9
	6,1	24					4,9	7
	6,2	18						
C	6,3 - 7,0	17	5,8 - 6,5	15	5,4 - 6,1	13	5,0 - 5,7	6
D	7,1 - 7,4	-	6,6 - 7,0	-	6,2 - 6,5	-	5,8 - 6,1	-
E	≥ 7,5	-	≥ 7,1	-	≥ 6,6	-	≥ 6,2	-

pH-Klasse	Humusgehalt									
	≤ 4,0 %		4,1 bis 8,0 %		8,1 bis 15,0 %		15,1 bis 30 %		> 30	
	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO
BG 5										
A	≤ 4,5	160	≤ 4,2	137	≤ 3,8	121	≤ 3,3	44		
	4,6	152	4,3	130	3,9	115	3,4	41		
	4,7	144	4,4	123	4,0	108	3,5	39		
	4,8	136	4,5	115	4,1	102	3,6	37		
	4,9	128	4,6	108	4,2	95	3,7	35		
	5,0	121	4,7	100	4,3	89	3,8	33		
	5,1	113	4,8	93	4,4	82	3,9	31		
	5,2	105	4,9	86	4,5	76	4,0	29		
	5,3	98								
B	5,4	90	5,0	78	4,6	69	4,1	27		
	5,5	82	5,1	71	4,7	63	4,2	25		
	5,6	75	5,2	69	4,8	56	4,3	23		
	5,7	67	5,3	56	4,9	50	4,4	21		
	5,8	59	5,4	49	5,0	43	4,5	19		
	5,9	52	5,5	41	5,1	37	4,6	17		
	6,0	44	5,6	34	5,2	30	4,7	14		
	6,1	36	5,7	27	5,3	24	4,8	12		
	6,2	29	5,8	19	5,4	17	4,9	10		
	6,3	21					5,0	8		
C	6,4 - 7,2	20	5,9 - 6,7	18	5,5 - 6,3	16	5,1 - 5,9	7		
D	7,3 - 7,7	-	6,8 - 7,2	-	6,4 - 6,7	-	6,0 - 6,3	-		
E	≥ 7,8	-	≥ 7,3	-	≥ 6,8	-	≥ 6,4	-		
BG 6 (Humusgehalt > 30 %)										
A, B									≤ 4,2	10
C									4,3	^{a)}
D, E									≥ 4,4	-

¹⁾ errechnet mittels biostatistischer Verfahren aus Ergebnissen von Kalkdüngungsdauerversuchen

²⁾ keine Erhaltungskalkung

Hinweis:

Die empfohlenen Gaben beinhalten den Kalkbedarf bis zur nächsten Bodenuntersuchung (nach Ablauf einer Fruchtfolge). Unterlegt: Mengen zur Erhaltungskalkung (in dt CaO/ha)

Entnommen aus: VON WULFFEN et al. (2007: 14 - 17)

Bodengruppe	Höchstmengen in dt CaO/ha	
	Ackerland	Grünland
BG 1	28	21
BG 2	42	21
BG 3	56	28
BG 4	70	35
BG 5	84	42
BG 6	28	28

Fruchtart	optimaler pH-Bereich	Fruchtart	optimaler pH-Bereich
Hafer	5,0 – 6,0	Winterweizen	6,0 – 7,5
Kartoffeln	5,0 – 6,0	Zuckerrüben	6,0 – 7,5
Winterroggen	5,0 – 6,5	Winterraps	6,5 – 7,5
Lupine (blau)	5,5 – 6,0	Erbsen, Ackerbohne	6,5 – 7,5
Ackergras	5,5 – 7,0	Sommergerste	6,5 – 8,0
Mais	5,8 – 7,0	Wintergerste	6,5 – 8,0

Entnommen aus: VON WULFFEN et al. (2007: 20)

A2-4-1: Berechnungen der fixen und variablen Kosten für die Verfahren der Bodenbeprobung nach ADAMCHUK (2000: 78ff)

Variable Kosten der Bodenbeprobung nach der herkömmlichen Methodik (C_S)

$C_S = \frac{10.000}{F_A^2} * (c_{\text{Laborkosten}} + c_{\text{Bodenbeprobung}})$		F. A2.4a
mit		
F_A	-	Rastergröße (m)
$c_{\text{Laborkosten}}$	-	Kosten für pH-Wert Analyse (2,20 \$ n ⁻¹)
$c_{\text{Bodenbeprobung}}$	-	Kosten für Bodenbeprobung (\$ ha ⁻¹)

$C_S = 1,37 + 1,22 * \frac{F_A^2}{10.000}$	F. A2.4b
--	----------

$C_S = 1,5 * (1,37 + 1,22 * \frac{F_A^2}{10.000})$	F. A2.4c
--	----------

Fixkosten für den Betrieb des pH-Sensors (C_F):

$C_F = \frac{\sum_{i=1}^N c_i * n_i * u_i * (\frac{1}{T_i} + I) + M_M + M_R}{A}$		F. A2.4d
mit		
N	-	Anzahl der spezifischen Komponente
c_i	-	Kosten der <i>i</i> -ten Komponente (\$)
n_i	-	Anzahl der <i>i</i> -ten Komponente
u_i	-	Anteilige Nutzung der <i>i</i> -ten Komponente
T_i	-	Lebensdauer der <i>i</i> -ten Komponente (y)
I	-	Zinskosten (10 %)
M_M	-	Deckungsbeitrag des Herstellers (ca. 28 %, \$ y ⁻¹)
M_R	-	Handelspanne des Einzelhandels (ca. 21 %, \$ y ⁻¹)
A	-	Gesamtbeprobungsfläche (ha y ⁻¹)

Die Kalkulation der Fixkosten führt zu einem Betrag von 2.182,93 \$ a⁻¹.

Variable Kosten für den Betrieb des pH-Sensors (C_V):

$C_V = C_L + C_F + C_W + C_S$		F. A2.4e
mit		
C_L	-	Kosten der Feldarbeit
C_F	-	Kosten für Treibstoffe

C_W	-	Kosten für Spülwasser
C_S	-	Kosten für den Betrieb des pH-Sensors

Kosten für Feldarbeit C_L

$C_L = c_L * t_{ha} \frac{t_{tot}}{t_{eff}}$	F. A2.4f
mit	
c_L	- Stundenlohn (9,65 \$ h ⁻¹)
t_{ha}	- Arbeitszeitbedarf (h)
t_{tot}	- Gesamtarbeitszeit (8 h d ⁻¹)
t_{eff}	- Effektive Arbeitszeit (7 h d ⁻¹)

Kosten für Treibstoffe C_F

$C_F = c_f * Q_f * t_{ha}$	F. A2.4g
mit	
c_f	- Treibstoffkosten (0,23 \$ l ⁻¹)
Q_f	- Treibstoffverbrauch (32,4 l h ⁻¹)
t_{ha}	- Arbeitszeitbedarf (h)

Kosten für Spülwasser C_W

$C_W = c_w * Q_w * n_{ha}$	F. A2.4h
mit	
c_w	- Kosten für Wasser (0,11 \$ l ⁻¹)
Q_w	- Wasserverbrauch (0,095 l n ⁻¹)
n_{ha}	- Beprobungsdichte (n ha ⁻¹)

Kosten für den Betrieb des pH-Sensors C_S

$C_S = 2c_s * \frac{n_{ha}}{n_{sensor}}$	F. A2.4i
mit	
c_s	- Kosten einer ionensensitiven pH-Elektrode (75 \$)
n_{ha}	- Beprobungsdichte (n ha ⁻¹)
n_{sensor}	- Geschätzte Lebensdauer einer pH-Elektrode (30.000 Messungen)

Auslastung des pH-Sensors t_{ha}

$t_{ha} = \frac{10}{L_g * S}$		F. A2.4j
mit		
L_g	-	Abstand der Rasterbeprobung (m)
S	-	Arbeitsgeschwindigkeit (km h ⁻¹)

Gesamtbeprobungsfläche A

$A = \frac{T_y * t_{eff}}{t_{ha}}$		F. A2.4k
mit		
T_y	-	Feldarbeitstage (43 d y ⁻¹)
t_{ha}	-	Arbeitszeitbedarf (h)
t_{eff}	-	Effektive Arbeitszeit (7 h d ⁻¹)

Arbeitsgeschwindigkeit S

$S = \frac{3,6 * L_g}{n_g * t_{ss}}$		F. A2.4l
mit		
L_g	-	Abstand der Rasterbeprobung (m)
n_g	-	Proben je Raster ($n_g = 2$)
t_{ss}	-	Zeit für Probenahmezyklus (10 s)

Beprobungsdichte n_{ha}

$n_{ha} = \frac{10^4}{L_g^2} * n_g$		F. A2.4m
mit		
L_g	-	Abstand der Rasterbeprobung (m)
n_g	-	Proben je Raster ($n_g = 2$)

Die Berechnungsgrundlagen der variablen Kostenkalkulation befinden sich in der Dissertation von ADAMCHUK (2000: 163ff) in tabellarischer Form. Ein Abdruck der Tabelle ist nicht gestattet, jedoch sind die variablen Kosten in der Abb. 2-2 dargestellt.

Gesamtkosten für den Betrieb des pH-Sensors (C_{AS}):

$C_{AS} = C_F + C_V$		F. A2.4n
mit		
C_{AS}	-	Beprobungskosten des pH-Sensors ($\$ \text{ ha}^{-1}$)
C_F	-	Fixkosten des pH-Sensors ($\$ \text{ ha}^{-1}$)
C_V	-	Variable Kosten des pH-Sensors ($\$ \text{ ha}^{-1}$)

A3-1-2: Verrechnung der Nährstoffergebnisse von 27-m- auf 36-m-Pflegesystem

Die GPS-gestützte Bodenbeprobung erfolgte nach den gesetzlichen Vorgaben, beschrieben in VON KAPE et al. (2009: 5ff) im Jahr 2007 im 27-m-Raster. Mit dem Erntejahr 2008 änderte sich betriebsbedingt das Pflegesystem von 27-m- auf ein 36-m-System. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den folgenden Untersuchungsjahren zu ermöglichen, mussten die Ergebnisse aus 2007 in das entsprechende Raster nach dem neu angelegten System überführt werden. Durch die Dokumentation der Einzelnstichpunkte, konnten die Ergebnisse den neu erstellten Parzellen zugeordnet werden. Innerhalb der Parzellen erfolgte eine Mittelwertbildung für die untersuchten Bodenparameter und erlaubten eine weitere Vergleichbarkeit. Die folgenden Abbildungen präzisieren die Vorgehensweise.

Ausgangssituation:

Die Versuchsanlage im Jahr 2007 wurde in einer Wabenform angelegt, um durch die ringförmige Bodenprobenentnahme eine möglichst hohe Repräsentanz der Mischprobe für die Parzelle zu garantieren. Es stellte sich jedoch heraus, dass durch die diagonale Anlage des Pflegesystems, Parzellen im Randbereich der Versuchsglieder z.T. unterschiedlich bewirtschaftet wurden (s. Abb. A3-1-2-1).

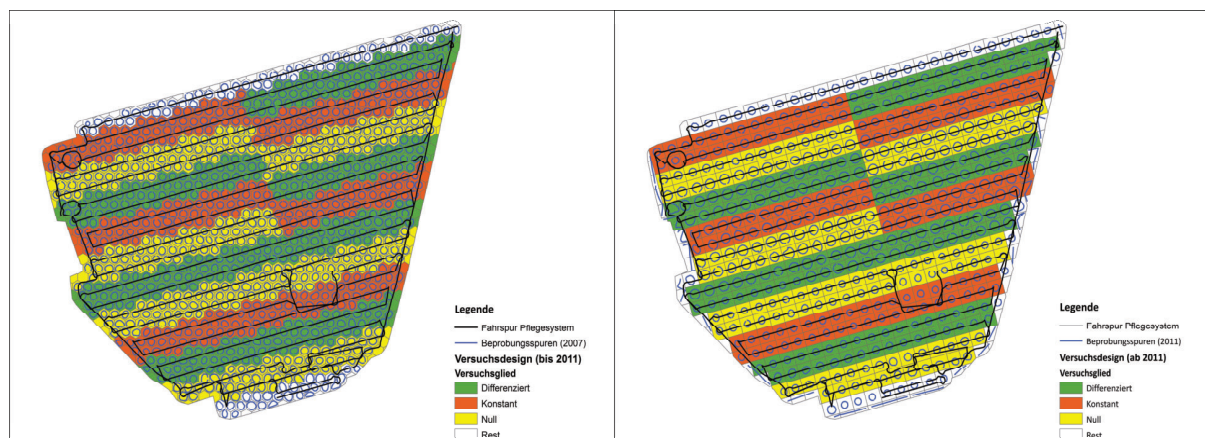


Abb. A3-1-2-1: Anpassung des Versuchsdesigns des Versuchsschlages „550“ Görzig

Ein weiterer Grund, der eine Anpassung des Versuchsdesigns an das neue Pflegesystem erforderte, ist der Stand der aktuellen Applikationstechnik. Diese ermöglicht keine Ansteuerung der Teilbreiten mit unterschiedlichen Sollwerten. Ein Beispiel ist dazu in der Abbildung A3-1-2-2 rot markiert dargestellt. Neben der Darstellung des alten 27-m-Rasters ist die Arbeitsbreite im 36-m-System enthalten. Innerhalb der einfachen Arbeitsbreite befinden sich nach dem alten System zwei Varianten, in denen, je nach Position des Empfängers, nur ein Sollwert nach einer Variante appliziert werden kann.

