

Aus dem Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde

Kerstin Panten

**Ein Beitrag zur Fernerkundung der räumlichen
Variabilität von Boden- und Bestandesmerkmalen**

Manuskript, zu finden in www.fal.de

Published as: Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 232

**Braunschweig
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
2002**

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abbildungen und Tabellen im Anhang.....	IX
1 Einleitung.....	1
2 Material und Methoden.....	5
2.1 <i>Untersuchungsgebiet.....</i>	<i>5</i>
2.2 <i>Standortmerkmale.....</i>	<i>8</i>
2.2.1 <i>Boden.....</i>	<i>8</i>
2.2.2 <i>Relief.....</i>	<i>10</i>
2.2.3 <i>Klima.....</i>	<i>11</i>
2.3 <i>Fernerkundung und Bildverarbeitung.....</i>	<i>12</i>
2.4 <i>Ertragsermittlung.....</i>	<i>18</i>
2.5 <i>Boden- und Pflanzenprobenahme.....</i>	<i>21</i>
2.5.1 <i>30 m Rasterbeprobung.....</i>	<i>21</i>
2.5.2 <i>Probenahme anhand klassifizierter Luftbilder.....</i>	<i>22</i>
2.5.3 <i>Probenahme anhand von Ertragskarten.....</i>	<i>24</i>
2.5.4 <i>Probenahme anhand von Reliefparametern.....</i>	<i>25</i>
2.6 <i>Analytik.....</i>	<i>26</i>
2.7 <i>Datenverarbeitung und Statistik.....</i>	<i>27</i>
3 Ergebnisse.....	31
3.1 <i>Deskriptive Statistik ausgewählter Merkmale der Bodenfruchtbarkeit.....</i>	<i>31</i>
3.2 <i>Beziehungen zwischen Fernerkundungsdaten und Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit.....</i>	<i>36</i>
3.2.1 <i>Unüberwacht klassifizierte Bodenbilder.....</i>	<i>38</i>
3.2.2 <i>Unüberwacht klassifizierte Vegetationsbilder.....</i>	<i>41</i>
3.3 <i>Raum- und Zeitstabilität spektraler Signaturen.....</i>	<i>45</i>
3.3.1 <i>Vergleich spektraler Signaturen einer Kulturart an verschiedenen Zeitpunkten auf mehreren Schlägen.....</i>	<i>45</i>
3.3.2 <i>Betrachtung spektraler Signaturen von Kulturarten im Vegetationsverlauf.....</i>	<i>47</i>
3.3.3 <i>Vergleich spektraler Signaturen zu Bodenparametern, bestimmt an verschiedenen Terminen.....</i>	<i>50</i>
3.3.4 <i>Schlussfolgerung.....</i>	<i>54</i>
3.4 <i>Fallstudie zur Ableitung von Monitorpedozellen.....</i>	<i>56</i>
3.4.1 <i>Ableitung von Monitorpedozellen anhand unüberwacht klassifizierter Luftbilder.....</i>	<i>56</i>
3.4.2 <i>Ableitung von Monitorpedozellen anhand relativer Ertragskarten.....</i>	<i>64</i>
3.4.3 <i>Ableitung von Monitorpedozellen unter Anwendung eines DGM.....</i>	<i>72</i>
4 Diskussion.....	77
4.1 <i>Beurteilung der untersuchten Merkmale der Bodenfruchtbarkeit.....</i>	<i>77</i>
4.2 <i>Beurteilung der Beziehungen zwischen Fernerkundungsdaten und Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit.....</i>	<i>80</i>
4.2.1 <i>Kritische Betrachtung der verwendeten Fernerkundungsdaten.....</i>	<i>81</i>
4.2.2 <i>Beziehungen zwischen Bodenbildern und Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit.....</i>	<i>83</i>
4.2.3 <i>Beziehungen zwischen Vegetationsbildern und Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit.....</i>	<i>84</i>
4.3 <i>Räumlich und zeitlich wiederkehrende spektrale Signaturen.....</i>	<i>86</i>

4.4	<i>Monitorpedozellen zur Erfassung der räumlichen Variabilität</i>	89
4.4.1	<i>Fernerkundungsdaten</i>	90
4.4.2	<i>Ertragskarten</i>	92
4.4.3	<i>Digitale Geländemodelle</i>	94
4.4.4	<i>Vergleich der Methoden</i>	95
5	Zusammenfassung	97
6	Literatur	103
7	Anhang	109

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2-1: Lageplan zum Versuchsstandort Mariensee.
- Abb. 2-2: Untersuchungsgebiet Mariensee. Übersichtskarte der Versuchsflächen auf Grundlage der Topographischen Karte 1:25000. (Kartengrundlage: Topographische Karte 1:25 000, Blattnummern: 3422 (1991), 3423 (1991). Vervielfältigung mit Erlaubnis des Herausgebers: LGN – Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen –52-3190/01).
- Abb. 2-3: Schrägaufnahme des Versuchsbetriebes Mariensee vom 10.04.2000. Abgebildet wird ein Teil der Schläge im Leinetal.
- Abb. 2-4: Schrägaufnahme des Versuchsbetriebes Mariensee vom 10.04.2000. Abgebildet wird ein Teil der Schläge in der Nienburger Geest.
- Abb. 2-5: Übersicht der Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee auf der Bodenkarte 1:25000. Ausschnitt aus BK 25, 3422 Neustadt a. Rübenberge (1984) und 3423 Otterndorf (1985).
- Abb. 2-6: Monatliche Niederschlagsverteilung der Jahre 1995-2000 am Standort Mariensee bezogen auf das langjährige Mittel von Neustadt am Rübenberge.
- Abb. 2-7: Monatliche Niederschlagsverteilung der Jahre 1995-2000 in Nienburg an der Weser bezogen auf das langjährige Mittel.
- Abb. 2-8: Monatliche Sonnenscheindauer der Jahre 1995-2000 in Nienburg an der Weser bezogen auf das langjährige Mittel der Wetterstation Hannover.
- Abb. 2-9: Erkundungsflugzeug (Piper PA 28).
- Abb. 2-10: Schema der Bildverarbeitung am Beispiel der Aufnahme von Schlag 7 vom 21.07.1996.
- Abb. 2-11: Massey Ferguson Mährescher mit Flowcontrol Ertragssensor und DGPS.
- Abb. 2-12: Haferertragskarte des Schlages Duvenwinkel von 1995.
- Abb. 2-13: Reliefparameter nach dem ARC/INFO TIN Modell.
- Abb. 2-14: Räumliche Abhängigkeit des Zuckerrübenenertrages auf dem Schlag Gr. Fuchsberg des Versuchsstandortes Mariensee 1999.
- Abb. 3-1: Variabilität der Bodenparameter pH, P, K und Mg auf dem Schlag Stall 3 anhand der Rasterbeprobung von 1995.
- Abb. 3-2: Prozentualer Anteil der Ackerflächen in Mariensee in den P-Gehaltsklassen der Landwirtschaftskammer Hannover im Jahr 1995 (ANONYM, 1998).
- Abb. 3-3: Prozentualer Anteil der Ackerflächen in Mariensee in den K-Gehaltsklassen der Landwirtschaftskammer Hannover im Jahr 1995 (ANONYM, 1998).

- Abb. 3-4: Prozentualer Anteil der Ackerflächen in Mariensee in den Mg-Gehaltsklassen der Landwirtschaftskammer Hannover im Jahr 1995 (ANONYM, 1998).
- Abb. 3-5: Prozentualer Anteil signifikanter Zusammenhänge zwischen Bildklassen eines jeden Aufnahmetermins und Bodenparametern der Rasterbeprobung 1995 sowie Ertragsdaten von 1995-2000.
- Abb. 3-6: Signifikante Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierten Bodenbildern und ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit der Rasterbeprobung von 1995 sowie von Ertragsdaten auf dem Versuchsstandort Mariensee unterteilt nach Landschaftsgebieten.
- Abb. 3-7: Prozentuale Anteile signifikanter Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierten Bodenbildern und ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit der Rasterbeprobung von 1995 unterteilt nach den vorherrschenden Bodenarten Auenboden und Braunerde der Landschaftsgebiete.
- Abb. 3-8: Signifikante Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierten Vegetationsbildern und ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit der Rasterbeprobung von 1995 sowie von Ertragsdaten auf dem Versuchsstandort Mariensee unterteilt nach Landschaftsgebieten.
- Abb. 3-9: Prozentuale Anteile signifikanter Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierten Vegetationsbildern und ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit der Rasterbeprobung von 1995 unterteilt nach den vorherrschenden Bodenarten Auenboden und Braunerde der Landschaftsgebiete.
- Abb. 3-10: Prozentuale Anteile signifikanter Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierten Vegetationsbildern und Ertragsdaten der Jahre 1995-2000 unterteilt nach den vorherrschenden Bodenarten Auenboden und Braunerde der Landschaftsgebiete.
- Abb. 3-11: Prozentualer Anteil signifikanter Zusammenhänge zwischen Bildklassen gewonnen aus unüberwacht klassifizierten Luftbildern von fünf Schlägen mit Wintergerste zu fünf verschiedenen Zeitpunkten.
- Abb. 3-12: Prozentualer Anteil Übereinstimmungen der Ergebnisse der Varianzanalyse anhand von Bildklassen von zwei Aufnahmeterminen (Gruppe 1996: 07.06.96 und 21.07.96, Gruppe 2000: 10.04.00 und 15.05.00) während einer Vegetationsperiode.
- Abb. 3-13: Übereinstimmung der Ergebnisse des F-Test zwischen Bildklassen und Bodenparametern der Rasterbeprobungen 1995 und 1998 bzw. 2000 für Schlag 3, Schlag 5 + 6 + Kultur II und Stall 3.

- Abb. 3-14: Prozentualer Anteil signifikanter Unterschiede zwischen Bildklassen der Bodenbilder von Mariensee und den Bodenparametern der Rasterbeprobung 1995 in Abhängigkeit vom Aufnahmeterrain.
- Abb. 3-15: Unüberwacht klassifiziertes Luftbild des Schlags Moorkamp vom 25.09.1997 mit 17 festgelegten Monitorpedozellen.
- Abb. 3-16: Unüberwacht klassifiziertes Luftbild des Feldes Schlag 2 vom 07.06.1996 mit zwölf festgelegten Monitorpedozellen.
- Abb. 3-17: Unüberwacht klassifiziertes Luftbild des Feldes Schlag 7 vom 21.07.1996 mit 15 festgelegten Monitorpedozellen.
- Abb. 3-18: Monitorpedozellen von Schlag 2 ausgewählt anhand relativer Ertragsdaten von drei Jahren (1996, 1997 und 1999).
- Abb. 3-19: Monitorpedozellen von Schlag 7 ausgewählt anhand relativer Ertragsdaten von 1999.
- Abb. 3-20: Monitorpedozellen vom Gr. Fuchsberg ausgewählt anhand relativer Ertragsdaten von vier Jahren (1995, 1996, 1997 und 1998).
- Abb. 3-21: Monitorpedozellen vom Gr. Fuchsberg von 33 auf 16 reduziert anhand der Analysenergebnisse von 1999 und dem unüberwacht klassifizierten Luftbild vom 07.06.1996.
- Abb. 3-22: Signifikante und nicht signifikante Unterschiede zwischen Geländemerkmale nach dem ARC/INFO TIN Modell und ausgewählten Bodenparametern der Rasterbeprobung 1995 sowie Erträgen von 1995-2000 für zwölf Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee.
- Abb. 4-1: Beziehungen zwischen der Schlaggröße und dem Variationskoeffizienten für die Bodenparameter P, K und Mg für den Versuchsbetrieb Mariensee.

Tabellenverzeichnis

- Tab. 2-1: Bodeneigenschaften der Schläge aus der Bodenkarte 1:25000 und der Bodenkarten auf der Grundlage der Bodenschätzung 1:5000.
- Tab. 2-2: Jährliche Niederschläge und Sonnenscheindauer der Vegetationsperioden 1995/1996 bis 1999/2000.
- Tab. 2-3: Bildinhalte der Luftbilder des Versuchsstandortes Mariensee 1995-2000. (Grau hervorgehoben sind Aufnahmen, die zur Festlegung von Monitorpedozellen benutzt wurden).
- Tab. 2-4: Real-time Ertragsmessungen auf dem Versuchsstandort Mariensee von 1995-2000. (Grau hervorgehoben sind Datensätze, die zu relativen Ertragskarten zusammengefasst wurden, mit deren Hilfe Monitorpedozellen festgelegt wurden).
- Tab. 2-5: Beprobungen am Versuchsstandort Mariensee nach unüberwacht klassifizierten Luftbildern.
- Tab. 2-6: Beprobungen am Versuchsstandort Mariensee nach relativen Ertragskarten.
- Tab. 2-7: Methoden der Boden- und Pflanzenanalysen.
- Tab. 2-8: Reichweite von ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit der Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee, ermittelt anhand der Rasterdaten (30 m) von 1995.
- Tab. 3-1: Zusammenfassung der Minima, Maxima, arithmetischen Mittel und Variationskoeffizienten der Bodenmerkmale der Schläge für die Rasterbeprobung von 1995.
- Tab. 3-2: Statistische Sicherheit (F-Test) für Bodenparameter der Rasterbeprobung von 1995 gemessen in Luftbildklassen des Schlages Kultur IV.
- Tab. 3-3: Prozentuale Häufigkeiten auftretender signifikanter Unterschiede zwischen den Bildklassen von Vegetationsbildern unterschiedlicher Kulturarten für die Bodenparameter von 1995 und Ertragsdaten von 1995-2000.
- Tab. 3-4: Prozentualer Anteil Übereinstimmungen von signifikanten Unterschieden zwischen spektralen Signaturen im Verlauf einer Vegetationsperiode (drei Termine) und Bodenparametern der Rasterbeprobung von 1995 und Ertragsdaten von 1995-2000.

- Tab. 3-5: Zusammenfassung der Minima, Maxima, arithmetischen Mittel und Variationskoeffizienten der Bodenmerkmale der Schläge Schlag 3, Schlag 5 + 6 + Kultur II und Stall 3 im Vergleich für die Rasterbeprobung von 1995, 1998 und 2000.
- Tab. 3-6: Statistische Sicherheiten (F-Test) für ausgewählte Bodenparameter gemessen in Luftbildklassen für Schlag 3 und Stall 3 in Abhängigkeit ihrer zeitlichen Entfernung in Jahren.
- Tab. 3-7: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Raum- und Zeitstabilität spektraler Signaturen.
- Tab. 3-8: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter gemessen in nach dem Luftbild vom 25.09.1997 festgelegten Monitorpedozellen für den Schlag Moorkamp.
- Tab. 3-9: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter gemessen in nach dem Luftbild vom 07.06.1996 festgelegten Monitorpedozellen für den Schlag 2.
- Tab. 3-10: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter gemessen in nach dem Luftbild vom 21.07.1996 festgelegten Monitorpedozellen für Schlag 7.
- Tab. 3-11: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter gemessen in nach relativen Ertragsklassen festgelegten Monitorpedozellen für Schlag 2.
- Tab. 3-12: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter gemessen in nach relativen Ertragsklassen festgelegten Monitorpedozellen für Schlag 7.
- Tab. 3-13: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter gemessen in nach relativen Ertragsklassen und nach Luftbildern festgelegten Monitorpedozellen für den Schlag Gr. Fuchsberg (1999: 33 Proben; 2000: 16 Proben).
- Tab. 3-14: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Bodenparameter gemessen in Monitorpedozellen, festgelegt nach Geländemerkmale im Frühjahr 1999 für Schlag 5 + 6 + Kultur II, Schlag 7 und Stall 7.
- Tab. 3-15: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Bodenparameter der Rasterbeprobung von 1995 gemessen in Geländeklassen aus der LandMapR™ Geländeanalyse für Schlag 3, Schlag 5 + 6 und Stall 7 + 8.

Abbildungen und Tabellen im Anhang

- Tab. A1: Deskriptive Statistik ausgewählter Merkmale der Bodenfruchtbarkeit des Versuchsstandortes Mariensee, Rasterbeprobung (30x30 m) des Oberbodens 1995.
- Tab. A2: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Bodenparameter der Rasterbeprobung 1995 und Ertragsdaten 1995-2000 gemessen in Luftbildklassen der Vegetationsbilder des Versuchsbetriebes Mariensee.
- Tab. A3: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Bodenparameter der Rasterbeprobung 1995 und Ertragsdaten 1995-2000 gemessen in Luftbildklassen der Bodenbilder des Versuchsbetriebes Mariensee.
- Tab. A4: Vergleich von Ergebnissen der einfaktoriellen Varianzanalyse zwischen unüberwacht klassifizierten Luftbildern von zwei Terminen einer Vegetationsperiode und den Bodendaten der Rasterbeprobung 1995 sowie den Ertragsdaten 1995-2000 auf Schlägen des Versuchsbetriebes Mariensee.
- Tab. A5: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter der Rasterbeprobungen 1998 und 2000 gemessen in Luftbildklassen von Schlag 3, Schlag 5 + 6 + Kultur II und Stall 3.
- Tab. A6: Deskriptive Statistik für die anhand des unüberwacht klassifizierten Luftbildes vom 25.09.1997 festgelegten und 1999 und 2000 beprobten Monitorpedozellen auf dem Schlag Moorkamp.
- Tab. A7: Deskriptive Statistik für die anhand des unüberwacht klassifizierten Luftbildes vom 07.06.1996 festgelegten und 2000 beprobten Monitorpedozellen auf Schlag 2.
- Tab. A8: Deskriptive Statistik für die anhand des unüberwacht klassifizierten Luftbildes vom 21.07.1996 festgelegten und 2000 beprobten Monitorpedozellen auf Schlag 7.
- Tab. A9: Deskriptive Statistik der Monitorpedozellen nach relativen Ertragsdaten 1999 und 2000 von Schlag 2.
- Tab. A10: Deskriptive Statistik der Monitorpedozellen nach relativen Ertragsdaten 1999 und 2000 von Schlag 7.
- Tab. A11: Deskriptive Statistik der 33 Monitorpedozellen nach relativen Ertragsdaten 1999 vom Gr. Fuchsberg.

- Tab. A12: Deskriptive Statistik der anhand von Analyseergebnisse 1999 und dem unüberwacht klassifizierten Luftbild vom 07.06.1996 von 33 auf 16 reduzierten Monitorpedozellen 2000 vom Gr. Fuchsberg.
- Tab. A13: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Bodenparameter der Rasterbeprobung von 1995 und Ertragsdaten von 1995-2000 gemessen in Geländeklassen des ARC/INFO TIN Modells für zwölf Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee.
- Tab. A14: Deskriptive Statistik der Monitorpedozellen nach Geländemerkmale für die Schläge Schlag 5 + 6 + Kultur II, Schlag 7 und Stall 7, beprobt im März 1999.

Bildtafeln 1-13

- Abb. A1: 17.07.95 Schlag 1 a h
- Abb. A2: 17.07.95 Stall 5 a+b
- Abb. A3: 07.06.96 Duvenwinkel
- Abb. A4: 07.06.96 Gr. Fuchsberg
- Abb. A5: 07.06.96 Moorkamp
- Abb. A6: 07.06.96 Schlag 2 und Stall 2
- Abb. A7: 07.06.96 Schlag 3
- Abb. A8: 07.06.96 Schlag 5+6 und Schlag 5+Kultur II
- Abb. A9: 07.06.96 Schlag 7
- Abb. A10: 07.06.96 Stall 3 und Stall 5 a+b
- Abb. A11: 07.06.96 Stall 6 b und Stall 7+8
- Abb. A12: 07.06.96 Vietingskamp
- Abb. A13: 21.07.96 Duvenwinkel
- Abb. A14: 21.07.96 Gr. Fuchsberg
- Abb. A15: 21.07.96 Kultur IV
- Abb. A16: 21.07.96 Moorkamp und Vietingskamp
- Abb. A17: 21.07.96 Schlag 1
- Abb. A18: 21.07.96 Schlag 2 und Stall 2
- Abb. A19: 21.07.96 Schlag 3
- Abb. A20: 21.07.96 Schlag 5+6 und Schlag 5+Kultur II
- Abb. A21: 21.07.96 Schlag 7
- Abb. A22: 21.07.96 Stall 5 a+b
- Abb. A23: 21.07.96 Stall 6 b

- Abb. A24: 21.07.96 Stall 7+8
- Abb. A25: 25.09.97 Duvenwinkel
- Abb. A26: 25.09.97 Gr. Fuchsberg
- Abb. A27: 25.09.97 Moorkamp
- Abb. A28: 25.09.97 Schlag 1 a h
- Abb. A29: 25.09.97 Schlag 3
- Abb. A30: 25.09.97 Stall 3
- Abb. A31: 25.09.97 Stall 5 a+b und Stall 6 b
- Abb. A32: 25.09.97 Vietingskamp
- Abb. A33: 13.07.98 Duvenwinkel
- Abb. A34: 13.07.98 Gr. Fuchsberg
- Abb. A35: 13.07.98 Schlag 3
- Abb. A36: 13.07.98 Schlag 7
- Abb. A37: 13.07.98 Vietingskamp
- Abb. A38: 19.10.99 Gr. Fuchsberg
- Abb. A39: 19.10.99 Kultur IV
- Abb. A40: 19.10.99 Moorkamp
- Abb. A41: 19.10.99 Schlag 1
- Abb. A42: 19.10.99 Schlag 2
- Abb. A43: 19.10.99 Schlag 5+6 und Schlag 5+Kultur II
- Abb. A44: 19.10.99 Stall 2
- Abb. A45: 19.10.99 Stall 3
- Abb. A46: 19.10.99 Stall 5 a+b
- Abb. A47: 19.10.99 Stall 6 b
- Abb. A48: 19.10.99 Vietingskamp
- Abb. A49: 10.04.00 Gr. Fuchsberg
- Abb. A50: 10.04.00 Kultur IV
- Abb. A51: 10.04.00 Moorkamp
- Abb. A52: 10.04.00 Schlag 1
- Abb. A53: 10.04.00 Schlag 1 a h
- Abb. A54: 10.04.00 Schlag 2
- Abb. A55: 10.04.00 Schlag 3
- Abb. A56: 10.04.00 Schlag 5+6 und Schlag 5+Kultur II
- Abb. A57: 10.04.00 Schlag 7
- Abb. A58: 10.04.00 Stall 2

Abb. A59:	10.04.00 Stall 3
Abb. A60:	10.04.00 Stall 5 a+b
Abb. A61:	10.04.00 Stall 6 b
Abb. A62:	10.04.00 Vietingskamp
Abb. A63:	15.05.00 Duvenwinkel
Abb. A64:	15.05.00 Gr. Fuchsberg
Abb. A65:	15.05.00 Kultur IV
Abb. A66:	15.05.00 Moorkamp
Abb. A67:	15.05.00 Schlag 1
Abb. A68:	15.05.00 Schlag 1 a h
Abb. A69:	15.05.00 Schlag 2
Abb. A70:	15.05.00 Schlag 3
Abb. A71:	15.05.00 Schlag 5+6 und Schlag 5+Kultur II
Abb. A72:	15.05.00 Schlag 7
Abb. A73:	15.05.00 Stall 2
Abb. A74:	15.05.00 Stall 5 a+b
Abb. A75:	15.05.00 Stall 6 b
Abb. A76:	15.05.00 Vietingskamp

1 Einleitung

Böden gehören dem Kontinuum der Pedosphäre an. Zur Beschreibung, Untersuchung und Gruppierung werden kleinste Bodenkörper, sogenannte Peda gebildet (SCHROEDER, 1992). Böden sind somit keine einheitlichen Gebilde, sondern bestehen aus einer Vielzahl kleiner Bodenkörper, die sich in ihren Merkmalen und Eigenschaften von ihren benachbarten Peda unterscheiden. Entscheidend bei der Entwicklung von Peda sind die Faktoren und Prozesse der Bodenbildung. Die Größe eines Pedon ist von Landschaft zu Landschaft verschieden und bestimmt das Ausmaß der Variabilität von Bodenfruchtbarkeitsmerkmalen innerhalb eines Feldes. Hinzu kommen die zum Teil seit Jahrhunderten währenden menschlichen Einflüsse auf die Böden (BECKETT und WEBSTER, 1971; BURROUGH, 1993). Innerhalb eines Schlates als Bewirtschaftungseinheit gibt es somit ein Nebeneinander unterschiedlichster Ausprägungen eines jeden Wachstumsfaktors. Z.B. wechseln sich Areale mit hohen Phosphatgehalten mit solchen mittlerer und niedriger Phosphatgehalte ab. Untersuchungen von HANEKLAUS et al. (1997) haben gezeigt, dass die räumliche Variabilität von Standortmerkmalen innerhalb eines einzigen Schlates größer sein kann, als in der gesamten umgebenden Landschaft. Die in der Landwirtschaft noch übliche gleichförmige Behandlung (z.B. Düngung) von Schlägen führt daher zwangsläufig zu einem Nebeneinander von Unter- und Überversorgung der Pflanzen. Im ersten Fall wird hierdurch das Ertragspotenzial der Pflanze nicht ausgeschöpft, im zweiten Fall die Faktoreffizienz verringert und unter Umständen die Umwelt nachhaltig beeinträchtigt.

Im Zuge der technischen Revolution, die in der Landwirtschaft eine weitestgehende Mechanisierung zur Folge hatte, war es dem Landwirt bisher nicht möglich, auf die ihm durchaus bekannten Bodenheterogenitäten innerhalb eines Schlates zu reagieren (SCHMIDT und HAASE, 1980).

Erst als sich seit Ende der achtziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts die Bewirtschaftungsform des Precision Agriculture (PA) entwickelte, wurde unter Einsatz des Differential Global Positioning Systems (DGPS), der Elektronischen Datenverarbeitung (EDV) und der Geo-Informationssysteme (GIS) die gezielte, variable Bearbeitung von Schlägen möglich. Das Grundtheorem des PA, nämlich durch die unterschiedliche Behandlung von vorhandener räumlicher Variabilität innerhalb eines Feldes zu einer insgesamt höheren Faktorausnutzung zu kommen, kann nur erfüllt werden, wenn diese Variabilität effektiv erfasst werden kann.

Seit den ersten Luftaufnahmen des Franzosen Felix Tournachon 1858 aus einem Ballon über Paris hat sowohl in der Luft- und Raumfahrt als auch in der Fotografie eine rasante Entwicklung stattgefunden, die meist durch militärische Überlegungen vorangetrieben wurde. Seit den dreißiger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts werden Luftaufnahmen auch zur Bodenkartierung herangezogen, da sie die räumliche Variabilität von Bodentypen widerspiegeln. Seit dieser Zeit gibt es auch Bestrebungen Zusammenhänge zwischen Bildmerkmalen und Bodenparametern herzustellen. Vorgehensweisen zur Bodenkartierung mittels Luftaufnahmen wurden erarbeitet und zur Rationalisierung der Feldarbeit genutzt (VINK, 1962; ANONYM, 1973; MILFRED und KIEFER, 1976). Die Verwendung von Luftbildern landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in Stresssituationen wurden als Hilfsmittel zur Erschließung von geologischen Gegebenheiten von SVENSSON (1972) beschrieben. Außerdem wurden Überlegungen angestellt, in welcher Form Fernerkundungsdaten als Entscheidungshilfen für landwirtschaftliche Prozesse eingesetzt werden können (MYERS und ALLEN, 1968). In den achtziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts wurde in der Deutschen Demokratischen Republik die Nutzung von Fernerkundungsverfahren für die Pflanzenproduktion erprobt und Leitlinien entwickelt (WEISE et al., 1989; VILLWOCK, 1993). Dabei handelte es sich z.B. um die Auswertung von Luftbildern zur Vorbereitung hydromeliorativer Maßnahmen, zur Feststellung von großflächig auftretenden Pflanzenkrankheiten oder tierischen Schäden, zur Einschätzung von Art und Umfang von Bewirtschaftungs-, Witterungs- oder Standortsschäden sowie zur Erfassung des aktuellen Zustandes des Bodens und der Vegetationsdecke (BONAU, 1988).

In den sechziger und siebziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts wurden durch die Entwicklung der elektronischen Datenverarbeitung und der Satellitentechnik neue Methoden der Datenerfassung und -verarbeitung möglich (LILLESAND und KIEFER, 1994; LÖFFLER, 1994).

Als Folge der vor einigen Jahren begonnenen Entwicklung kommerzieller Satelliten, die sowohl in Bezug auf die räumliche und spektrale Auflösung, als auch durch die Wiederholraten den Bedürfnissen des PA weitestgehend entsprechen, wird sich in naher Zukunft ein großes Angebot an Satellitenbildern auf dem Markt befinden, die ähnliche Eigenschaften wie Luftbilder aufweisen.

Während die Entwicklung von Landmaschinen zur variablen Bearbeitung von Ackerflächen und zur flächenhaften Erfassung von Erträgen kontinuierlich fortgeführt wurde und dadurch heute eine große Auswahl an Technik zur Verfügung steht (SCHMERLER et al., 1998), ist die effiziente Erfassung der kleinräumigen Heterogenitäten und daraus resultierende

Handlungsanweisungen ein noch weitestgehend ungelöstes Problem (LAMP et al., 1999). Dieses führte unter anderem zu einer deutlich verlangsamten Einführung von PA in Praxisbetrieben, als noch vor einigen Jahren vorhergesehen.

Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Ansätze der Datengewinnung beschrieben. Das zeit- und kostenintensive Verfahren der Rasterbeprobung kann nach POKNEE et al. (1996) aufgrund der unregelmäßigen Anordnung der Peda die Erfassung von Heterogenitäten innerhalb eines Schläges nicht immer gewährleisten. So wurden für verschiedene Regionen unterschiedliche maximale Rasterabstände zur Erfassung der räumlichen Variabilität berechnet. HANEKLAUS et al. (1997) ermittelte erforderliche Rasterabstände von 50-100 m für ausgewählte Gebiete in Norddeutschland. Für nordamerikanische Standorte berechnete MULLA (1997) notwendige Rasterweiten von 70 bis 145 m.

Ansätze zur effizienten Bestimmung von Bodenparametern liefert z.B. das ‚Self-Surveying‘-Verfahren (HANEKLAUS et al., 1998; SCHRÖDER, 1999) für dauerhafte Bodenmerkmale wie Bodenart (Textur) und Humusgehalt, das ‚Directed-Sampling‘-Verfahren (SCHNUG et al., 1994 und 1998; POKNEE et al., 1996; MULLA, 1997) für mittelfristig veränderliche Nährstoffvorräte wie Phosphor (P), Kalium (K) und Calcium (Ca) und das von McBRATNEY et al. 1999 vorgestellte ‚Variance quad-tree‘-Verfahren (VQT).

Das Directed-Sampling-Verfahren basiert in der Regel auf der Evaluierung von Equifertilen (SCHNUG et al., 1994), d.h. Zonen gleicher Bodenfruchtbarkeit bzw. Produktivität. Diese können unter Anwendung des Self-Surveying oder aus Daten der langjährigen Ertragskartierung abgeleitet werden (HANEKLAUS und SCHNUG, 2000). Grundidee des Directed-Sampling ist es, an Hand möglichst vieler vorab gewonnener Informationen die Probenahme im Hinblick auf Einfachheit und Informationsgehalt zu verbessern.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu prüfen, ob sich einfache Methoden der Fernerkundung zur Lokalisierung der räumlichen Variabilität von Böden und Beständen, und damit als Hilfsmittel zur Informationsbeschaffung für Precision Agriculture, nutzen lassen. Unter einfachen Methoden der Fernerkundung werden Methoden verstanden, die für den einzelnen landwirtschaftlichen Betrieb finanziell tragbar und praktisch durchführbar sind.

Die Erforschung der Ursachen der räumlichen Variabilität von spektraler Signaturen oder von Ertragsunterschieden war nicht primäres Ziel dieser Arbeit, da vielmehr Unterschiede in der Reflexion und in den Erträgen dazu genutzt werden sollten, die für eine Beprobung repräsentativen Stellen im Feld zu lokalisieren.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stand die Untersuchung von drei Kernfragen:

- Welche Beziehungen bestehen zwischen spektralen Signaturen und physikalischen sowie chemischen Bodeneigenschaften?
- Wie verändert sich die räumliche Variabilität spektraler Signaturen im Zeitverlauf?
- Inwieweit können aus Bildinformationen auch ohne Geländebeobachtung (= ‚ground truth‘) produktionstechnische und ökologisch relevante Informationen abgeleitet werden?

Neben den Untersuchungen zur Eignung von Luftbildern bei der Ableitung von Equifertilen für das Directed-Sampling-Verfahren sollte auch die Nutzung von Ertragskarten und Geländeparametern für diesen Zweck geprüft werden. Alle Ansätze hatten zum Ziel, sogenannte Monitorpedozellen (MPZ) für einen Schlag oder evtl. auch für einen landwirtschaftlichen Betrieb zu erfassen, um hierdurch die Anzahl der benötigten Proben zur Erfassung der kleinräumigen Heterogenität auf ein Minimum zu beschränken (HANEKLAUS et al., 1998; SCHNUG et al., 1998; HANEKLAUS et al., 2000a). Mit diesem Verfahren werden Positionen definiert, die als dauerhafte Beobachtungspunkte dienen und die gesamte Spannweite der Bodenparameter widerspiegeln. Durch wiederholte Probenahmen soll mit Hilfe der MPZ das zeitliche Verhalten von Bodeneigenschaften beobachtet werden, um dann Rückschlüsse auf entsprechende Bereiche der Equifertilen im Schlag zu ziehen. Als Folge wäre eine räumlich differenzierte Bearbeitung von Schlägen mit einem geringen Probenaufwand möglich.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen zur vorliegenden Arbeit wurden auf dem landwirtschaftlichen Betrieb des Institutes für Tierzucht und Tierverhalten (TZV) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Mariensee durchgeführt. Das Anfang des dreizehnten Jahrhunderts erstmals urkundlich erwähnte Klosterdorf Mariensee liegt etwa 30 km nordwestlich von Hannover am Südrand des Norddeutschen Flachlandes (Abb. 2-1).