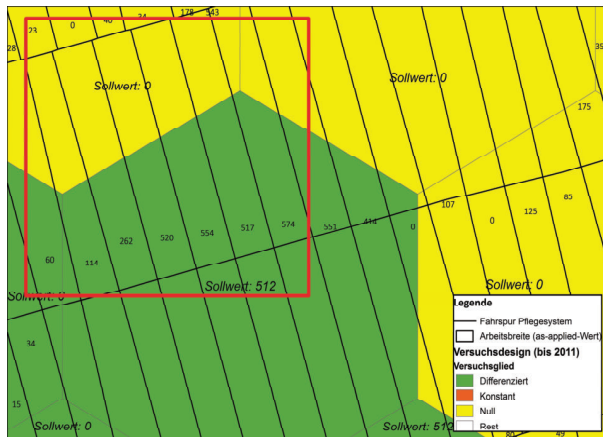


Abb. A3-1-2-2: As-applied-Karte vs. Sollwertkarte

Die Anlage des neuen 36-m-System erfolgte anhand der Ausrichtung des bestehenden Fahrgassensystems. Damit können Fehlapplikationen vermieden werden. In der Abb. A3-1-2-3 ist das neue Versuchsdesign mit den aufgezeichneten Fahrspuren des neuen Fahrgassensystems dargestellt.

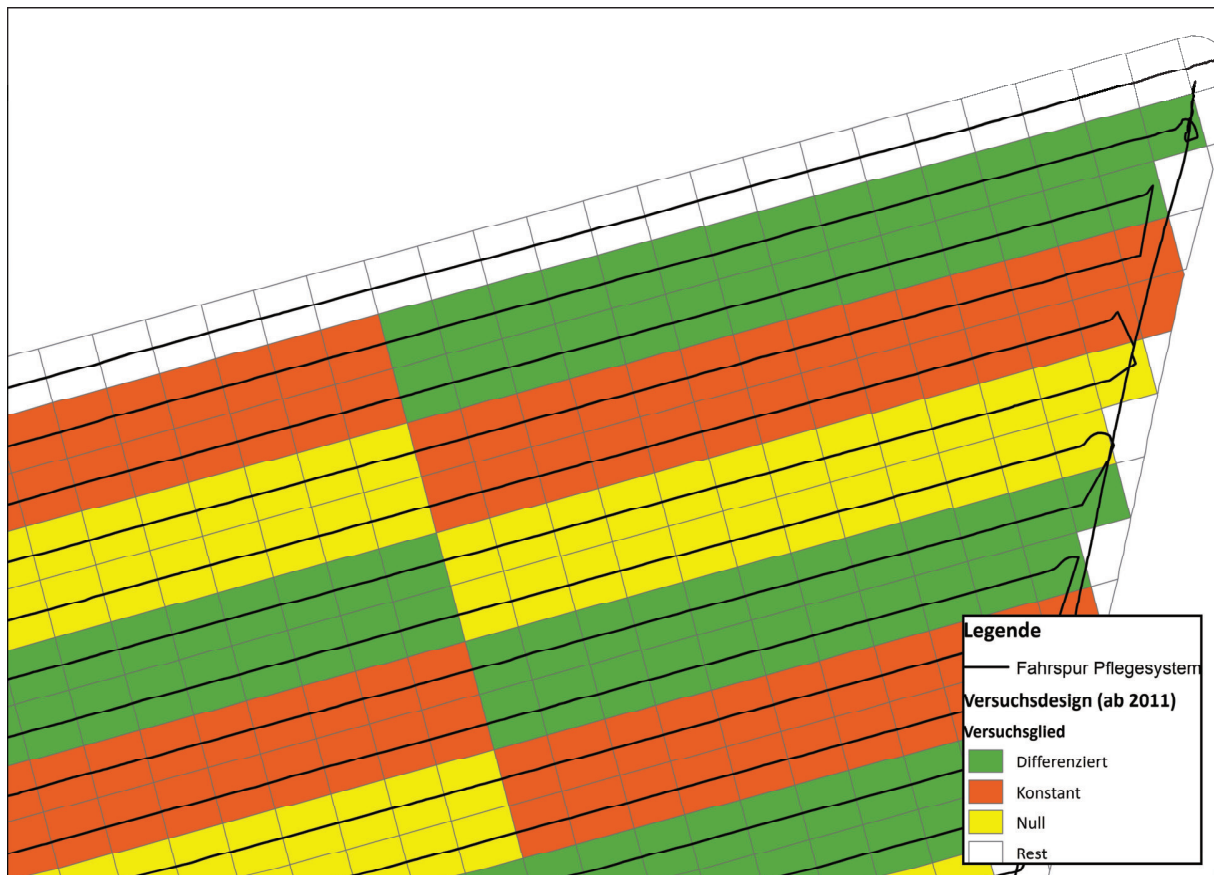


Abb. A3-1-2-3: Versuchsdesign ab 2011

Anhang A3-1-3: Standortbeschreibung der Wetterstationen der Praxisschläge

Tab. A3-1-3-1: Datengrundlage mittlerer jährlicher Niederschlag

Versuchsschlag	St. ID	Stationsname	Niederschlag	geogr. Breite	geogr. Länge	Distanz Station	Stationshöhe	BL	Bezugszeit	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
				°	°	km	m üNN		y	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Deutsches Feld	3580	Löbejün-Wettin-Neutz		51,60698	11,84132	7,544	149	ST	1981-2010	34	28	36	33	58	52	62	53	52	30	47	40	525
Lange Winde	3456	Neinstedt		51,75146	11,08693	3,442	140	ST	1981-2010	40	35	43	41	54	56	54	49	41	34	40	44	531
Rieder	4187	Quedlinburg-Rieder		51,73447	11,16552	0,878	194	ST	1981-2010	36	33	40	41	60	58	64	51	50	34	42	44	551
550	5784	Zörbig		51,62588	12,10818	7,781	82	ST	1981-2010	38	30	44	36	57	55	65	54	52	36	48	48	562
Dölzig II	2705	Kötschitz-Zschöchergergen		51,34952	12,15787	4,585	103	ST	1981-2010	31	30	38	39	47	57	70	57	43	30	43	42	526
Dölzig I	2705	Kötschitz-Zschöchergergen		51,34952	12,15787	4,708	103	ST	1981-2010	31	30	38	39	47	57	70	57	43	30	43	42	526
110	4988	Taucha		51,37062	12,47952	4,317	127	SN	1981-2010	48	41	52	45	54	58	77	68	55	39	57	59	653
Lange Welle	5476	Werddau-Langenhessen		50,74689	12,34956	7,926	295	SN	1981-2010	39	39	46	44	62	72	80	73	54	43	53	51	657
Kuhberg	1688	Gölsnitz		50,88937	12,44014	7,479	243	TH	1981-2010	38	38	44	43	60	62	80	71	53	39	53	49	630
Maststall	1688	Gölsnitz		50,88937	12,44014	7,532	243	TH	1981-2010	38	38	44	43	60	62	80	71	53	39	53	49	630

Tab. 3-1-3-2: Datengrundlage mittlere jährliche Temperatur

Versuchsschlag	St. ID	Stationsname	Temperatur	geogr. Breite	geogr. Länge	Distanz Station	Stationshöhe	BL	Bezugszeit	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
				°	°	km	m üNN		y	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Deutsches Feld	1957	Halle-Kröllwitz		51,51377	11,94993	11,723	93	ST	1981-2010	0,8	1,4	5,0	9,1	13,8	16,5	19,0	18,6	14,4	9,8	5,0	1,6	9,6
Lange Winde	4032	Quedlinburg		51,79536	11,13192	5,692	142	ST	1981-2010	0,9	1,2	4,5	8,6	13,4	16,2	18,5	17,9	14,0	9,6	5,1	1,7	9,3
Rieder	4032	Quedlinburg		51,79536	11,13192	5,506	142	ST	1981-2010	0,9	1,2	4,5	8,6	13,4	16,2	18,5	17,9	14,0	9,6	5,1	1,7	9,3
550	2704	Köthen (Anhalt)		51,75147	12,00789	9,183	76	ST	1981-2010	0,8	1,4	5,0	9,3	14,1	16,7	19,2	18,6	14,5	9,8	4,9	1,5	9,7
Dölzig II	1957	Leipzig/Halle		51,43479	12,23962	9,828	131	SN	1981-2010	0,5	1,1	4,7	8,9	13,8	16,5	19,0	18,6	14,4	9,8	4,7	1,3	9,4
Dölzig I	1957	Leipzig/Halle		51,43479	12,23962	9,441	131	SN	1981-2010	0,5	1,1	4,7	8,9	13,8	16,5	19,0	18,6	14,4	9,8	4,7	1,3	9,4
110	2641	Leipzig-Holzhausen		51,31507	12,44623	4,949	138	SN	1981-2010	1,0	1,5	5,2	9,5	14,2	16,9	19,1	18,8	14,4	9,9	4,9	1,5	9,7
Lange Welle	5797	Lichtentanne		50,68799	12,43284	8,042	353	SN	1981-2010	-0,2	0,5	4,0	8,2	13,1	15,7	18,0	17,6	13,5	9,0	4,1	0,7	8,7
Kuhberg	5797	Lichtentanne		50,68799	12,43284	15,006	353	SN	1981-2010	-0,2	0,5	4,0	8,2	13,1	15,7	18,0	17,6	13,5	9,0	4,1	0,7	8,7
Maststall	5797	Lichtentanne		50,68799	12,43284	14,509	353	SN	1981-2010	-0,2	0,5	4,0	8,2	13,1	15,7	18,0	17,6	13,5	9,0	4,1	0,7	8,7

Anhang A3-4-1-3: Getreideeinheitenschlüssel

Getreideeinheitenschlüssel**Pflanzliche Erzeugnisse (GE in dt)**

1 dt	Weizen	1,07
1 dt	Gerste	1,00
1 dt	Roggen	1,01
1 dt	Hafer	0,85
1 dt	Mais	1,10
1 dt	Hirse	0,84
1 dt	Reis	0,92
1 dt	Ackerbohnen	0,92
1 dt	Bohnen	0,86
1 dt	Erbsen	1,04
1 dt	Kartoffeln	0,22
1 dt	Zuckerrüben	0,27
1 dt	Futterrüben	0,12
1 dt	Körnerraps	2,46
1 dt	Sonnenblumen	2,60
1 dt	Sojabohnen	2,60
1 dt	Faserlein	1,00
1 dt	Hanf	1,00
1 dt	Grassamen	4,38
1 dt	Klee-/Luzernesamen	5,80
1 dt	Gemüse allgemein	0,57
1 dt	Weißkohl	0,25
1 dt	Möhren	0,38
1 dt	Spargel	2,00
1 dt	Obst	0,86
1 dt	Baumobst	0,81
1 dt	Strauchobst	1,59
1 dt	Erdbeeren	1,50
1 dt	Hopfen	7,38
1 dt	Tabak	2,66
1 dt	Weinmost	1,29
1 dt	Blumen	135,00
1 dt	Ziergehölze	135,00
1 dt	Grasland	0,43
1 dt	Silomais	0,18
1 dt	Sonstige Hauptfutterfrüchte	0,60
1 dt	Zwischenfrüchte (Raps)	0,11
1 dt	Gerstenstroh	0,49
1 dt	Klee-, Luzerneheu	0,68
1 dt	Futterrübenblatt	0,11
1 dt	Zuckerrübenblatt	0,13
1 dt	Zuckerrübenmelasse	0,80
1 dt	Zuckerrübenschnitzel	0,98
1 dt	Trockenschnitzel	0,98

Anhang A3-6-2: Dreijährige Durchschnittspreise von Phosphat und Kalk

Monat	Jahr	Triplesuperphosphat (46 % P ₂ O ₅)	kohlensaurer Kalk (85 % CaCO ₃)
		(€ t ⁻¹)	(€ t ⁻¹)
1	2010	fehlend	fehlend
2	2010	fehlend	fehlend
3	2010	fehlend	fehlend
4	2010	fehlend	fehlend
5	2010	fehlend	fehlend
6	2010	372	24
7	2010	fehlend	fehlend
8	2010	362	21
9	2010	388	21
10	2010	fehlend	fehlend
11	2010	398	21
12	2010	fehlend	fehlend
1	2011	402	22
2	2011	420	21
3	2011	437	21
4	2011	fehlend	fehlend
5	2011	446	20
6	2011	fehlend	fehlend
7	2011	459	20
8	2011	fehlend	fehlend
9	2011	470	21
10	2011	479	21
11	2011	479	21
12	2011	480	21
1	2012	466	20
2	2012	457	19
3	2012	448	20
4	2012	446	23
5	2012	445	23
6	2012	449	24
7	2012	444	22
8	2012	450	22
9	2012	457	22
10	2012	459	21
11	2012	409	22
12	2012	445	21
1	2013	387	21
2	2013	370	21
	Mittelwert	434,22	21,33

Anhang A3-6-6-1: Ertragsfunktionen in Abhängigkeit der Bodengruppen

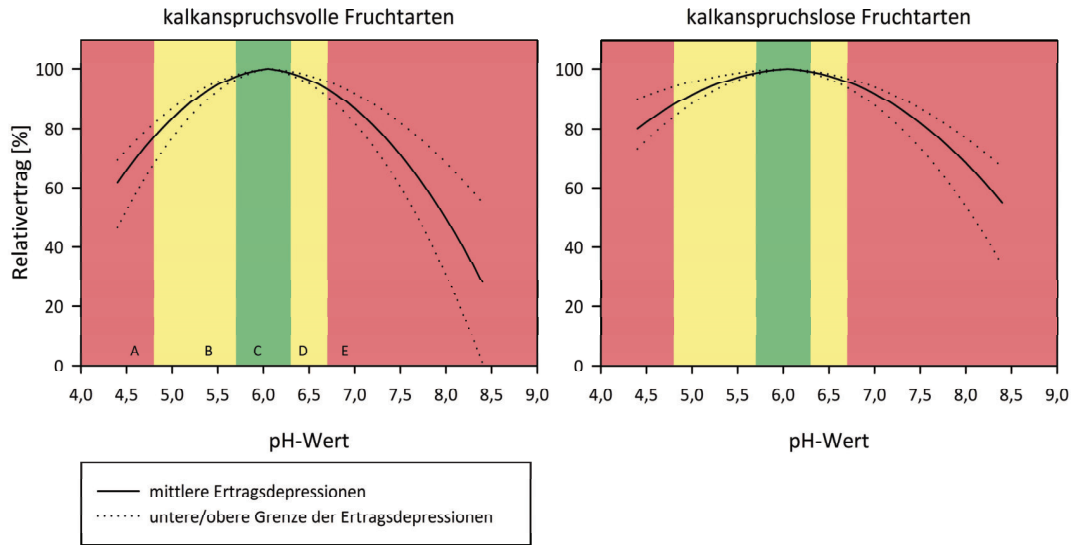
Aus der Literaturrecherche gehen unterschiedlich starke Ertragseffekte auf die Ackerbaukulturen hervor (siehe Anhang A2-1-1 bis A2-1-4). Deshalb wird eine Klassifizierung nach SCHILLING (2000: 384) in kalkanspruchslose und kalkanspruchsvolle Kulturen vorgenommen. Für diese beiden Gruppen erfolgt anhand der beschriebenen Szenarienrechnung mit unterschiedlich starken Ertragseffekten (s. Kap. 3.6.6) die Modellierung der zu erwartenden Ertragsdepressionen. Dafür werden quadratische Ertragsfunktionen verwendet, um Ertragsdepressionen im optimalen Bereich geringer zu modellieren als im suboptimalen pH-Wert-Bereich. Die Modellierung der Ertragsfunktionen erfolgte iterativ, um möglichst die Ergebnisse der Literaturrecherche vollständig abzudecken. Die Ergebnisse der Versuche der Literaturrecherche zeigen überwiegend die Ertragseffekte einer Kalkung oder deren Unterlassung auf, können aber keinen funktionalen Zusammenhang zwischen den untersuchten Fruchtarten und dem pH-Wert herstellen. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Ertragsfunktionen stellen deshalb keine Funktionen dar, die in Exaktversuchen ermittelt worden sind. Sie sollen einen Beitrag dazu leisten, um das ökonomische Potential zur Erfassung des pH-Wertes mit einer vielfach höheren Beprobungsdichte als bisher üblich zu beurteilen.

In den folgenden Darstellungen (A3-6-6-2 bis A3-6-6-4) werden die Ertragseffekte für die auf den Versuchsschlägen dominierenden Bodengruppen II, III und IV dokumentiert.

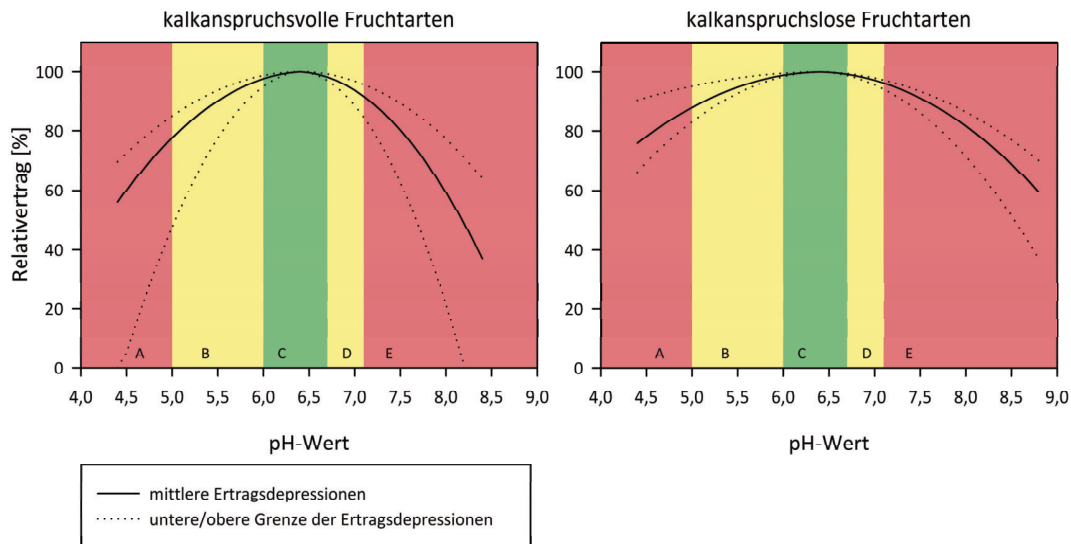
Tab. A3-6-6-1: Parameter der Ertragsfunktionen in Abhängigkeit der Bodengruppen

Fruchtart	Bodengruppe			
	2	3	4	
kalkanspruchslos	Best-Case	$y = -5,1069x^2 + 60,023x - 76,33$	$y = -3,6905x^2 + 45,15x - 38,046$	$y = -0,0339x^2 + 1,3641x + 86,277$
	Average-Case	$y = -7,77x^2 + 93,283x - 180,44$	$y = -6,5014x^2 + 82,432x - 161,53$	$y = -0,0574x^2 + 2,4401x + 73,879$
	Worst-Case	$y = -11,091x^2 + 132,48x - 296,17$	$y = -9,5971x^2 + 120,94x - 281,35$	$y = -0,0939x^2 + 3,9618x + 57,941$
kalkanspruchsvoll	Best-Case	$y = -9,1341x^2 + 112,63x - 248,13$	$y = -8,1945x^2 + 104x - 230,04$	$y = -0,0600x^2 + 2,5122x + 73,644$
	Average-Case	$y = -13,25x^2 + 160,86x - 389,32$	$y = -13,098x^2 + 164,25x - 415,52$	$y = -0,1015x^2 + 4,3354x + 53,428$
	Worst-Case	$y = -18,341x^2 + 222,91x - 578,86$	$y = -27,888x^2 + 353,88x - 1023,6$	$y = -0,1687x^2 + 7,3225x + 20,534$

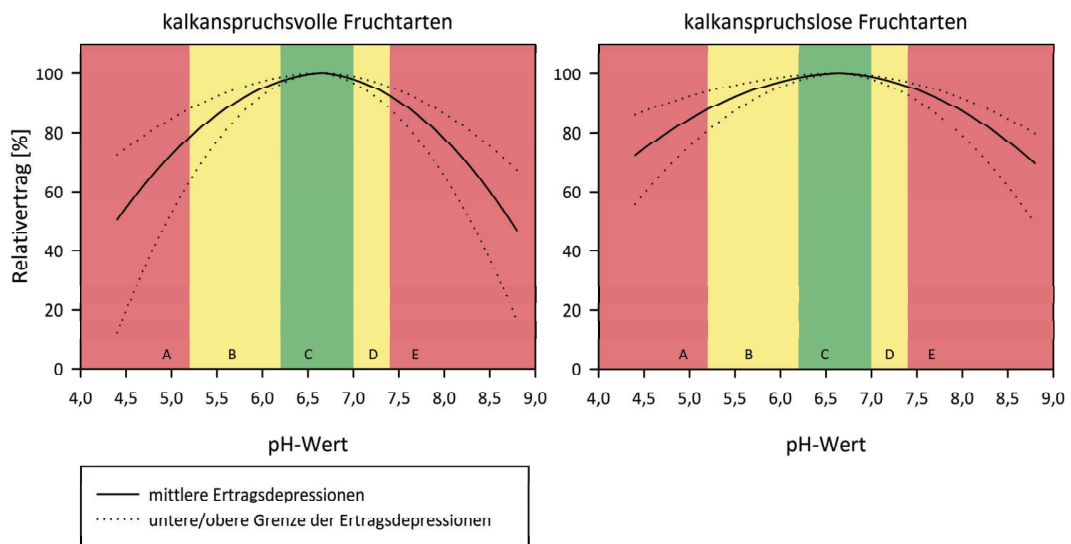
Anhang A3-6-6-2: Mittlere zu erwartende Relativerträge und Grenzen der Relativerträge für kalkanspruchsvolle und kalkanspruchslose Fruchtarten (gültig für Bodengruppe II)



Anhang A3-6-6-3: Mittlere zu erwartende Relativerträge und Grenzen der Relativerträge für kalkanspruchsvolle und kalkanspruchslose Fruchtarten (gültig für Bodengruppe III)

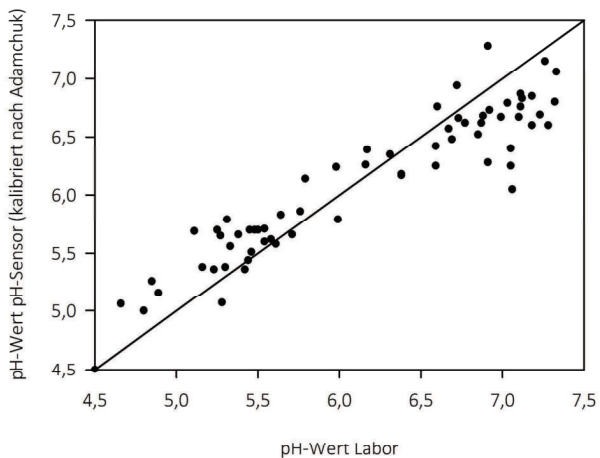


Anhang A3-6-6-4: Mittlere zu erwartende Relativerträge und Grenzen der Relativerträge für kalkanspruchsvolle und kalkanspruchslose Fruchtarten (gültig für Bodengruppe IV)

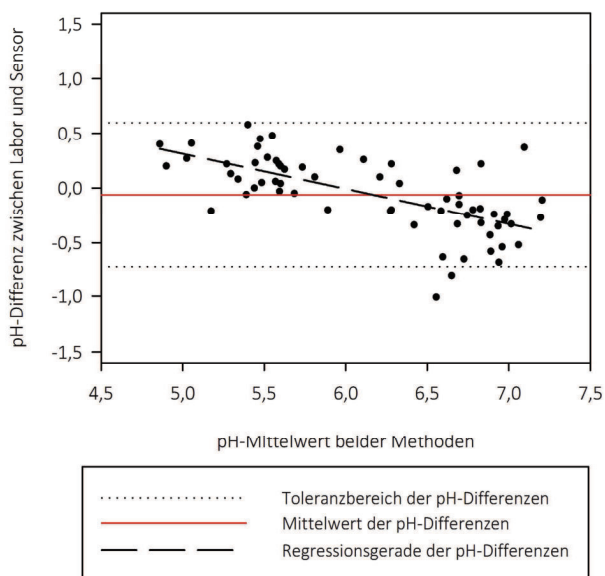


Anhang A4-1-7: Ergebnisse der angepassten pH-Werte des Verissensors nach den verschiedenen Kalibrieransätzen sowie deren Bland-Altman-Plots