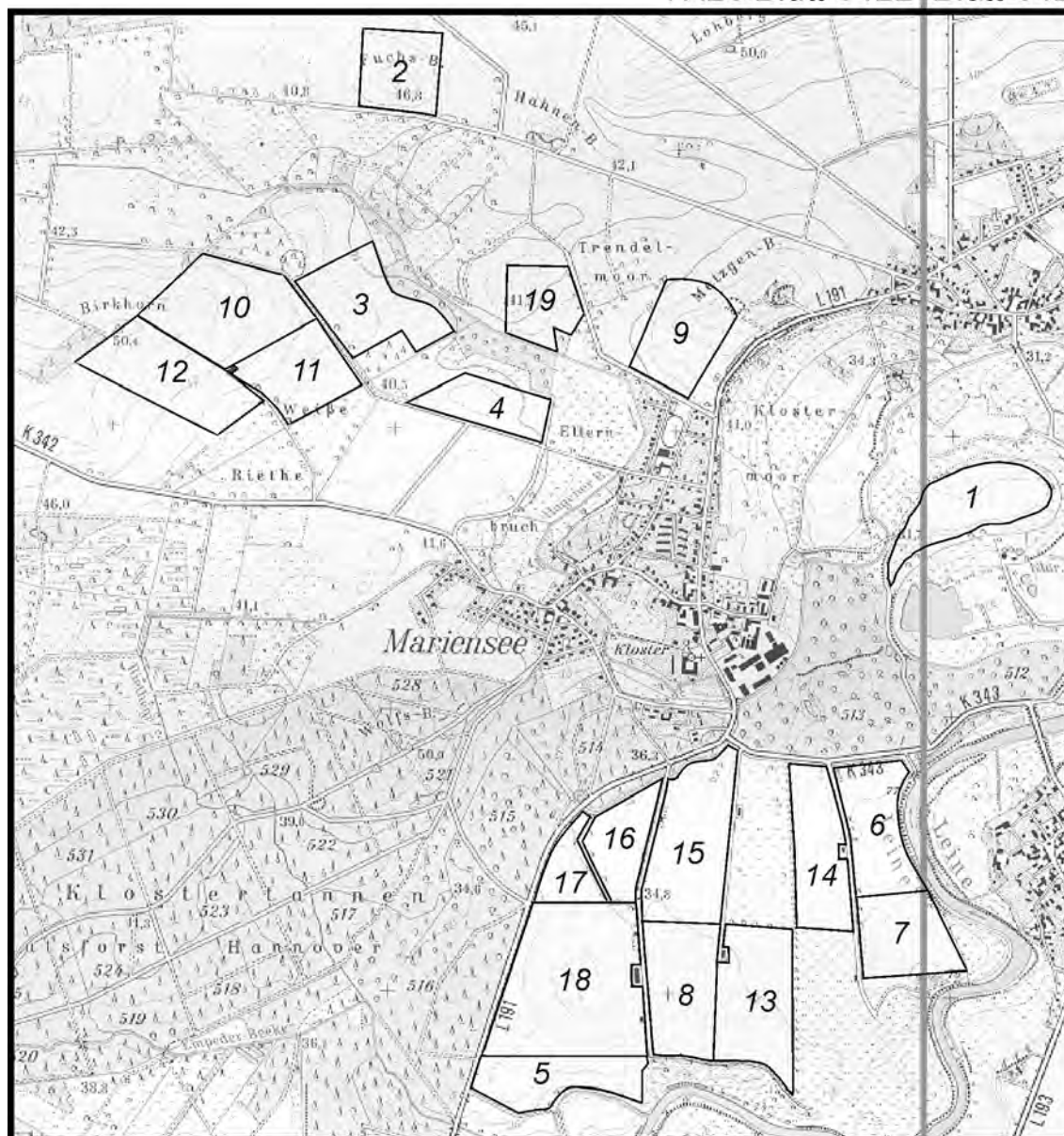


Abb. 2-1: Lageplan zum Versuchsstandort Mariensee.

Nachweislich wird seit Ende des sechzehnten Jahrhunderts um das Kloster herum Landwirtschaft betrieben. Am Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts wurde auf dem heutigen Institutsgelände ein Remonteamt (Remonten: junge Pferde) auf einer Fläche von 390 ha eingerichtet, welches wirtschaftlich zum Gut Mecklenhorst gehörte. 1945 pachtet die Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft das Institutsgelände, mit dem Ziel eine Forschungsanstalt für Tierzucht und Tierernährung im Bundesgebiet zu errichten (KREFT, 1997). Seit 1974 ist das Institut in die FAL eingegliedert und erhielt den heutigen Namen.

Abbildung 2-2 zeigt die Versuchsflächen in Mariensee.

TK25 Blatt 3422 Blatt 3423



- | | | | |
|---|-------------------|----|----------------------|
| 1 | Duvenwinkel | 10 | Schlag 5 & 6 |
| 2 | Großer Fuchsberg | 11 | Schlag 5 & Kultur II |
| 3 | Kultur IV | 12 | Schlag 7 |
| 4 | Moorkamp | 13 | Stall 2 |
| 5 | Schlag 1 | 14 | Stall 3 |
| 6 | Schlag 1 a vorne | 15 | Stall 5 a & b |
| 7 | Schlag 1 a hinten | 16 | Stall 6 a |
| 8 | Schlag 2 | 17 | Stall 6 b |
| 9 | Schlag 3 | 18 | Stall 7 & 8 |
| | | 19 | Vietingskamp |

Abb. 2-2: Untersuchungsgebiet Mariensee. Übersichtskarte der Versuchsflächen auf Grundlage der Topographischen Karte 1:25000. (Kartengrundlage: Topographische Karte 1:25 000, Blattnummern: 3422 (1991), 3423 (1991). Vervielfältigung mit Erlaubnis des Herausgebers: LGN – Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen –52-3190/01.)

1994 begann eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde (PB) der FAL und dem landwirtschaftlichen Betrieb der TZV zur Einführung von Precision Agriculture in die praktische Produktionstechnik. Seit dieser Zeit werden auf dem Betrieb real-time Ertragskartierungen mit DGPS durchgeführt und seit 1996 Untersuchungen zur variablen Ausbringung von Düngemitteln.

Von den etwa 300 ha des Betriebes werden 220 ha ackerbaulich bewirtschaftet. Diese verteilen sich 1994 auf 19 Schläge (Abb. 2-2), von denen 17 (190 ha) intensiv im 30x30 m Raster kartiert wurden.

Abbildung 2-3 und 2-4 zeigen in Schrägaufnahmen Teile des Versuchsbetriebes Mariensee.

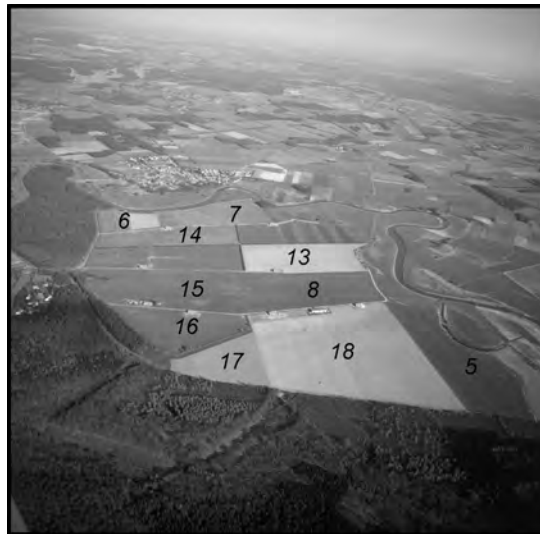


Abb. 2-3: Schrägaufnahme des Versuchsbetriebes Mariensee vom 10.04.2000. Abgebildet wird ein Teil der Schläge im Leinetal.



Abb. 2-4: Schrägaufnahme des Versuchsbetriebes Mariensee vom 10.04.2000. Abgebildet wird ein Teil der Schläge in der Nienburger Geest.

Hauptkulturarten sind Wintergerste, Winterweizen, Hafer, Silomais, Erbsen, Ackerbohnen und Zuckerrüben. Gülle und Stallmist von etwa 1,1 GV/ha werden entsprechend der Fruchtfolge auf die Schläge ausgebracht. Eine Grunddüngung mit P, K, Magnesium (Mg) und Kalk wird bedarfsabhängig, meist nur zu den Hackfrüchten, durchgeführt. Seit 1996 wird auf ausgewählten Schlägen eine räumlich variable Ausbringung von Stickstoff (N) durchgeführt. Nach einer Bodengrundinventur im 30x30 m Raster 1995 wurden im Laufe der Jahre regelmäßig Boden- und Pflanzenproben gezogen.

2.2 Standortmerkmale

2.2.1 Boden

Die untersuchten Schläge befinden sich nordwestlich der Ortschaft Mariensee im kuppigen Hügelland der Nienburger Geest und im Leinetal, welches südöstlich von Mariensee in die Nienburger Geest eingesenkt ist. Das Landschaftsbild wird von eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Lockersedimenten bestimmt. In der Elster-Eiszeit und im Drenthe-Stadium der Saale-Eiszeit überfuhren die Inlandgletscher das Gebiet und hinterließen ihre Grundmoränen, die heute als Geschiebelehm bzw. Geschiebemergel vorliegen. Im Vorland der Gletscher wurden von den Eisschmelzwässern Sande und Kiessande (glazifluviatil) abgelagert. In der Weichsel-Eiszeit lagerte die Leine bis zu 10 m mächtige Flusssande ab. Der Wind blies das Feinmaterial aus den Lockersedimenten aus und trieb es zu Sandlöß- bzw. Flugsanddecken zusammen. In der Nacheiszeit wurden letztere zu Dünen aufgeweht und im Leinetal wurde der Auelehm abgesetzt.

Die Nienburger Geest besteht vorwiegend aus Sanden und Kiesen mit sehr gutem bis gutem Wasserleitvermögen. Gelegentlich kommen in diesen Schlufflinsen vor, die eine geringe Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Der Grundwasserspiegel liegt zwischen 10 und 30 m unter der Fluroberfläche. In der Leineniederung, in der ein Teil des drenthestadialen Sand-Kieskörpers erodierte und später durch weichselzeitliche Sande ersetzt wurde, bewegt sich der Grundwasserflurabstand zwischen mehreren Dezimetern bis zu wenigen Metern.

Die 17 untersuchten Schläge lassen sich fünf verschiedenen Landschaften zuordnen, die nach den vorherrschenden bodenbildenden Ausgangsgesteinen und Bodentypen bezeichnet sind:

1. Geschiebedecksand-Podsol-Landschaft
2. Sandlöß-Pseudogley-Parabraunerde-Landschaft
3. Auelehm-Auenboden-Landschaft

4. Hochflutlehm-Braunerde/Gley-Landschaft
5. Niederungssand-Gley/Niedermoor-Landschaft

Weiterführende Angaben zur Naturgeschichte des Untersuchungsstandortes finden sich bei JORDAN (1980) sowie in den Kartenwerken GK 25 (1980 und 1973), BK 25 (1984 und 1985) und ANONYM (1994 und 1995).

Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die vorherrschenden Bodeneigenschaften der 17 untersuchten Schläge, abgeleitet aus der Bodenkarte 1:25000 und der Bodenkarte auf der Grundlage der Bodenschätzung im Maßstab 1:5000.

Tab. 2-1: Bodeneigenschaften der Schläge aus der Bodenkarte 1:25000 und der Bodenkarten auf der Grundlage der Bodenschätzung 1:5000.

Schlagbezeichnung (Landschaftstyp)	Bodentypologische Bezeichnung	Bodenart	nFK [mm]	Boden-/ Ackerzahl
Duvenwinkel (3)	Auenboden	SI – L	150-≥200	40/42 – 65/66
Großer Fuchsberg (2)	Braunerde	S – IS	100-200	23/25 – 39/41
Kultur IV (1)	Braunerde	S – IS, Mo	100-200	30/32 – 37/38
Moorkamp (1, 5)	Podsole + Braunerde	SI – IS, Mo	100-150	34/36 – 40/42
Schlag 1 (3, 4)	Auenboden + Braunerde	IS – sL	100-200	48/50 – 65/66
Schlag 1 a hinten (3)	Auenboden	sL – L	150-≥200	70/71 – 73/74
Schlag 2 (3)	Auenboden	IS – sL	100-≥200	47/49 – 67/68
Schlag 3 (1)	Plaggenesche	S – IS	150-200	25/27 – 38/40
Schlag 5+6 (1, 2)	Braunerde	S – IS	100-200	24/26 – 37/38
Schlag 5+Kultur II (1, 2)	Braunerde + Gleye	SI – IS	100-200	32/34 – 39/41
Schlag 7 (1, 2)	Braunerde + Gleye	IS	150-200	37/38 – 39/41
Stall 2 (3)	Auenboden	IS – sL	100-≥200	47/49 – 68/69
Stall 3 (3)	Auenboden	sL – LT	150-≥200	68/69 – 69/69
Stall 5 a+b (3)	Auenboden	IS – sL	150-≥200	50/52 – 67/68
Stall 6 b (3, 4)	Braunerde + Auenboden	IS	150-≥200	49/47 – 49/51
Stall 7+8 (3, 4)	Braunerde + Auenboden	IS – sL	100-≥200	49/51 – 66/67
Vietingskamp (1)	Braunerde + Gleye	IS – SL	100-200	38/40 – 40/42

Veranschaulichend werden die Schläge in Abbildung 2-5 nochmals auf der Bodenkarte im Maßstab 1:25000 graphisch dargestellt.

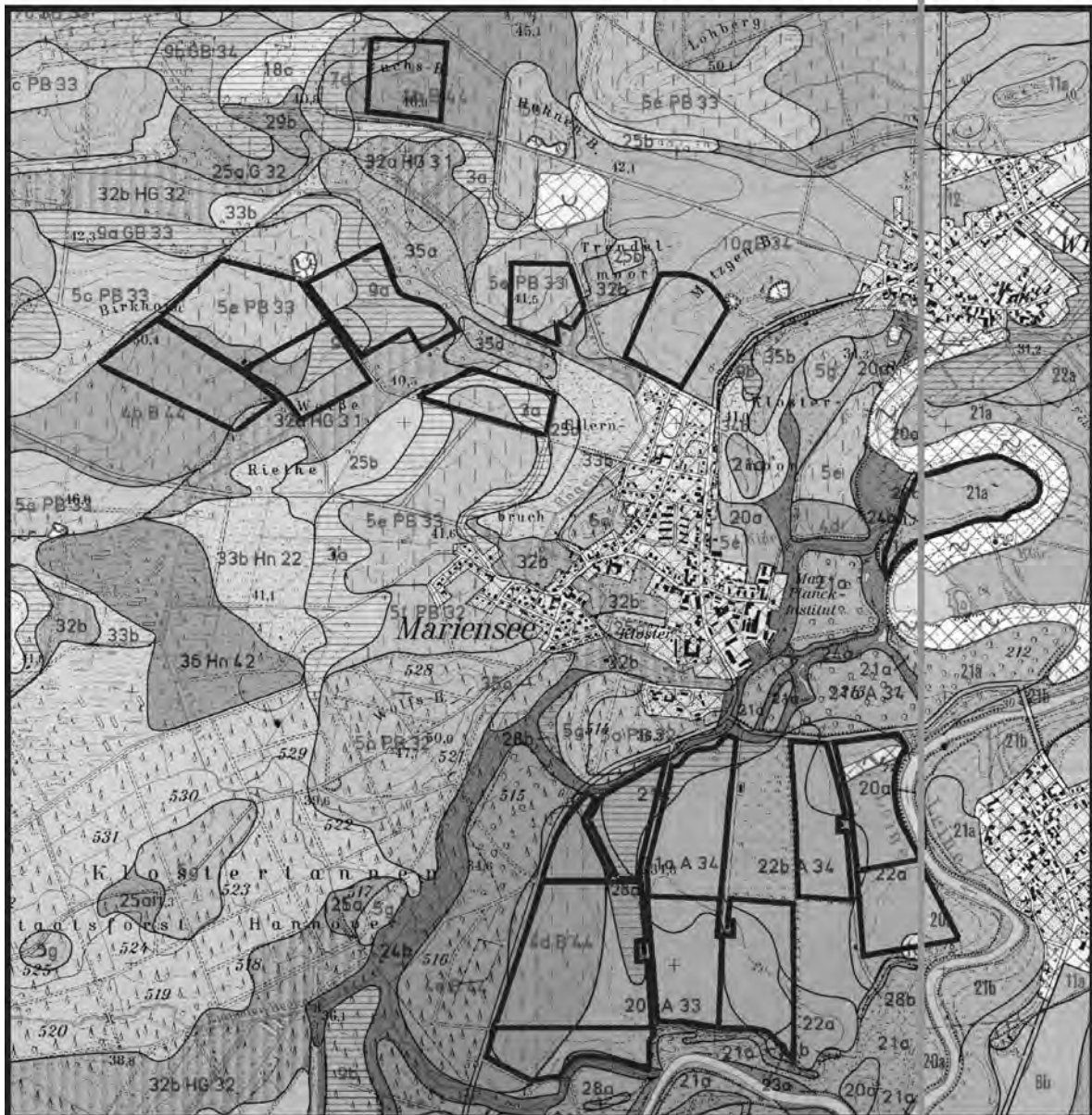


Abb. 2-5: Übersicht der Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee auf der Bodenkarte 1:25000. Ausschnitt aus BK 25, 3422 Neustadt a. Rübenberge (1984) und 3423 Otternhagen (1985).

2.2.2 Relief

Die Geländeoberfläche der holozänen Talaue ist, von einigen Altwasserarmen und flachen Terrassenkanten abgesehen, fast eben. Ihr schließt sich nach W, NW und N die um 2-3 m höher gelegene weichseleiszeitliche Niederterrassenebene an. Der Höhenunterschied zwischen der Niederterrasse und der sich im NW anschließenden hügeligen Moränenlandschaft Nienburger Geest beträgt maximal 4-5 m (ANONYM, 1994 und 1995).

Die Versuchsflächen des Betriebes liegen zwischen 32 und 51 m ü. NN. Der maximale Höhenunterschied innerhalb eines Feldes beträgt 9,5 m, der minimale 0,3 m. Generell weisen die Schläge im Leinetal geringere Höhenunterschiede auf (0,3–3,2 m) als die der Nienburger Geest (1,5–9,5 m).

81 % der ackerbaulich genutzten Fläche weist eine Hangneigung von weniger als 2 % auf, weitere 17 % der Fläche bewegt sich zwischen 2 und 5 % Hangneigung und nur 2 % der Fläche weisen eine Hangneigung von mehr als 5 % auf.

2.2.3 Klima

Eigene Niederschlagsmessungen am Standort Mariensee ergaben die in Abbildung 2-6 dargestellten Niederschlagsverteilung in den Jahren 1995-2000. Abbildung 2-7 und 2-8 zeigen die an der Wetterstation in Nienburg an der Weser in den Jahren 1995-2000 gemessenen Niederschlags- und Sonnenstundenverteilungen.

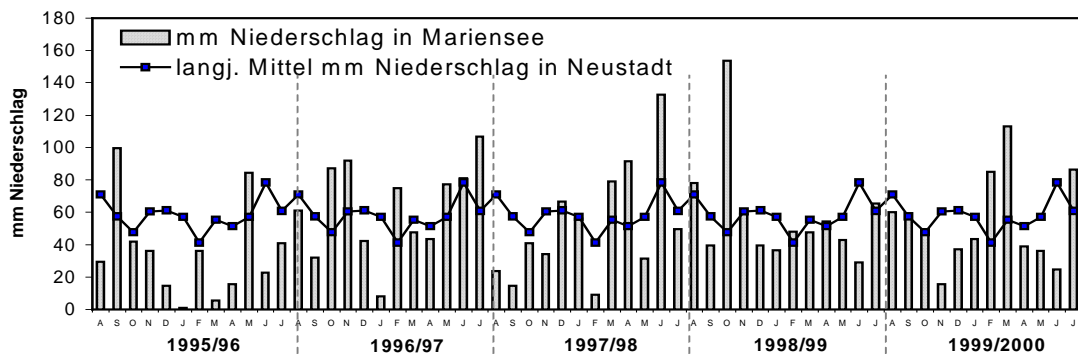


Abb. 2-6: Monatliche Niederschlagsverteilung der Jahre 1995-2000 am Standort Mariensee bezogen auf das langjährige Mittel von Neustadt am Rübenberge.

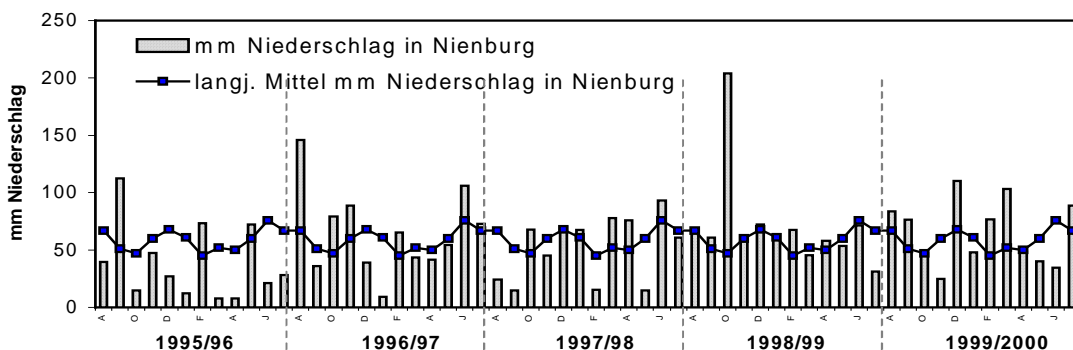


Abb. 2-7: Monatliche Niederschlagsverteilung der Jahre 1995-2000 in Nienburg an der Weser bezogen auf das langjährige Mittel.

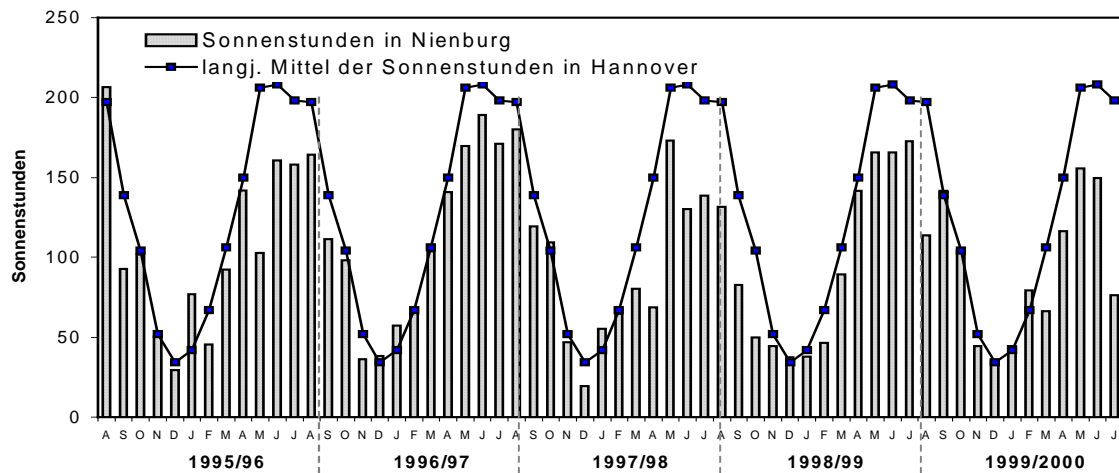


Abb. 2-8: Monatliche Sonnenscheindauer der Jahre 1995-2000 in Nienburg an der Weser bezogen auf das langjährige Mittel der Wetterstation Hannover.

Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über die jährlichen Niederschlagsmittel von Mariensee und Nienburg sowie den Sonnenstunden für Nienburg von 1995-2000 im Vergleich zum langjährigen Mittel.

Tab. 2-2: Jährliche Niederschläge und Sonnenscheindauer der Vegetationsperioden 1995/1996 bis 1999/2000.

	Niederschlag in mm in Mariensee	Niederschlag in mm in Nienburg	Sonnenscheindauer in STD in Nienburg
Langj. Mittel 1961-90	699 *	704	1501**
1995/1996	428	466	1259
1996/1997	754	783	1347
1997/1998	628	628	1185
1998/1999	694	855	1165
1999/2000	657	783	1128

Langjähriges Mittel der DWD-Stationen: *Neustadt a. Rbge. und **Hannover

2.3 Fernerkundung und Bildverarbeitung

Nach LÖFFLER (1994) ist Fernerkundung das Beobachten, Kartieren und Interpretieren von Erscheinungen auf der Erdoberfläche oder auch der Oberfläche anderer Himmelskörper, ohne die Gebiete zunächst zu betreten. Also die Gesamtheit aller Methoden, die das kontaktlose wissenschaftliche Beobachten und Erkunden eines Gebietes aus der Ferne erlauben. Alle Fernerkundungssysteme beruhen auf der Ausnutzung elektromagnetischer Strahlung und fast alle basieren auf der direkten oder indirekten Sonnenstrahlung. Die

Ausnahmen sind Radar und Laser aufgebaute Fernerkundungssysteme. Die Aufzeichnung der elektromagnetischen Strahlung erfolgt über analoge oder digitale fotografische Systeme sowie durch opto-mechanische oder opto-elektronische Scanner. Als Beobachtungsplattformen dienen Flugzeuge, Hubschrauber oder Satelliten, besonders für Precision Agriculture kommen aber auch terrestrische Plattformen, wie z.B. auf Fahrzeuge montierte Scanner, zum Einsatz.

Bei der Auswahl der Fernerkundungsmethode für die vorliegende Arbeit war die Flexibilität des Aufnahmezeitpunktes ein entscheidendes Kriterium, so dass Luftaufnahmen zur Aufzeichnung von spektralen Signaturen gewählt wurden. Da zu Beginn der Datenaufzeichnung 1995 digitale fotografische Systeme noch nicht in ausreichender Qualität und ökonomisch vertretbar vorhanden waren, wurde auf ein analoges fotografisches System zur Multispektralaufzeichnung des sichtbaren Lichtes verwendet. Es wurde versucht, die Aufnahmeparameter der einzelnen Befliegungen konstant zu halten.

Folgende Aufnahmeparameter wurden standardmäßig gewählt:

- Echtfarben Diapositiv (Kodak Ektachrom E 100 S)
- 50 mm Weitwinkel
- Mittelformat: 6x6 cm, Rollei 6006 – 6008
- 1000 m Flughöhe

Insbesondere der Parameter ‚Flughöhe‘ bereitete einige Male Schwierigkeiten, da das Versuchsgebiet am Rande der Kontrollzonen des Flughafens Hannover-Langenhagen und des Militärflughafens Wunstorf liegt. War eine Flughöhe von 1000 Metern nicht möglich, wurde versucht, eine Fluggenehmigung für eine geringere Höhe zu erhalten. In diesen Fällen wurde anstelle des 50 mm ein 40 mm Weitwinkelobjektiv benutzt, so dass wieder ein Bildmaßstab von ca. 1:20000 erreicht wurde.

Die Aufnahmen erfolgten aus der Bodenluke einer Piper PA 28 (Abb. 2-9), die auf dem Sportflughafen Hildesheim, etwa 50 km vom Versuchsstandort entfernt, stationiert war.

Die Aufnahmeparameter wurden so gewählt, dass auch der größte Schlag als ganzes abgebildet wurde. Ein Mosaiking von Flächen, wie es z.B. von AFEK und BRAND (1998) beschrieben wurde, konnte dadurch vermieden werden. Befliegungen fanden zu folgenden Terminen statt: 17.07.1995, 07.06.1996, 21.07.1996, 25.09.1997, 13.07.1998, 19.10.1999, 10.04.2000 und 15.05.2000.



Abb. 2-9: Erkundungsflugzeug (Piper PA 28).

Die im Mittelformat vorliegenden Echtfarbenbilds wurden mit einem Nikon Filmscanner LS-4500 AF im RGB-Modus mit einer Bildelementgröße von etwa 33 μm abgetastet und als Rasterdatei im ‚Tagged Image File Format‘ (TIF) abgespeichert.

Alle rasterverarbeitenden Operationen wurden mit dem Geo-Informationssystem ARC/INFO durchgeführt und werden in Abbildung 2-10 am Beispiel des Schlags Schlag 7 und des Luftbildes vom 21.07.1996 schematisch dargestellt.

Nach BÄHR (1998) sind affine oder polynomale Ansätze zweiten oder dritten Grades für die Entzerrung eines Bildes geeignet. Ausschlaggebend für die Art der Entzerrung ist die Größe des abgebildeten Gebietes. Für die Entzerrung und Geokodierung der Bilder des Versuchsstandortes Mariensee wurde eine affine Transformation mit sechs Parametern gewählt.

$$X' = Ax + By + C$$

$$Y' = Dx + Ey + F$$

Mit:	X', Y' :	Soll-Koordinaten (=WGS84)
	x, y :	Ist-Koordinaten
	A, E:	Skalierungsparameter
	B, D:	Rotationsparameter
	C, F:	Berücksichtigung des beliebigen Koordinatenursprungs

Auf die Verwendung eines Digitalen Geländemodells (DGM) konnte bei der Entzerrung verzichtet werden, da eine für die Landwirtschaft ausreichend genaue Anpassung an die Feldgrenzen von ein bis zwei Metern erreicht wurde.

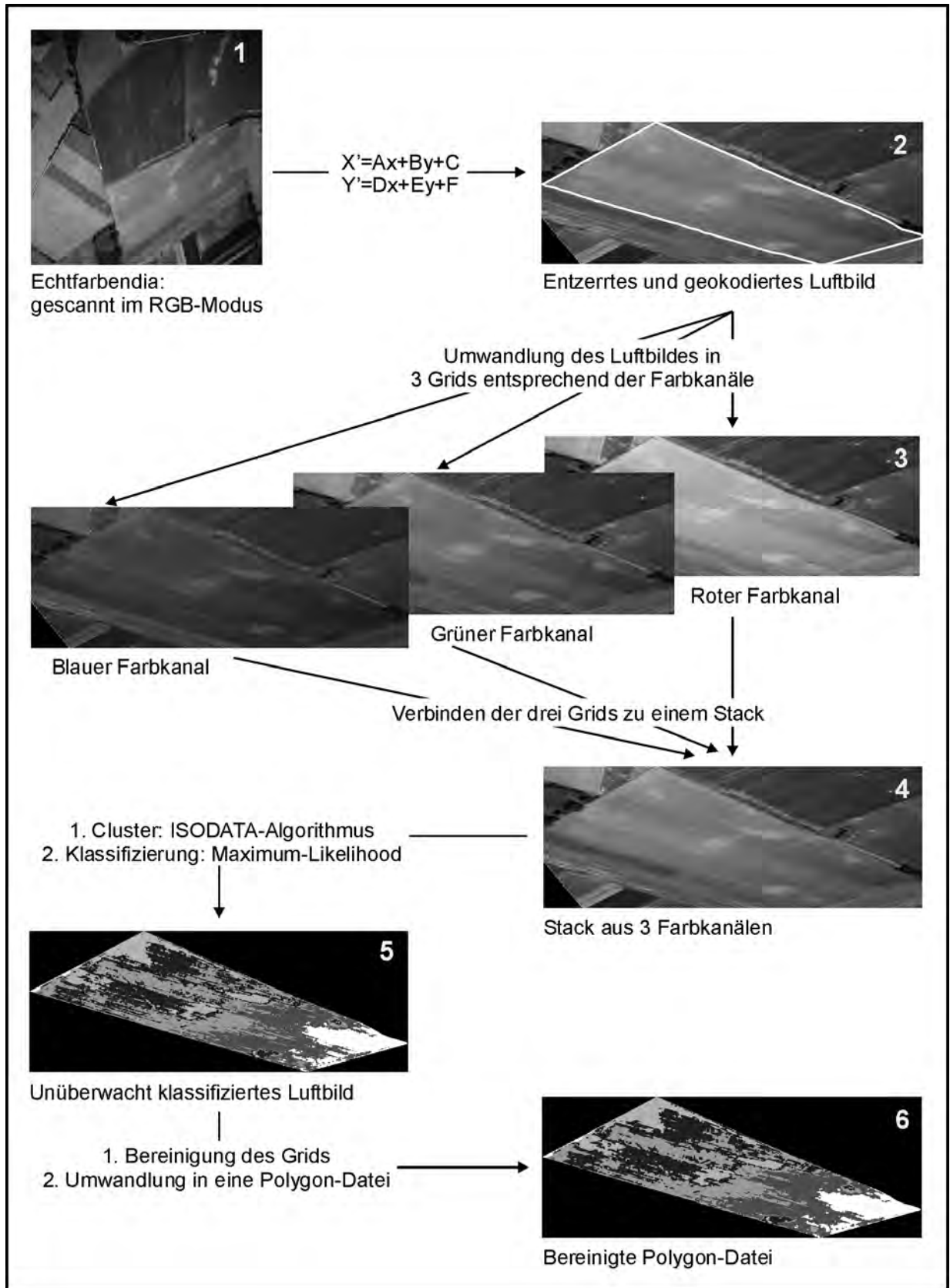


Abb. 2-10: Schema der Bildverarbeitung am Beispiel der Aufnahme von Schlag 7 vom 21.07.1996.