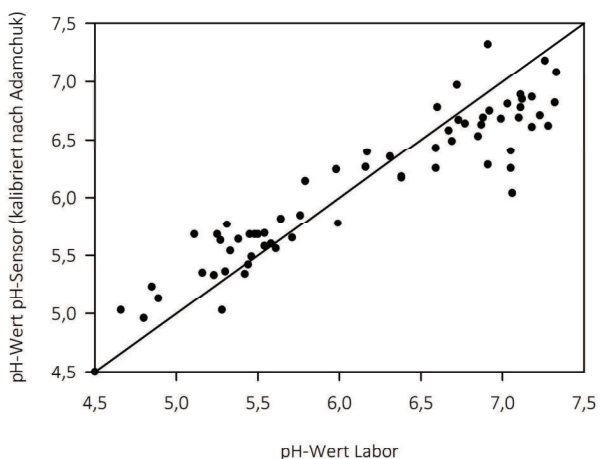
kalibrierte pH-Werte des Sensors nach Adamchuk (LS) vs Labor



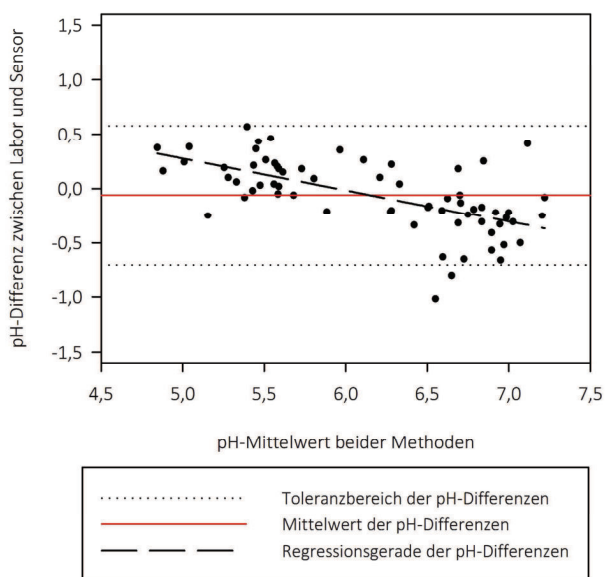
Bland-Altman-Plot zwischen kalibrierten pH-Werten nach Adamchuk vs Labor



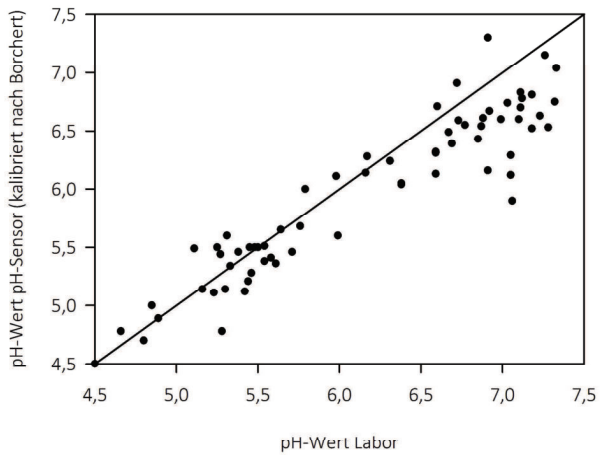
kalibrierte pH-Werte des Sensors nach Adamchuk (Shift) vs Labor



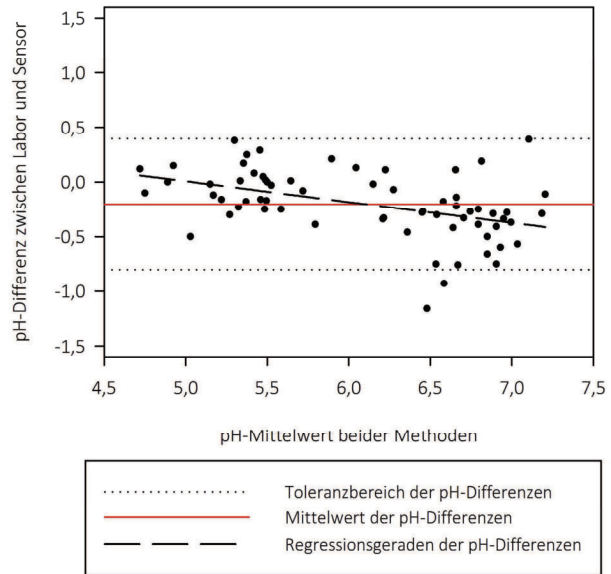
Bland-Altman-Plot zwischen kalibrierten pH-Werten nach Adamchuk vs Labor



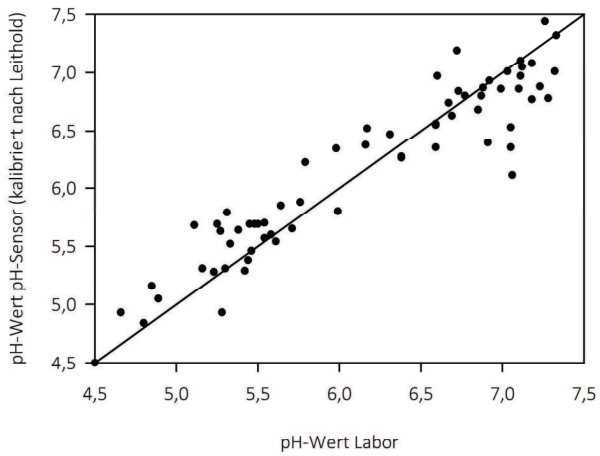
kalibrierte pH-Werte des Sensors
nach Borchert vs Labor



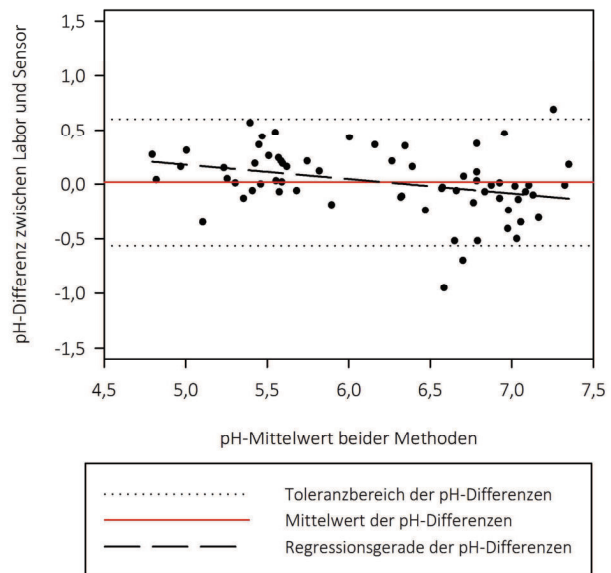
Bland-Altman-Plot zwischen kalibrierten
pH-Werten nach Borchert vs Labor



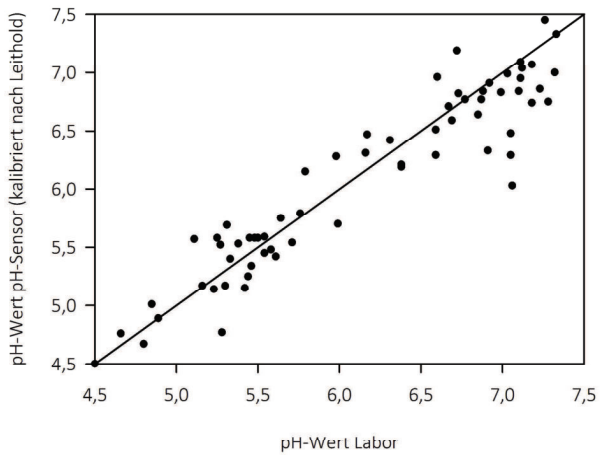
kalibrierte pH-Werte des Sensors
nach Leithold (LS) vs Labor



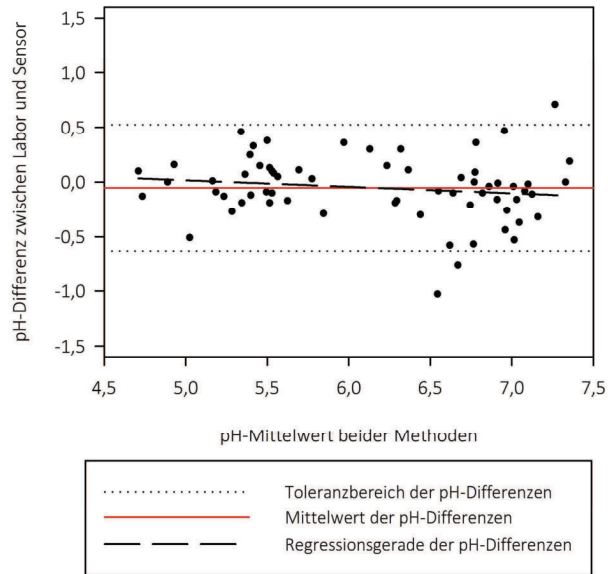
Bland-Altman-Plot zwischen kalibrierten
pH-Werten nach Leithold vs Labor



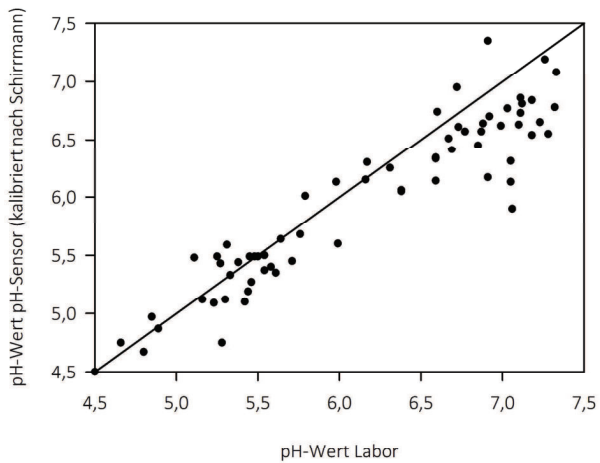
kalibrierte pH-Werte des Sensors
nach Leithold (PB) vs Labor



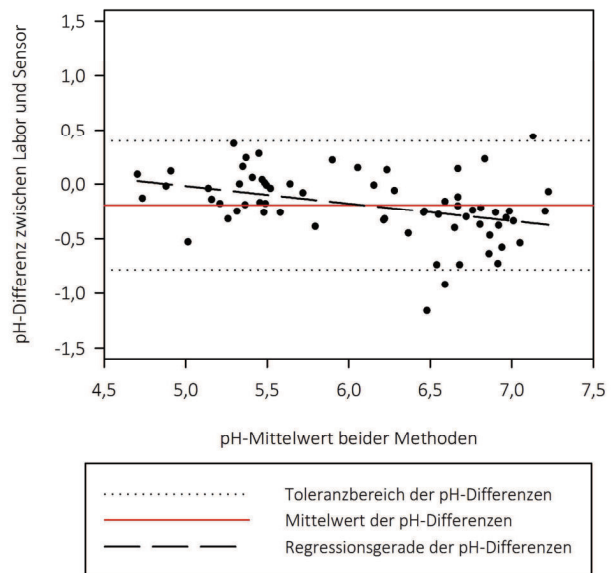
Bland-Altman-Plot zwischen kalibrierten
pH-Werten nach Leithold vs Labor



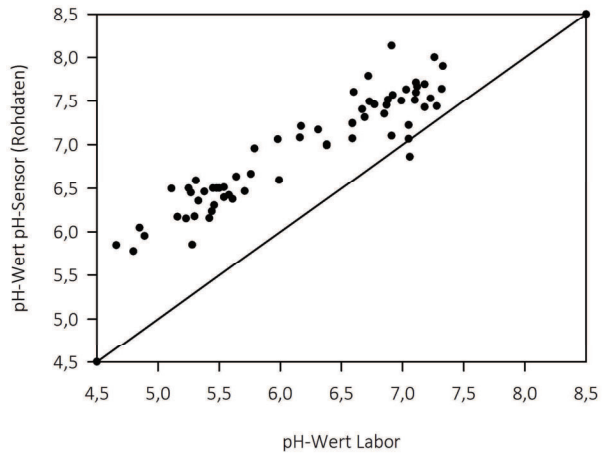
kalibrierte pH-Werte des Sensors
nach Schirrmann vs Labor



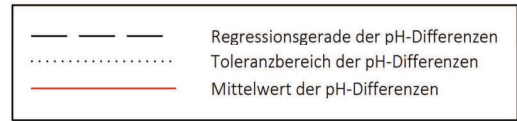
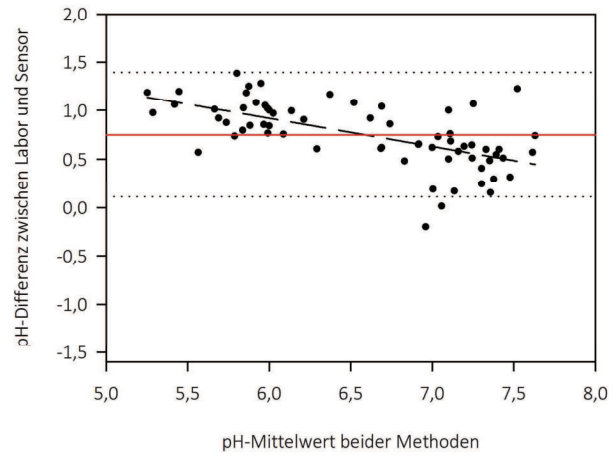
Bland-Altman-Plot zwischen kalibrierten
pH-Werten nach Schirrmann vs Labor