Die Abschätzung der radialen Verzerrung (Δr) ermöglicht eine numerische Abschätzung der Genauigkeit (KRAUS, 1996).

$$\Delta r = \Delta h \frac{r}{h_g}$$

Mit: Δr : radiale Versetzung der Bildpunkte
 Δh : Höhenunterschied eines Schlages
 r : $\frac{1}{2}$ Diagonale des Schlages
 h_g : Flughöhe

Anhand dieser Formel wurde für den Schlag mit dem größten maximalen Geländehöhenunterschied (9,5 m) auf einer Strecke von 560 m eine radiale Versetzung der Bildpunkte von maximal 2,7 m berechnet. Diese ist für landwirtschaftliche Anwendungen vernachlässigbar.

Die Interpolation der Pixel bei der Entzerrung wurde mittels des ‚Nearest Neighbor Resampling‘ Verfahrens durchgeführt, welches sich besonders eignet, wenn nachfolgend eine Klassifikation des Bildes erfolgen soll (RICHARDS und JIA, 1999). Grafik Nummer 2 in Abbildung 2-10 zeigt das Ergebnis einer Entzerrung.

Nach der Entzerrung und Geokodierung wurde, wie in Schritt 3 von Abbildung 2-10 zu sehen, jedes Bild in drei Grids umgewandelt, je eines für den roten, grünen und blauen Farbkanal. Die Pixelgröße wurde als Gridgröße beibehalten, wodurch ein erneutes Resampling vermieden werden konnte. Jeder Farbkanal wird durch 256 (0-255) Graustufen wiedergegeben, welche dem jeweiligen Grauwert des Originalbildes entsprechen.

Im nächsten Arbeitsschritt (Nr. 4 in Abb. 2-10) wurden die drei Grids zu einem Stack zusammengefügt. Dies bedeutet, dass die drei Grauwerte der drei Farbkanäle einer jeden Gridzelle erneut kombiniert wurden. Wie deutlich zu sehen ist, unterscheidet sich das Stack optisch nicht vom entzerrten und geokodierten Ausgangsbild. Die Umformung des Luftbildes in ein Grid ist jedoch essenziell, um Bildanalysen mit ARC/INFO durchführen zu können.

Es wurde eine unüberwachte Klassifizierung gewählt, bei der im Gegensatz zur überwachten Klassifizierung keine Trainingsgebiete und damit auch keine vorherigen Geländekenntnisse erforderlich waren. Dabei werden Bilddaten mit Hilfe von Clusteranalysen in spektrale Klassen unterteilt, deren Zusammengehörigkeit allein auf der statistischen Auswertung der Bildinformation beruht. Die Ursachen der durch die Klassen erfassten Erscheinungen müssen anschließend durch Geländeuntersuchungen ermittelt werden (LILLESAND und KIEFER, 1994; LÖFFLER, 1994).

Für die vorliegende Arbeit wurde der ISODATA-Algorithmus (BALL und HALL, 1965) ausgewählt, um die in dem Stack zusammengeführten multivariaten Daten zu clustern. Dieser Algorithmus, auch als Verfahren der modifizierten iterativen Clusteroptimierung („Modified

Iterative Optimization Clustering Procedure') bzw. als Technik der fließenden Mittelwerte (,Migrating Means Technique') bezeichnet, wurde unter Verwendung der folgenden Parameter durchgeführt:

- Anzahl der Klassen = 5
- Anzahl der Wiederholungen = 20
- Minimale Anzahl von Gridzellen in einer Klasse = 20
- Intervall zwischen den Proben der Clusteranalyse = 10

Die nach Anwendung des Clusteralgorithmus entstandene Datei enthält die Klassensignaturen die zur Klassifizierung nach dem Verfahren der größten Wahrscheinlichkeit (,Maximum-Likelihood Classification') verwendet wurden (Nr. 5 in Abb. 2-10). Es geht von der Voraussetzung aus, dass die Reflexionswerte eines bestimmten Objektes nicht willkürlich streuen, sondern annähernd eine Gauß'sche Normalverteilung aufweisen. Dabei wird jedes Pixel derjenigen Klasse zugeordnet, der es mit der größten Wahrscheinlichkeit bezüglich der Grauwertverteilung angehört (LÖFFLER, 1994).

Als Gütemaß für die Klassifikation wurde die Option des ,Maximum-Likelihood'-Befehls herangezogen, bei dem jedem klassifizierten Pixel eine Wahrscheinlichkeit der ,richtigen Klassifizierung' zugeordnet wird. Dies erfolgte in 14 Schritten:

- 1: 100%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 2: 99,5%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 3: 99%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 4: 97,5%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 5: 95%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 6: 90%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 7: 75%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 8: 50%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 9: 25%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 10: 10%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 11: 5%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 12: 2,5%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 13: 1%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation
- 14: 0,05%ige Wahrscheinlichkeit der ,richtigen' Klassifikation

Nach Abschluss der Klassifikation wurde das erzeugte Grid bereinigt und durch eine automatische Filteroption (3x3 Filter) generalisiert, d. h. einzelne Gridzellen, die einer anderen Klasse zugeordnet wurden als Nachbargridzellen, wurden entsprechend der überwiegenden Klasse zugeordnet. Im Anschluss wurde das Grid in eine Polygon-Datei umgewandelt, bevor

die Klassifikationsergebnisse mit anderen Daten verschnitten wurden. Bild Nummer 6 in Abbildung 2-10 zeigt die so erzeugte Polygon-Datei.

Zur Klassifikation wurden nur Bilder herangezogen, auf denen eindeutig zu erkennen war, ob es sich um Boden oder Vegetation handelte. Bilder, die z.B. während der Bearbeitung eines Feldes aufgezeichnet wurden, fanden keine Verwendung (Tab. 2-3).

Tab. 2-3: Bildinhalte der Luftbilder des Versuchsstandortes Mariensee 1995-2000. (Grau hervorgehoben sind Aufnahmen, die zur Festlegung von Monitorpedozellen benutzt wurden).

Schlagbezeichnung	7/1995	6/1996	7/1996	9/1997	7/1998	10/1999	4/2000	5/2000
Duvenwinkel		V	V	B	V			B
Gr. Fuchsberg		V	V	B	V	V	B	V
Kultur IV			V			B	V	V
Moorkamp		B	V	B		V	V	V
Schlag 1			V			B	V	V
Schlag 1 a h	V			V			V	V
Schlag 2		V	V			V	V	V
Schlag 3		V	V	B	V		B	B
Schlag 5+Kultur II		V	V			V	V	V
Schlag 5+6		V	V			V	V	V
Schlag 7		V	V		V		B	V
Stall2		V	V			B	B	B
Stall 3		B		B		B	V	
Stall 5 a+b	V	V	V	V		V	V	V
Stall 6 b		V	V	V		V	B	V
Stall 7+8		V	V					
Vietingskamp		V	V	B	V	B	B	B

Abgebildet: V = Vegetation, B = Boden

Tabelle 2-3 gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit benutzten Luftbilder, aufgeteilt nach Boden- und Vegetationsbildern. Alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Luftbilder sind in den Bildtafeln 1-13 im Anhang dargestellt. Es handelt sich hierbei um die gescannten Originalaufnahmen, bevor weitere Bildverarbeitungsschritte durchgeführt wurden.

2.4 Ertragsermittlung

Real-time Ertragskartierungssysteme mit automatischer Positionsaufzeichnung (DGPS) wurden seit Anfang der neunziger Jahre für Getreide entwickelt und kommen seit Mitte der neunziger Jahre zum Einsatz. Heute existieren diese, in unterschiedlichen Entwicklungsstadien, auch für viele andere Fruchtarten, wie z.B. für Kartoffeln, Zuckerrohr, Weintrauben, Baumwolle, Erdnüsse und Gemüse (ROSSEL, 2001). Je nach Konstruktion der Ertragssensoren findet eine direkte oder indirekte Ertragsmessung statt. Direkte Sensoren bestimmen den aktuellen Ertrag über das Gewicht oder das Volumen. Indirekte Sensoren, wie der in diese Arbeit verwendete (s.u.), bestimmen einen Parameter, über den dann indirekt der

Ertrag berechnet wird. Bei der Ertragsaufzeichnung kommt es zu Fehlern (GRENZDÖRFFER und GEBBERS, 2001), die, wenn möglich, vor der Verwendung der Daten beseitigt werden müssen. Eine Automatisierung für die Bereinigung der Daten ist von Seiten der Industrie bis heute nicht realisiert, systematische Ansätze zur Bereinigung werden aber u.a. von STEINMAYR, et al. (2001) und NOACK, et al. (2001) diskutiert. So ist insbesondere bei der Datenaufbereitung noch ein hohes Entwicklungspotenzial vorhanden.

Die real-time Ertragsmessung während des Mähdreschens erfolgte auf den untersuchten Schlägen seit 1995 mit einem Massey Ferguson ‚Fieldstar‘ System unter Anwendung eines DGPS (Abb. 2-11). Beschreibungen der verschiedenen Sensortypen geben MURPHY et al. (1995) und GRIEPENTROG (1999). Beim Fieldstar System handelt es sich um ein radiometrisches Massestrommessgerät, welches mit Hilfe einer Strahlungsquelle am Elevatorkopf Gammastrahlen aussendet. Ein im Elevator der Quelle gegenüber positionierter Sensor detektiert die Strahlung. Das Erntegut fließt zwischen Strahlungsquelle und Sensor hindurch. Je größer die Masse ist, die das Messfenster passiert, desto weniger Strahlung wird am Detektor gemessen.



Abb. 2-11: Massey Ferguson Mähdrescher mit Flowcontrol Ertragssensor und DGPS.

Die Rohertragsdaten wurden, wie in HANEKLAUS et al. (2000b) beschrieben, bereinigt und zu Ertragskarten bezogen auf ein 10 m Raster interpoliert. Die Bereinigung der Ertragsdaten erfolgt getrennt für Areale mit auffällig hohen und niedrigen Ertragswerten über den Vergleich mit den benachbarten Fahrspuren. Zur schnelleren Bearbeitung werden diese Bereiche mit Polygonen ausgewählt, getrennt sortiert und Fehlwerte gelöscht. Beispielhaft ist in der Abbildung 2-12 die Karte für die Hafererträge des Jahres 1995 auf dem Schlag Duvenwinkel dargestellt.

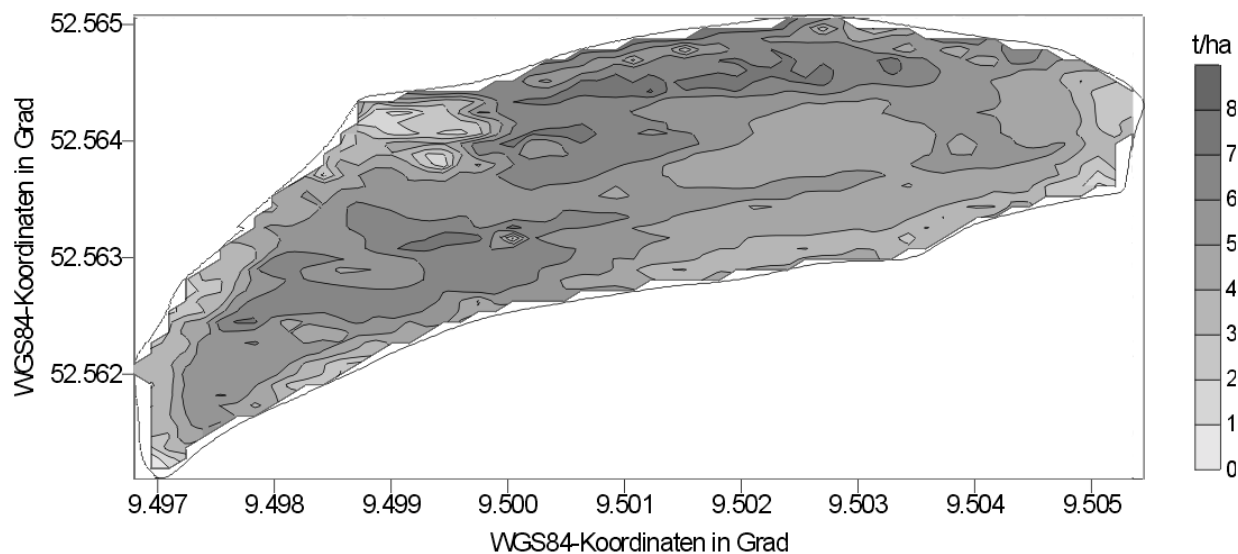


Abb. 2-12: Haferertragskarte des Schlags Duvenwinkel von 1995.

Tabelle 2-4 gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit verwendeten Ertragsdaten.

Tab. 2-4: Real-time Ertragsmessungen auf dem Versuchsstandort Mariensee von 1995-2000. (Grau hervorgehoben sind Datensätze, die zu relativen Ertragskarten zusammengefasst wurden, mit deren Hilfe Monitorpedozellen festgelegt wurden).

Schlagbezeichnung	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Duvenwinkel	Hafer	WG		Hafer		
Gr. Fuchsberg	Hafer	WG	Erbsen	WG		Hafer
Kultur IV		Ackerb.	Hafer	WG		WW
Moorkamp			Hafer	WG		WG
Schlag 1	Ackerb.		WW	WG		WW
Schlag 1 a h	WW	Ackerb.	WG			WW
Schlag 2		WW	WG		WW	WG
Schlag 3		WG		Hafer		
Schlag 5+Kultur II		Erbsen	WG		WW	WG
Schlag 5+6	Ackerb.		SG		WW	WG
Schlag 7					WG	Hafer
Stall2		WW	WG		Hafer	Erbsen
Stall 3	WG			WW		
Stall 5 a+b	WG	Hafer				WG
Stall 6 b		Ackerb.	WW		Hafer	
Stall 7+8		WG		WW	WG (Stall7)	
Vietingskamp			Ackerb.	WG		

Ackerb. = Ackerbohnen SG = Sommergerste WG = Wintergerste WW = Winterweizen

Zusätzlich zur online Ertragserfassung wurde 2000 an den MPZ in Getreidebeständen eine Handerte (1/4 m²) zur Ertragsermittlung durchgeführt, ebenso 1999 und 2000 auf je einem Zuckerrübenschlag (2 m²), da für Zuckerrüben kein entsprechendes Ertragskartierungssystem zur Verfügung stand.

2.5 Boden- und Pflanzenprobenahme

Die von FINCK (1979) beschriebene klassische Bodenprobenahme ist zur Erfassung von räumlicher Variabilität nicht geeignet. Für Fragestellungen des Precision Agriculture wurden bisher Rasterbeprobungen zur Untersuchung von Boden- und Pflanzenheterogenitäten durchgeführt. Dieses zeit- und kostenaufwendige Verfahren ist der Forschung vorbehalten. Durch den Einsatz von vollautomatischen Beprobungsfahrzeugen, können ausschließlich die Kosten der Probenahme gesenkt werden. Die wesentlich höheren Kosten der Laboranalysen bleiben aber bestehen. So wird in den letzten Jahren verstärkt nach alternativen, effizienteren Beprobungsmethoden geforscht, wie sie auch im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt werden. Einen Überblick über bisherige Untersuchungen zu effizienten Beprobungsstrategien liefert ROSSEL (2001). Außerdem gibt es Bestrebungen Laboranalysen ganz oder zumindest teilweise durch Sensortechniken, wie z.B. der Messung der elektrischen Leitfähigkeit zu ersetzen. Die Variabilität von Pflanzenparametern als Summe aller variabilitätsbeeinflussenden Faktoren sowie als Qualitätskriterium wird in letzter Zeit verstärkt untersucht. Ein von JØRGENSEN und JØRGENSEN (2001) vorgestelltes System, das während des Mähdrusches automatisch Kornproben nimmt, zeigt erste Entwicklungen zur vereinfachten Pflanzenprobenahme.

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen Probenahmen anhand von Luftbildern, relativen Ertragskarten und Geländeparametern wurden nach dem Directed-Sampling-Verfahren (SCHNUG et al., 1994 und 1998; POKNEE et al., 1996; MULLA, 1997; HANEKLAUS et al., 2000a) durchgeführt. Dabei wurden die Stellen für die Probenahmen nicht, wie sonst allgemein üblich, zufallsbedingt oder systematisch verteilt festgelegt (FINCK, 1979), sondern entsprechend der Unterschiede in der Variabilität von spektralen Signaturen oder Ertragsunterschieden ausgewählt. Die Beprobung erfolgte punktbezogen, d.h. räumlich eng am Punkt und nicht über größere Flächen verteilt.

Die verwendeten Analysemethoden der Boden- und Pflanzenanalyse werden in Kapitel 2.6 beschrieben. Die Auswahl der durchgeführten Analysen umfasst ausschließlich Standarduntersuchungen, da sie nicht zur Erklärung von Ertragsunterschieden genutzt werden sollten.

2.5.1 30 m Rasterbeprobung

1995 fand eine Beprobung der Oberböden aller Schläge der TZV in Mariensee im 30x30 m Raster statt. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Bodenparameter befinden sich im

Sonderheft der Landbauforschung (SCHNUG et al., 2001). Die Proben wurden auf Humusgehalt, Rubidium (Rb), pH und P, K, Mg, Zink (Zn) und Kupfer (Cu) untersucht.

1998 wurde auf zwei Schlägen (Schlag 3 = Hafer, Stall 3 = Winter Weizen), 2000 auf einem Schlag (Schlag 5 + 6 + Kultur II = Winter Gerste) während des Mähdreschens eine Korn-, Stroh- und Bodenprobenahme in einem 30 m Raster durchgeführt. Die Kornproben wurden direkt aus dem Kornstrom des Mähdreschers entnommen und unmittelbar hinter dem Mähdrescher abgeworfen. An den entsprechenden Stellen erfolgte dann eine Stroh- und Oberbodenprobenahme.

Die Proben aus 1998 wurden auf folgende Merkmale analysiert (siehe auch Kap. 2.6):

- Boden 0-10 cm: Humus, pH und N_{ges} , P, K, Mg
- Korn: N, P, K, Mg
- Stroh: N, P, K, Mg

Die Proben von 2000 wurden auf folgende Elemente analysiert:

- Boden 0-30 cm: Humus, pH, N_{min} und N_{ges} , P, K, Mg

2.5.2 Probenahme anhand klassifizierter Luftbilder

Da in der Regel mehr als ein unüberwacht klassifiziertes Luftbild vorlag, wurde die Entscheidung, welches zur Lokalisierung von Probenahmepunkten (MPZ) herangezogen wurde, nach folgendem Kriterium getroffen. Das bei der Klassifizierung entstandene Gütemaß (siehe Kap. 2.3), welches in 14 Schritten die Wahrscheinlichkeit der ‚richtigen‘ Klassifikation widerspiegelt, wurde zu drei Klassen zusammengefasst:

- 95 - 100%ige Wahrscheinlichkeit der ‚richtigen‘ Klassifikation
- 50 - <95%ige Wahrscheinlichkeit der ‚richtigen‘ Klassifikation
- 0,05 - <50%ige Wahrscheinlichkeit der ‚richtigen‘ Klassifikation

Es wurde das klassifizierte Luftbild ausgewählt, das den geringsten prozentualen Anteil an Gridzellen in der dritten Klasse (0,05 - <50%ige Wahrscheinlichkeit der ‚richtigen‘ Klassifikation) aufwies. Für jede Klasse wurden drei bis fünf MPZ ausgewählt.

Nach der Ernte 1999 wurde für den Schlag Moorkamp anhand eines unüberwacht klassifizierten Luftbildes 17 MPZ festgelegt und dort Bodenproben (0-90 cm) gezogen.

Im Frühjahr 2000 erfolgte für zwei weitere Schläge (Schlag 2 und Schlag 7) die Festlegung von MPZ nach unüberwacht klassifizierten Luftbildern. Für einen weiteren Schlag (Großer Fuchsberg) erfolgte eine Reduzierung von 33 MPZ nach relativen Ertragskarten auf 16 MPZ unter Berücksichtigung eines unüberwacht klassifizierten Luftbildes und der Beständigkeit der Punkte in Bezug auf ihre Zugehörigkeit zu den Ertragsklassen über mehrere Jahre.

An den MPZ nach Luftbildern wurden Bodenprobenahmen (0-90 cm) zu Vegetationsbeginn, Schossen und zur Ernte durchgeführt, sowie Pflanzenprobenahmen zu Schossen und zur Ernte. Tabelle 2-5 beinhaltet eine genaue Auflistung der beprobten Schläge, Beprobungsdatum und Art der Probenahme.

Tab. 2-5: Beprobungen am Versuchsstandort Mariensee nach unüberwacht klassifizierten Luftbildern.

Schlagbez. (Probenanzahl)	Probenahme			
	Ernte 1999	Vegetationsbeginn 2000	Schossen 2000	Ernte 2000
Gr. Fuchsberg (16)	siehe Tab. 2-6	<u>23.02.2000</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: pH, P, K, Mg	<u>08.05.2000</u> Boden 0-10 cm: pH, N _{min} , P, K, Mg Pflanze: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl	<u>07.08.2000</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: Humus, pH, P, K, Mg <u>28.07.2000</u> Korn: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl Stroh: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl
Moorkamp (17)	<u>10.08.1999</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: Humus, pH, N, P, K, Mg	<u>02.03.2000</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: pH, P, K, Mg	<u>17.04.2000</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: pH, N _{ges} , P, K, Mg Pflanze: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl	<u>05.07.2000</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: pH, P, K, Mg <u>26.06.2000</u> Korn: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl Stroh: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl
Schlag 2 (12)		<u>27.03.2000</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: pH, P, K, Mg	<u>26.04.2000</u> Pflanze: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl	<u>10.07.2000</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: Humus, pH, P, K, Mg <u>26.06.2000</u> Korn: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl Stroh: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl
Schlag 7 (15)		<u>23.02.2000</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: pH, P, K, Mg	<u>15.05.2000</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: pH, P, K, Mg Pflanze: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl	<u>07.08.2000</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: Humus, pH, P, K, Mg <u>04.08.2000</u> Korn: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl Stroh: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl

2.5.3 Probenahme anhand von Ertragskarten

Tabelle 2-6 beinhaltet eine genaue Auflistung der beprobten Schläge, Beprobungsdatum und Art der Probenahme anhand von Ertragskarten.

Tab. 2-6: Beprobungen am Versuchsstandort Mariensee nach relativen Ertragskarten.

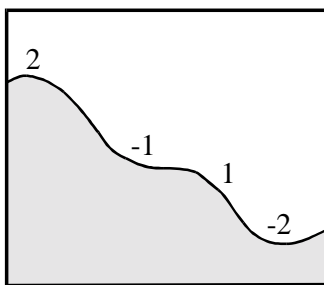
Schlagbez. (Proben- anzahl)	Probenahme		
	Ernte 1999	Schossen/ Reihenschluss (ZR) 2000	Ernte 2000
Gr. Fuchsberg (33)	<u>21.10.1999</u> Boden 0-10 cm: Humus, pH, N _{ges} , P, K, Mg Körper: N, P, K Blatt: N, P, K	siehe Tab. 2-5	siehe Tab. 2-5
Schlag 2 (14)	<u>09.08.1999</u> Boden 0-30 cm: Humus, pH, N _{ges} , P, K, Mg	<u>26.04.2000</u> Pflanze: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl	<u>07.07.2000</u> Boden 0-10 cm: Humus, pH, P, K, Mg <u>26.06.2000</u> Korn: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl Stroh: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl
Schlag 5+6+Kultur II (24)	<u>09.08.1999</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: Humus, pH, N _{ges} , P, K, Mg	<u>17.04.2000</u> Pflanze: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl	<u>05.07.2000</u> Boden 0-10 cm: Humus, pH, P, K, Mg <u>21.06.2000</u> Korn: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl Stroh: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl
Schlag 7 (28)	<u>22.07.1999</u> Boden 0-10 cm: Humus, pH, N _{ges} , P, K, Mg	<u>15.05.2000</u> Boden 0-10 cm: N _{min} , pH, P, K, Mg Pflanze: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl	<u>04.08.2000</u> Boden 0-10 cm: Humus, pH, P, K, Mg <u>04.08.2000</u> Korn: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl Stroh: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl
Stall 2 (19)	<u>02.08.1999</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: P, K		
Stall 6 b (12)	<u>03.08.1999</u> Boden 0-90 cm: N _{min} Boden 0-30 cm: P, K		
Stall 7 (43)	<u>22.07.1999</u> Boden 0-10 cm: Humus. pH, N _{ges} , P, K	<u>27.06.2000 (ZR)</u> Boden 0-10 cm: Humus, pH, P, K, Mg Pflanze: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl	<u>28.07.2000 (Erbsen)</u> Boden 0-10 cm: Humus, pH, P, K, Mg Erbsen: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl <u>25.09.2000 (ZR)</u> Boden 0-10 cm: Humus, pH, P, K, Mg Körper.: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl Blatt: N, P, S, K, Ca, Mg, Cl

Nach der Ernte 1999 wurden für sieben Schläge relative Ertragskarten aus den bis dato gewonnenen Ertragsdaten hergestellt, indem das arithmetische Mittel des Absolutertrages eines jeden Jahres gleich 100% gesetzt wurde. Anhand dieser Karten wurden MPZ (Boden 0-90 cm oder Oberboden) für jeden Schlag festgelegt. Hierzu wurden maximal fünf Ertragsklassen gebildet, die Schrittweiten zwischen 10 und 30 % aufwiesen. In der Regel wurden die Klassen um 100 % enger gewählt und die vom Mittelwert weiter entfernten Klassen größer gefasst, um dem geringeren Flächenanteil dieser Zonen gerecht zu werden. In diese Klassen wurden dann räumlich verteilt die MPZ gelegt.

Die Fläche Schlag 5 + 6 und Kultur II wurden bis 1998 geteilt bewirtschaftet, darum mussten die MPZ zunächst für die Flächen getrennt ermittelt werden. In Jahr 2000 erfolgten in den so festgelegten MPZ Probenahmen von Oberböden und Pflanzen zu Schossen und zur Ernte. Ausgenommen waren jedoch die Schläge, auf denen in 2000 Erbsen oder Mais angebaut wurden. Der Schlag Stall 7 bildete in sofern eine Ausnahme, dass er in 2000 mit zwei unterschiedlichen Kulturen bestellt war. So fielen 15 der 43 MPZ auf Erbsen und 28 auf Zuckerrüben. In diesem Fall wurden auch vom mit Erbsen bestellten Teil des Schlages Proben genommen. Für die Auswertungen in Kapitel 3.4 und 4.4 wurden exemplarisch drei der Versuche ausgewählt.

2.5.4 Probenahme anhand von Reliefparametern

Im Frühjahr 1999 wurde auf drei Schlägen eine Bodenprobenahme (0-90 cm) anhand von Reliefparametern durchgeführt. Dabei wurden Probenahmepunkte auf, mit dem ARC/INFO TIN Modell (ANONYM, 1991) aus einem Digitalen Geländemodell (DGM) bestimmten Landschaftsteilen (Abb. 2-13), Kuppe, konvexer Hang, konkaver Hang und Senke positioniert (Sattelpunkte wurden nicht ermittelt).



- 2 lokales Oberflächenmaximum
- 2 lokales Oberflächenminimum
- 1 lokale Oberflächenkonvexität
- 1 lokale Oberflächenkonkavität
- 0 Sattelpunkt (sowohl lokales Maximum,
als auch Minimum)

Abb. 2-13: Reliefparameter nach dem ARC/INFO TIN Modell.

In den gezogenen Bodenproben wurden folgende Parameter bestimmt (s. auch Kap. 2-6):

- 0-90 cm: N_{\min}
- 0-30 cm: Humus, pH, N_{ges} , P, K, Mg

Des Weiteren wurde an zwölf der 17 Schläge geprüft, inwieweit ein Zusammenhang zwischen Reliefparametern, gewonnen aus einem Digitalen Geländemodell (DGM), und Laboranalysen der Rasterbeprobungen besteht. Hierzu wurden die von PANTEN (1996) mit dem ARC/INFO TIN Modell ermittelten Geländeparameter verwendet. Diese wurden für das 10 m Raster entsprechend den interpolierten Laborwerte der Rasterbeprobung von 1995 berechnet.

Für drei der Schläge (Schlag 3, Schlag 5 + 6 + Kultur II und Stall 7 + 8) wurde weiterhin eine Geländeanalyse nach MACMILLAN et al. (2000) unter Anwendung des ‚LandMapR™‘ Programmes durchgeführt. Dieses Programm wurde in Kanada speziell für landwirtschaftliche Fragestellungen entwickelt und klassifiziert Digitale Geländemodelle in bis zu 15 unterschiedliche Reliefklassen unter Anwendung von Fuzzy-Regeln, die nicht ausschließlich die Nachbarschaftsbeziehungen von Punkten berücksichtigen, sondern auch die Gesamtlage des Punktes im Gelände. Dabei werden in einem ersten Schritt zehn geländebeschreibende Parameter aus dem DGM abgeleitet, wie z.B. Hangneigung, Exposition, Feuchteindex und relative Bestrahlung. Es wurden Parameter ausgewählt die einen großen Einfluss auf die Bewegung und Ansammlung von Wasser und damit von Nährstoffen im Gelände haben. Jeder der Parameter wird dann in eine kontinuierliche Skala von 1 bis 100 umgeformt, bevor aus den Parametern durch Anwendung von Fuzzy-Regeln 20 Reliefattribute und daraus dann die 15 Reliefklassen gebildet werden. Die 15 Reliefklassen sind den drei Geländekategorien Oberhang, Mittelhang und Unterhang zugeordnet. Wobei drei Reliefklassen in die Geländekategorie Oberhang und je sechs in den Mittelhang und Unterhang fallen.

2.6 Analytik

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen an Böden (lufttrockene Feinerden (< 2 mm)) und Pflanzen (80 °C getrocknet und feinvermahlen (< 0,12 mm)) erfolgten nach folgenden Methoden.

Tab. 2-7: Methoden der Boden- und Pflanzenanalysen.

Probenart	Parameter	Methode	Messeinrichtung, -verfahren
Boden	P (verfügbar)	CAL nach Schüller (1969)	Spektralphotometrie
	K (verfügbar)	CAL nach Schüller (1969)	Flammenphotometrie
	Mg (verfügbar)	nach Schachtschabel (1954)	Atom-Absorptions-Spektrometrie
	pH	0,01m CaCl ₂ , 1:10 Suspension (Schlichting und Blume, 1966)	Potentiometrie
	Cu, Zn (verfügbar)	nach Westerhoff (1954/55)	Atom-Absorptions-Spektrometrie
	Ton	nach Schnug und Haneklaus (1996b)	indirekt über Rb im Westerhoff-Extrakt mit Atom-Absorptions-Spektrometrie
	Gesamt-C	direkte Verbrennung	Leco
	Humus	nach Schnug und Haneklaus (1996a)	indirekt über Absorption des Westerhoff-Extraktes bei 540 nm mit Spektralphotometrie
	N _{ges}	Kjeldahl-Verfahren (Schlichting und Blume, 1966)	
N _{min}	nach VDLUFA (1987) und Kücke und Przemeczek (1982)	Spektralphotometrie	
Pflanze	P, S, K, Ca, Mg, Cl	nach Schnug und Haneklaus (1992)	Röntgenfluoreszenz-Spektrometrie
	Gesamt-N	Kjeldahl-Verfahren (Schlichting und Blume, 1966)	

Wird im späteren Text von P, K, Mg, Zn oder Cu im Zusammenhang mit Bodenanalysen gesprochen, sind stets die pflanzenverfügbaren Gehalte gemeint. Im Zusammenhang mit Pflanzenanalysen handelt es sich stets um die Gesamtgehalte in der Trockensubstanz.

2.7 Datenverarbeitung und Statistik

Für die den Bildklassen, relativen Ertragsklassen und Reliefklassen (Faktorvariablen) zugeordneten Daten (Laboranalysen und Ertragswerte = quantitative, abhängige Variablen) wurden eine einfaktorielle Varianzanalyse (F-Test) mit der Prozedur ‚ANOVA‘ (zweiseitig) des Statistikprogramms SPSS (SPSS, 1998) durchgeführt.

Für Tabellen, in denen F-Testergebnisse wiedergeben werden, erfolgt eine Differenzierung der Signifikanzgrenzen:

> 5.0%	n.s.	= nicht signifikant
≤ 5.0%	*	= schwach signifikant
≤ 1.0%	**	= signifikant
≤ 0.1%	***	= hoch signifikant

Zur besseren Lesbarkeit wird im Text der Arbeit der allgemeine Begriff ‚signifikant‘ verwendet. Es handelt sich dabei um eine Zusammenfassung der drei Signifikanzstufen schwach signifikant, signifikant und hoch signifikant.

Die geostatistischen Analysen sowie die Erstellung der Semivariogramme erfolgte mit der Software Variowin (PANNATIER, 1996).