Rohdaten des Sensors vs Labor



Rohdaten des Sensors vs Labor



Anhang A4-2: SAS-Auswertung Vorfrucht (siehe CD)

Anhang A4-2-1: SAS-Auswertung Sommergerste (siehe CD)

Anhang A4-2-2: SAS-Auswertung Ackerbohne (siehe CD)

Anhang A4-3-2-1: SAS-Auswertung für den Versuchsschlag „550“ (siehe CD)

Y_99 – Ertragspunkte des Erntejahres 1999

Y_03 – Ertragspunkte des Erntejahres 2003

Y_06 – Ertragspunkte des Erntejahres 2006

Anhang A4-3-2-2: SAS-Auswertung für den Versuchsschlag „Lange Winde“ (siehe CD)

Y_2011 – Ertragspunkte des Erntejahres 2011

Y_2010 – Ertragspunkte des Erntejahres 2010

Y_2008 – Ertragspunkte des Erntejahres 2008

Anhang A4-3-2-3: Durchschnittserträge von Wintergerste, Winterweizen und Winterraps für Deutschland

Ertrag je Hektar (Feldfrüchte und Grünland): Deutschland, Jahre, Fruchtarten

Ernte- u. Betriebsbericht: Feldfrüchte und Grünland

Deutschland

Ertrag je Hektar (dt/ha)

Fruchtarten	Jahr																			
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Winterweizen	63	68,2	60,3	66,2	68,2	69,2	73,2	73,4	72,4	76,4	73,2	79,2	69,4	65,5	82,1	75,1	72,4	69,9	81,3	78,4
Wintergerste	57,7	61,7	57,3	51,3	58,4	62,5	56,1	65,0	61,3	65,9	63,8	70,9	60,7	52,7	70,6	65,6	63,7	58,1	66,1	69,5
Winterraps	.	31,4	27,4	28,9	28,8	32,4	23,6	32,2	34,3	36,3	33,7	36,9	29,9	29,2	41,3	37,8	37,6	34,5	37,7	42,9

Körnermais: ab 1987 einschließlich Corn-Cob-Mix.

Bei der Berechnung der Erntemengen wurden in verschiedenen Ländern in verschiedenen Jahren vom Körnermais Anbauflächen abgezogen und dem Silomais zugeschlagen. Beim Ergebnis für Deutschland wurde das berücksichtigt.

Zuckerrüben: ab 1978 Bundes- und Länderegebnisse aus unterschiedlichen Quellen.

Klee, Klee gras und Klee-Luzerne-Gemisch; Luzerne;
Feldgras/Grasanbau auf dem Ackerland; Wiesen; Mähweiden;
Wiesen und Mähweiden zusammen;
Ertrag in Heu berechnet (einschl. Grünfütter- und Weidenutzung).

Silomais: Ertrag in Grünmasse.

Ab 2005 werden Erntemengen, die auf einer repräsentativen Bodennutzungshaupterhebung beruhen, auf 1000 gerundet.
(Copyright Statistisches Bundesamt (Destatis), 2017
Stand: 10.04.2017 / 23:48:38

Anhang A4-4-1-7: Erläuterung zur Kostenkalkulation für den Verissensor

Z4: Absetzung für Abschreibung
(AfA in € a⁻¹)

$$AfA = \frac{(Z1 - Z2)}{Z3}$$

$$ZA = ((Z1 - Z2) * f + Z2) * i$$

mit

Z5: Zinsanspruch
(ZA in € a⁻¹)

$$i = 0,06$$

$$q = 1,06$$

$$f = \frac{q^{Z3}}{q^{Z3} - 1} - \frac{1}{Z3 * i} = 0,6116$$

Z6: geschätzte Reparaturkosten
(RA in € a⁻¹)

$$RA = 500 \text{ € p. a.}$$

Z7: Zwischensumme fixe Kosten
(ZFK in € a⁻¹)

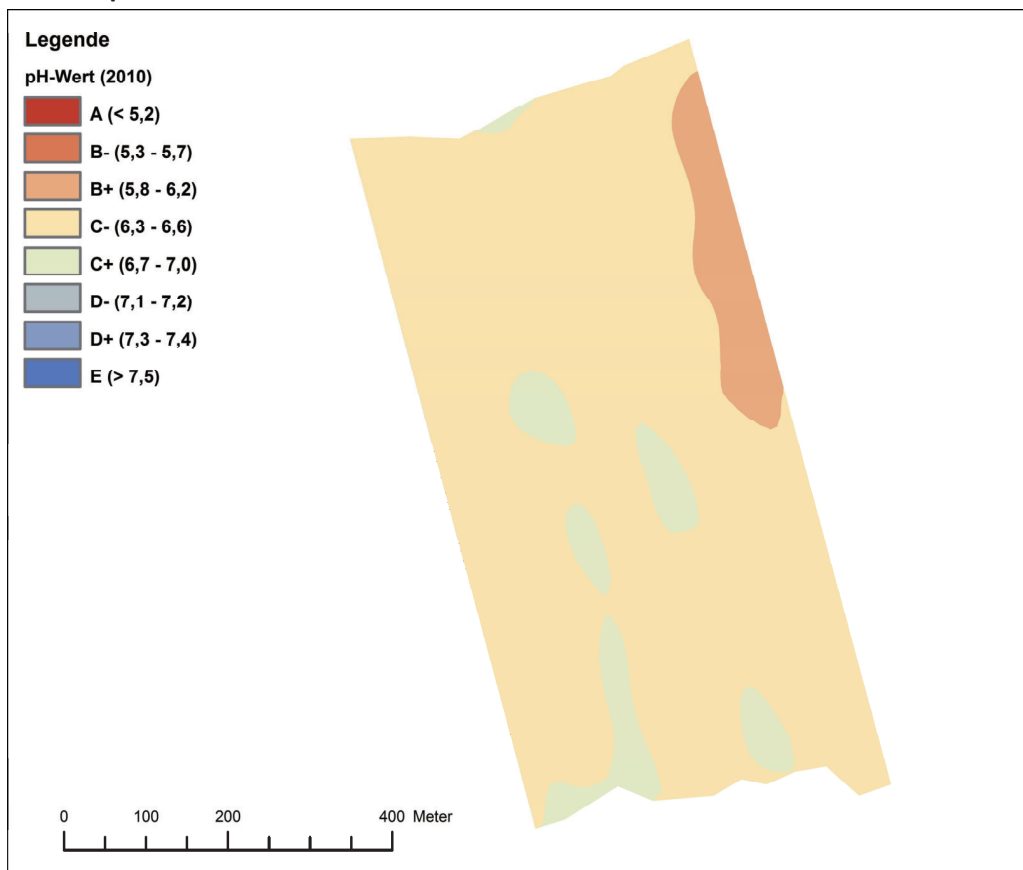
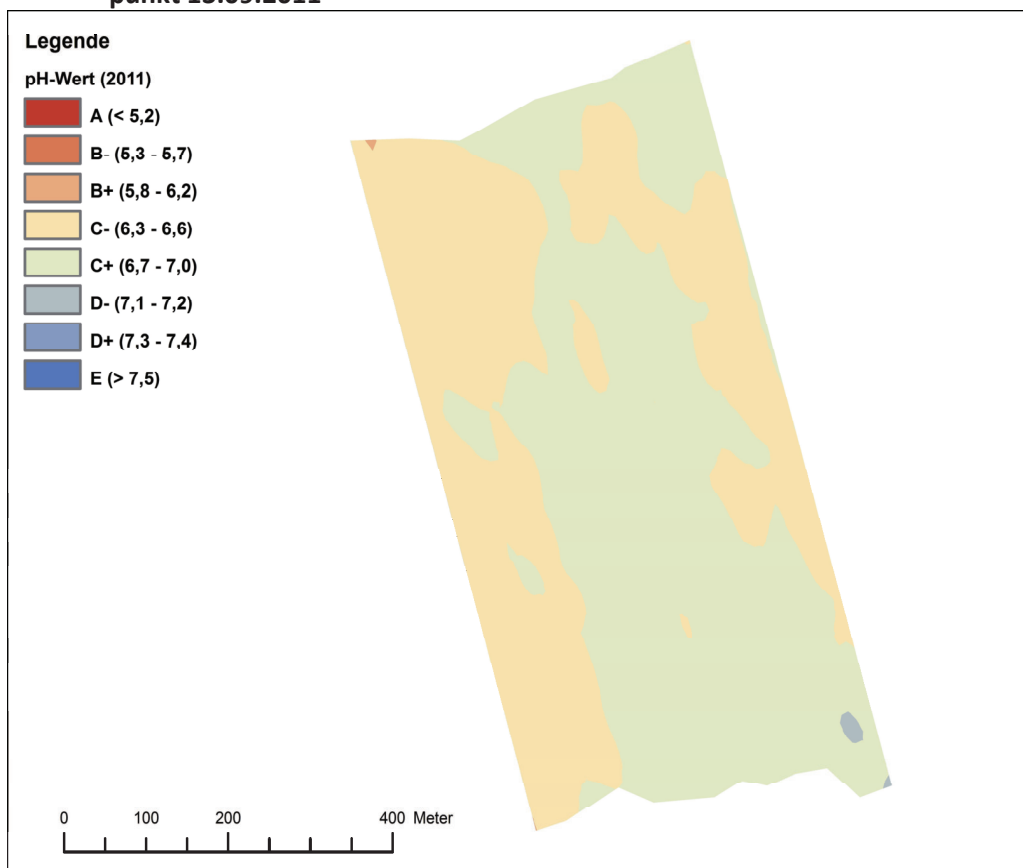
$$ZFK = Z4 + Z5 + Z6$$

Z15: Zwischensumme variable Kosten
(ZVK in € ha⁻¹)

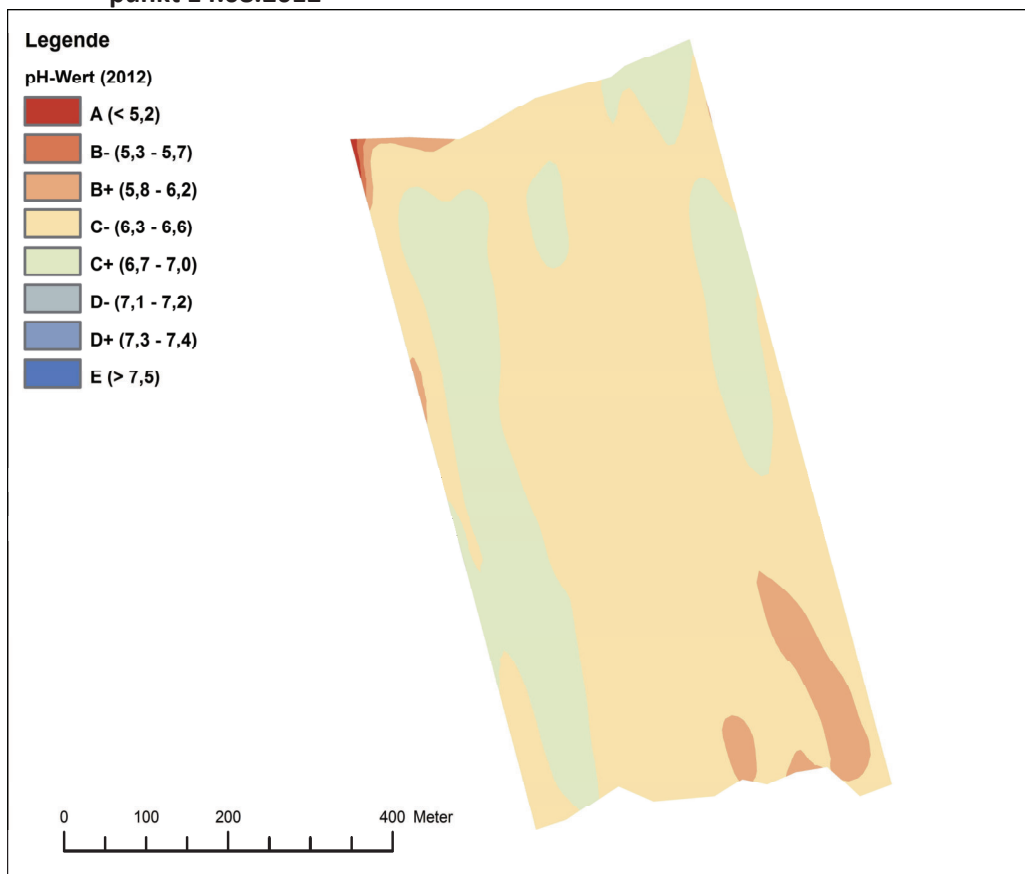
$$ZVK = Z10 * Z12 + Z9 * Z13 + Z11 * Z14 + Z8$$

Z16 bis Z23: Gesamtkosten (FEK) bei
unterschiedlichen Feldeinsätzen (n in ha a⁻¹)
in € ha⁻¹)

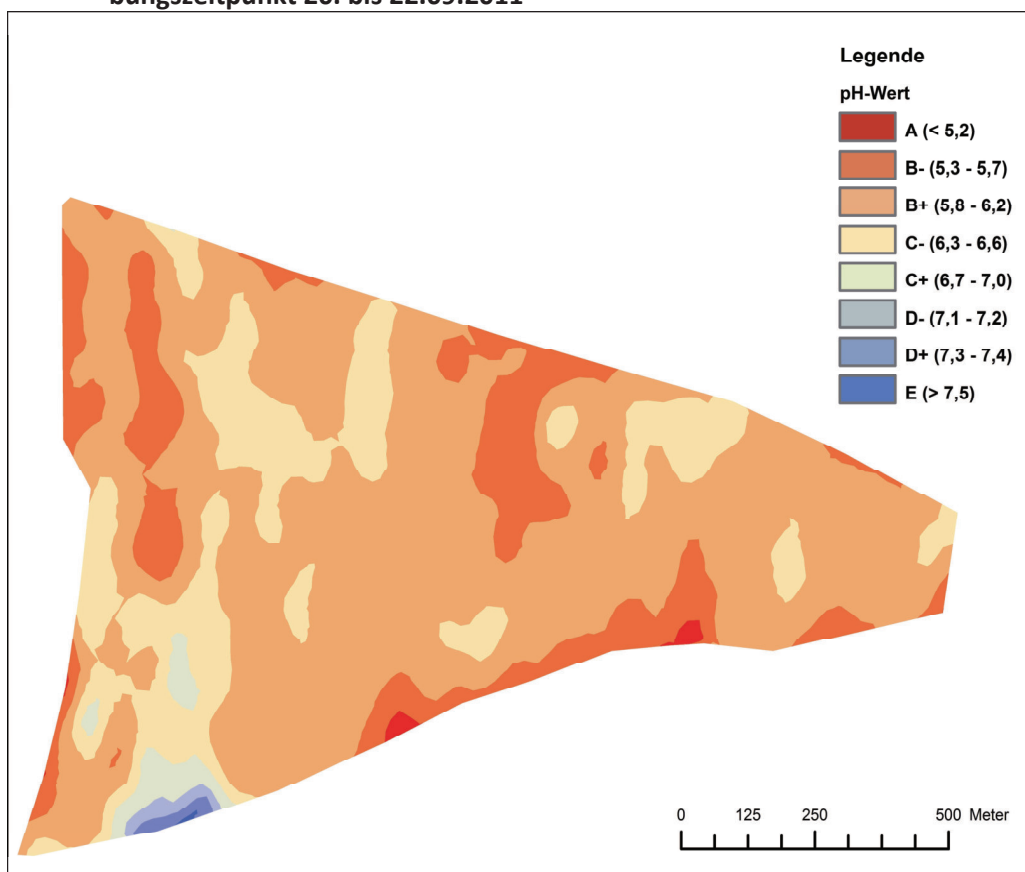
$$FEK = \frac{n * Z16 + Z7}{n}$$

Anhang A4-4-2-2-2a: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „110“, Standort Althen zum Beprobungszeitpunkt 14.10.2010**Anhang A4-4-2-2-2b: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „110“, Standort Althen zum Beprobungszeitpunkt 13.09.2011**

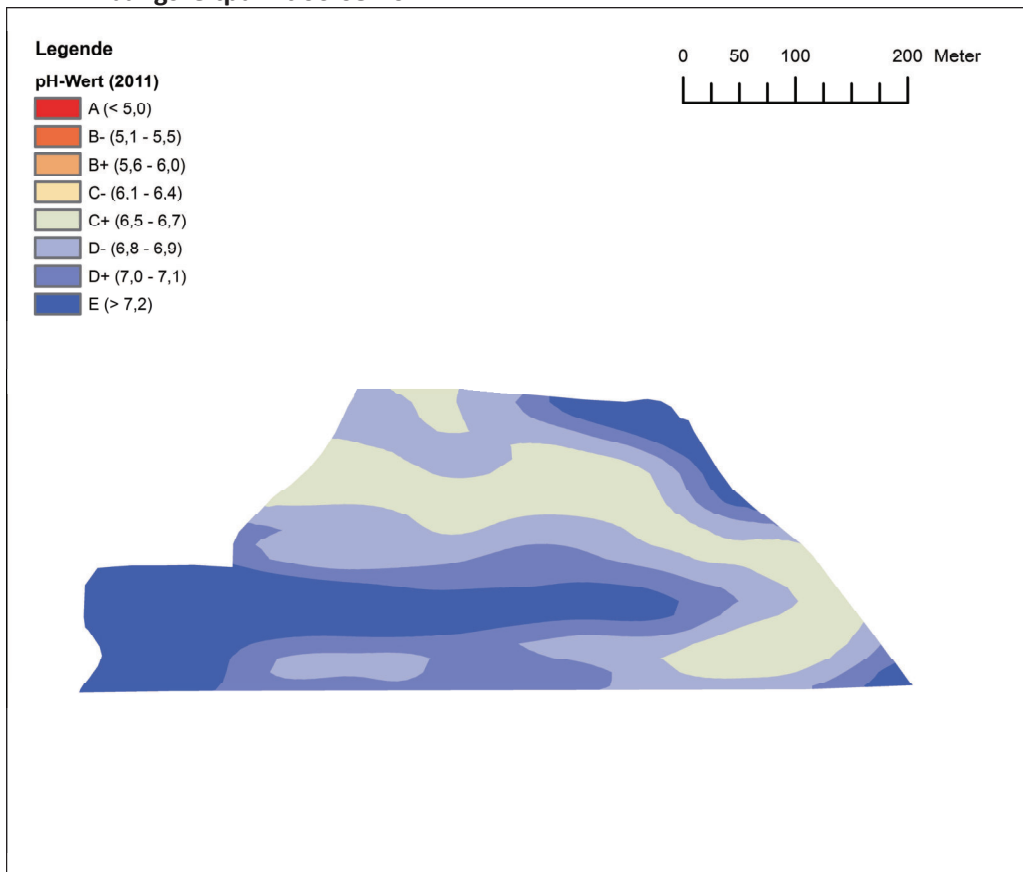
Anhang A4-4-2-2-2c: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „110“, Standort Althen zum Beprobungszeitpunkt 14.08.2012



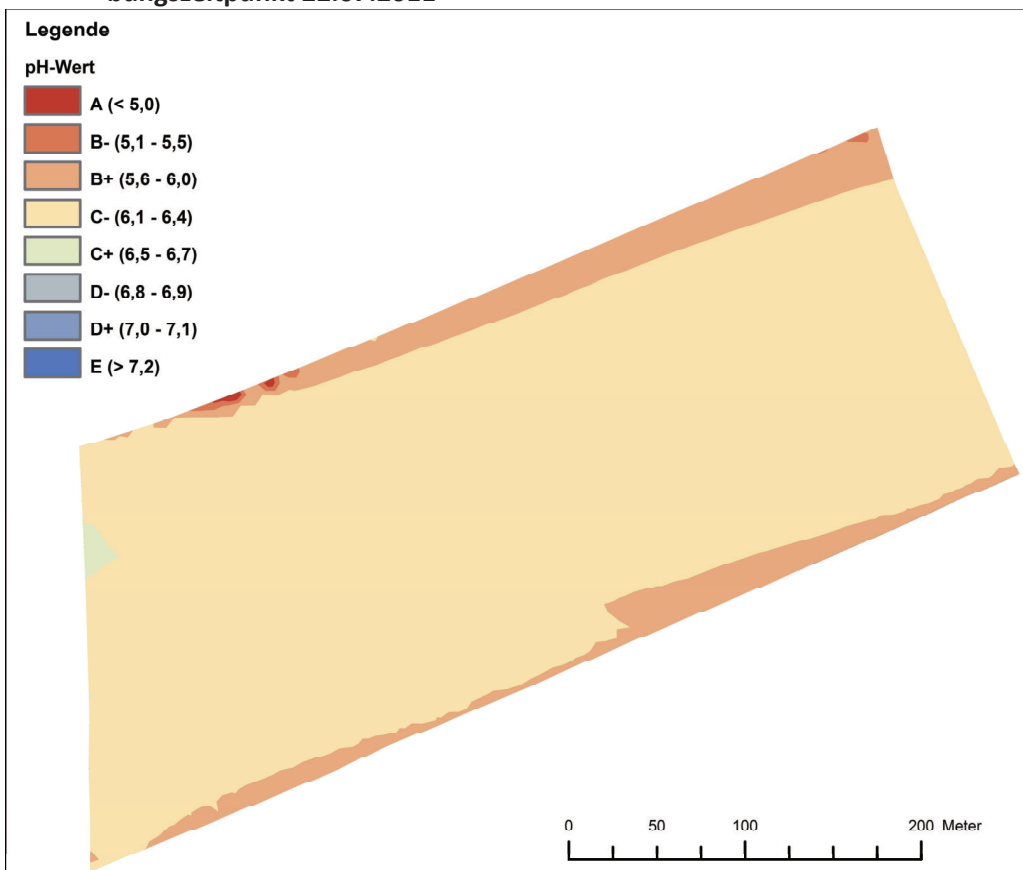
Anhang A4-4-2-2-2d: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Deutsches Feld“, Standort Krosigk zum Beprobungszeitpunkt 20. bis 22.09.2011



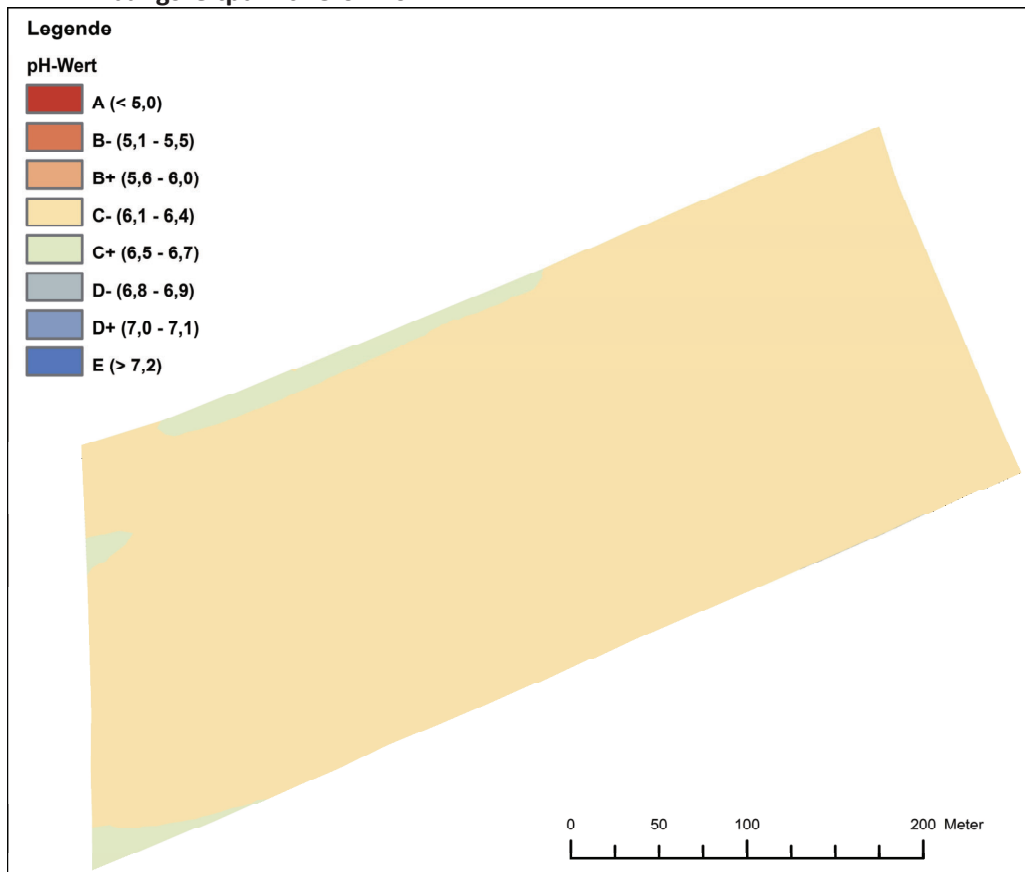
Anhang A4-4-2-2-2e: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Kuhberg“, Standort Dennheritz zum Beprobungszeitpunkt 06.08.2011