Die räumliche Korrelation eines Parameters kann durch eine Semivariogrammanalyse untersucht werden. Diese ist ein geostatistisches Verfahren, um die Beziehung zwischen einem Merkmal und seiner räumlichen Abhängigkeit zu ermitteln. Die maximale Distanz, bis zu welcher Daten noch in räumlicher Beziehung zueinander stehen, wird als Reichweite (Range [h]) bezeichnet, die Gesamtvarianz an diesem Punkt als Schwellwert (Sill $\gamma[h]$). Je geringer die ermittelte Reichweite ist, desto größer muss die Beprobungsdichte sein, um Daten zu gewinnen, die in räumlicher Beziehung zueinander stehen. Der Nugget-Effekt ist die Varianz bei der Reichweite Null.

Die experimentellen Variogramme können verschiedenen Modellen zugeordnet werden (z.B. linear, gaussisch, exponentiell oder sphärisch), wobei das Modell gewählt wird, welches die engste Korrelation, d.h. die beste Anpassung widerspiegelt. Weiterführende Informationen zur Geostatistik finden sich bei AKIN und SIEMES (1988), WEBSTER und OLIVER (1990) und BURROUGH (1993).

Geostatistische Auswertungen der Daten waren für die vorliegende Arbeit kaum notwendig. Die Daten für ausgewählte Merkmale der Bodenfruchtbarkeit der 30 m Rasterbeprobung von 1995 wurden in der Regel als Originaldaten verwendet. Einzige Ausnahme bildet das Kapitel 3.4.3, in dem die 30 m Rasterdaten für die Geländeanalysen auf ein 10 m Raster interpoliert wurden. Da im Rahmen anderer Arbeiten am Institut bereits Semivariogrammanalysen für alle im Untersuchungsgebiet analysierten Parameter durchgeführt wurden, soll an dieser Stelle nur eine Zusammenfassung der gefundenen Reichweiten für alle Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee, wie sie unter anderem in HANEKLAUS et al. (1997) veröffentlicht wurden, wiedergegeben werden (Tab. 2-8).

Tab. 2-8: Reichweite von ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit der Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee, ermittelt anhand der Rasterdaten (30 m) von 1995.

Parameter	Reichweite (m)			
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
Organische Substanz	59	171	83	79
Ton	58	102	78	80
pH	61	197	128	128
Phosphat	60	364	153	149
Kalium	60	205	135	145
Magnesium	74	171	136	136

Die ebenfalls von HANEKLAUS et al. (1997) bestimmten Reichweiten von 67 bis 105 m für Erträge verschiedener Kulturen und auf verschiedenen Böden zeigt deutlich, dass die bei der Ertragskartierung erzeugte Datendichten diese Reichweiten weit unterschreiten. Einzige Ausnahme in der vorliegenden Arbeit war die Ableitung einer Zuckerrüben-ertragskarte nach einer Handernte von 33 Proben im Jahr 1999 auf dem Gr. Fuchsberg (7,9 ha). Für diesen Fall ist nachfolgend exemplarisch das ermittelte Semivariogramm abgebildet (Abb. 2-14).

Wie auf der Abbildung dargestellt, konnte eine Reichweite von 185 m für die Zuckerrüben-erträge ermittelt werden, so dass die Punktdichte ausreichte, eine Interpolation der Werte durchzuführen und damit eine Ertragskarte zu erzeugen.

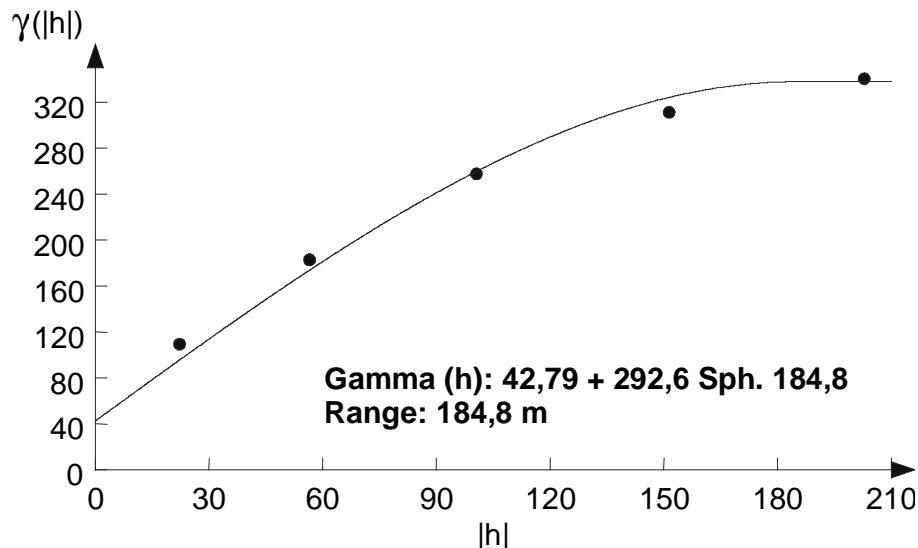


Abb. 2-14: Räumliche Abhängigkeit des Zuckerrüben-ertrages auf dem Schlag Gr. Fuchsberg des Versuchsbetriebes Mariensee 1999.

Die Ableitung von MPZ, wie sie unter Kapitel 3.4 beschrieben wird, erfordert keine Semivariogrammanalyse, da ein räumlicher Zusammenhang von Nachbarpunkten nicht zu erwarten und eine Interpolation der Daten nicht vorgesehen ist.

3 Ergebnisse

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zu prüfen, ob sich Methoden der Fernerkundung als Hilfsmittel zur Informationsbeschaffung für Precision Agriculture eignen, wobei der Schwerpunkt auf die Erfassung von Zusammenhängen zwischen spektralen Signaturen und der räumlichen Variabilität von Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit gelegt wurde.

Kapitel 3.1 gibt einen Überblick über die ausgewählten Merkmale der Bodenfruchtbarkeit am Versuchsstandort Mariensee sowie ihrer räumlichen Variabilität.

Nach der Darstellung der in dieser Arbeit verwendeten Merkmale der Bodenfruchtbarkeit wird in Kapitel 3.2 ihre Beziehung zu den klassifizierten Fernerkundungsdaten beschrieben, bevor Kapitel 3.3 auf die Raum- und Zeitstabilität spektraler Signaturen eingeht.

Abschließend wird dann, in einer Fallstudie, die Ableitung von MPZ anhand von klassifizierten Luftbildern und relativen Ertragsdaten vorgestellt (Kap. 3.4).

Bei der Darstellung der Ergebnisse sowie auch in der Diskussion erfolgt häufig eine Zweiteilung des Versuchsstandortes. Bei den Feldern südöstlich und östlich der Ortschaft Mariensee im Leinetal, handelt es sich vorwiegend um Auenböden, wohingegen die nordwestlich der Ortschaft in der Nienburger Geest gelegenen Felder vorwiegend Braunerden aufweisen (Kap. 2.2.1).

3.1 Deskriptive Statistik ausgewählter Merkmale der Bodenfruchtbarkeit

Dieses Kapitel gibt einen deskriptiven Überblick über die ausgewählten Merkmale der Bodenfruchtbarkeit für alle untersuchten Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee.

Es war ein Ziel der vorliegenden Arbeit, auf der Basis der 1995 durchgeführten Rasterbeprobung (30x30 m) des Oberbodens (Kap. 2.5.1), verschiedene Ansätze der Erfassung der räumlichen Variabilität zu beschreiben. Aus diesem Grund wird als erstes eine Zusammenfassung der durch die Rasterbeprobung 1995 ermittelten Bodenparameter gegeben. Eine vollständige Auflistung aller Minima, Maxima, Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Untersuchungsdaten des Versuchsbetriebes befindet sich im Anhang (Tab. A1).

Die Variationsbreite der pH-Werte lag für den Gesamtbetrieb zwischen 4,9 und 7,3. Vergleicht man die pH-Mittelwerte der Schläge, so wies Schlag 3 mit pH 5,6 den niedrigsten und Schlag 1 mit pH 6,6 den höchsten pH-Wert auf. Der Variationskoeffizient schwankte zwischen 7,2 % für den Duvenwinkel und 2,0 % für die Schläge Gr. Fuchsberg und Stall 6b.

Die mittleren P-Gehalte lagen zwischen 64,5 mg P kg⁻¹ (Stall 2) und 207,8 mg P kg⁻¹ (Schlag 1), wobei eine Variationsbreite von 29,0 - 401,4 mg P kg⁻¹ auf dem Versuchsbetrieb

bestimmt wurde. Die Variationskoeffizienten für die Schläge lagen zwischen 11,7 % (Moorkamp) und 50,8 % (Duvenwinkel).

Abbildung 3-1 zeigt exemplarisch für den Schlag Stall 3 die Variabilität der Bodenparameter pH, P, K und Mg nach der Rasterbeprobung von 1995. Einen vollständigen Überblick aller verwendeten Bodenparameter liefert SCHNUG et al. (2001).

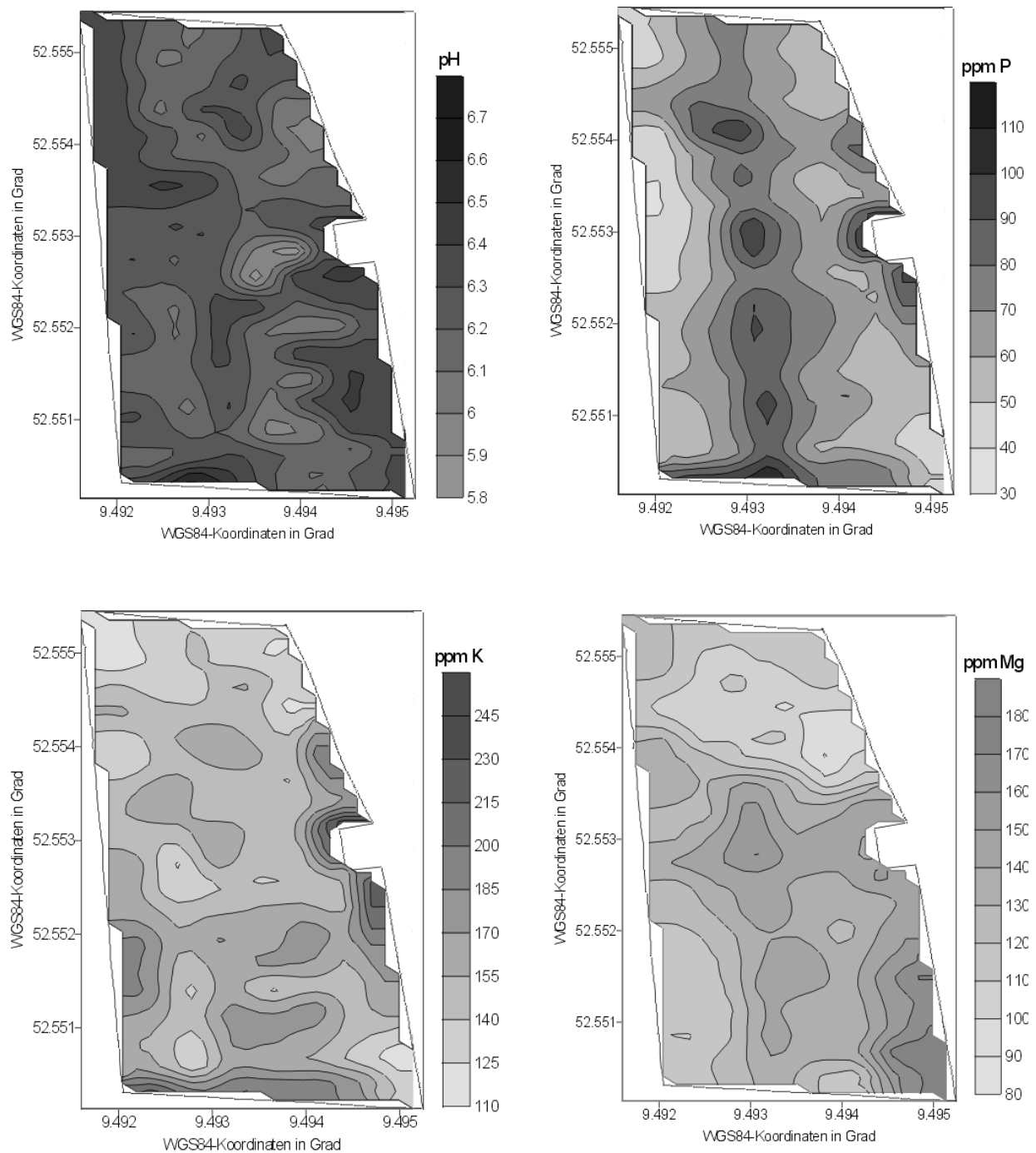


Abb. 3-1: Variabilität der Bodenparameter pH, P, K und Mg auf dem Schlag Stall 3 anhand der Rasterbeprobung von 1995.

Die Streuung der absoluten K-Gehalte über alle Felder in Mariensee lag zwischen 23,8 und 473,0 mg K kg⁻¹, bei einer mittleren Streuung von 40,0 - 319,7 mg K kg⁻¹ zwischen den Feldern, mit einem minimalen Variationskoeffizienten von 16,3 % für Schlag 5 + Kultur II und einem maximalen von 39,1 % für den Schlag Vietingskamp.

Mg-Gehalte konnten in einer Spannweite von 19,8 - 190,9 mg Mg kg⁻¹ über alle Fläche ermittelt werden, wobei die Mittelwerte zwischen 30,0 mg Mg kg⁻¹ (Schlag 7) und 130,9 mg Mg kg⁻¹ (Stall 3) lagen und Variationskoeffizienten von 10,7 % (Moorkamp) und 28,6 % (Duvenwinkel) zu finden waren.

Zn- und Cu-Gehalte wiesen eine deutlich höhere Variation auf den Feldern des Leinetals auf. So bewegten sich die Variationskoeffizienten für Zn zwischen 11,9 % und 71,2 % im Leinetal und zwischen 12,4 % und 27,6 % in der Nienburger Geest. Für Cu konnten Variationskoeffizienten zwischen 15,6 % - 45,6 % (Leinetal) und 11,6 % - 20,6 % (Nienburger Geest) nachgewiesen werden. Die verfügbaren Gehalte an Zn schwankten zwischen 1,0 mg Zn kg⁻¹ und 44,1 mg Zn kg⁻¹, während die Kupferwerte eine Spannweite von 1,2 mg Cu kg⁻¹ bis 19,1 mg Cu kg⁻¹ über alle Felder aufwiesen.

Nachfolgende Tabelle 3-1 listet die Minima und Maxima, die kleinsten und größten arithmetischen Mittel sowie die kleinsten und größten Variationskoeffizienten der ausgewählten Merkmale der Bodenfruchtbarkeit auf, sowohl im Vergleich aller Schläge, als auch getrennt für die Felder im Leinetal (LT) und der Nienburger Geest (NG).

Tab. 3-1: Zusammenfassung der Minima, Maxima, arithmetischen Mittel und Variationskoeffizienten der Bodenmerkmale der Schläge für die Rasterbeprobung von 1995.

Parameter	Gebiet	absolutes Minimum	absolutes Maximum	arithm. Mittel Minimum	arithm. Mittel Maximum	CV % Minimum	CV % Maximum
pH	Ges.	4,9	7,3	5,6	6,6	2,0	7,2
	LT	5,0	7,3	5,9	6,6	2,0	7,2
	NG	4,9	7,2	5,6	6,4	2,0	3,9
P (mg kg ⁻¹)	Ges.	29,0	401,4	64,5	207,8	11,7	50,8
	LT	29,0	401,4	64,5	207,8	18,7	50,8
	NG	49,5	325,3	89,0	145,3	11,7	29,4
K (mg kg ⁻¹)	Ges.	23,8	473,0	40,0	319,7	16,3	39,1
	LT	69,0	377,0	136,7	226,2	16,8	31,1
	NG	23,8	473,0	40,0	319,7	16,3	39,1
Mg (mg kg ⁻¹)	Ges.	19,8	190,9	30,0	130,9	10,7	28,6
	LT	19,8	190,9	30,5	130,9	11,9	28,6
	NG	20,1	95,8	30,0	59,7	10,7	27,3
Zn (mg kg ⁻¹)	Ges.	1,0	44,1	5,2	23,7	11,9	71,2
	LT	1,0	44,1	5,5	23,7	11,9	71,2
	NG	2,4	18,3	5,2	11,8	12,4	27,6
Cu (mg kg ⁻¹)	Ges.	1,2	19,1	2,0	7,3	11,6	45,6
	LT	1,7	19,1	2,9	7,3	15,6	45,6
	NG	1,2	8,9	2,0	5,6	11,6	20,6

Ges. = Alle Schläge, LT = Schläge des Leinetals, NG = Schläge der Nienburger Geest

Bei einem Vergleich der Analysedaten mit den von FRÜCHTENICHT et al. (1993) und der Landwirtschaftskammer Hannover (ANONYM, 1998) publizierten Werten sowie einer Zuordnung zu den angegebenen Gehaltsklassen konnten folgende Versorgungsstufen ermittelt werden. Die pH-Werte der Versuchsflächen in Mariensee bewegten sich nach FRÜCHTENICHT et al. (1993) in den Gehaltsklassen A bis E bei Betrachtung der arithmetischen Mittel der Schläge zwischen C bis E. Für die P- und K-Gehalte konnte sowohl nach FRÜCHTENICHT et al. (1993), als auch nach der Landwirtschaftskammer Hannover (ANONYM, 1998) die gleichen Gehaltsklassen ermittelt werden. So bewegten sich die P-Gehalte zwischen A und E, im arithmetischen Mittel jeden Schlages zwischen C und E. Abbildung 3-2 zeigt den prozentualen Anteil der untersuchten Ackerflächen in den einzelnen P-Gehaltsklassen der Landwirtschaftskammer Hannover.

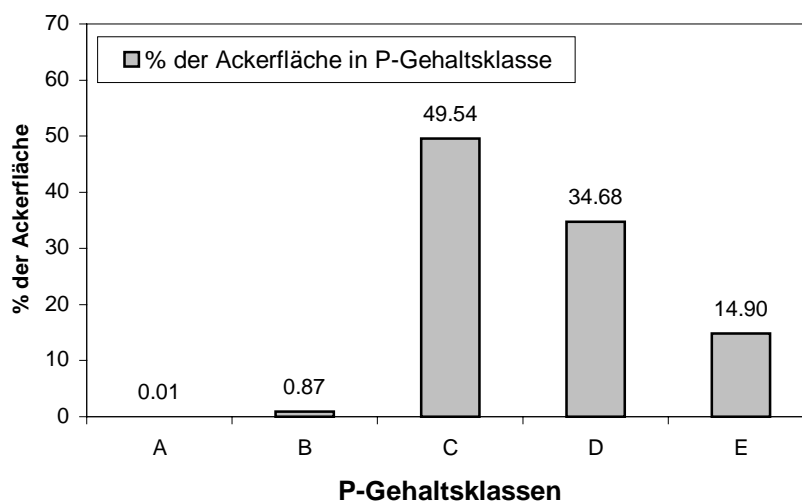


Abb. 3-2: Prozentualer Anteil der Ackerflächen in Mariensee in den P-Gehaltsklassen der Landwirtschaftskammer Hannover im Jahr 1995 (ANONYM, 1998).

Die ermittelten K-Gehalte lagen nach FRÜCHTENICHT et al. (1993) und der Landwirtschaftskammer Hannover (ANONYM, 1998) zwischen B und E, die arithmetischen Mittel der einzelnen Schläge zwischen B bis E. Die prozentualen Flächenanteile der K-Gehaltsklassen an der untersuchten Fläche werden in Abbildung 3-3 wiedergegeben.

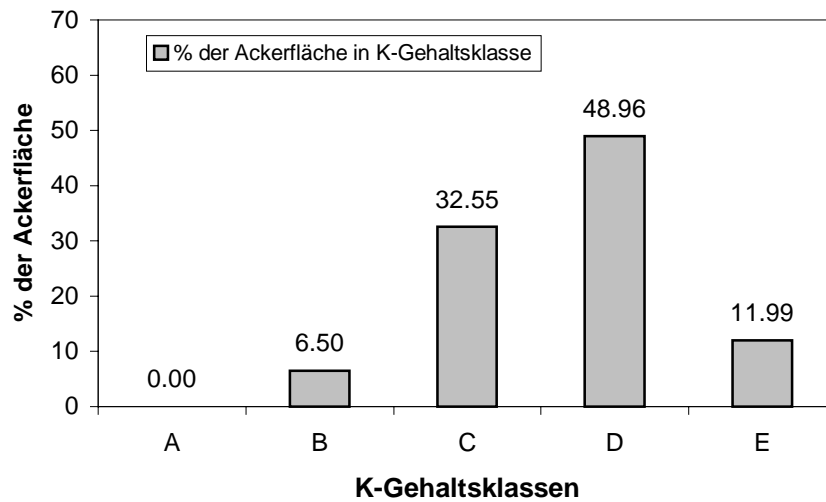


Abb. 3-3: Prozentualer Anteil der Ackerflächen in Mariensee in den K-Gehaltsklassen der Landwirtschaftskammer Hannover im Jahr 1995 (ANONYM, 1998).

Die absoluten Mg-Gehalte ebenso wie die arithmetischen Mittel über die Schläge entsprachen nach FRÜCHTENICHT et al. (1993) den Gehaltsklassen A bis E, während nach der Landwirtschaftskammer Hannover (ANONYM, 1998) Gehaltsklassen von A bis E und arithmetische Mittel über die Schläge von B bis D zugeordnet wurden. Abbildung 3-4 gibt den prozentualen Anteil jeder Mg-Gehaltsklasse an der Gesamtfläche nach der Landwirtschaftskammer Hannover (ANONYM, 1998) wieder.

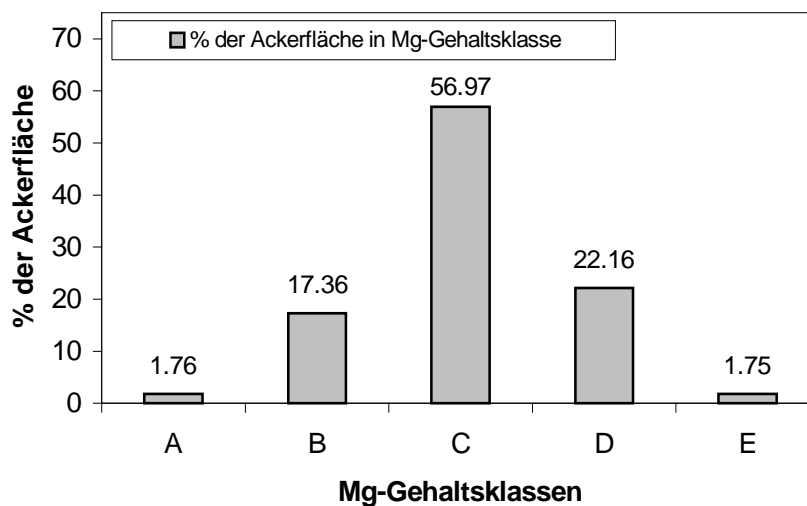


Abb. 3-4: Prozentualer Anteil der Ackerflächen in Mariensee in den Mg-Gehaltsklassen der Landwirtschaftskammer Hannover im Jahr 1995 (ANONYM, 1998).

Über Zn-Gehalte (nach WESTERHOFF, 1954/55) schrieb FINCK (1979), dass Gehalte von 8-10 mg Zn kg⁻¹ eine gute Versorgung des Bodens widerspiegeln, so dass mit Ausnahme der Schläge Duvenwinkel, Moorkamp, Schlag 7 und Vietingskamp eine ausreichende Zn-Versorgung ermittelt wurde. Die Cu-Gehalte, ebenso wie die arithmetischen Mittel der Schläge, wurden entsprechend den Vorgaben der Landwirtschaftskammer Hannover (ANONYM, 1998) den Gehaltsklassen A bis C zugeordnet.

Bei obigen Ausführungen gilt es zu beachten, dass eine derart aufwendige Probenahme nicht innerhalb weniger Tage durchgeführt werden konnte. So wurde ein überwiegender Teil der 1995 mit Wintergetreide bestellten Schläge im Februar und März, ein geringer Teil nach der Ernte im August, und die Schläge mit Sommerkulturen im Mai beprobt. Daraus folgt, dass eine gewisse zeitliche Variabilität, wie sie von OBENAUF (1987) beschrieben wurde (Kap. 4.1), nicht auszuschließen ist und mit in die Ausführungen einfließen.

Zusammenfassend geht aus den obigen Ergebnissen hervor, dass 1995 ein Großteil der Flächen des Versuchsbetriebes in den Gehaltsklassen C und D lag und somit ausreichend mit Makronährstoffen versorgt war. Da bis Ende der achtziger Jahre eine Grunddüngung zu allen Fruchtarten erfolgte und seit diesem Zeitpunkt P-, K- und Mg-Dünger nur noch zu Hackfrüchten bzw. nach Bodenanalysen bei Bedarf zu anderen Kulturen erfolgte, ist damit zu rechnen, dass eine Verschiebung der Gehaltsklassen vom Jahr der Rasterbeprobung (1995) bis heute stattfand. Trotz der allgemein als gut zu bezeichnenden Versorgung mit Makronährstoffen wiesen die Versuchsflächen insgesamt eine große Spannweite an Versorgungszuständen auf. So lag, wenn auch nur mit geringem Flächenanteil, ein Teil der Versuchsflächen für die Mg-Gehalte sogar in der Versorgungsstufe A.

3.2 Beziehungen zwischen Fernerkundungsdaten und Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit

In diesem Kapitel wird auf Grundlage der 1995 durchgeführten Rasterbeprobung der Versuchsflächen in Mariensee geprüft, ob sich räumlich variable Merkmale der Bodenfruchtbarkeit in unüberwacht klassifizierten Luftbildern widerspiegeln. Hierzu wurden alle verfügbaren Bilder (Tab. 2-3) nach dem in Kapitel 2.3 beschriebenen Verfahren klassifiziert, mit den Bodendaten der Rasterbeprobung verschnitten (d. h. den Probenpunkten wird die ihrer Position entsprechende Bildklasse angefügt) und eine einfaktorielle Varianzanalyse unterzogen (Tab. A2 und A3 im Anhang). In den nachfolgenden Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 werden die Ergebnisse getrennt nach Bildinhalten (Abbildung von Boden oder Vegetation) dargestellt. Tabelle 3-2 gibt als ein Beispiel dieser Varianzanalyse die

Signifikanzen für den F-Test (Varianzursache = Bildklasse) zwischen den Bildklassen und der Auswertung der Bodenanalysen des Schlags Kultur IV wieder. Vier Luftbilder lagen für diesen Schlag vor, drei der Aufnahmen bildeten den Schlag mit Vegetation, eine ohne Vegetation ab.

Tab. 3-2: Statistische Sicherheit (F-Test) für Bodenparameter der Rasterbeprobung von 1995 gemessen in Luftbildklassen des Schlags Kultur IV.

Datum	Kultur/Boden	OS	Ton	pH	P	K	Mg	Zn	Cu
21.07.1996	Ackerbohnen	*	***	*	***	n.s.	**	**	***
19.10.1999	Boden	n.s.	***	***	n.s.	n.s.	***	n.s.	n.s.
10.04.2000	Winterweizen	n.s.	**	***	***	n.s.	**	n.s.	*
15.05.2000	Winterweizen	n.s.	***	***	*	n.s.	*	*	*

> 5,0% n.s. = nicht signifikant ≤ 1,0% ** = signifikant
 ≤ 5,0% * = schwach signifikant ≤ 0,1% *** = hoch signifikant

Ziel dieser Analysen ist es zunächst einmal einen Überblick zu bekommen, in welchem Umfang spektrale Signaturen und Analysendaten statistisch signifikante Beziehungen aufweisen. Das umfangreiche Tabellenmaterial hierzu ist im Anhang in den Tabellen A2 und A3 zusammengestellt. An dieser Stelle wird zusammenfassend eine hieraus errechnete Übersicht gegeben (Abb.3-5), die den prozentualen Anteil signifikanter Zusammenhänge zwischen Bildklassen eines jeden Aufnahmeterrins und Bodenparametern der Rasterbeprobung 1995 sowie der Ertragsdaten von 1995-2000 darstellt.

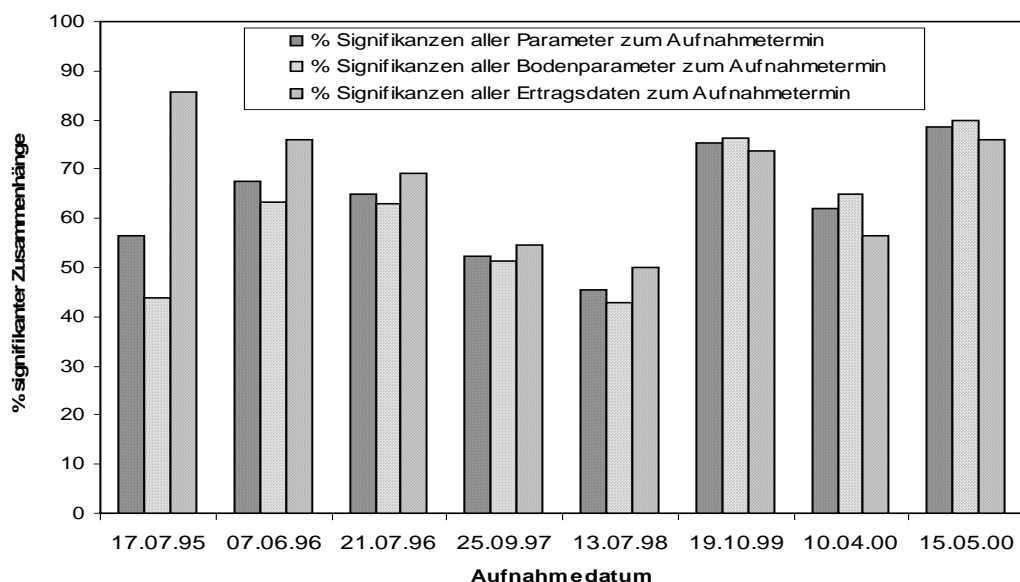


Abb. 3-5: Prozentualer Anteil signifikanter Zusammenhänge zwischen Bildklassen eines jeden Aufnahmeterrins und Bodenparametern der Rasterbeprobung 1995 sowie Ertragsdaten von 1995-2000.

Um zu prüfen, ob sich die Häufigkeiten der berechneten Signifikanzen für die Bodenparameter und Ertragsdaten unterscheiden, wurde der jeweilige prozentuale Anteil dieser bestimmt und ebenfalls dargestellt. So lag für die Aufnahmetermine 19.10.1999, 10.04.2000 und 15.05.2000 der prozentuale Anteil signifikanter Unterschiede zwischen den Bildklassen für die Bodenparameter höher, während für alle anderen Termine der Anteil Signifikanzen der Ertragsdaten höher war.

Die Abbildung 3-5 zeigt, dass in mehr als der Hälfte der Fälle eine signifikante Beziehung zwischen der spektralen Signatur und einem der untersuchten Parameter der Bodenfruchtbarkeit besteht. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass die aus einem Luftbild bestimmten Boden- und Bestandesunterschiede in mehr als 50 % der Fälle auf Unterschiede in Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit zurückzuführen waren. Offen bleibt dabei zunächst, um welches Merkmal es sich handelt. Dennoch lässt sich bereits aus diesem ersten Ergebnis ableiten, dass die Planung der Probenahme für Bodenanalysen hierdurch erfolversprechend verbessert werden kann.

3.2.1 Unüberwacht klassifizierte Bodenbilder

Für insgesamt elf der 17 Versuchsflächen lagen ein bis vier Luftbilder des unbewachsenen Bodens vor. Da die Bodenbilder aus fünf der acht Befliegungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (07.06.1996, 25.09.1997, 19.10.1999, 10.04.2000, 15.05.2000) stammten, wurde auf ihnen Boden in verschiedenen Bearbeitungsstadien und Abtrocknungsgraden abgebildet. 23 Bodenbilder wurden verarbeitet und mit ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit der Rasterbeprobung von 1995 sowie mit Ertragsdaten verschnitten. Nachfolgend werden die Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (Tab. A3 im Anhang) beschrieben.

Bei Vergleichen zwischen den Feldern im Leinetal und der Nienburger Geest ist zu beachten, dass von fünf Schlägen des Leinetals zehn Bodenbilder zur Verfügung standen, während sich die 13 Bodenbilder der Nienburger Geest auf sechs Schläge verteilten. Eine detaillierte Übersicht aller beteiligten Schläge mit den dazugehörigen Signifikanzen befindet sich im Anhang in Tabelle A2. Die variierende Anzahl mit Ertragsdaten verschnittener Bilder zwischen den Jahren ergab sich aufgrund der Tatsache, dass in der Fruchtfolge auch Kulturarten angebaut wurden, bei denen keine Ertragskartierung möglich war.

Abbildung 3-6 zeigt die Gesamtanzahl unüberwacht klassifizierter Bodenbilder und im Vergleich dazu die Anzahl Bilder, bei denen ein signifikanter Unterschied von Bodenparametern bzw. Erträgen zwischen den Bildklassen gefunden wurde. Diese wurden nochmals entsprechend der Landschaftsgebiete Leinetal und Nienburger Geest unterteilt.