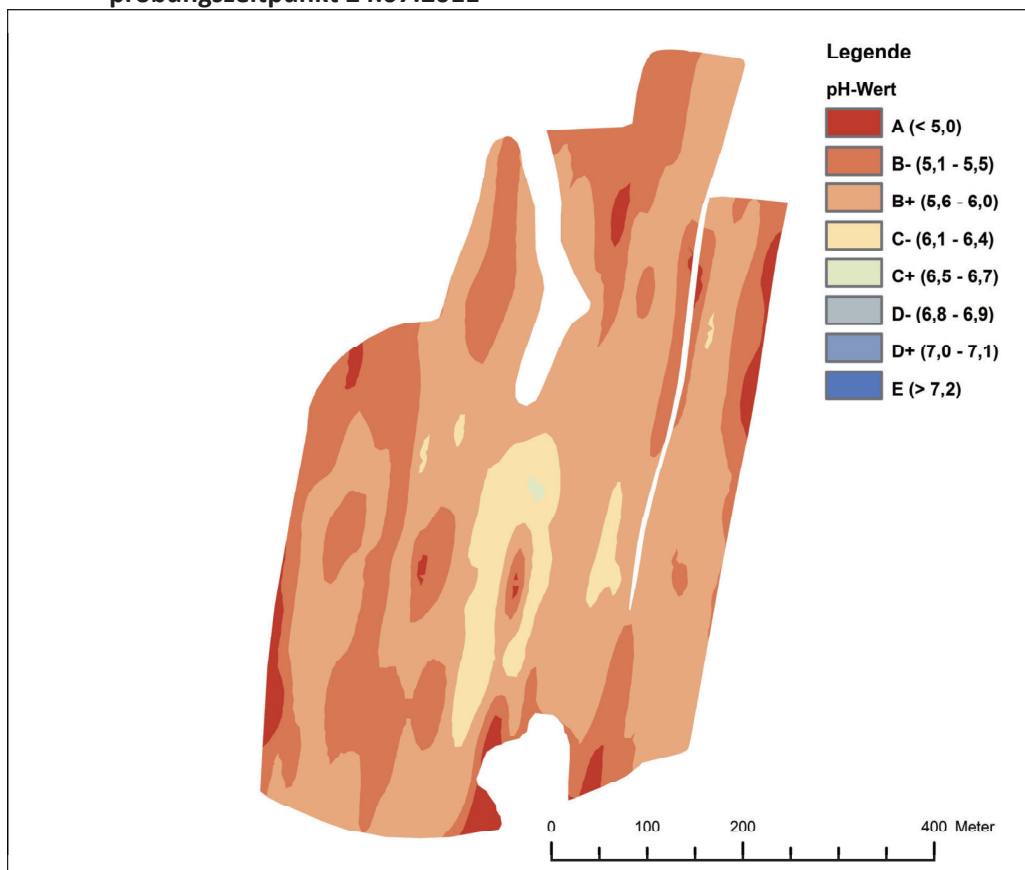
Anhang A4-4-2-2-2f: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Maststall“, Standort Dennheritz zum Beprobungszeitpunkt 22.07.2011



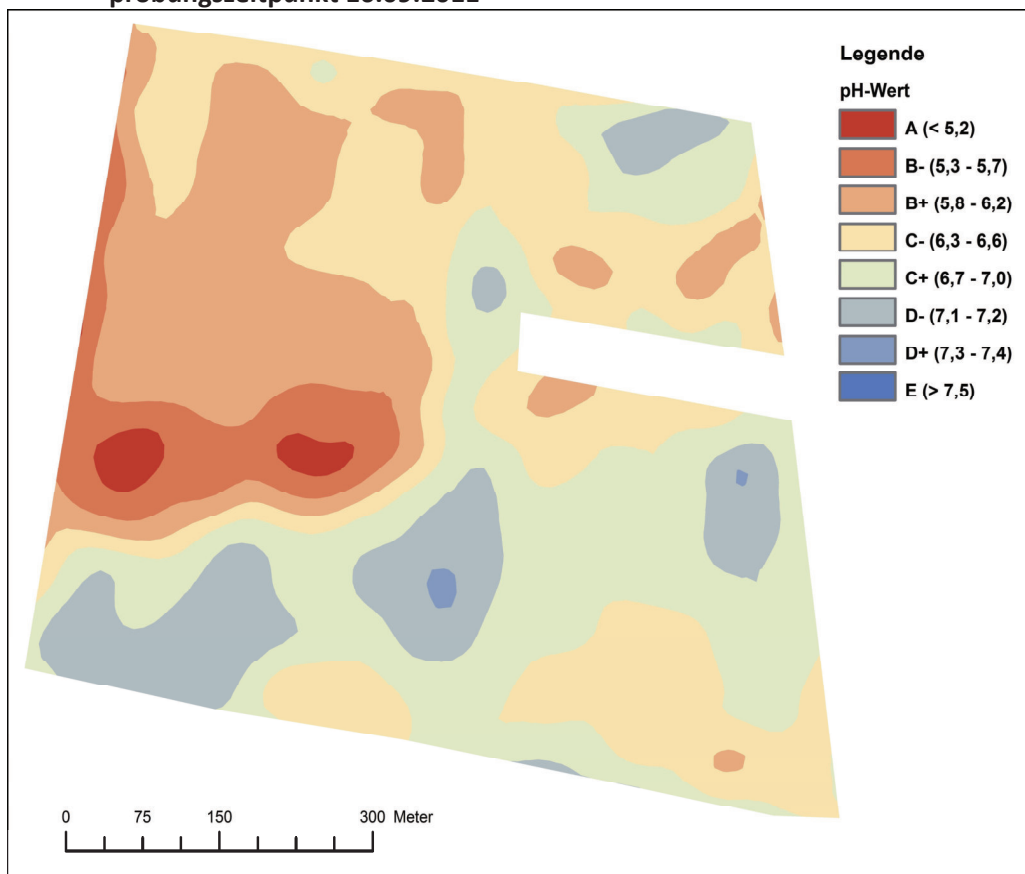
Anhang A4-4-2-2-2g: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Maststall“, Standort Dennheritz zum Beprobungszeitpunkt 25.07.2011



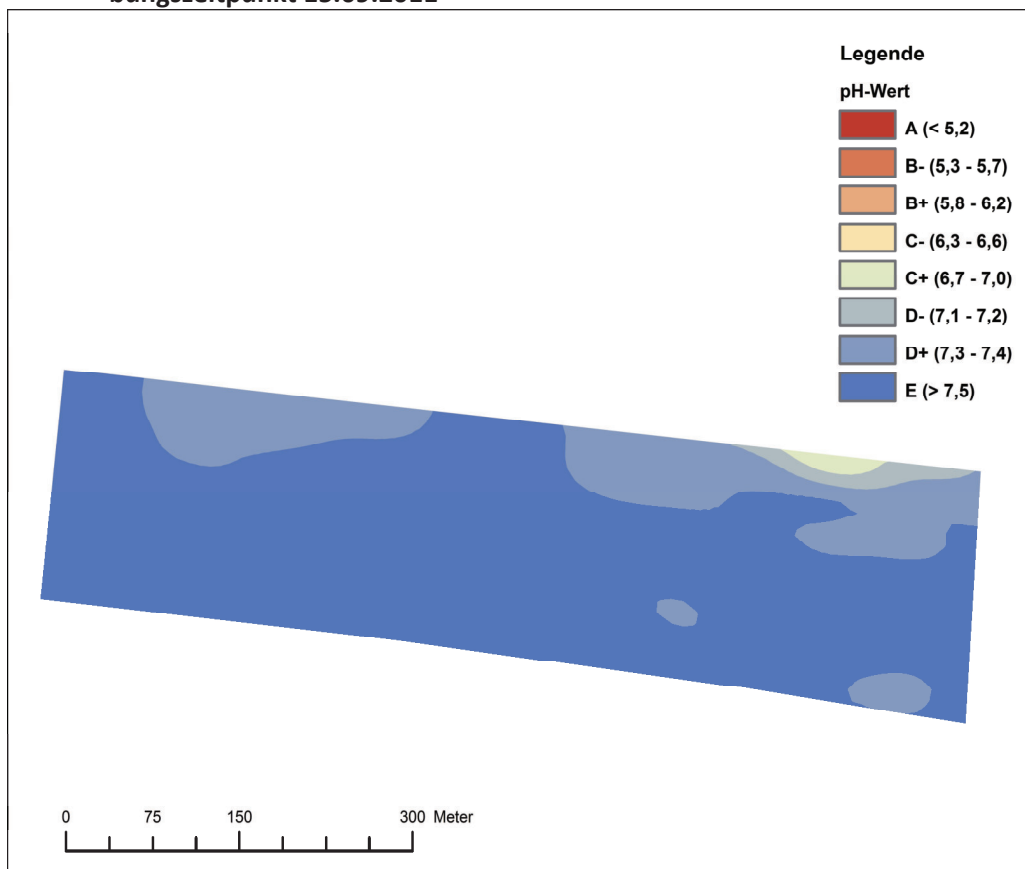
Anhang A4-4-2-2-2h: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Lange Welle“, Standort Dennheritz zum Beprobungszeitpunkt 24.07.2011



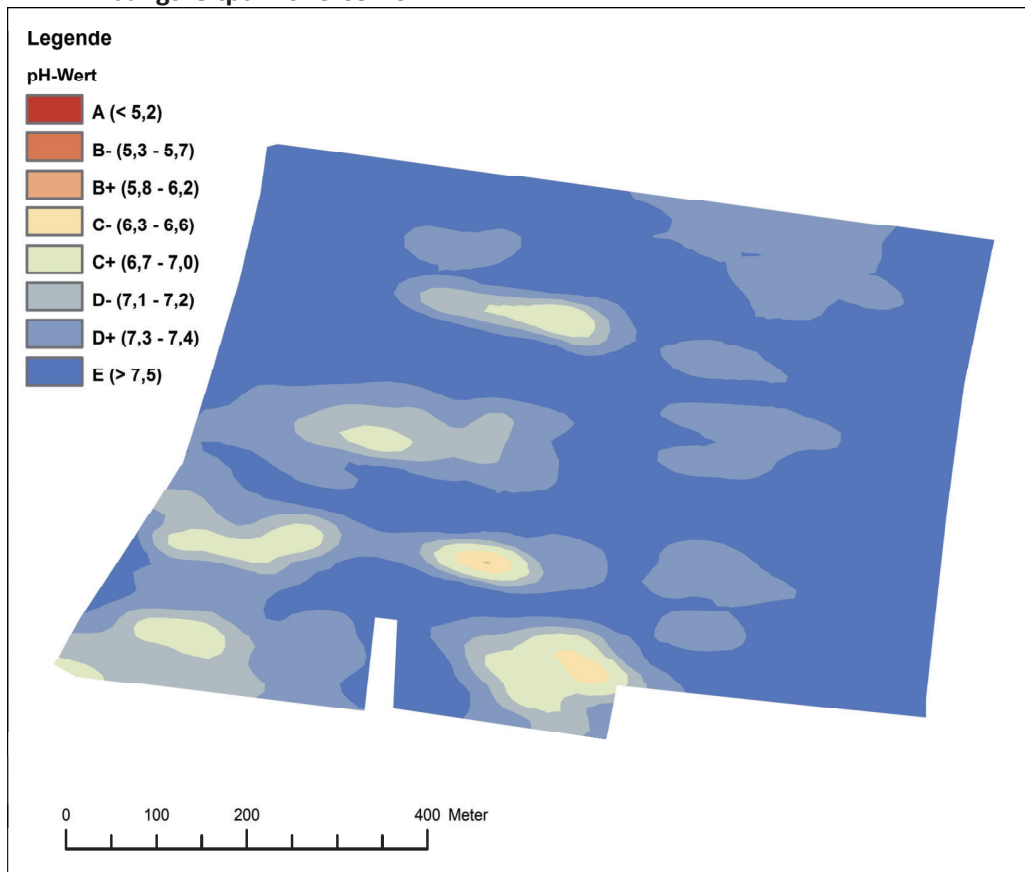
Anhang A4-4-2-2-2i: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Lange Winde“, Standort Warnstedt zum Beprobungszeitpunkt 16.09.2011