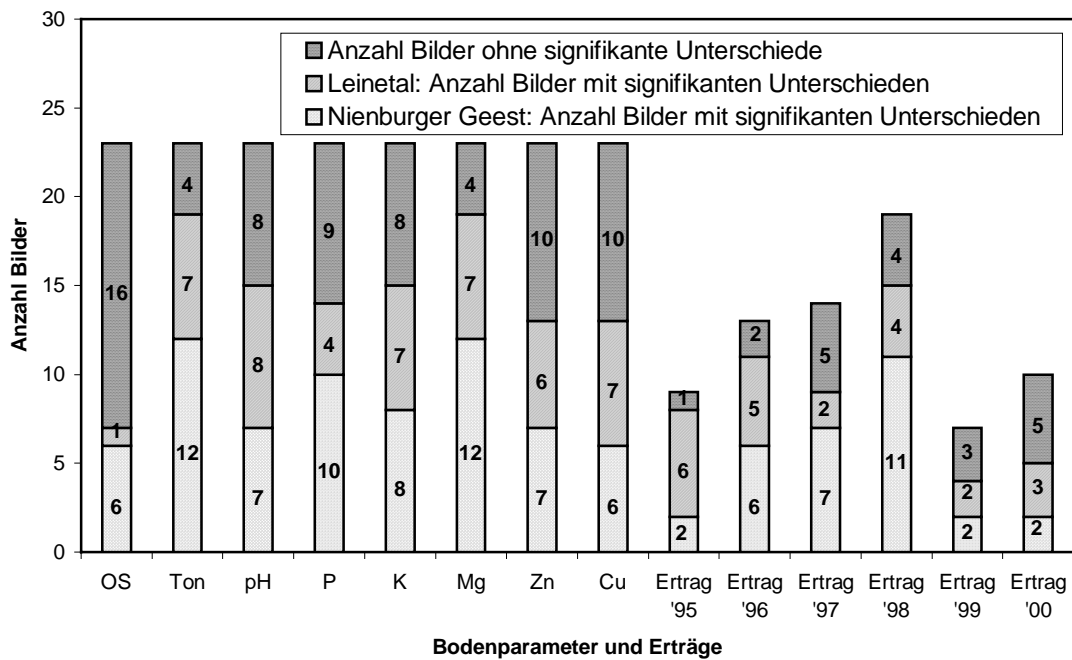


Abb. 3-6: Signifikante Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierten Bodenbildern und ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit der Rasterbeprobung von 1995 sowie von Ertragsdaten auf dem Versuchsstandort Mariensee unterteilt nach Landschaftsgebieten.

Der prozentuale Anteil der Bilder mit signifikanten Unterschieden zwischen den Bildklassen variierte stark. So wiesen 19 von 23 Bildern (83 %) für die Bodenparameter Ton und Mg signifikante Unterschiede auf, während der Parameter organische Substanz mit nur sieben von 23 (30 %) Bildern die geringste Anzahl Signifikanzen aufwies. Bei den übrigen Bodenparametern: pH-Wert, P, K, Zn und Cu zeigten zwischen 13 und 15 Bilder (57-65 %) signifikante Unterschiede zwischen den Bildklassen.

Für die Termine der Ertragserfassung lagen zwischen sieben (1999) und 19 (1998) unüberwacht klassifizierte Bodenbilder vor, von denen zwischen 50 % (2000) und 89 % (1995) signifikante Differenzen zwischen den Bildklassen aufwiesen.

Diese Analyse wurde noch um eine Differenzierung nach vorwiegenden Bodenarten erweitert. Durch Aufteilung der Bodenbilder konnte geprüft werden, ob es zwischen dem Auftreten von signifikanten Bildunterschieden und den jeweils vorwiegenden Bodenarten des Leinetals (Auenböden) und der Nienburger Geest (Braunerden) Zusammenhänge gab. Zu beachten gilt, dass vom Leinetal nur zehn Bodenbilder vorlagen, wohingegen von der Nienburger Geest 13 Bilder vorhanden waren. Aus diesem Grund sind die prozentualen Anteile getrennt für beide Landschaftsgebiete berechnet worden und in Abbildung 3-7 dargestellt.

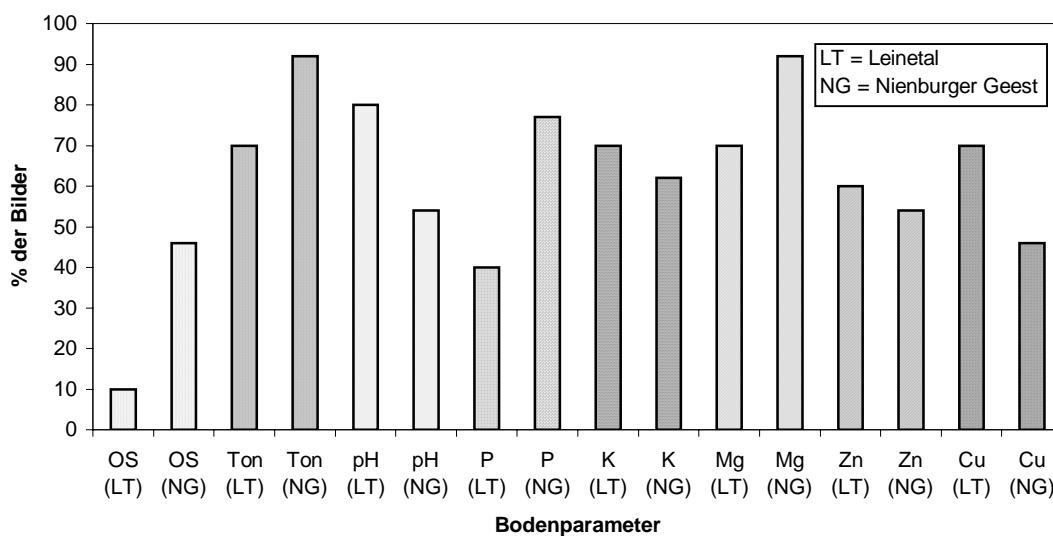


Abb. 3-7: Prozentuale Anteile signifikanter Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierten Bodenbildern und ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit der Rasterbeprobung von 1995 unterteilt nach den vorherrschenden Bodenarten Auenboden und Braunerde der Landschaftsgebiete.

Für die Bodenparameter organische Substanz, Ton, P und Mg lag eine höhere Anzahl signifikanter Bilder von der Nienburger Geest vor. Für die Parameter pH-Wert, K, Zn und Cu wurde eine höhere Anzahl Bilder des Leinetals mit signifikanten Unterschieden ermittelt, als in der Nienburger Geest. Da das Verhältnis der Anzahl vorhandener Bilder und auch deren Aufteilung auf die Landschaftsgebiete Leinetal und Nienburger Geest variiert, konnte ein direkter Vergleich der Ertragsdaten nicht stattfinden.

Allgemeingültige Aussagen lassen sich aufgrund der Betrachtung von Bodenparametern des Versuchsstandortes nicht ableiten, vielmehr müsste dazu eine umfassende Studie an möglichst vielen Standorten mit entsprechenden Böden erfolgen. Somit können die gefundenen Unterschiede zwischen den beiden Landschaftsgebieten des Versuchsstandortes Mariensee nur als Beispiele dienen.

Bei der Betrachtung einzelner Schläge, von denen mehr als ein Bodenbild vorlag, war festzustellen, dass sich signifikante Unterschiede eines Parameters nicht zwangsläufig in allen Bildern nachweisen ließen (Tab. A3 im Anhang). So konnten z.B. für den Schlag Duvenwinkel für alle Parameter signifikante Unterschiede zwischen den Klassen des Bildes vom 15.05.2000 nachgewiesen werden, während für das Bodenbild vom 25.09.1997 nur noch der pH-Wert und die Ertragsdaten Signifikanzen aufwiesen.

Als Gegenbeispiel soll der Schlag Vietingskamp vorgestellt werden, von dem vier Bodenbilder vorlagen (25.09.1997, 19.10.1999, 10.04.2000, 15.05.2000). Für alle unüberwacht klassifizierten Bilder konnten signifikante Unterschiede für die Parameter organische Substanz, Ton, pH-Wert, P, Mg, Zn, Ertrag 1997 und 1998 ermittelt werden. Für Cu-Gehalte wurden bei keinem Bild signifikante Unterschiede zwischen den Klassen ermittelt, während die K-Gehalte Signifikanzen zu den Bildern vom 25.09.1997 und 15.05.2000 aufwiesen. Für die Bilder vom 19.10.1999 und 10.04.2000 konnten keine Unterschiede der K-Gehalte zu den Bildklassen ermittelt werden.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass, wenn für ein bestimmtes Merkmal in mehreren Bildern wiederholt eine Signifikanz zwischen Bildklassen gefunden wird, hieraus nicht auf ein räumlich konstantes Ergebnis geschlossen werden kann, denn die in diesem Kapitel vorgestellte Prüfung berücksichtigt noch nicht, ob ein gleiches Ergebnis auch immer an der gleichen Stelle im Schlag gefunden wird. Hierzu wird auf die Kapitel 3.3 und 4.3 verwiesen, die sich unter anderem mit der räumlichen Stabilität spektraler Signaturen befassen.

Fazit der Auswertung für den Versuchsstandort Mariensee ist, dass in mehr als der Hälfte der Fälle die spektralen Signaturen eines Bodenbildes auf Unterschiede in Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit, mit Ausnahme der organischen Substanz, hinwiesen. Ohne entsprechende Bodenanalysen können aber keine Aussagen über die Art des Bodenmerkmals bzw. der Bodenmerkmale gemacht werden.

3.2.2 *Unüberwacht klassifizierte Vegetationsbilder*

Für alle untersuchten Schläge des Versuchsbetriebes in Mariensee lagen insgesamt 65 Vegetationsbilder vor. Davon bildeten 32 Bilder Schläge des Leinetals ab und 33 Bilder Schläge der Nienburger Geest. Die abgebildete Vegetation umfasste größtenteils Wintergetreide, aber auch Erbsen, Ackerbohnen, Hafer, Zuckerrüben, Mais, Grünbrache und Zwischenfrüchte. Aufgrund der Aufnahmezeitpunkte wurden die Kulturen in unterschiedlichen Entwicklungsstadien erfasst.

Erwähnt sei an dieser Stelle, dass als zusätzliche Varianzursache für die spektrale Signatur der Getreidebestände raumvariable Düngung, insbesondere mit N, hinzukommt. Da theoretisch aber davon ausgegangen wird, dass ein Ausgleich der durch N bedingten Unterschiede der spektralen Signaturen durch die angepasste Düngung vorgenommen wird und diese damit geringer werden, kann zumindest ein negativer Effekt ausgeschlossen werden.

Abbildung 3-8 gibt eine Gesamtübersicht aller unüberwacht klassifizierten Vegetationsbilder sowie der Anzahl Bilder mit signifikanten Unterschieden zwischen den Bildklassen aufgeteilt nach den Landschaftsgebieten. Tabelle A3 im Anhang gibt detailliert Auskunft über die ermittelten Signifikanzen zwischen den Bildklassen von Vegetationsbildern und Bodenparametern der Rasterbeprobung von 1995 sowie den Ertragsdaten.

Mit Ausnahme der organischen Substanz (36,9 %), konnte für alle Bodenparametern in 52 % bis 62 % der Fälle signifikante Unterschiede zwischen den Bildklassen ermittelt werden. Der prozentuale Anteil Bilder mit signifikanten Unterschieden der Bildklassen in Bezug auf die Erträge schwankte zwischen 56 % und 75 %, mit einem Mittel von 65 % und lag damit insgesamt höher als bei den Bodenparametern.

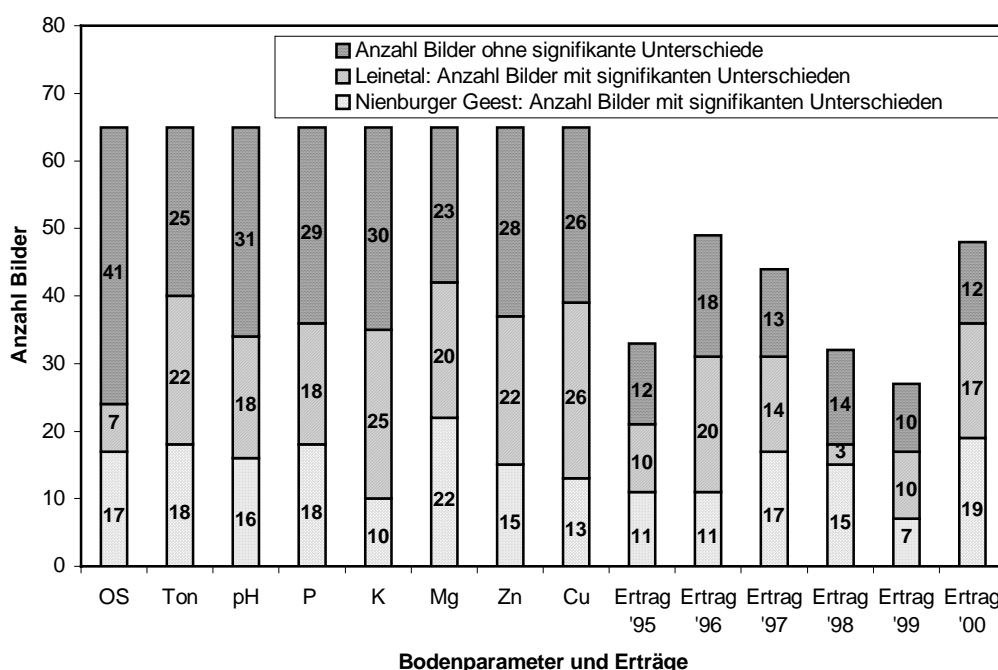


Abb. 3-8: Signifikante Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierten Vegetationsbildern und ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit der Rasterbeprobung von 1995 sowie von Ertragsdaten auf dem Versuchsstandort Mariensee unterteilt nach Landschaftsgebieten.

Bei getrennter Betrachtung der Signifikanzen für das Leinetal und die Nienburger Geest kam es für die Bodenparameter organische Substanz, Ton, K, Zn und Cu zu auffälligen Abweichungen zwischen den Landschaftsgebieten. Abbildung 3-9 zeigt die prozentualen Anteile zwischen signifikanten Bildunterschieden und den jeweils vorwiegenden Bodenarten des Leinetals (Auenboden) und der Nienburger Geest (Braunerden).

Während 52 % der klassifizierten Bilder der Nienburger Geest signifikante Unterschiede in der organischen Substanz zwischen den Bildklassen aufwiesen, wurden im Leinetal in nur 22

% der Fälle Signifikanzen ermittelt. Gegensätzlich verhielt es sich für den Tongehalt, für den signifikante Differenzen zwischen den Bildklassen der Vegetationsbilder für 69 % der Beobachtungen im Leintal und für 54 % der Nienburger Geest ermittelt wurden. Die Gehalte an K, Zn und Cu wiesen generell einen höheren Prozentsatz Signifikanzen für Bilder aus dem Leintal (K: 78 %, Zn: 69 %, Cu: 81 %) als für die der Nienburger Geest (K: 30 %, Zn: 46 %, Cu: 39 %) auf.

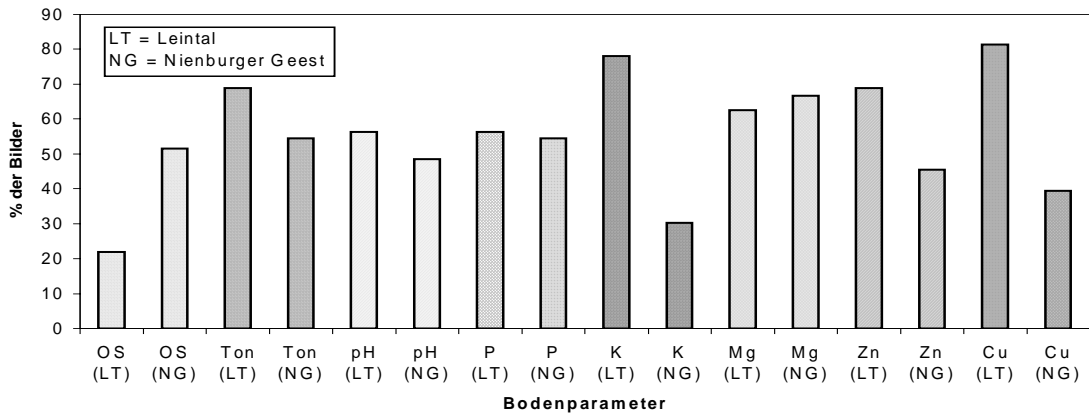


Abb. 3-9: Prozentuale Anteile signifikanter Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierten Vegetationsbildern und ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit der Rasterbeprobung von 1995 unterteilt nach den vorherrschenden Bodenarten Auenboden und Braunerde der Landschaftsgebiete.

Für die Ertragsdaten ließ sich dagegen keine Regelmäßigkeit feststellen. Wie Abbildung 3-10 zeigt, verhielten sich die Jahre 1998 und 1999 völlig gegensätzlich. Während 1998 nur 33 % der Bilder des Leintals, dafür aber 65 % der Nienburger Geest signifikante Unterschiede zwischen den Bildklassen aufwiesen, kehrte sich dieses Verhältnis 1999 um, so dass für 83 % der Bilder des Leintals und 50 % der Nienburger Geest Signifikanzen ermittelt werden konnten.

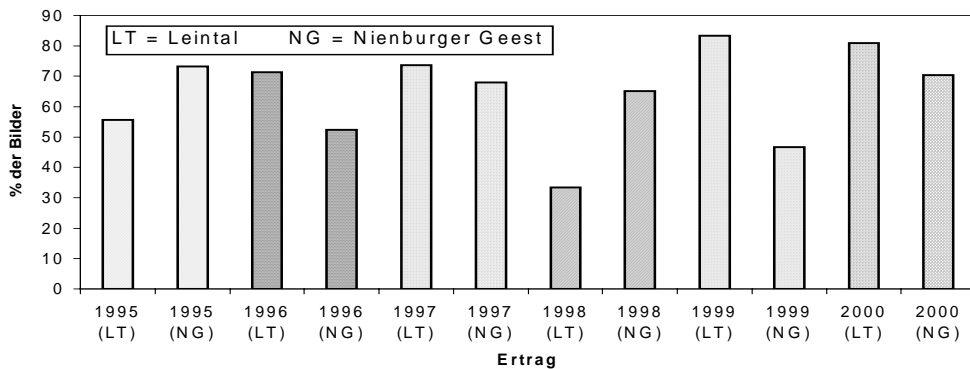


Abb. 3-10: Prozentuale Anteile signifikanter Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierten Vegetationsbildern und Ertragsdaten der Jahre 1995-2000 unterteilt nach den vorherrschenden Bodenarten Auenboden und Braunerde der Landschaftsgebiete.

Ein Vergleich zwischen den abgebildeten Fruchtarten wird hier exemplarisch durchgeführt, da die Anzahl vorhandener unüberwacht klassifizierter Bilder für jede Fruchtart schwankte. So lagen für Wintergerste 28, für Winterweizen zwölf und für Hafer sieben Bilder vor, andere Fruchtarten waren in noch geringerem Maße vertreten. Bei einem Vergleich der prozentualen Häufigkeiten signifikanter Unterschiede zwischen den Bildklassen und den Bodenparametern bzw. den Ertragsdaten konnten keine statistisch gesicherten Abhängigkeiten zu den Kulturarten ermittelt werden (Tab. 3-3).

Tab. 3-3: Prozentuale Häufigkeiten auftretender signifikanter Unterschiede zwischen den Bildklassen von Vegetationsbildern unterschiedlicher Kulturarten für die Bodenparameter von 1995 und Ertragsdaten von 1995-2000.

	OS	Ton	pH	P	K	Mg	Zn	Cu	Ertr. 1995	Ertr. 1996	Ertr. 1997	Ertr. 1998	Ertr. 1999	Ertr. 2000
Ges.	36,9	61,5	52,3	55,3	53,8	64,6	56,9	60,0	63,6	63,3	70,5	56,3	63,0	75,0
WG	46,4	62,3	57,1	53,6	50,0	60,7	57,1	53,6	71,4	52,4	81,3	63,3	72,7	71,4
WW	25,0	83,3	50,0	41,7	50,0	50,0	58,3	75,0	50,0	77,8	72,7	20,0	75,0	90,9
Hafer	14,3	42,9	42,9	42,9	71,4	71,4	71,4	71,4	50,0	57,1	-	80,0	33,3	40,0

Ges. = Alle Vegetationsbilder

WG = Wintergerste

WW = Winterweizen

Ertr. = Ertrag

Abweichungen besonders beim Hafer aber auch beim Winterweizen sind unter dem Gesichtspunkt der geringeren Datendichte gegenüber der Wintergerste zu betrachten. Trotzdem fiel auf, dass für die Wintergetreide die signifikanten Unterschiede für alle Ertragsdaten von 1995-2000 höher lagen (WG: 67 %, WW: 64 %) als für den Hafer (52 %), wobei die Wintergetreide in etwa das Mittel von 65 % aller Fruchtarten erreichte.

Auffällig ist aber auch, dass sich für Hafer deutlich häufiger statistische Signifikanzen zwischen den Bildklassen für Merkmale der Nährstoffversorgung im Boden (K, Mg, Zn, Cu) ergaben, was möglicherweise durch die spezifischen Nährstoffansprüche dieser Kulturart (FINCK, 1979) bedingt sein könnte (Tab. 3-3).

Zusammenfassend zeigten die Auswertungen für den Versuchsstandort Mariensee, dass in mehr als 50 % der Fälle die spektralen Signaturen eines Bestandes auf Unterschiede in Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit hinwiesen. Die Art der Bodenmerkmale schien, zumindest in Bezug auf die Häufigkeiten, in Zusammenhang mit der vorherrschenden Bodenart zu stehen. Ohne geokodierte Bodenanalysen in den Bildklassen können aber keine Aussagen über die Art des Bodenmerkmals bzw. der Bodenmerkmale gemacht werden.

3.3 Raum- und Zeitstabilität spektraler Signaturen

Mit dem Vergleich von unüberwacht klassifizierten Bildern, zum einen von gleichen Kulturarten zum gleichen Zeitpunkte auf verschiedenen Schlägen (Kap. 3.3.1), zum anderen von gleichen Kulturarten im Vegetationsverlauf auf einem Schlag (Kap. 3.3.2), wird untersucht, inwieweit eine Raum- und Zeitstabilität der Bilddaten gegeben ist. Diese beiden Analysen wurden anhand der Bodendaten der Rasterbeprobung von 1995 und den Ertragsdaten von 1995-2000 durchgeführt.

Des weiteren wird dann anhand der für drei Schläge wiederholten Rasterbeprobung 1998 bzw. 2000 geprüft, ob das gleiche unüberwacht klassifizierte Bild von einem Schlag für die gleichen Bodenparameter aus verschiedenen Jahren signifikante Unterschiede zwischen den Bildklassen aufweist (Kap. 3.3.3). Abschließend wird die Hypothese geprüft, ob sich mit Vergrößerung der Zeitspanne zwischen Bodenanalyse und Bildaufnahme der Anteil signifikanter Unterschiede zwischen den Bildklassen verringert.

3.3.1 Vergleich spektraler Signaturen einer Kulturart an verschiedenen Zeitpunkten auf mehreren Schlägen

In diesem Kapitel wird untersucht, ob sich bei Wintergerste zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmte Trends hinsichtlich der Häufigkeit von Signifikanzen für die Beziehung zwischen Boden- bzw. Bestandesparametern und spektralen Signaturen finden lassen. Hierzu wurden alle vorhandenen, zum gleichen Termin aufgezeichneten, Luftbilder von Schlägen verglichen, die mit Wintergerste bestellt waren. Dieser Vergleich ist nur für die Kulturart Wintergerste möglich, da nur von dieser ausreichend Bildmaterial vorlag. Für fünf verschiedene Aufnahmetermine (07.06.96, 21.07.96, 19.10.99, 10.04.00, 15.05.00) lagen jeweils von fünf Schlägen Luftaufnahmen vor. Dabei handelt es sich bei den Aufnahmen von 1996 um die Schläge Duvenwinkel, Gr. Fuchsberg, Schlag 3, Schlag 7 und Stall 7 + 8, von 1999 und 2000 um die Schläge Moorkamp, Schlag 2, Schlag 5 + 6, Schlag 5 + Kultur II und Stall 5 a + b.

Die Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse, die in die nachfolgenden Untersuchungen eingeflossen sind, befinden sich im Anhang in Tabelle A3. Wie Abbildung 3-11 verdeutlicht, konnte die größte Anzahl varianzanalytisch gesicherter Unterschiede zwischen den Bildklassen vom 15.05.2000 ermittelt werden. Für insgesamt 79 % aller untersuchten Parameter konnten signifikante Differenzen in den Bildklassen nachgewiesen werden, wobei kein wesentlicher Unterschied zwischen Ertragsdaten und Bodenparametern festgestellt werden konnte. Die Bildklassen der Luftbilder vom 19.10.1999 wiesen einen fast ebenso großen Anteil (74 %) Signifikanzen auf, wohingegen am 10.04.2000 nur 46 % der Parameter Unterschiede

zwischen den Klassen aufwies und davon wiederum ein höher Anteil Signifikanzen zu den Bodenparametern als zu den Erträgen ermittelt wurden. Auffällig bei den Aufnahmen vom Juni und Juli 1996 (55 % und 47 % Signifikanzen gesamt) ist der höhere Anteil signifikanter Unterschiede für die Ertragsdaten (67 %) im Verhältnis zu den Bodenparametern mit 50 % im Juni und 38 % im Juli.

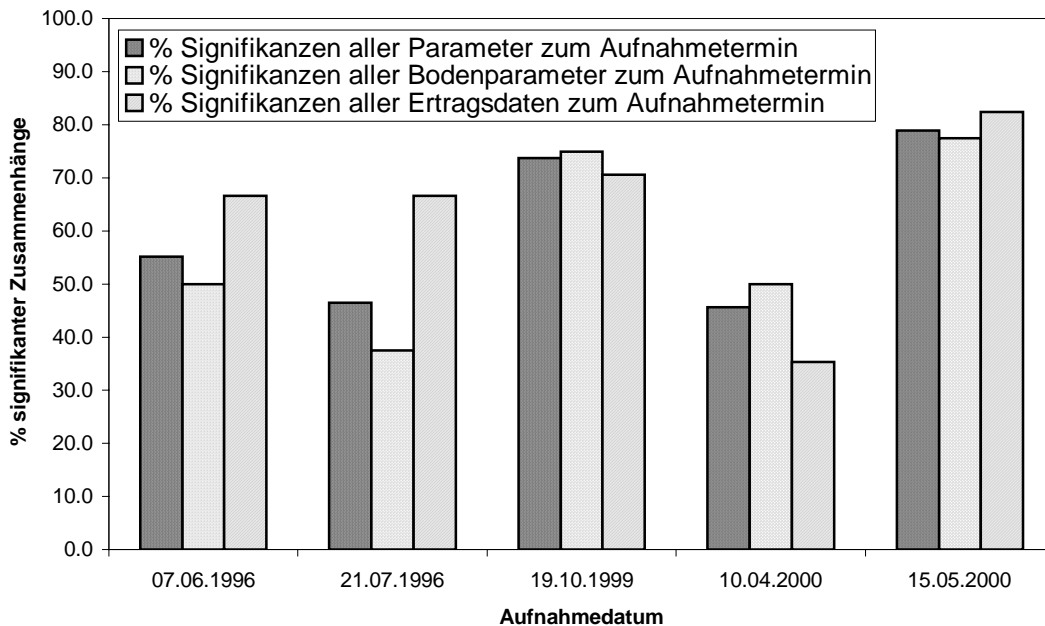


Abb. 3-11: Prozentualer Anteil signifikanter Zusammenhänge zwischen Bildklassen gewonnen aus unüberwacht klassifizierten Luftbildern von fünf Schlägen mit Wintergerste zu fünf verschiedenen Zeitpunkten.

Für einen Schlag (Großer Fuchsberg) lagen zwei Bilder der gleichen Fruchtart zu einem nahezu identischen Zeitpunkt (21.07.1996 und 13.07.1998) während der Abreife der Wintergerste vor. Beide unüberwacht klassifizierten Bilder zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bildklassen für die Bodenparameter der Rasterbeprobung 1995. Allerdings wiesen beide Bilder zu fünf der sechs während der Jahre 1995-2000 aufgezeichneten Ertragsdaten signifikante Unterschiede auf. Nur für die Ertragsdaten von 1998 konnten keine signifikanten Unterschiede zu den Bildklassen der beiden Luftbilder ermittelt werden (Tab. A2).

Fazit dieser Auswertung ist, dass spektrale Signaturen einer im Vegetationsverlauf unterschiedlich stark mit Boden- und Bestandesparametern korrelieren. Es war jedoch kein Trend hinsichtlich überdurchschnittlich häufig auftretender Signifikanzen an einem der Termine auszumachen.

3.3.2 Betrachtung spektraler Signaturen von Kulturarten im Vegetationsverlauf

Mit dieser Auswertung sollte die Konstanz von Beziehungen zwischen spektralen Signaturen sowie Boden- und Bestandesparametern innerhalb einer Vegetationsperiode und eines Schlages geprüft werden.

Für fünf Schläge lagen drei Bilder der gleichen Kultur (Wintergerste) während einer Vegetationsperiode vor. Dabei handelt es sich um die Schläge Moorkamp, Schlag 2, Schlag 5 + 6, Schlag 5 + Kultur II und Stall 5 a + b, die am 19.10.1999, 10.04.2000 und 15.05.2000 abgebildet wurden. Untersucht wurde für jeden Parameter eines Schlages, ob bei allen Terminen entweder signifikante oder nicht signifikante Unterschiede zwischen den Bildklassen vorlagen (Tab. A2 im Anhang). In Tabelle 3-4 wird der prozentuale Anteil an Übereinstimmungen der einfaktoriellen Varianzanalyse zwischen den Bildklassen der drei Termine und den Bodenparameter sowie Ertragsdaten wiedergegeben.

Tab. 3-4: Prozentualer Anteil Übereinstimmungen von signifikanten Unterschieden zwischen spektralen Signaturen im Verlauf einer Vegetationsperiode (drei Termine) und Bodenparametern der Rasterbeprobung von 1995 und Ertragsdaten von 1995-2000.

	Moorkamp	Schlag 2	Schlag 5 + 6	Schlag 5 + Kultur II	Stall 5 a + b
	%				
Alle Parameter	9,1	83,3	41,7	45,5	54,5
Bodenparameter	12,5	75,0	50,0	50,0	75,0
Ertragsdaten	0,0	100,0	25,0	33,3	0,0

Mit Ausnahme des Feldes Schlag 2, bei dem 83 % aller Parameter an allen drei Terminen übereinstimmende Signifikanzen aufwiesen sowie des Schlages Moorkamp mit nur neun Prozent Übereinstimmung aller Parametern, lag der Prozentsatz Parameter mit identischen Ergebnissen der Varianzanalyse um 50 %. Auffällig waren die geringen Prozentsätze für signifikante Unterschiede bei Ertragsdaten, die, abgesehen vom Schlag 2 (100 %), mit 0 bis 33 % sehr gering ausfielen.

Betrachtet man die einzelnen Parameter (Tab. A2 im Anhang), so wies der K-Gehalt mit Übereinstimmungen bei vier von fünf Schlägen den höchsten Anteil auf. Die Bodenparameter organische Substanz, P, Zn und Cu waren bei drei von fünf, Tongehalt und Mg bei zwei von fünf und der pH-Wert bei einem von fünf Schlägen identisch. Dagegen waren die Ergebnisse des F-Test's für die Ertragsdaten nur bei sechs von 17 Fällen (35 %) zu allen drei Terminen identisch.

Ein weiterer Vergleich von Bildpaaren der Jahre 1996 (07.06.96, 21.07.96) und 2000 (10.04.00, 15.05.00) wurde durchgeführt. Bei diesem wurde auch Luftbilder anderer Kulturarten berücksichtigt. Im verfügbaren Material lagen 18 mal zwei Bilder einer Vegetationsperiode vor, für vier Schläge war ein doppelter Datensatz vorhanden. Auf diesen Bildern war neun mal Wintergerste, fünf mal Winterweizen, zwei mal Mais und je einmal Erbsen und Hafer abgebildet. Zehn der Bildpaare waren am 07.06.1996 und 21.07.1996, acht am 10.04.2000 und 15.05.2000 aufgenommen worden. Insgesamt stimmten in diesem Datensatz nach der Varianzanalyse 58 % der Bodenparameter und 62 % der Erträge überein. Unterteilt man die Schläge entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu den Landschaftsgebieten Leinetal (acht Fälle) und Nienburger Geest (zehn Fälle), so ergeben sich mit 62 % und 61 % nahezu gleiche Ergebnisse für die Ertragsdaten, wohingegen für die Bodenparameter mit 52 % im Leinetal und 64 % in der Nienburger Geest ein Unterschied auszumachen war.

Differenziert man die Aufnahmegruppen entsprechend ihrer Aufnahmetermine in eine Gruppe 1996 (07.06.96 und 21.07.96) und eine Gruppe 2000 (10.04.00 und 15.05.00), so stellt sich heraus, dass die Gruppe 1996, deren Aufnahmetermine näher am Erntetermin lagen, einen höheren Prozentsatz (69 %) Übereinstimmungen für die Ertragsdaten aufwies, als die der Gruppe 2000 mit 52 %. Die Differenz zwischen den Bodenparametern der Gruppen fiel mit 56 % für Gruppe 1996 und 61 % für Gruppe 2000 geringer aus.

Abbildung 3-12 zeigt die prozentualen Anteile aller Bodenparameter und Erträge jeden Schlages, bei denen varianzanalytisch übereinstimmende Ergebnisse bei beiden unüberwacht klassifizierten Bildern ermittelt wurden. Eine Zusammenfassung der Signifikanzniveaus erfolgte wie in Kapitel 2.7 beschrieben.