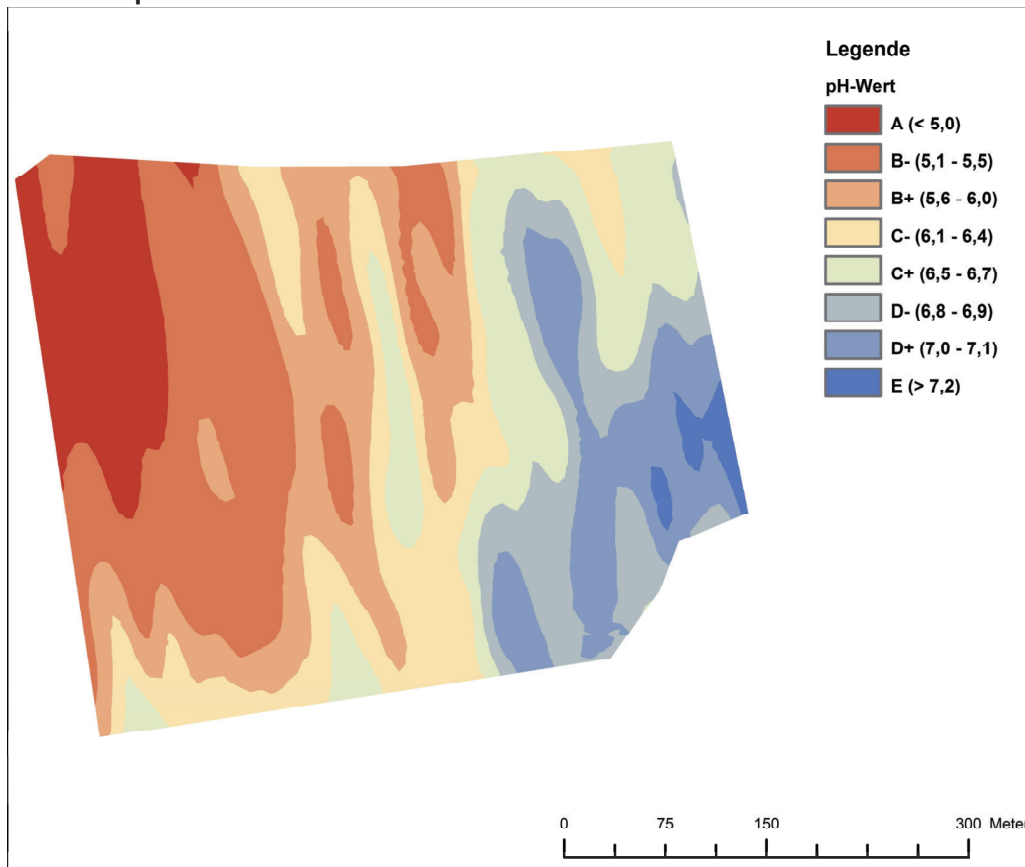
Anhang A4-4-2-2-2j: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Rieder I“, Standort Warnstedt zum Beprobungszeitpunkt 15.09.2011



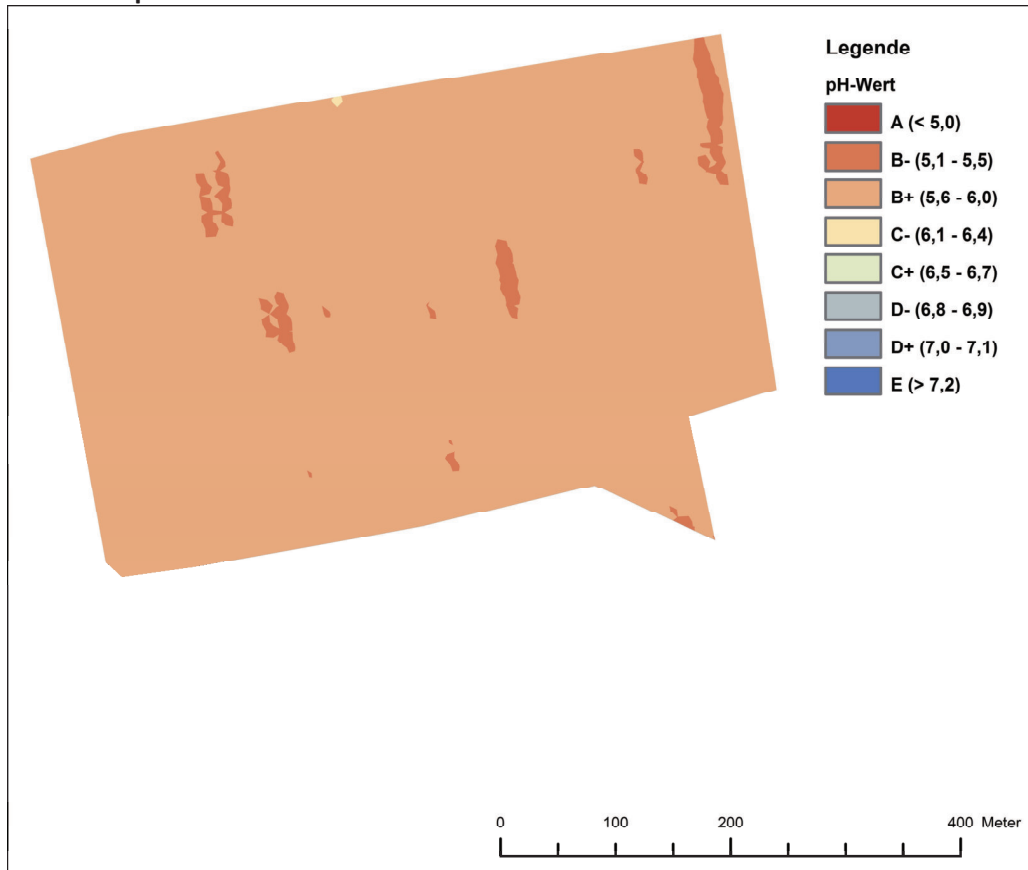
Anhang A4-4-2-2-2k: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Rieder II“, Standort Warnstedt zum Beprobungszeitpunkt 15.09.2011



Anhang A4-4-2-2-2l: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Dölzig I“, Standort Starsiedel zum Beprobungszeitpunkt 19.10.2010



Anhang A4-4-2-2-2m: pH-Wert Verteilung für den Versuchsschlag „Dölzig II“, Standort Starsiedel zum Beprobungszeitpunkt 19.10.2010



Anhang A4-4-2-2-4: prozentualer Anteil der Fruchtarten innerhalb der Fruchtfolge der landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland
0101 R Landwirtschaftliche Betriebe insgesamt 2012 nach jeweiligen Flächen und Anbaukulturen

Deutschland

Lfd. Nr.	Fläche und Anbaukultur (Hauptnutzungsart / Kulturart / Fruchtart)	Betriebe		Jeweilige Fläche	Prozentualer Anteil
		Anzahl in 1 000		1 000 ha	in %
		1		2	3
					(eigene Berechnungen)
1	Landwirtschaftlich genutzte Fläche zusammen	287,5	A	16 684,1	A
2	Ackerland zusammen	221,5	A	11 850,1	A
	darunter:				
3	Getreide zur Körnergewinnung ¹⁾ zusammen	186,8	A	6 525,0	A
	darunter:				
4	Weizen zusammen	138,2	A	3 061,5	A
5	Winterweizen einschl. Dinkel und Einkorn	134,9	A	2 896,6	A
6	Sommerweizen	14,9	A	152,8	A
7	Hartweizen (Durum)	0,5	C	12,1	B
8	Roggen und Wintermenggetreide	36,5	A	709,9	A
9	Triticale	43,8	A	373,4	A
10	Gerste zusammen	127,9	A	1 683,4	A
11	Wintergerste	99,0	A	1 093,4	A
12	Sommergerste	63,2	A	590,0	A
13	Hafer	40,9	A	145,6	A
14	Sommermenggetreide	6,6	B	32,0	B
15	Körnermais / Mais zum Ausreifen (einschl. CCM)	37,2	A	509,8	A
16	Pflanzen zur Grünenernte zusammen	148,8	A	2 830,1	A
17	Getreide zur Ganzpflanzenernte ²⁾	5,1	B	56,6	B
18	Silomais / Grünmais	109,4	A	2 056,4	A
19	Leguminosen zur Ganzpflanzenernte	49,9	A	273,4	A
20	Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	56,8	A	385,9	A
21	andere Pflanzen zur Ganzpflanzenernte	7,0	B	57,9	A
22	Hackfrüchte zusammen	60,1	A	647,3	A
23	Kartoffeln zusammen	34,9	A	238,1	A
24	Speisekartoffeln	28,7	A	97,2	B
25	andere Kartoffeln (Industrie-, Futter- und Pflanzkartoffeln)	8,7	B	140,9	B
26	Zuckerrüben ohne Saatguterzeugung	30,3	A	404,2	A
27	andere Hackfrüchte ohne Saatguterzeugung	4,7	B	5,0	B
28	Hülsenfrüchte zur Körnergewinnung ¹⁾ zusammen	9,6	B	82,0	A
	darunter:				
29	Erbsen	6,5	B	44,9	A
30	Ackerbohnen	2,3	B	15,6	B
31	Süßlupinen	1,1	B	17,8	A
32	Handelsgewächse zusammen	60,6	A	1 383,5	A
33	Ölfrüchte zur Körnergewinnung ¹⁾ zusammen	57,4	A	1 349,4	A
34	Winterraps	54,7	A	1 300,7	A
35	Sommerraps, Winter- und Sommerrüben	0,8	C	6,8	B
36	Sonnenblumen	1,5	C	26,4	A
37	Öllein (Leinsamen)	0,2	C	4,2	B
38	andere Ölfrüchte zur Körnergewinnung ¹⁾	2,3	B	11,3	B
39	weitere Handelsgewächse zusammen	4,3	B	34,1	B
40	Gemüse, Erdbeeren u.a. Gartengewächse zusammen	18,0	A	132,0	A
	darunter:				
41	Gemüse und Erdbeeren zusammen	13,4	A	123,5	A
42	Blumen und Zierpflanzen zusammen	6,0	B	7,8	B
43	Stillegelegte Flächen mit Beihilfe- / Prämienanspruch	47,6	A	208,5	A
44	Brache ohne Beihilfe- / Prämienanspruch	12,4	B	6,5	B

1) Einschließlich Saatguterzeugung.

2) Einschließlich Teigreife.

Statistisches Bundesamt, Fachserie 3, Reihe 3.1.2, 2012 (Vorbericht)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Datum

Unterschrift des Antragstellers

**Erklärung über bestehende Vorstrafen und anhängige Ermittlungsverfahren /
Declaration concerning Criminal Record and Pending Investigations**

Hiermit erkläre ich, dass ich weder vorbestraft bin noch dass gegen mich Ermittlungsverfahren anhängig sind. / *I hereby declare that I have no criminal record and that no preliminary investigations are pending against me.*

Datum / *Date*

Unterschrift des Antragstellers / *Signature of the applicant*

Lebenslauf

ANGABEN ZUR PERSON

Name: Tobias Karl Oskar Leithold
Geburtsdatum und -ort: 21. Dezember 1984 in Zwickau
Familienstand: verheiratet

BERUFSTÄTIGKEIT

seit 05/2016 Geschäftsführer der Agrar GmbH Frienstedt

06/2013 – 04/2016 Precision Farming Specialist – CLAAS, Service und Entwicklung von Precision Farming Anwendungen (Ertragskartierung, potentielle Bodenfeuchtekarten, Potentialkartenerstellung)

08/2009 – 12/2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Landwirtschaftliche Betriebslehre, Drittmittelprojekt im Bereich Precision Farming (Entwicklung wissenschaftlicher Methoden und Entscheidungsregeln zur Evaluierung der kleinräumigen pH-Wert-Ermittlung unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten und anhand von Untersuchungen eines pH-Wert-Sensor)

SCHULBILDUNG UND –ABSCHLUSS

10/2003 – 07/2009 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Studium der Agrarwissenschaften (Diplom)
(Abschlussnote: 1,6)
Thema der Diplomarbeit:
„Zur Wirtschaftlichkeit von Herbiziden und Fungiziden bei Wintergetreide in einem Langzeitversuch unter Berücksichtigung verschiedener Berechnungsszenarien“
(Gesamtnote: 1,1)

08/1995 – 07/2003 „Johann-Heinrich-Pestalozzi“ Gymnasium Meerane
Abitur
(Abschlussnote: 2,4)

PRAKTIKA

2005 – 2008 Wissenschaftliche Hilfskraft (MLU Halle-Wittenberg, Landwirtschaftliche Fakultät) u.a. zur Literaturrecherche, Plausibilitätsprüfung eines betriebswirtschaftlichen Planungsprogramms, Betriebsbefragungen, Datenmanagement einer Ackerschlagkartei, Leiter eines Tutoriums

2005 – 2008

Betreuung und Pflege der Ackerschlagkartei auf dem
Landwirtschaftsbetrieb Wehrle, Prehna

07 – 10/2005 – 2007

Vorführer Väderstad GmbH
Vertrieb Sachsen/Thüringen

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Betreuer Herrn Prof. Dr. Peter Wagner, der mich bei meinen Forschungsaufgaben stets unterstützt hat und immer den Blick auf die praktische Anwendbarkeit der Forschungsbestrebungen gewahrt hat.

Des Weiteren bedanke ich mich auch bei allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Landwirtschaftliche Betriebslehre für die gute Zusammenarbeit und die wertvollen Diskussionen und Anregungen.

Mein herzlichster Dank gilt nicht zuletzt auch dem Bundesministerium für Wirtschaft und Bildung, das eine Finanzierung des Projektes unter der Richtlinie „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ ermöglichte.

Ein sehr herzlicher Dank gilt meinen Eltern Elke und Rudolf Leithold, meiner Schwester Dr. Marlen Eigenwillig, meinem Bruder Mario Leithold und meiner Frau Dr. Camilla Leithold, die alle auf ihre Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Frienstedt, den 04.02.2020

Tobias Leithold