Wie anhand der Abbildung zu sehen ist, variieren die prozentualen Übereinstimmungen von Schlag zu Schlag stark. Bei einem Vergleich von Schlag 2, Schlag 5 + 6, Schlag 5 + Kultur II und Stall 5 a + b, von denen in beiden Jahren ein Bildpaar vorlag, fällt auf, dass Schlag 5 + 6 (58 %) und Stall 5 a + b (64 %) einen identischen Anteil Übereinstimmungen aufwies, wohingegen für Schlag 2 (1996: 33 %, 2000: 92 %) und Schlag 5 + Kultur II (1996: 73 %, 2000: 46 %) große Differenzen zwischen den Jahren ermittelt wurden. Die für Abbildung 3-12 verwendeten Daten befinden sich in Tabelle A4 im Anhang. Dort werden sie zusätzlich differenziert in Bodenparameter und Erträge wiedergegeben.

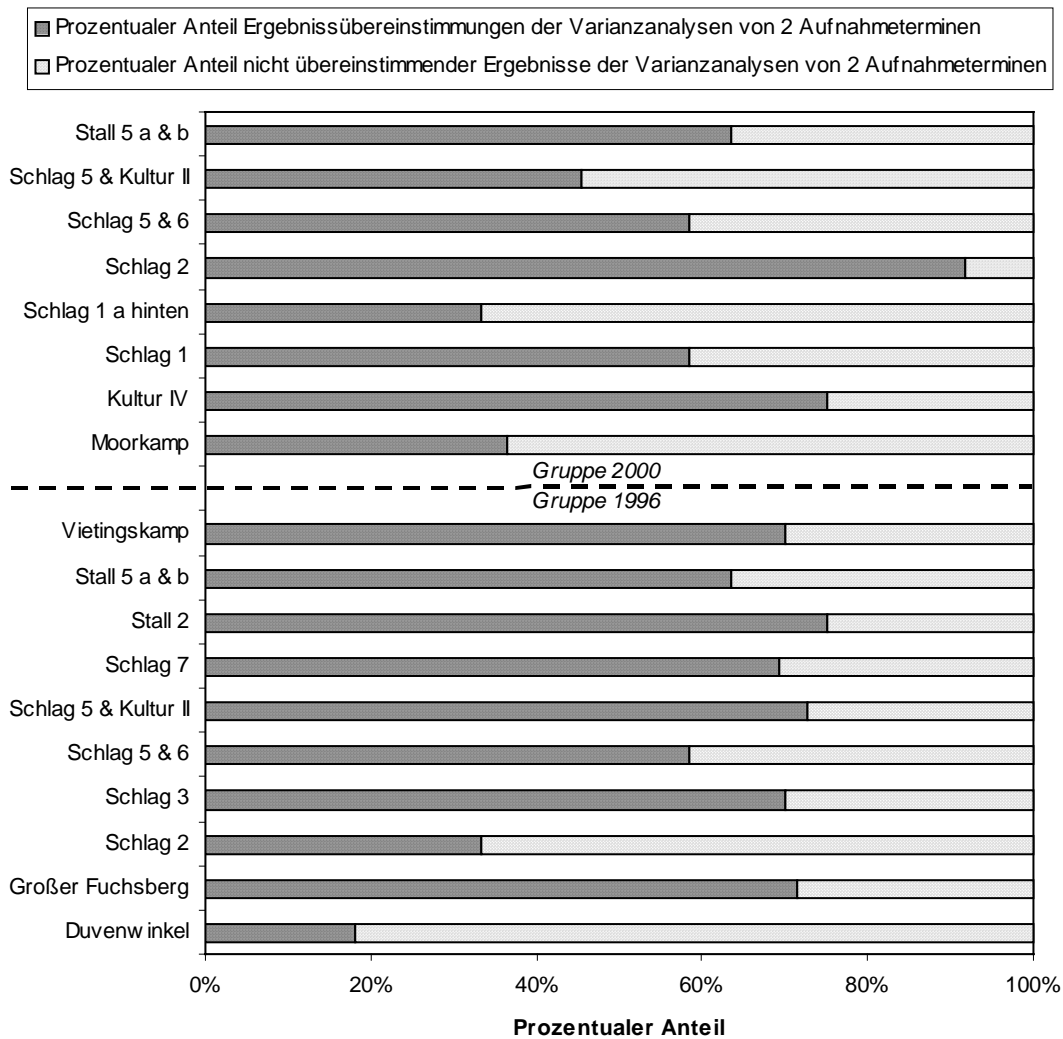


Abb. 3-12: Prozentualer Anteil Übereinstimmungen der Ergebnisse der Varianzanalyse anhand von Bildklassen von zwei Aufnahme Terminen (Gruppe 1996: 07.06.96 und 21.07.96, Gruppe 2000: 10.04.00 und 15.05.00) während einer Vegetationsperiode.

Als zusammenfassendes Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen kann festgestellt werden, dass eine Konstanz der räumlichen Muster spektraler Signaturen im Verlauf einer Vegetationsperiode nicht gegeben ist. Außerdem zeigt sich wie schon in Kapitel 3.2 (Abb. 3-5), dass für näher am Erntetermin gelegene Aufnahmezeitpunkte ein entsprechend höherer Anteil Signifikanzen zu den Ertragsdaten ermittelt werden konnte. Sowie die Problematik der sich ändernden räumlichen Muster der spektralen Signaturen während der Vegetationsperiode.

3.3.3 Vergleich spektraler Signaturen zu Bodenparametern, bestimmt an verschiedenen Terminen

In Kapitel 3.3.3 wird geprüft, ob es mit zunehmender Zeitdifferenz zwischen der Luftbildaufzeichnung und der Probenahme bzw. der Ertragsaufzeichnung zu einer Verschlechterung der signifikanten Beziehungen kommt. Dazu wurde unter anderem die Rasterbeprobung von 1995 für Schlag 3 und Stall 3 im Jahr 1998 und für Schlag 5 + 6 + Kultur II im Jahr 2000 wiederholt und untersucht, ob das gleiche unüberwacht klassifizierte Luftbild von einem Schlag für die gleichen Bodenparameter aus verschiedenen Jahren Übereinstimmungen der signifikanten Unterschiede zwischen den Bildklassen aufwies. Im zweiten Teil dieses Kapitels wird dann untersucht, ob die Zeitspanne zwischen Bildaufzeichnung und Bodenanalyse Einfluss auf die Zusammenhänge zwischen Bildklassen und Bodenparametern ausübt.

In Tabelle 3-5 werden die absoluten Minima und Maxima, das arithmetische Mittel und der Variationskoeffizient für die drei Schläge zu den jeweils zwei Beprobungsterminen gegenübergestellt. Beim Vergleich der Werte ist zu beachten, dass die Beprobungen 1998 und 2000 jeweils direkt nach der Ernte durchgeführt wurden, während die Beprobung von 1995 für Stall 3 zu Vegetationsbeginn im März und für Schlag 3 und Schlag 5 + 6 + Kultur II im Mai stattfanden. Beim Schlag 5 + 6 + Kultur II kommt hinzu, dass es sich im Jahr 2000 um 30 cm tiefe Bodenproben handelte.

Tabelle 3-5 spiegelt nur die Bodenparameter wider, die für beide Beprobungstermine analysiert wurden. Angaben zu den ermittelten Signifikanzen zwischen Luftbildklassen und der Rasterbeprobung 1995 befinden sich im Anhang in Tabelle A2 und A3, für die Rasterbeprobungen von 1998 und 2000 in Tabelle A5.

Die auffälligen Differenzen der arithmetischen Mittel zwischen den Jahren in Tabelle 3-5 sind auf mehrere Ursachen zurückzuführen. Zum einen auf die oben angeführten unterschiedlichen Beprobungszeiten im Jahr, deren Auswirkungen in OBENAUF (1987) beschrieben sind (Kap. 4.1). Außerdem wurde Ende der achtziger Jahre die Düngepraxis der Grundnährstoffe P, K und Mg auf dem Versuchsbetrieb Mariensee geändert. Seit diesem Zeitpunkt findet, anstelle einer jährlichen Grunddüngung, nur noch zu Hackfrüchten und nach Bodenuntersuchungen bei Bedarf auch zu den anderen Kulturen eine Grunddüngung mit mineralischen Düngemitteln statt. Hinzu kommt die Ausbringung von Gülle und Stallmist von ca. 1,1 Gv/ha. Bilanziert man die Nährstoffzufuhr und -abfuhr der Jahre zwischen den Beprobungen kommt man mit Ausnahme der Mg- Gehalte für Schlag 5 + 6 + Kultur II zu einem Defizit, welches durch die unterschiedlichen Probenzeitpunkte noch verstärkt wurde.

Tab. 3-5: Zusammenfassung der Minima, Maxima, arithmetischen Mittel und Variationskoeffizienten der Bodenmerkmale der Schläge Schlag 3, Schlag 5 + 6 + Kultur II und Stall 3 im Vergleich für die Rasterbeprobung von 1995, 1998 und 2000.

Parameter	Schlagbez.	Jahr	Minimum	Maximum	arithm. Mittel	CV %
pH	Schlag 3	1995	4,9	6,0	5,6	3,9
		1998	5,4	6,4	5,7	2,3
	Schlag 5 + 6 + Kultur II	1995	5,9	7,2	6,4	3,1
		2000	5,8	6,6	6,2	2,7
	Stall 3	1995	5,8	6,7	6,2	2,5
		1998	5,9	6,9	6,5	2,9
P (mg kg ⁻¹)	Schlag 3	1995	92,0	308,8	121,9	20,4
		1998	45,9	107,0	75,1	13,8
	Schlag 5 + 6 + Kultur II	1995	81,0	325,3	135,8	29,6
		2000	45,9	185,1	89,3	30,5
	Stall 3	1995	39,2	109,7	67,4	24,8
		1998	29,6	93,2	53,0	26,0
K (mg kg ⁻¹)	Schlag 3	1995	64,6	257,0	96,1	32,9
		1998	22,0	82,0	39,3	21,7
	Schlag 5 + 6 + Kultur II	1995	81,0	473,0	205,8	52,6
		2000	71,4	251,6	142,6	23,8
	Stall 3	1995	112,2	259,4	157,2	17,6
		1998	64,6	219,3	113,6	23,8
Mg (mg kg ⁻¹)	Schlag 3	1995	29,9	67,8	48,8	14,7
		1998	21,1	41,7	33,2	9,6
	Schlag 5 + 6 + Kultur II	1995	23,1	95,8	38,0	28,6
		2000	43,1	132,3	69,0	20,5
	Stall 3	1995	88,5	177,5	130,9	14,8
		1998	41,4	203,8	119,4	33,1

Abbildung 3-13 gibt eine Zusammenfassung der Daten aus Tabelle A5. Es wird das Verhältnis der Gesamtzahl gegenüber der Anzahl Übereinstimmungen für die Bodenparameter (pH, P, K und Mg) sowie für die Ertragsdaten dargestellt. Die Gesamtzahl ergibt sich aus der Anzahl unüberwacht klassifizierter Luftbilder für die Bodenparameter und einem vielfachen, entsprechend der Anzahl Jahre mit Ertragsaufzeichnung, für die Ertragsdaten. Für Schlag 3 lagen von sechs Aufnahmeperioden unüberwacht klassifizierte Luftbilder vor, drei für Schlag 5 + 6 + Kultur II und vier für Stall 3.

Wiederum wurde nur nach Übereinstimmungen zwischen den Analysen der Beprobungstermine gesucht, so dass auch an beiden Terminen nicht signifikante Zusammenhänge zwischen den Bildklassen und den Bodenparametern als Übereinstimmung gewertet wurden.

Wie Abbildung 3-13 zeigt, kam es zu einer Übereinstimmung von 25 % für den pH-Wert von Stall 3 bis zu 100 % für den pH-Wert und den Gehalt an P für Schlag 5 + 6 + Kultur II. Unabhängig von den Bodenparametern wiesen die Erträge für diese drei Schläge ein recht stabiles Verhalten, mit 67 % Übereinstimmungen für Schlag 5 + 6 + Kultur II, 75 % für Schlag 3 und 88 % für Stall 3 auf.

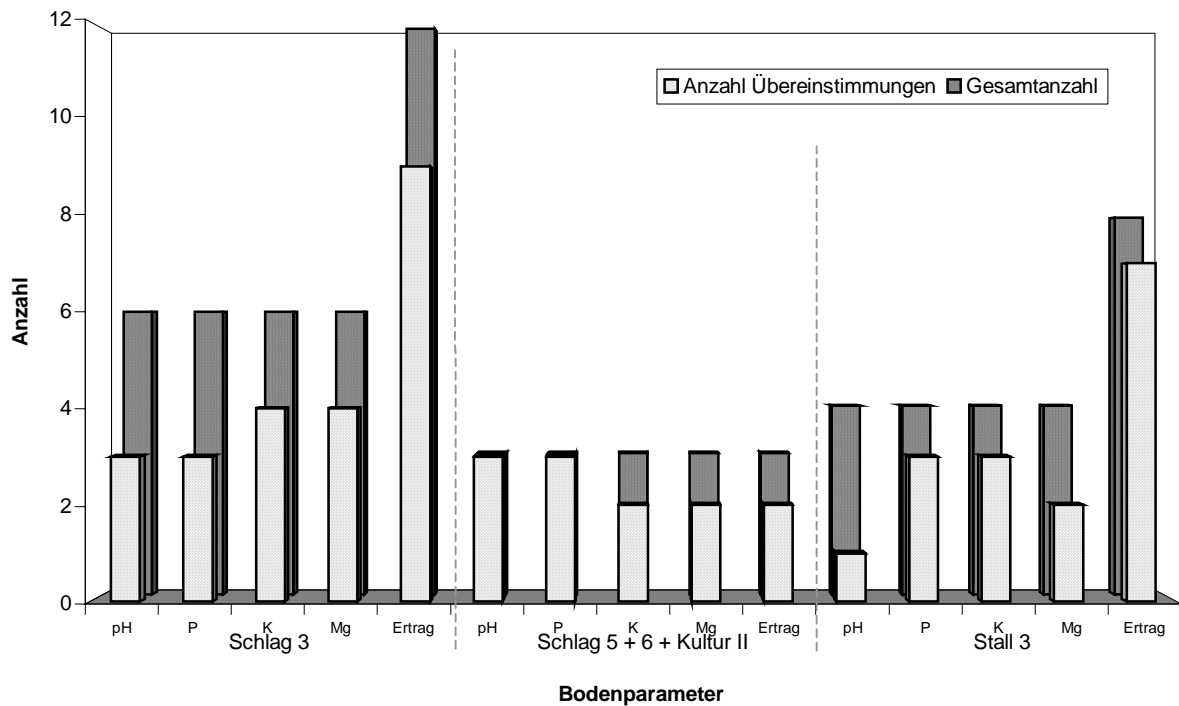


Abb. 3-13: Übereinstimmung der Ergebnisse des F-Test zwischen Bildklassen und Bodenparametern der Rasterbeprobungen 1995 und 1998 bzw. 2000 für Schlag 3, Schlag 5 + 6 + Kultur II und Stall 3.

Wie in Kapitel 3.2.1 schon erwähnt, lagen insgesamt 23 Bodenbilder aus fünf Befliegungen von elf der 17 Versuchsflächen vor. Aufgrund der unterschiedlichen Zeitpunkte (07.06.1996, 25.09.1997, 19.10.1999, 10.04.2000, 15.05.2000) wurde der Boden in verschiedenen Bearbeitungsstadien und Abtrocknungsgraden abgebildet. Trotzdem soll an dieser Stelle geprüft werden, ob sich mit zunehmender zeitlicher Entfernung der Bodenanalyse zur Luftbildaufzeichnung entscheidende Veränderungen in der Anzahl der signifikant für die Bildklassen zu unterscheidenden Bodenmerkmale ergeben.

Bei dieser Untersuchung blieb die maximale Zeitdifferenz von sechs Monaten zwischen den Probenahmen der einzelnen Schläge 1995 unberücksichtigt. Wird jeder Aufnahmezeitpunkt getrennt betrachtet, ergeben sich die in Abbildung 3-14 dargestellten prozentualen Anteile Signifikanzen für den jeweiligen Befliegungstermin. Die Anteile für die Termine 07.06.1996 (63 %), 19.10.1999 (65 %) und 10.04.2000 (67 %) waren annähernd gleich, während für die unüberwacht klassifizierte Bodenbilder vom 25.09.1997 nur 42 % Signifikanzen und vom 15.05.2000 mit 84 % der höchsten Anteil Signifikanzen ermittelt werden konnten.

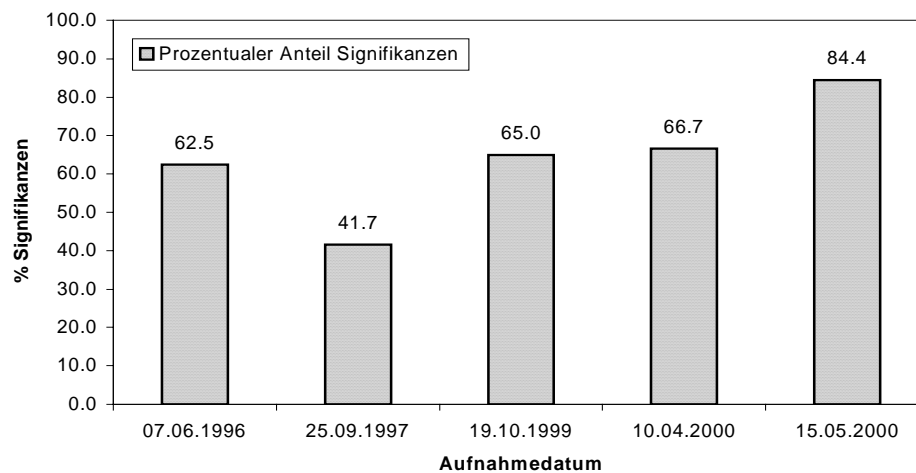


Abb. 3-14: Prozentualer Anteil signifikanter Unterschiede zwischen Bildklassen der Bodenbilder von Mariensee und den Bodenparametern der Rasterbeprobung 1995 in Abhängigkeit vom Aufnahmeterrmin.

Abschließend wird noch ein zeitlicher Vergleich zwischen Bodenbildern und den Bodendaten von zwei Probenahmeterrminen (1995 und 1998) für die Schläge Schlag 3 und Stall 3, von denen jeweils drei Bodenbilder vorlagen, durchgeführt. Beide Schläge wurden 1995 im 30 m Raster und nach der Ernte 1998 im annähernd 30 m Raster beprobt. Der angestrebte Vergleich soll für die bei beiden Beprobungsterminen analysierten Bodenmerkmale pH-Wert, P, K und Mg durchgeführt werden. Tabelle 3-5 am Anfang dieses Kapitels gibt einen deskriptiven Überblick über die Bodenparameter. Für Schlag 3 lag jeweils ein Bodenbild vom 25.09.1997, 10.04.2000 und 15.05.2000 vor, für Stall 3 vom 07.06.1996, 25.09.1997 und 19.10.1999.

In Tabelle 3-6 werden die ermittelten Signifikanzen in Abhängigkeit ihrer zeitlichen Entfernung zur Bodenprobenahme dargestellt. Doppelte Angaben bei Schlag 3 resultieren aus den zwei Aufnahmeterrminen des Jahres 2000.

Wie deutlich zu sehen ist, konnte im betrachteten Zeitraum kein Zusammenhang zwischen den zeitlichen Unterschieden zwischen Bodenprobenahme und Bildaufzeichnung ermittelt werden. So wurde z.B. für Schlag 3 in fünf von acht Fällen ein höherer signifikanter Zusammenhang bei größerer zeitlicher Entfernung festgestellt.

Tab. 3-6: Statistische Sicherheiten (F-Test) für ausgewählte Bodenparameter gemessen in Luftbildklassen für Schlag 3 und Stall 3 in Abhängigkeit ihrer zeitlichen Entfernung in Jahren.

Zeitliche Entfernung zwischen Bildaufzeichnung und Probenahme in Jahren								
-2	-1	Bodenparameter	Jahr der Probenahme	+1	+2	+3	+4	+5
<i>Schlag 3</i>								
-	-	pH	1995	-	n.s.	-	-	n.s./n.s.
-	-	P	1995	-	n.s.	-	-	***/**
-	-	K	1995	-	n.s.	-	-	***/**
-	-	Mg	1995	-	n.s.	-	-	**/**
-	**	pH	1998	-	n.s./*	-	-	-
-	n.s.	P	1998	-	n.s.	-	-	-
-	n.s.	K	1998	-	n.s./**	-	-	-
-	n.s.	Mg	1998	-	**/**	-	-	-
<i>Stall 3</i>								
-	-	pH	1995	n.s.	n.s.	-	*	-
-	-	P	1995	n.s.	n.s.	-	n.s.	-
-	-	K	1995	**	n.s.	-	*	-
-	-	Mg	1995	***	*	-	***	-
***	n.s.	pH	1998	n.s.	-	-	-	-
n.s.	n.s.	P	1998	n.s.	-	-	-	-
n.s.	n.s.	K	1998	***	-	-	-	-
***	n.s.	Mg	1998	***	-	-	-	-

$> 5,0\%$ n.s. = nicht signifikant $\leq 1,0\%$ ** = signifikant
 $\leq 5,0\%$ * = schwach signifikant $\leq 0,1\%$ *** = hoch signifikant

Wie die Untersuchungen dieses Kapitels zeigen, konnte ein negativer Einfluss auf die signifikanten Zusammenhänge zwischen Bildklassen und Bodenparametern mit Zunahme der Zeitdauer zwischen der Aufzeichnung von spektralen Signaturen und der Probenahme nicht nachgewiesen werden. Vielmehr wird deutlich, dass der Aufnahmezeitpunkt im Jahr und die damit verbundenen unterschiedlichen Aufzeichnungsgegenstände einen Einfluss auf die Anzahl signifikanter Zusammenhänge ausübten.

3.3.4 Schlussfolgerung

Sowohl die Variabilität in der Zeit als auch die Variabilität im Raum erwies sich für spektrale Signaturen von Boden- und Bestandesmerkmalen im Datenmaterial dieser Arbeit als relativ hoch. Demnach kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein und dasselbe Merkmal zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort in gleicher Ausprägung wiedergefunden werden kann. Die Ergebnisse bestätigen die Nutzbarkeit von Fernerkundung, um anhand spektraler Signaturen signifikante Unterschiede in Boden- und Bestandesparametern zu identifizieren. Sie lassen aber auch klar erkennen, dass bei fehlenden kausalen und konstanten Beziehungen hieraus keine logischen Schlüsse auf die Ursachen gezogen werden können.

Tabelle 3-7 stellt die Ergebnisse der in Kapitel 3.3 durchgeführten Untersuchungen zur Raum- und Zeitstabilität dar.

Tab. 3-7: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Raum- und Zeitstabilität spektraler Signaturen.

Fragestellung	Material	Ergebnis
Welcher Aufnahmezeitpunkt resultiert in der größten Anzahl signifikanter Zusammenhänge zwischen den Bildklassen und den Boden- und Bestandesparametern für die Kulturart Wintergerste?	Luftbilder von Wintergerste vom 07.06.1996, 21.07.1996, 19.10.1999, 10.04.2000 und 15.05.2000 sowie Bodendaten der Rasterbeprobung von 1995 und Ertragsdaten von 1995-2000.	Spektrale Signaturen einer Kulturart korrelierten entsprechend des Aufnahmezeitpunktes unterschiedlich stark mit Boden- und Bestandesparametern. Größte Anzahl varianzanalytisch gesicherter Unterschiede am 15.05.2000, aber keine überdurchschnittlich häufig auftretenden Signifikanzen.
Wie verhalten sich räumliche Muster spektraler Signaturen im Vegetationsverlauf innerhalb eines Schläges?	Zwei bis drei Luftbilder während einer Vegetationsperiode. Vergleich der mittels F-Test berechneten Signifikanzen zwischen Bildklassen und Boden- und Bestandesparametern eines jeden Schläges auf Konstanz.	Eine Konstanz der Muster spektraler Signaturen im Verlauf einer Vegetationsperiode war nicht gegeben.
Werden für ein räumliches Muster spektraler Signaturen gleiche Korrelationen zu Daten von Rasterbeprobungen aus verschiedenen Jahren gefunden?	Vergleich der Signifikanzen zwischen Luftbildklassen und Daten der Rasterbeprobung 1995 sowie einer Wiederholung 1998 bzw. 2000 und den Ertragsdaten.	Nach drei bzw. fünf Jahren deutlich veränderte Bodenparameter. Übereinstimmung der Signifikanzen zwischen 25 % und 100 %. Eine signifikante Konstanz zwischen Bodenparametern und Klassen der spektralen Signaturen wurde nicht ermittelt.
Ändert sich mit größerer Zeitdifferenz zwischen Luftaufnahmen des Bodens und Bodenprobenahmen die Anzahl signifikanter Zusammenhänge?	<p>a) Alle Bodenbilder (1996-2000) chronologisch geordnet und Anzahl signifikanter Zusammenhänge zu Bodenparametern ermittelt.</p> <p>b) Je drei Bodenbilder von zwei Schlägen und signifikante Zusammenhänge zu Bodenparametern in Abhängigkeit zur Entfernung in Jahren zur Luftaufnahme.</p>	<p>a) Im Betrachtungszeitraum ließ sich keine Abnahme der Signifikanzen mit Zunahme der Zeitdifferenz feststellen.</p> <p>b) Zeitdifferenz zwischen Luftaufnahme und Beprobung ließ im Beobachtungszeitraum für die ermittelten Signifikanzen keine Tendenz erkennen.</p>

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass zwar stets signifikante Beziehungen zwischen spektralen Signaturen und Boden- und Bestandesparametern ermittelt wurden, jedoch keine regelmäßigen und wiederkehrenden Zusammenhänge erkennbar waren. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass aus einem Luftbild immer Bildklassen extrahiert werden können, die mit Boden- und Bestandesparametern signifikant korrelieren.

3.4 Fallstudie zur Ableitung von Monitorpedozellen

In diesem Kapitel wird die Ableitung von MPZ anhand von Luftbildern und Ertragsdaten untersucht. Monitorpedozellen stehen repräsentativ für Probenahmepunkte innerhalb verschiedener Equifertilen, die zeitliche Veränderungen widerspiegeln. MPZ sind somit ein Mittel um den Aufwand zur Aktualisierung von Bodenfruchtbarkeitskarten zu begrenzen. Es wurden zwei Ansätze zu Gewinnung von MPZ angewendet. Erstens die Identifizierung von MPZ unter Verwendung von unüberwacht klassifizierten Luftbildern (Kap. 3.4.1) und zum Vergleich dazu deren Auswahl anhand von Ertragskarten (Kap. 3.4.2). In einem ersten Schritt wurde mit Hilfe der unüberwacht klassifizierten Luftbilder bzw. ‚klassifizierten‘ Ertragskarten auf Basis langjähriger Mittelwerte Probenahmepunkte festgelegt. Mit regelmäßigen Wiederholungen der Probenahmen über mehrere Jahre wurde geprüft, welche MPZ konsistent waren und zielgerichtet ausgewählt die räumliche Variabilität erfassen.

Während relative Ertragskarten quantitative Aussagen vermitteln, spiegeln die verschiedenen Bildklassen nur ein unterschiedliches Reflexionsverhalten ohne Wertung wider. So wurden für jede Bildklasse drei bis fünf MPZ definiert (Kap. 2.5.2). Im Falle der relativen Ertragskarten wurden die MPZ über die gesamte Spannweite der Relativerträge mit jeweils drei bis 15 Proben pro Klasse verteilt (Kap. 2.5.3).

Die Ergebnisse eines dritten Ansatzes zur Ableitung von MPZ unter Nutzung eines DGM werden vergleichend zum Abschluss des Kapitels vorgestellt (Kap. 3.4.3).

3.4.1 Ableitung von Monitorpedozellen anhand unüberwacht klassifizierter Luftbilder

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob sich die mit Hilfe von Luftbildern festgelegten MPZ hinsichtlich der untersuchten Boden- und Bestandesparameter unterscheiden. Auf drei Schlägen (Moorkamp, Schlag 2, Schlag 7) des Versuchsbetriebes Mariensee wurden MPZ anhand von unüberwacht klassifizierten Luftbildern ausgewählt. Der Entscheidungsprozess, welches der vorhandenen Luftbilder bei der Auswahl der MPZ zu Grunde gelegt wurde, wurde in Kapitel 2.5.2 beschrieben worden. Es wurde bewusst darauf verzichtet, Vorwissen aus den Rasterbeprobungen einzusetzen, um ein möglichst unbeeinflusstes und reproduzierbares

Verfahren zu verwenden. Eine genaue Auflistung über Art der Probe, Probenahmetermin und analysierte Parameter befindet sich in Kapitel 2.5.2, Tabelle 2-5.

Außerdem wurden die 1999 mittels einer relativen Ertragskarte ausgewählten 33 MPZ für den Schlag Gr. Fuchsberg, anhand eines unüberwacht klassifizierten Luftbildes und der Beständigkeit der Punkte in Bezug auf ihre Zugehörigkeit zu den Ertragsklassen über mehrere Jahre, für das Jahr 2000 auf 16 MPZ reduziert. Dieser Sonderfall wird in Kapitel 3.4.2 beschrieben.

Die Festlegung der MPZ für den Schlag Moorkamp erfolgte anhand des unüberwacht klassifizierten Bodenbildes vom 25.09.1997. Insgesamt wurden 17 MPZ definiert, die sich auf vier Bildklassen verteilten. Abb. 3-15 zeigt das klassifizierte Luftbild mit den Probenahmepositionen.

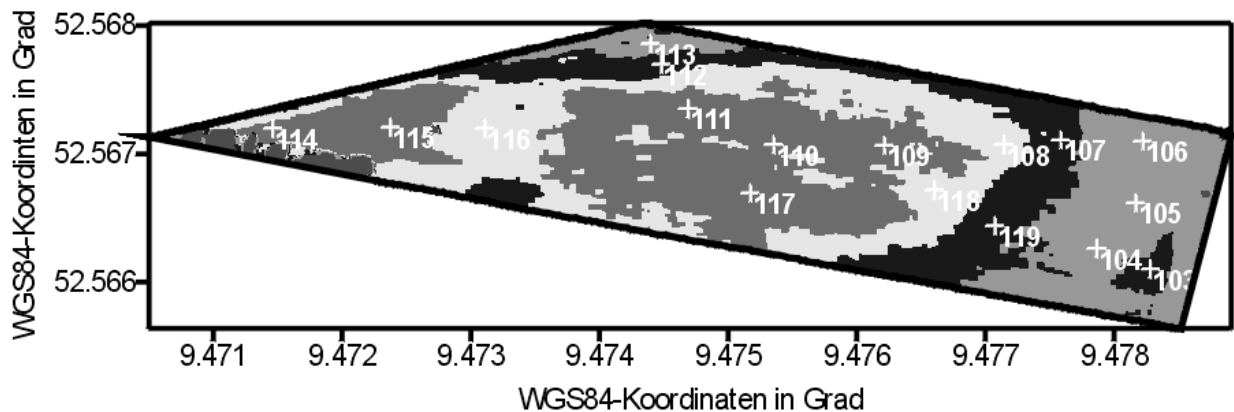


Abb. 3-15: Unüberwacht klassifiziertes Luftbild des Schlages Moorkamp vom 25.09.1997 mit 17 festgelegten Monitorpedozellen.

Die 17 MPZ wurden am 10.08.1999, 02.03.2000, 17.04.2000 und zur Ernte am 26.06.2000 (Pflanzen) bzw. 05.07.2000 (Boden) beprobt.

Tabelle A6 im Anhang beinhaltet eine Zusammenstellung der analysierten Boden- und Pflanzenmerkmale aller Beprobungstermine. So ergaben die Untersuchungen aller Bodenparameter Variationskoeffizienten zwischen 3 % für die pH-Werte vom 17.04.2000 und 05.07.2000 und 80 % für die N_{\min} -Werte vom 05.07.2000 nach der Ernte. Bei den Pflanzenproben wies das Stroh der Wintergerste sowohl den niedrigsten als auch den höchsten Variationskoeffizient mit 2 % für die P-Gehalte und mit 29 % für die Cl-Gehalte auf. Wobei Cl die größte Spannweite der Variationskoeffizienten mit 11 % bis 29 % aufwies. Die Variationskoeffizienten für das Korn lagen regelmäßig geringer als für das Stroh und für die Wintergerste zu Beginn des Schossens.

Die maximalen Variationskoeffizienten lagen damit für die Pflanzenparameter deutlich niedriger als für die Bodenparameter.

Tabelle 3-8 gibt eine vollständige Auflistung aller Signifikanzen zwischen den Bildklassen der unüberwacht klassifizierten Luftbilder und den Boden- und Pflanzenparametern.

Tab. 3-8: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter gemessen in nach dem Luftbild vom 25.09.1997 festgelegten Monitorpezellen für den Schlag Moorkamp.

Datum der Probenahme	Probenart	Parameter	Datum der Luftbildaufnahme					
			07.06.96	21.07.96	25.09.97	19.10.99	10.04.00	15.05.00
10.08.99	Boden	OS	*	*	*	*	n.s.	n.s.
10.08.99	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	*
10.08.99	Boden	N _{min}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
10.08.99	Boden	N _{ges}	n.s.	*	*	*	n.s.	n.s.
10.08.99	Boden	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
10.08.99	Boden	K	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
10.08.99	Boden	Mg	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
02.03.00	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.
02.03.00	Boden	N _{min}	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
02.03.00	Boden	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
02.03.00	Boden	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
02.03.00	Boden	Mg	*	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
17.04.00	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
17.04.00	Boden	N _{min}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
17.04.00	Boden	N _{ges}	n.s.	**	*	n.s.	n.s.	n.s.
17.04.00	Boden	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
17.04.00	Boden	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
17.04.00	Boden	Mg	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
17.04.00	WG-Schoss	N	*	n.s.	n.s.	*	***	n.s.
17.04.00	WG-Schoss	P	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
17.04.00	WG-Schoss	S	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	***	n.s.
17.04.00	WG-Schoss	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
17.04.00	WG-Schoss	Ca	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.
17.04.00	WG-Schoss	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	*	*	*
17.04.00	WG-Schoss	Cl	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	***	n.s.
26.06.00	WG-Korn	N	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Korn	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	***
26.06.00	WG-Korn	S	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Korn	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Korn	Ca	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	*
26.06.00	WG-Korn	Mg	*	n.s.	n.s.	*	n.s.	*
26.06.00	WG-Korn	Cl	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	N	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	S	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	Ca	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	Mg	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	Cl	**	n.s.	**	*	n.s.	n.s.
05.07.00	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
05.07.00	Boden	N _{min}	*	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
05.07.00	Boden	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
05.07.00	Boden	K	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
05.07.00	Boden	Mg	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
1997	Hafer	Ertrag	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
1998	WG	Ertrag	**	n.s.	**	***	n.s.	n.s.
2000	WG	Ertrag	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*

> 5,0% n.s. = nicht signifikant ≤ 1,0% ** = signifikant
 ≤ 5,0% * = schwach signifikant ≤ 0,1% *** = hoch signifikant

Es werden nicht nur die Signifikanzen für das ursprünglich zur Ableitung der MPZ genutzte Luftbild (25.09.1997) dargestellt, sondern auch für alle zu anderen Terminen aufgezeichneten Luftbildern. Besonderes Interesse gilt dabei den Aufnahmen, die etwa zum Zeitpunkt der Probenahmen angefertigt wurden.

Vergleicht man die absolute Anzahl signifikanter Unterschiede zwischen den Bildklassen und den Boden- und Pflanzenparametern, so fällt auf, dass die Aufnahme vom 25.09.1997 und 19.10.1999 jeweils sieben Signifikanzen aufwies. Demgegenüber konnten neun mal Signifikanzen für den 10.04.2000, zehn mal für den 15.05.2000, zwölf mal für den 07.06.1996 und 13 mal für den 21.07.1996 ermittelt werden. Es wurden elf der 13 signifikanten Unterschiede zwischen den Bildklassen des Bildes vom 21.07.1996 für Bodenparametern berechnet, wovon wiederum zu allen vier Beprobungsterminen ein signifikanter Klassenunterschied zum Mg vorlag.

Für die Aufnahmen der Wintergerste am 19.10.1999, 10.04.2000 und 15.05.2000 wurde ein Großteil der Signifikanzen in Bezug auf die Pflanzenparameter gefunden. Besonders auffällig ist, dass für alle drei Bildklassifizierungen eine Signifikanz zu den Mg-Gehalten der Wintergerste zu Schossen und für zwei der Bilder (19.10.1999 und 15.05.2000) zum Wintergerste Korn beobachtet werden konnte. Vergleicht man die Mg-Gehalte zum Schossen (Tab. A6), von 0,6 ‰ bis 1,1 ‰ mit einem Mittelwert von 0,8 ‰, mit den von FINCK (1991) publizierten Werten (< 1,0 ‰) für das Auftreten von Mangelsymptomen, so kann vermutet werden, dass die Mg-Mangelsymptome auf den Bildern der Vegetationsperiode 1999/2000 zumindest ein reflexionsbeeinflussender Faktor waren. Alle anderen untersuchten Pflanzenparameter lagen im optimalen Versorgungsbereich. Es war aber nicht auszuschließen, dass weitere Beeinflussungen der spektralen Signaturen durch z.B. Trockenstress oder Pflanzenkrankheiten aufgezeichnet wurden. Vergleicht man nun die Mg-Gehalte des Bodens mit einem arithmetischen Mittel von etwa 42 mg Mg kg⁻¹, mit denen von der Landwirtschaftskammer Hannover (ANONYM, 1998) publizierten Werten, fällt auf, dass ein Großteil des Schlages in der Versorgungsstufe B lag.

Die Festlegung der zwölf MPZ für Schlag 2 erfolgte nach dem unüberwacht klassifizierten Vegetationsbild vom 07.06.1996 (Winterweizen), die 15 MPZ für Schlag 7 nach dem vom 21.07.1996 (Wintergerste). Beide Schläge wurden zu Vegetationsbeginn, Schossen und zur Ernte 2000 beprobt, wobei auf Schlag 2 zum Schossen nur Pflanzenproben genommen wurden. Abb. 3-16 und 3-17 zeigen die Lage der MPZ auf Schlag 2 und Schlag 7.

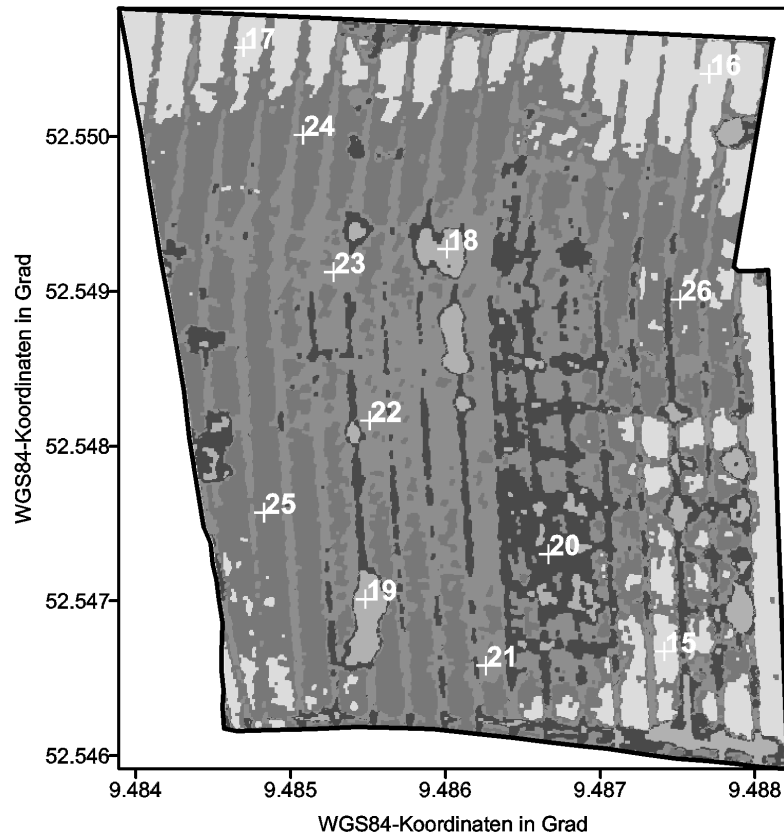


Abb. 3-16: Unüberwacht klassifiziertes Luftbild des Feldes Schlag 2 vom 07.06.1996 mit zwölf festgelegten Monitorpedozellen.

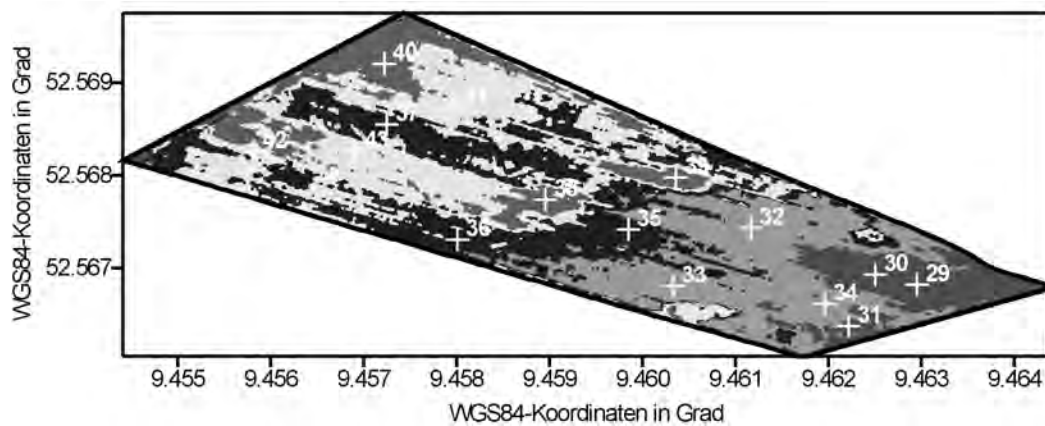


Abb. 3-17: Unüberwacht klassifiziertes Luftbild des Feldes Schlag 7 vom 21.07.1996 mit 15 festgelegten Monitorpedozellen.

Tabelle A7 im Anhang listet die absoluten Maxima und Minima, die arithmetischen Mittel und die Variationskoeffizienten der untersuchten Boden- und Pflanzenparameter für Schlag 2 auf. Bei den Bodenparametern lag für Schlag 2 der Variationskoeffizient der N_{\min} -Werte mit 30 % am 27.03.2000 und 50 % am 10.07.2000 am höchsten. Für die Pflanzenparameter (Wintergerste) ließ sich die Beobachtung vom Moorkamp, dass die Korngelalte die geringsten

Variationskoeffizienten aufwiesen, nicht bestätigen. So lagen die Variationskoeffizienten für alle Parameter, bis auf Cl, zum Zeitpunkt des Schossens am niedrigsten, wohingegen für die Pflanzenparameter im Stroh die höchsten Variationskoeffizienten ermittelt wurden. Wie beim Schlag Moorkamp wiesen die Bodenparameter höhere Variationskoeffizienten auf als die Pflanzenparameter.

In Tabelle 3-9 wird eine vollständige Auflistung aller Signifikanzen zwischen den Bildklassen der unüberwacht klassifizierten Luftbilder und den Boden- und Pflanzenparametern gegeben.

Tab. 3-9: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter gemessen in nach dem Luftbild vom 07.06.1996 festgelegten Monitorpedozellen für den Schlag 2.

Datum der Probenahme	Probenart	Parameter	Datum der Luftbildaufnahme				
			07.06.96	21.07.96	19.10.99	10.04.00	15.05.00
27.03.00	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
27.03.00	Boden	N _{min}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
27.03.00	Boden	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
27.03.00	Boden	K	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
27.03.00	Boden	Mg	n.s.	**	**	*	n.s.
26.04.00	WG-Schoss	N	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.04.00	WG-Schoss	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.04.00	WG-Schoss	S	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
26.04.00	WG-Schoss	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.04.00	WG-Schoss	Ca	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**
26.04.00	WG-Schoss	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.04.00	WG-Schoss	Cl	n.s.	*	**	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Korn	N	n.s.	n.s.	n.s.	**	**
26.06.00	WG-Korn	P	n.s.	n.s.	n.s.	**	**
26.06.00	WG-Korn	S	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.
26.06.00	WG-Korn	K	n.s.	n.s.	n.s.	*	*
26.06.00	WG-Korn	Ca	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Korn	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
26.06.00	WG-Korn	Cl	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	N	n.s.	n.s.	n.s.	*	*
26.06.00	WG-Stroh	P	n.s.	n.s.	n.s.	*	**
26.06.00	WG-Stroh	S	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	K	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	Ca	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	***	**
26.06.00	WG-Stroh	Cl	n.s.	*	*	*	n.s.
10.07.00	Boden	OS	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
10.07.00	Boden	pH	n.s.	*	*	n.s.	n.s.
10.07.00	Boden	N _{min}	n.s.	n.s.	n.s.	*	**
10.07.00	Boden	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
10.07.00	Boden	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
10.07.00	Boden	Mg	n.s.	*	**	n.s.	n.s.
1996	WW	Ertrag	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
1997	WG	Ertrag	n.s.	n.s.	n.s.	**	*
1999	WW	Ertrag	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2000	WG	Ertrag	n.s.	n.s.	n.s.	**	*

> 5,0% n.s.

= nicht signifikant

≤ 1,0% **

= signifikant

≤ 5,0% *

= schwach signifikant

≤ 0,1% ***

= hoch signifikant

Besonders auffällig bei Schlag 2 ist die Tatsache, dass zwischen den Bildklassen vom 07.06.1996 und allen untersuchten Parametern keine signifikanten Unterschiede ermittelt

werden konnten. Demgegenüber wiesen die Bildklassen vom 10.04.2000 mit zwölf und vom 15.05.2000 mit 13 Signifikanzen die höchsten Anzahl auf. Ähnlich wie beim Schlag Moorkamp konnten besonders für die Pflanzenparameter signifikante Unterschiede zwischen den Klassen ermittelt werden. So zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den Bildklassen für N und P sowohl im Korn, als auch im Stroh, für beide oben genannten Bilder und für Mg sowohl im Korn, als auch im Stroh für die Klassen des Bildes vom 15.05.2000 und im Stroh für die Bildklassen vom 10.04.2000.

Die absoluten Minima und Maxima, die arithmetischen Mittel und Variationskoeffizienten der Ergebnisse der MPZ-Beprobungen auf Schlag 7 während des Jahres 2000 werden in Tabelle A8 wiedergegeben. 15 MPZ wurden für den 2000 mit Hafer bestellten Schlag definiert und während der Vegetationsperiode beprobt. Vergleicht man die Variationskoeffizienten der drei Bodenprobenahmen, so fällt auf, dass die CV für die P-Gehalte im Boden mit 34 %, 36 % und 55 % am höchsten lagen. Der niedrigste CV wurde mit einem Prozent für den pH-Wert des Bodens ermittelt. Die Differenzen zwischen den absoluten Minima und Maxima eines jeden Parameters und Beprobungstermins wiesen, mit Ausnahme der N_{\min} -Gehalte, keine größeren Schwankungen zwischen den einzelnen Terminen auf. Bei den Pflanzenparametern wurden wiederum die Variationskoeffizienten des Korns als niedrigste ermittelt, während die analysierten Parameter des Strohs, mit Ausnahme des Ca-Gehaltes, die höchsten Variationskoeffizienten aufwiesen.

In Tabelle 3-10 werden die signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Parametern und den Bildklassen aufgezeigt. Besonders auffällig ist die hohe Anzahl Signifikanzen (19) für die Bildklassen des Bildes vom 21.07.1996, welche zur Festlegung der MPZ benutzt wurden.

Betrachtet man die Signifikanzen zu den Bildern vom 10.04.2000 und 15.05.2000 und vergleicht diese mit den Signifikanzen des Bildes vom 21.07.1996, fällt auf, dass der Gehalt an organischer Substanz zu den Klassen aller drei Bilder signifikante Unterschiede aufweist. Ebenso verhält es sich mit dem Gehalt an Mg im Boden zum Schossen, während der Mg-Gehalt zum Vegetationsbeginn und zur Ernte nur zu den Klassen der Bilder vom 21.07.1996 und 15.05.2000 Signifikanzen aufweist. Im Gegensatz zu den MPZ vom Moorkamp und Schlag 2 werden mit einer Ausnahme keine Signifikanzen zu den analysierten Pflanzenparametern ermittelt. Allerdings liegen auch alle Pflanzenparameter oberhalb der Konzentrationen für Mangelsymptome.

Tab. 3-10: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter gemessen in nach dem Luftbild vom 21.07.1996 festgelegten Monitorpedozellen für Schlag 7.

Datum der Probenahme	Probenart	Parameter	Datum der Luftbildaufnahme				
			07.06.96	21.07.96	13.07.98	10.04.00	15.05.00
23.02.00	Boden	pH	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
23.02.00	Boden	N _{min}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
23.02.00	Boden	P	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
23.02.00	Boden	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
23.02.00	Boden	Mg	n.s.	**	n.s.	n.s.	*
15.05.00	Boden	OS	n.s.	*	n.s.	*	**
15.05.00	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**
15.05.00	Boden	N _{min}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
15.05.00	Boden	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
15.05.00	Boden	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
15.05.00	Boden	Mg	n.s.	*	n.s.	**	*
15.05.00	Hafer-Schoss	N	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
15.05.00	Hafer-Schoss	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
15.05.00	Hafer-Schoss	S	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.
15.05.00	Hafer-Schoss	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
15.05.00	Hafer-Schoss	Ca	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
15.05.00	Hafer-Schoss	Mg	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
15.05.00	Hafer-Schoss	Cl	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Korn	N	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Korn	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Korn	S	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Korn	K	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Korn	Ca	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Korn	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Korn	Cl	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Stroh	N	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Stroh	P	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Stroh	S	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Stroh	K	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Stroh	Ca	n.s.	*	n.s.	**	n.s.
04.08.00	Hafer-Stroh	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
04.08.00	Hafer-Stroh	Cl	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
07.08.00	Boden	OS	n.s.	**	n.s.	*	**
07.08.00	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
07.08.00	Boden	N _{min}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
07.08.00	Boden	P	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.
07.08.00	Boden	K	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
07.08.00	Boden	Mg	n.s.	*	n.s.	n.s.	*
1999	WG	Ertrag	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
2000	Hafer	Ertrag	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.

> 5,0% n.s.

≤ 5,0% *

= nicht signifikant

= schwach signifikant

≤ 1,0% **

≤ 0,1% ***

= signifikant

= hoch signifikant

Zusammenfassend zeigte sich bei den durchgeführten Versuchen, dass sich MPZ, abgeleitet aus unüberwacht klassifizierten Luftbildern eignen, Variabilität von Boden- und Pflanzenparametern in großen Spannweiten zu erfassen (Tab. A6, A7 und A8). Allerdings wurde durch die Signifikanzanalyse (Tab. 3-8, 3-9 und 3-10) deutlich, dass die meisten signifikanten Zusammenhänge nicht zwangsläufig mit dem zur Auswahl der MPZ verwendeten Luftbild ermittelt wurden, sondern häufig eine höhere Anzahl Signifikanzen zu anderen klassifizierten Bildern vorlagen. Somit zeigte sich, dass die Ableitung von Equifertilen aus den klassifizierten Luftbildern nicht möglich ist, bzw. nur dann möglich sein wird, wenn sich ein

untersuchter Parameter als reflexions- und ertragsbeeinflussend erweist, für den dann Bearbeitungszonen anhand des klassifizierten Luftbildes festgelegt werden können.

3.4.2 *Ableitung von Monitorpedozellen anhand relativer Ertragskarten*

Die Ableitung von MPZ anhand relativer Ertragskarten wird in diesem Kapitel an drei Beispielschlägen erläutert und weiterhin untersucht, ob sich die MPZ hinsichtlich der erhobenen Boden- und Bestandesparameter unterscheiden. Von den sieben möglichen Schlägen wurden Schlag 2 und Schlag 7 ausgewählt, um einen Vergleich zur Methode der Ableitung nach Fernerkundungsdaten zu ermöglichen. Als dritter Schlag soll der Sonderfall Gr. Fuchsberg dargestellt werden, für den zur Zuckerrübenenernte 1999 33 MPZ nach Ertragskarten definiert wurden, die dann für 2000 auf 16 MPZ unter Nutzung des unüberwacht klassifizierten Luftbildes vom 07.06.1996 und der Analysendaten von 1999 reduziert wurden. Die Bearbeitung der Roherträge sowie die Erzeugung von relativen Ertragskarten wurden in Kapitel 2.4 und 2.5.3 beschrieben. Genaue Angaben über Probenahmetermin, Art der Probenahme und die analysierten Parameter befinden sich in Tabelle 2-6 und 2-7 in Kapitel 2.5.2 und 2.5.3.

Zur Ableitung der 14 MPZ für Schlag 2 wurde von drei verfügbaren Ertragskarten (1996 WW, 1997 WG und 1999 WW) jeweils eine relative Ertragskarte erstellt und dann das Mittel dieser drei Karten gebildet. Abbildung 3-18 zeigt die mittlere relative Ertragskarte über die Jahre 1996, 1997 und 1999 sowie die 14 MPZ. Aufgrund der Ertragsstruktur wurden drei MPZ in den Bereich 60-80 %, drei in 80-100 %, fünf in 100-110 % und drei in 110-120 % relativen Ertrag plaziert.

Nach der Ernte des Winterweizens im August 1999 wurden Bodenproben an den Stellen der 14 MPZ gezogen. Im April 2000 wurden Pflanzenproben und zur Ernte Boden- und Pflanzenproben genommen. Tabelle A9 im Anhang gibt einen deskriptiven Überblick über die untersuchten Boden- und Pflanzenmerkmale.

Die Variationskoeffizienten der Bodenparameter nach den Ernten 1999 und 2000 wiesen bis auf die K-Gehalte nur geringfügige Differenzen zwischen den Jahren von maximal vier Prozent auf. Für die K-Gehalte wurde 1999 ein CV von 23 % ermittelt und für 2000 ein CV von zwölf Prozent. Vergleicht man die absoluten Differenzen zwischen Minima und Maxima zu den beiden Beprobungsterminen, so ergibt sich auch dabei der größte Unterschied für die K-Gehalte, die 1999 eine Spannweite von 96 mg K kg^{-1} und 2000 von 50 mg K kg^{-1} betrug.

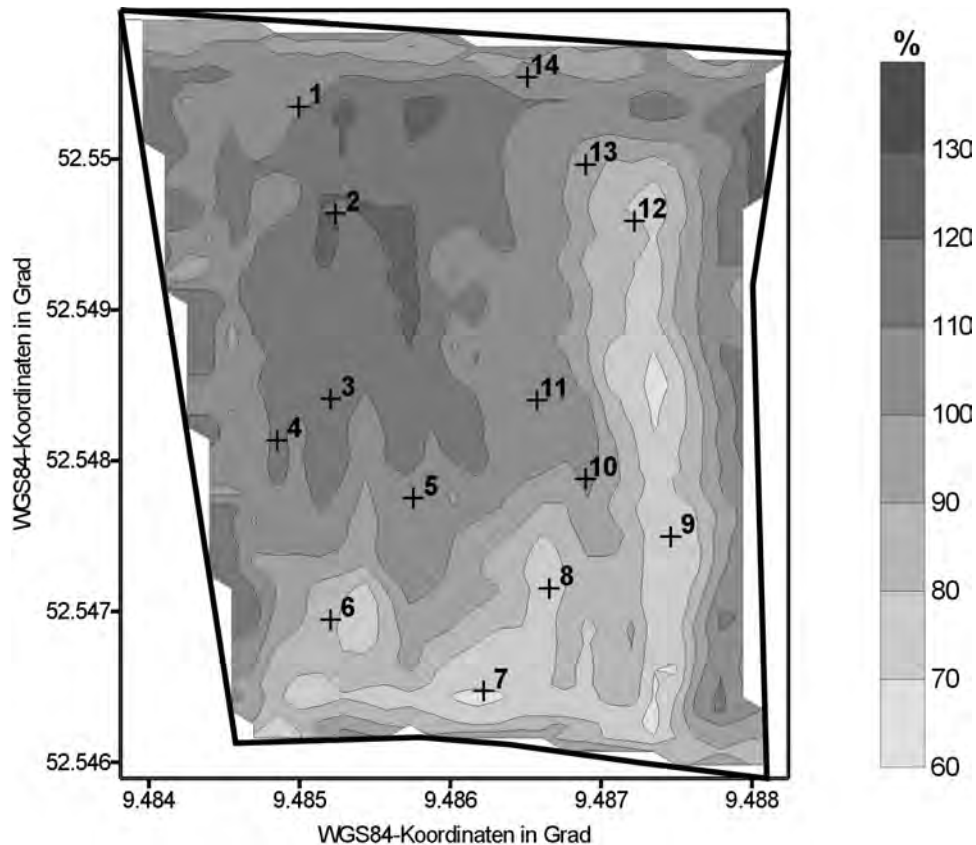


Abb. 3-18: Monitorpedozellen von Schlag 2 ausgewählt anhand relativer Ertragsdaten von drei Jahren (1996, 1997 und 1999).

Bei den Pflanzenparametern wiesen die Strohgehalte die höchsten Variationskoeffizienten (6 % (P) - 28 % (CI)) auf, während mit Ausnahme der P- und CI-Gehalte die Variationskoeffizienten zum Zeitpunkt des Schossens am niedrigsten lagen, mit einer Spannweite von drei Prozent für P bis zu 14 % für CI. Die P- und CI-Gehalte wiesen die niedrigsten Variationskoeffizienten im Korn auf (3 % (P) und 6 % (CI)).

Tabelle 3-11 beinhaltet alle Angaben über signifikante Unterschiede zwischen den Boden- und Pflanzenparametern und den relativen Ertragsklassen. Zum einen wurden die Signifikanzen zu den Ertragsklassen der gemittelten relativen Ertragskarte von 1996, 1997 und 1999 berechnet, zum anderen für die relativen Ertragskarten eines jeden Jahres.

Bei Betrachtung der absoluten Anzahl signifikanter Unterschiede zwischen den relativen Ertragsklassen fällt auf, dass für das Beprobungsjahr 2000 mit fünf Signifikanzen zu der relativen Ertragskarte des Jahres 2000 die geringste Anzahl ermittelt wurde, während 1997 und 1999 zehn Signifikanzen und 1996 elf Signifikanzen berechnet wurden. Für die zur Ableitung der MPZ verwendeten gemittelten relativen Ertragsklassen konnten neun Signifikanzen ermittelt werden. Ebenso wie bei den MPZ nach unüberwacht klassifizierten Luftbildern

konnte ein Großteil der signifikanten Unterschiede für die Pflanzenparameter bestimmt werden, wobei die Korn- und Strohgehalte den höchsten Anteil aufwiesen. Die N-Gehalte des Korns und die Cl-Gehalte des Strohs unterschieden sich in allen Jahren für alle relativen Ertragsklassen signifikant.

Tab. 3-11: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter gemessen in nach relativen Ertragsklassen festgelegten Monitorpedozellen für Schlag 2.

Datum der Probenahme	Probenart	Parameter	Jahre der Relativerträge				
			96/97/99	1996	1997	1999	2000
09.08.99	Boden	OS	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
09.08.99	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
09.08.99	Boden	N _{ges}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
09.08.99	Boden	P	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
09.08.99	Boden	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
09.08.99	Boden	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.04.00	WG-Schoss	N	n.s.	*	**	n.s.	n.s.
26.04.00	WG-Schoss	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.04.00	WG-Schoss	S	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.04.00	WG-Schoss	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.04.00	WG-Schoss	Ca	***	n.s.	*	n.s.	n.s.
26.04.00	WG-Schoss	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.04.00	WG-Schoss	Cl	*	*	n.s.	*	n.s.
26.06.00	WG-Korn	N	***	**	**	***	*
26.06.00	WG-Korn	P	n.s.	*	*	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Korn	S	*	*	n.s.	*	n.s.
26.06.00	WG-Korn	K	n.s.	**	*	n.s.	*
26.06.00	WG-Korn	Ca	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Korn	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Korn	Cl	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	N	*	n.s.	n.s.	*	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	P	**	*	*	***	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	S	n.s.	*	n.s.	n.s.	*
26.06.00	WG-Stroh	K	*	n.s.	n.s.	**	*
26.06.00	WG-Stroh	Ca	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	Mg	***	n.s.	**	***	n.s.
26.06.00	WG-Stroh	Cl	*	**	*	*	***
07.07.00	Boden	OS	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
07.07.00	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.
07.07.00	Boden	P	n.s.	*	*	*	n.s.
07.07.00	Boden	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
07.07.00	Boden	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

> 5,0% n.s. = nicht signifikant ≤ 1,0% ** = signifikant
 ≤ 5,0% * = schwach signifikant ≤ 0,1% *** = hoch signifikant

Für die Bodenparameter konnten keine signifikanten Zusammenhänge zu den gemittelten relativen Ertragsklassen (1996, 1997 und 1999) gefunden werden. Zwei der untersuchten Parameter (N und P) wiesen aber signifikante Unterschiede zwischen den Ertragsklassen einiger Einzeljahre auf, allerdings nicht zu den Ertragsklassen des Jahres 2000.

Da für Schlag 7 nach der Ernte 1999 nur eine Ertragskarte (Wintergerste) vorlag, wurden in diesem Fall die MPZ anhand dieser einjährigen relativen Erträge definiert. 28 MPZ wurden nach der Ernte 1999, zum Schossen und nach der Ernte 2000 beprobt.

Abbildung 3-19 zeigt die 28 MPZ auf der relativen Ertragskarte des Jahres 1999. Bei Klassengrößen von 20 % relativem Ertrag fielen die MPZ für die Ertragskarte der Wintergerste 1999 in nur drei Klassen. Drei MPZ lagen zwischen 60-80 %, 15 zwischen 80-100 % und zehn zwischen 100-120 %. Bei den Hafererträgen 2000 umfassten die MPZ die gesamte Klassenanzahl. So entfielen sechs MPZ auf den Bereich < 60 %, fünf auf 60-80 %, neun auf 80-100 %, fünf auf 100-120 % und drei auf > 120 % relativ Ertrag.

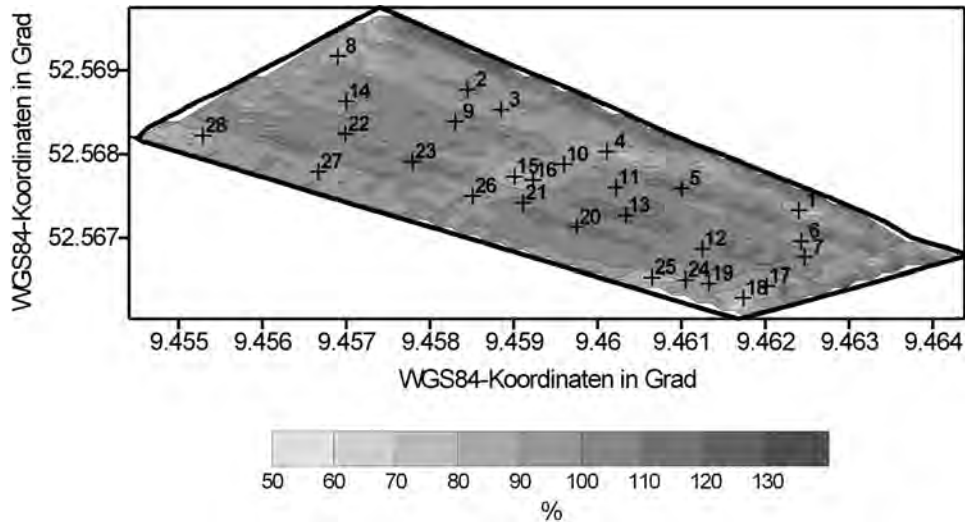


Abb. 3-19: Monitorpedozellen von Schlag 7 ausgewählt anhand relativer Ertragsdaten von 1999.

Die Probenahmen erfolgten nach der Ernte 1999 am 22.07.99 (Boden), zum Schossen 2000 am 15.05.00 (Boden und Pflanze) und zur Ernte 2000 am 04.08.2000 (Boden und Pflanze). Tabelle A10 im Anhang gibt einen deskriptiven Überblick über die untersuchten Boden- und Pflanzenmerkmale.

Die Ergebnisse aller Bodenbeprobungen wiesen für die C-Gehalte mit 30 bis 32 % die höchsten Variationskoeffizienten auf. Die Schwankungsbreite zwischen den CV der einzelnen Beprobungstermine war für die K-Gehalte mit einem CV von 15 % am 22.07.1999, mit 23 % am 15.05.2000 und mit 18 % am 04.08.2000 am höchsten, was sich auch in den Differenzen zwischen absolutem Minima und Maxima von 70 mg kg^{-1} , 101 mg kg^{-1} und 113 mg kg^{-1} K widerspiegelt.

Die geringsten Variationskoeffizienten der Pflanzenparameter wurden für die Korngehalte, die höchsten für die Strohgehalte ermittelt. Besonders hoch war der CV von 41 % für Ca zum Schossen und von 44 % für N und Cl im Stroh zur Ernte.

Tabelle 3-12 enthält die signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Parametern und den Klassen der Relativerträge von 1999, anhand derer die MPZ definiert wurden, der

Als letztes Beispiel soll die Ableitung der MPZ für den Schlag Gr. Fuchsberg dargestellt werden. Für den 1999 mit Zuckerrüben bestellten Schlag wurde eine Ertragskarte erstellt.

Nach der Erzeugung einer relativen Ertragskarte, gemittelt aus den Ertragskarten von 1995 (Hafer), 1996 (WG), 1997 (Erbsen) und 1998 (WG), wurden im Directed-Sampling-Verfahren 33 Positionen bestimmt (Abb. 3-20), an denen sowohl eine Ertragsbestimmung, als auch eine Boden- und Pflanzenanalyse vorgenommen wurde.

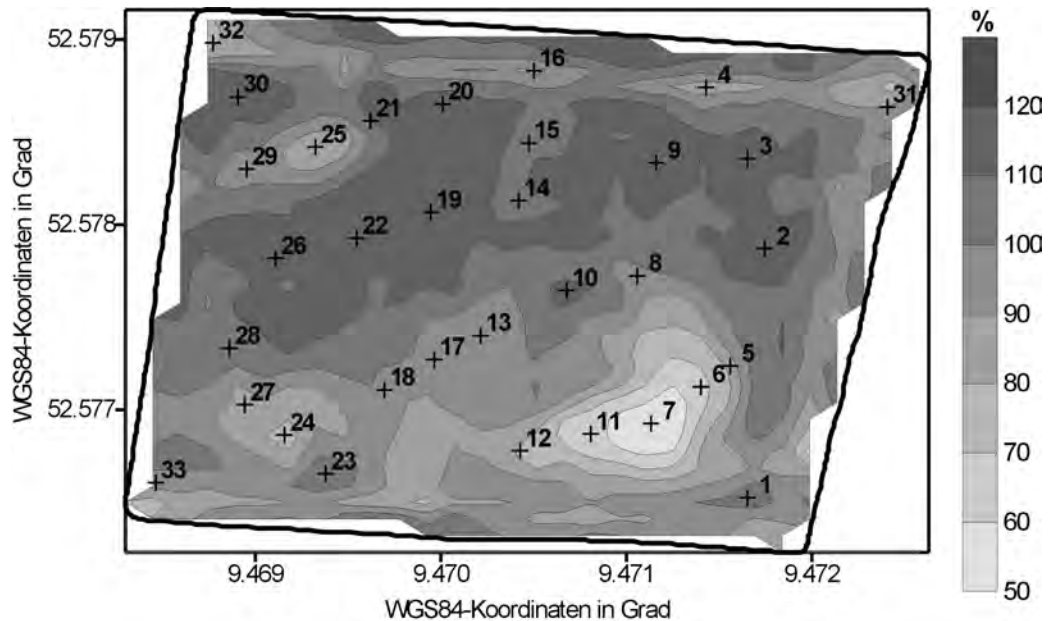


Abb. 3-20: Monitorpedozellen vom Gr. Fuchsberg ausgewählt anhand relativer Ertragsdaten von vier Jahren (1995, 1996, 1997 und 1998).

Die deskriptive Statistik der Ergebnisse der Boden- und Pflanzenanalysen zur Zuckerrübenenernte 1999 befindet sich in Tabelle A11 im Anhang.

Der höchste Variationskoeffizient wurde bei den Bodenparametern für die K-Gehalte mit 29 %, bei den Pflanzenparametern für K-Gehalte im Rübenkörper mit 20 % ermittelt. Anhand der Analysenwerte von 1999 und des unüberwacht klassifizierten Luftbildes vom 07.06.1996 wurden die 33 Probenahmestellen auf 16 reduziert, an denen dann im Jahr 2000 Beprobungen stattfanden. Abbildung 3-21 zeigt das unüberwacht klassifizierte Luftbild und die 16 verbleibenden MPZ des Jahres 2000.

Wie deutlich zu erkennen ist, verteilen sich die 16 MPZ ungleichmäßig auf drei Bildklassen. Drei der MPZ liegen in Klasse I, vier in Klasse II und neun in Klasse III. Da von den ursprünglichen 33 Probenahmestellen die Positionen schon vorgegeben waren und ein Entscheidungskriterium das stabile Verhalten eines jeden Punktes über die einzelnen Jahre in

Bezug auf die Klassenzugehörigkeit zu den relativen Ertragsklassen war, konnte diese ungleiche Verteilung nicht vermieden werden.

So wurden die Punkte beibehalten, die sowohl in der relativen Ertragskarte der Jahre 1995-1998 als auch in den einzelnen relativen Ertragskarte eines jeden Jahres der gleichen Ertragsklasse zugeordnet werden konnten. An den 16 MPZ wurde zu Vegetationsbeginn (23.02.2000) eine Bodenprobenahme sowie zu Schossen (08.05.2000) und zur Ernte (28.07.2000 und 07.08.2000) eine Boden- und Pflanzenprobenahme durchgeführt.

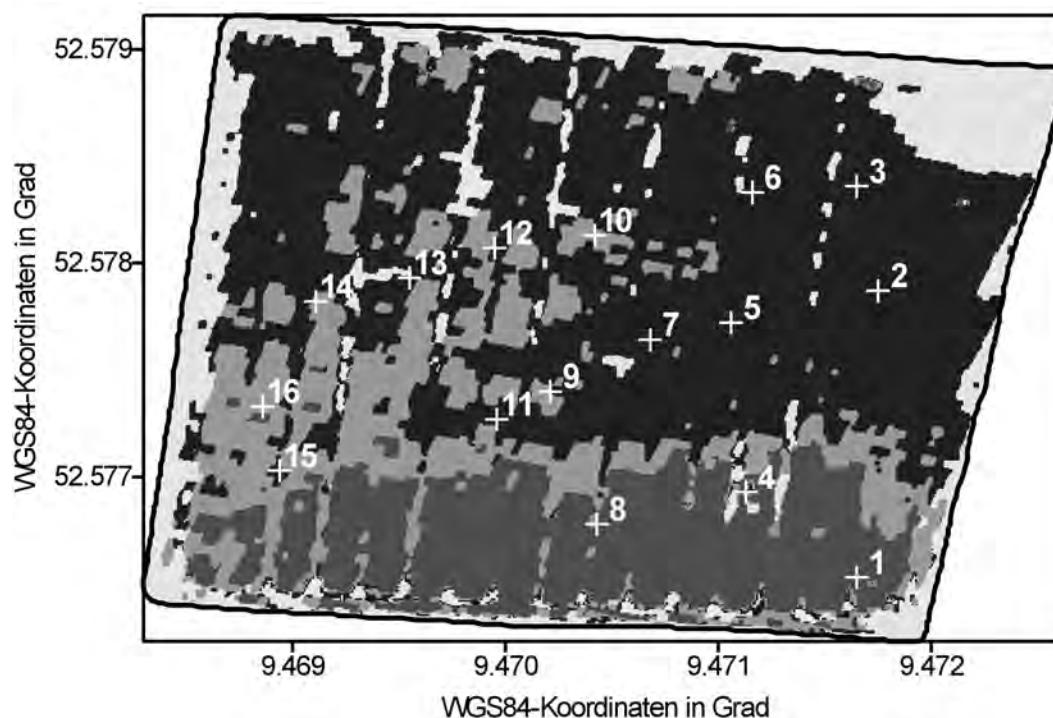


Abb. 3-21: Monitorpedozellen vom Gr. Fuchsberg von 33 auf 16 reduziert anhand der Analyseergebnisse von 1999 und dem unüberwacht klassifizierten Luftbild vom 07.06.1996.

Tabelle A12 im Anhang liefert die deskriptive Statistik der untersuchten Parameter. Die Variationskoeffizienten der einzelnen Bodenparameter weisen keine großen Schwankungen auf. Bei einem Vergleich der CV von 2000 mit denen des Vorjahres fällt auf, dass der CV für die C- und Mg-Gehalte von 1999 mit 13 % bzw. 10 % nur etwa halb so groß wie die Variationskoeffizienten von 2000 war. Vergleicht man die Differenzen von Minima und Maxima der einzelnen Bodenparameter stellt sich heraus, dass die Spannweiten der 16 MPZ nur geringfügig von denen der 33 MPZ abwichen. Von den Pflanzenparametern wiesen die Strohproben des Hafers mit Ausnahme des Ca-Gehaltes wiederum die höchsten CV auf. Die Haferproben des Schossens ergaben außer für die P- und Cl-Gehalte die geringsten CV.

Tabelle 3-13 beinhaltet alle Angaben der Jahre 1999 und 2000 über signifikante Unterschiede zwischen den Boden- und Pflanzenparametern und den relativen Ertragsklassen.

Tab. 3-13: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter gemessen in nach relativen Ertragsklassen und nach Luftbildern festgelegten Monitorpedozellen für den Schlag Gr. Fuchsberg (1999: 33 Proben; 2000: 16 Proben).

Datum der Probenahme	Probenart	Parameter	Jahre der Relativerträge						
			95-98	1995	1996	1997	1998	1999	2000
21.10.99	Boden	OS	*	**	**	**	n.s.	n.s.	***
21.10.99	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
21.10.99	Boden	N _{ges}	n.s.	*	*	*	n.s.	n.s.	**
21.10.99	Boden	P	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
21.10.99	Boden	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
21.10.99	Boden	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
21.10.99	ZR-Körper	N	**	*	**	*	n.s.	**	**
21.10.99	ZR-Körper	P	n.s.	*	**	*	n.s.	**	**
21.10.99	ZR-Körper	K	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
21.10.99	ZR-Körper	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
21.10.99	ZR-Blatt	N	*	n.s.	*	**	n.s.	*	n.s.
21.10.99	ZR-Blatt	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
21.10.99	ZR-Blatt	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
21.10.99	ZR-Blatt	Mg	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	**
23.02.00	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
23.02.00	Boden	N _{min}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
23.02.00	Boden	P	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.
23.02.00	Boden	K	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	**	*
23.02.00	Boden	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	*	*	**	**
08.05.00	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
08.05.00	Boden	P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
08.05.00	Boden	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
08.05.00	Boden	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
08.05.00	Hafer-Schoss	N	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
08.05.00	Hafer-Schoss	P	*	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
08.05.00	Hafer-Schoss	S	*	**	***	**	**	*	***
08.05.00	Hafer-Schoss	K	n.s.	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	*
08.05.00	Hafer-Schoss	Ca	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
08.05.00	Hafer-Schoss	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
08.05.00	Hafer-Schoss	Cl	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
28.07.00	Hafer-Korn	N	***	***	**	***	n.s.	**	***
28.07.00	Hafer-Korn	P	n.s.	*	**	**	**	n.s.	**
28.07.00	Hafer-Korn	S	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
28.07.00	Hafer-Korn	K	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
28.07.00	Hafer-Korn	Ca	***	***	***	***	n.s.	*	***
28.07.00	Hafer-Korn	Mg	**	***	**	**	*	*	***
28.07.00	Hafer-Korn	Cl	*	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
28.07.00	Hafer-Stroh	N	***	***	***	***	n.s.	***	***
28.07.00	Hafer-Stroh	P	**	***	**	***	*	n.s.	***
28.07.00	Hafer-Stroh	S	*	n.s.	n.s.	*	n.s.	**	n.s.
28.07.00	Hafer-Stroh	K	**	***	***	**	n.s.	**	***
28.07.00	Hafer-Stroh	Ca	**	***	**	***	*	**	***
28.07.00	Hafer-Stroh	Mg	***	***	***	***	*	**	***
28.07.00	Hafer-Stroh	Cl	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
07.08.00	Boden	OS	**	***	**	n.s.	*	**	**
07.08.00	Boden	pH	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	**	*
07.08.00	Boden	N _{min}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
07.08.00	Boden	P	*	**	**	*	*	*	*
07.08.00	Boden	K	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
07.08.00	Boden	Mg	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

> 5,0% n.s. = nicht signifikant

≤ 5,0% * = schwach signifikant

≤ 1,0% ** = signifikant

≤ 0,1% *** = hoch signifikant

Zum einen wurden die Signifikanzen zu den Ertragsklassen der gemittelten relativen Ertragskarte von 1995, 1996, 1997 und 1998 berechnet, zum anderen für die relativen Ertragskarten eines jeden Jahres bis einschließlich 2000.

Die Gesamtzahl signifikanter Unterschiede zwischen den Ertragsklassen schwankt für die einzelnen Klassifizierungen zwischen zehn (1998) und 27 (2000). Für die Klassifizierung der relativen Ertragskarte von 1995-1998, die zur Ableitung der MPZ verwendet wurde, konnten 19 signifikante Unterschiede zu den Ertragsklassen ermittelt werden.

Ebenso wie bei den anderen Beispielen, wurde ein prozentual höherer Anteil Signifikanzen zu den Pflanzenparametern als zu den Bodenparametern berechnet. Eine Ausnahme stellte der Gehalt an organischer Substanz im Boden dar, der sowohl nach der Zuckerrübenernte 1999, als auch nach der Haferernte 2000 Signifikanzen zu den Ertragsklassen aufwies.

Für die Pflanzenparameter wurde zu allen Ertragsklassifizierungen Signifikanzen für die S-Gehalte des Hafers zu Schossen, die Mg-Gehalte des Korns und die Ca- und Mg-Gehalte des Strohs gefunden. Auffällig war auch der N-Gehalt, der bei allen Pflanzenanalysen (ZR-Körper, ZR-Blatt, Hafer-Schoss, Hafer-Korn und Hafer-Stroh) Signifikanzen zu den Ertragsklassen der Relativerträge 1995-1998 aufwies.

Betrachtet man die Ergebnisse zusammenfassend, zeigt sich zum einen, dass mehr signifikante Zusammenhänge zwischen relativen Ertragskarten und den untersuchten Pflanzenparametern bestehen, als zu den Bodenparametern. Zum anderen wurde festgestellt, dass sich auch einjährige Ertragsdaten eignen, MPZ abzuleiten, sofern die Ertragsdaten das übliche Ertragsbild des Schlages widerspiegeln.

Wie schon bei der Verwendung von klassifizierten Luftbildern, konnte durch die beprobten MPZ eine große Spannbreite von Nährstoffgehalten im Boden und in der Pflanze erfasst werden. Besonders unter der Verwendung von Ertragsdaten zeigte sich aber auch, dass die analysierten Parameter nicht zwangsläufig die ertragsbeeinflussenden, bzw. limitierenden Faktoren waren, deren Ermittlung wiederum nicht Ziel dieser Arbeit war.

3.4.3 Ableitung von Monitorpedozellen unter Anwendung eines DGM

Auf drei Schlägen (Schlag 5 + 6 + Kultur II, Schlag 7 und Stall 7) des Versuchsbetriebes Mariensee wurden zu Vegetationsbeginn 1999 nach dem Directed-Sampling-Verfahren anhand von Geländemerkmale Bodenproben genommen (Kap. 2.5.4). Bevor auf die Ergebnisse dieser zielgerichteten Beprobung eingegangen wird, soll ein kurzer Überblick über die Zusammenhänge zwischen den mit dem ARC/INFO TIN Modell ermittelten

Geländemerkmale und den Daten der Rasterbeprobung von 1995 für zwölf Versuchsschläge gegeben werden. Zu diesem Zweck wurde für jeden Schlag eine einfaktorische Varianzanalyse zwischen den Geländeparametern und den Daten der Rasterbeprobung durchgeführt. Tabelle A13 im Anhang enthält eine vollständige Auflistung aller berechneten Signifikanzen. Abbildung 3-22 zeigt eine Zusammenfassung der Signifikanzen dieser zwölf Schläge.

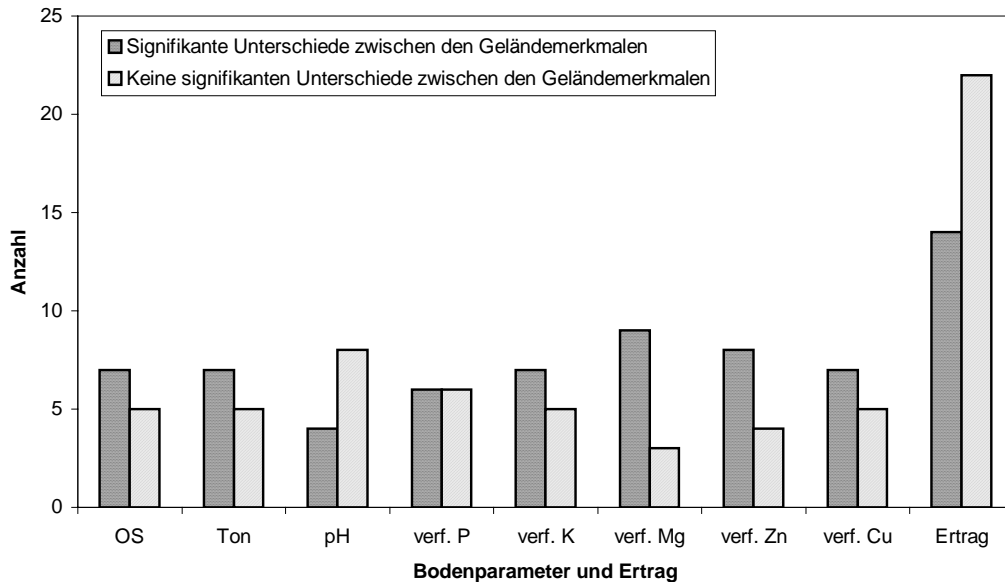


Abb. 3-22: Signifikante und nicht signifikante Unterschiede zwischen Geländemerkmale nach dem ARC/INFO TIN Modell und ausgewählten Bodenparametern der Rasterbeprobung 1995 sowie Erträgen von 1995-2000 für zwölf Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee.

Wie die Abbildung deutlich zeigt, konnten für die Parameter Organische Substanz, Tongehalt, K, Mg, Zn und Cu für mehr als 50 % der Schläge signifikante Unterschiede zwischen den Geländemerkmale Kuppe, Senke, konvexer und konkaver Hang ermittelt werden. Für den P-Gehalt wurde für je sechs Schläge signifikante bzw. nicht signifikante Unterschiede zwischen den Geländemerkmale berechnet wohingegen für die pH-Werte und die Erträge ein höherer Anteil nicht signifikante Unterschiede aufwies.

Im März 1999 wurden für die Schläge Schlag 7 (12 MPZ), Schlag 5 + 6 + Kultur II (20 MPZ) und Stall 7 (25 MPZ) anhand von Geländemerkmale MPZ bestimmt und beprobt. Tabelle 3-14 enthält die mittels einer einfaktorischen Varianzanalyse berechneten signifikanten Unterschiede zwischen den Geländemerkmale und den analysierten Bodenparametern. Eine deskriptive Statistik erfolgt in Tabelle A14 im Anhang.

Wie aus Tabelle A14 ersichtlich wird, lagen die Variationskoeffizienten, abgesehen vom CV der pH-Werte, für Schlag 5 + 6 + Kultur II zwischen 17 % (Mg) und 33 % (N_{\min}), für

Schlag 7 zwischen 11 % (Mg) und 35 % (OS) und für Stall 7 zwischen 21 % (K) und 40 % (N_{\min}).

Signifikante Unterschiede zwischen den Geländemerkmale und den untersuchten Bodenparametern (Tab. 3-14) konnten für Schlag 5 + 6 + Kultur II für die organische Substanz, N_{\min} , N_{ges} und Mg ermittelt werden. Schlag 7 wies keine signifikanten Unterschiede zu den untersuchten Bodenparametern und Stall 7 nur Signifikanzen zu den Bodenparametern N_{ges} und Mg auf.

Tab. 3-14: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Bodenparameter gemessen in Monitorpedozellen, festgelegt nach Geländemerkmale im Frühjahr 1999 für Schlag 5 + 6 + Kultur II, Schlag 7 und Stall 7.

Parameter	Schlag 5+6 +Kultur II	Schlag 7	Stall 7
OS	**	n.s.	n.s.
pH	n.s.	n.s.	n.s.
N_{\min}	*	n.s.	n.s.
N_{ges}	**	n.s.	*
P	n.s.	n.s.	n.s.
K	n.s.	n.s.	n.s.
Mg	*	n.s.	**

> 5,0% n.s. = nicht signifikant ≤ 1,0% ** = signifikant
 ≤ 5,0% * = schwach signifikant ≤ 0,1% *** = hoch signifikant

Abschließend werden Ergebnisse vorgestellt, die in Zusammenarbeit mit der Firma LandMapper Environmental Solutions aus Edmonton, Kanada ermittelt wurden. Für drei der Schläge (Schlag 3, Schlag 5 + 6, Stall 7 + 8) des Versuchsbetriebes Mariensee wurde aus dem vorliegenden DGM mittels der Software LandMapR™ eine Geländeanalyse durchgeführt. LandMapR™ bildet bis zu 15 Geländeklassen (Kap. 2.5.4). Im Gegensatz zum ARC/INFO TIN Modell erfolgt die morphologische Klassifizierung nicht unter Verwendung eines 3x3 Filters, sondern unter Anwendung von Fuzzy-Regeln (MACMILLAN et al., 2000). So wurden für Schlag 3 zehn, für Schlag 5 + 6 neun bzw. nach Überhöhung des DGM elf und für Stall 7 + 8 nach Überhöhung des DGM 15 Geländeklassen bestimmt.

Tab. 3-15: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Bodenparameter der Rasterbeprobung von 1995 gemessen in Geländeklassen aus der LandMapR™ Geländeanalyse für Schlag 3, Schlag 5 + 6 und Stall 7 + 8.

Schlagname	OS	Ton	pH	P	K	Mg	Zn	Cu
Schlag 3	***	***	***	n.s.	*	***	*	***
Schlag 5 + 6	***	***	***	***	***	***	***	***
Schlag 5 + 6 (überhöht)	***	***	***	***	***	***	***	***
Stall 7 + 8 (überhöht)	***	***	***	***	***	***	***	***

> 5,0% n.s. = nicht signifikant ≤ 1,0% ** = signifikant
 ≤ 5,0% * = schwach signifikant ≤ 0,1% *** = hoch signifikant

Nach Durchführung einer einfaktoriellen Varianzanalyse zwischen den Geländeklassen und den Daten der Rasterbeprobung von 1995 ergaben sich die in Tabelle 3-15 wiedergegebenen signifikante Unterschiede.

Wie deutlich zu erkennen ist, konnte für alle drei Schläge eine höhere Anzahl signifikanter Unterschiede ermittelt werden, als nach der Geländeanalyse durch das ARC/INFO TIN Modell (Tab. A13). Im direkten Vergleich ergaben sich für Schlag 3 nach dem TIN Modell zwei Signifikanzen (Ton, Mg) und nach LandMapR™ 7. Für Schlag 5 + 6 und Stall 7 + 8 wurden signifikante Unterschiede zu allen Bodenparametern (acht) nach Anwendung des LandMapR™ ermittelt und sechs Signifikanzen nach dem TIN Modell.

4 Diskussion

Methoden der Fernerkundung wurden von Beginn an ein großes Potenzial für die Erforschung bodenkundlicher, geologischer und pflanzenbaulicher Fragestellungen eingeräumt (MILFRED and KIEFER, 1976; MORAN et al., 1997). Durch die Entwicklung des Precision Agriculture (PA) und der damit verbundenen Möglichkeit, Schläge entsprechend der räumlichen Variabilität von Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit zu bearbeiten, bekam auch die Fernerkundung einen neuen Stellenwert. Rasterbeprobungen in Abständen von 30-50 Metern zur Ermittlung von Boden- und Pflanzenheterogenitäten innerhalb eines Schlages sind aus Kostengründen der Forschung vorbehalten. Für Praxisanwendungen des PA ist es daher notwendig, alternative Methoden zur Erfassung von räumlich variablen Boden- und Pflanzenmerkmalen zu entwickeln. Fernerkundungsmethoden werden, aufgrund der Möglichkeit durch spektrale Signaturen größere Flächen abzubilden, in der Literatur häufig als Alternativverfahren zur Erfassung von Variabilität angeführt (ANONYM, 1997; ANONYM, 1999). Es war daher ein Hauptziel der vorliegenden Arbeit, Zusammenhänge zwischen spektralen Signaturen und Boden- und Pflanzenparametern zu erfassen. Dabei sollte untersucht werden, ob spektrale Signaturen die Variabilität von Bodenfruchtbarkeitsmerkmalen hinreichend stabil anzeigen. Es war nicht Gegenstand der Untersuchungen, kausale Zusammenhänge aufzuklären.

In Kapitel 4.1 werden die Daten der Rasterbeprobung diskutiert, bevor in Kapitel 4.2 auf die Ergebnisse über Zusammenhänge zwischen spektralen Signaturen und ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit eingegangen wird. Kapitel 4.3 beschäftigt sich anschließend mit der räumlichen und zeitlichen Veränderung von spektralen Signaturen, bevor in Kapitel 4.4 das Verfahren der Ableitung von MPZ diskutiert wird.

4.1 Beurteilung der untersuchten Merkmale der Bodenfruchtbarkeit

1995 wurden als Grundinventur von den 19 Schlägen des Versuchsbetriebes Mariensee Oberbodenproben im 30 m Raster gezogen. 17 der 19 beprobten Schläge wurden für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit verwendet. Kapitel 3.1 fasst die Ergebnisse der Bodenanalysen zusammen, welche kritisch evaluiert und mit Daten anderer Untersuchungen verglichen werden.

Zunächst ist das Problem der unterschiedlichen Zeitpunkte der Probenahme im Jahr 1995 zu diskutieren. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, war es auf Grund des großen Datenumfangs nicht möglich, die Rasterbeprobung geschlossen innerhalb kürzester Zeit durchzuführen. Daher fand

die Rasterbeprobung verteilt in drei Kampagnen statt. Ein Großteil der mit Wintergetreide bestellten Schläge wurden im Februar und März 1995 beprobt, die Sommerkulturen im Mai und die verbleibenden Schläge mit Wintergetreide nach der Ernte im August. Wie aus den Untersuchungen von OBENAUF (1987) zu den Bodenparametern OS, N_{ges} , pH, P, K und Mg im Vegetationsverlauf hervorgeht, kommt es im Laufe der Vegetationsperiode zu Schwankungen der Gehalte, die entsprechend der Kulturart und der Witterungsverhältnisse unterschiedlich stark ausgeprägt sein können. Mit Einsetzen der Humus-Mineralisation im Frühjahr steigen die Gehalte für N, P, K und Mg an, die dann aber während der Wachstumsphase, als Folge der Nährstoffaufnahme der Pflanzen, wieder abnehmen. Besonders ausgeprägt sind hierbei Schwankungen im K-Gehalt des Bodens bei Hackfrüchten, welche, bedingt durch hohe Niederschläge in den Monaten Mai, Juni und Juli sogar unter die Gehalte zu Beginn der Vegetationsperiode fallen können. Bei den Nährstoffen P und Mg kommt es nach OBENAUF (1987) zu Schwankungen von bis zu $\pm 20 \text{ mg kg}^{-1}$ während des Vegetationszeitraumes von April bis Juli.

Die Auswertung der Daten für die vorliegende Arbeit erfolgte jeweils bezogen auf einen Schlag. Dadurch kommt es ausschließlich zur Betrachtung von räumlicher Variabilität innerhalb eines Schlages, so dass Schwankungen zwischen den Flächen ohne Relevanz für die Aussagen der Arbeit sind. Einzige Ausnahme bilden die in Tabelle 3-1 von Kapitel 3.1 dargestellten Ergebnisse, die eine Zusammenfassung der 17 Schläge widerspiegeln. Hier sollte jedoch lediglich ein Vergleich aller analysierten Bodenparameter gegeben werden. Eine Auflistung der deskriptiven Statistik aller untersuchten Schläge befindet sich in Tabelle A1 im Anhang.

Nachfolgend wird ein Vergleich der analysierten Bodenparameter P, K und Mg mit Ergebnissen anderer Untersuchungen (BECKETT und WEBSTER, 1971; DAMPNEY et al., 1997; RÜHLING, 1999) zur räumlichen Variabilität durchgeführt. Dieser Vergleich erfolgt dabei unabhängig von den verwendeten Analysemethoden.

Die 1971 von BECKETT und WEBSTER vorgestellte Studie gibt eine Zusammenfassung der bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführten Untersuchungen zur räumlichen Variabilität wieder. Für die Berechnung durchschnittlicher Variationskoeffizienten für Oberböden wurden Daten der USA, Südafrika, Australien, Neuseeland und einiger europäischer Staaten verwendet. Die Autoren berechneten Variationskoeffizienten von 45 % für P, 70 % für K und 45 % für Mg. Die Studie von DAMPNEY et al. (1997), in der 78 über ganz England verteilte Schläge berücksichtigt wurden, kommt auf Variationskoeffizienten von 36 % für P, 27 % für K und 29 % für Mg. Eine von RÜHLING (1999) durchgeführte Untersuchung auf Schlägen der

Lüneburger Heide bei Nienwohlde kam auf durchschnittliche Variationskoeffizienten im Oberboden von 21 % für P, 30 % für K und 25 % für Mg. Die Mittel der für die Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee berechneten Variationskoeffizienten für P mit 26 %, für K mit 24 % und für Mg mit 19 % entsprachen damit den Angaben von DAMPNEY et al. (1997) und RÜHLING (1999). Zur Erklärung der Abweichung der Werte von BECKETT und WEBSTER (1971) ist zu bemerken, dass es sich dabei um geschätzte Variationskoeffizienten handelt. Es lagen somit keine einheitlichen Erhebungsbedingungen vor.

BECKETT und WEBSTER (1971) berichten, dass mit Zunahme der Schlaggröße auch die Variationskoeffizienten zunehmen, was die Daten dieser Arbeit nicht bestätigen (Abb. 4-1). Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Schlaggrößen des Versuchsbetriebes in Mariensee zwischen 8 und 14 ha liegen und es sich bei den Ergebnissen von BECKETT und WEBSTER (1971), um einen Vergleich von Flächen der Größen 1 m² bis 184 ha handelt. Außerdem basierte die Berechnung der Variationskoeffizienten meist nicht auf Rasterbeprobungen, sondern auf verschiedene Beprobungsmethoden wie z.B. Transekte und Profile.

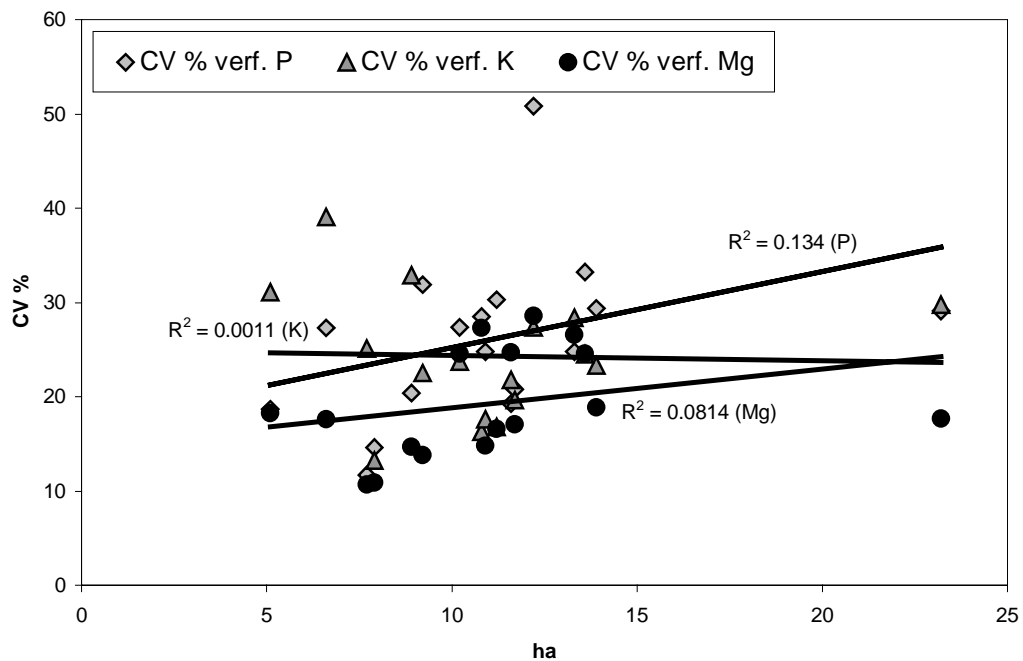


Abb. 4-1: Beziehungen zwischen der Schlaggröße und dem Variationskoeffizienten für die Bodenparameter P, K und Mg für den Versuchsbetrieb Mariensee.

Abschließend soll die Wahl der Rasterweite der Beprobung von 1995 diskutiert werden. Für die vorliegende Arbeit wurden die von HANEKLAUS et al. (1997) für diese Ergebnisse mitgeteilten Reichweiten (Tab. 2-8) übernommen.

Die von HANEKLAUS et al. (1997) berechneten mittleren Reichweiten für den Standort Mariensee (128 m für pH, 153 m für P und 135 m für K) sind vergleichbar mit Werten anderer Untersuchungen. So teilte MULLA (1997) für einen Standort in Washington (USA) eine mittlere Reichweite von 145 m für P mit und in einer Zusammenstellung von McBRATNEY und PRINGLE (1997) wurden durchschnittliche Reichweiten von 70 m für pH, 188 m für P und 255 m für K im Oberboden ermittelt. Bei den Ergebnissen von McBRATNEY und PRINGLE (1997) fällt die fast zwei mal so große Reichweite für K auf. Eine neuere Zusammenstellung von McBRATNEY und WHELAN (1999) kommt dann aber zu annähernd gleichen mittleren Reichweiten (128 m für pH, 153 m für P und 135 m für K), wie die für Mariensee ermittelten.

Für die Auswahl von Rasterweiten vor einer Probenahme ist jedoch die minimale Reichweite entscheidend. Diese liegt je nach untersuchtem Parameter für den Standort Mariensee zwischen 58 und 74 m (Tab. 2-8). Auch MULLA (1997) schlägt eine maximale Rasterweite von 60 m für Rasterbeprobungen vor. Die aus den Semivariogrammen ermittelten Reichweiten für den Versuchsstandort Mariensee bestätigen, dass eine Interpolation der Rasterdaten (30 m) von 1995 auf ein 10 m Raster durchgeführt werden konnte. Diese Interpolation wurde für alle erhobenen Daten durchgeführt um eine einheitliche Datenbank, insbesondere für die Erstellung von Applikationskarte, zu erhalten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die auf ein 10 m Raster interpolierten Daten ausschließlich bei der Verschneidung von Bodenparametern mit Geländeklassen und der nachfolgenden einfaktoriellen Varianzanalyse eingesetzt (Kap. 3.4.3).

4.2 Beurteilung der Beziehungen zwischen Fernerkundungsdaten und Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit

Die Ergebnisse der umfangreichen Datenerhebungen im Rahmen von Rasterbeprobungen sowie Aufzeichnungen von Fernerkundungsdaten und Ertragsdaten werden in diesem Kapitel dargestellt. Kapitel 4.2.1 diskutiert zunächst die Wahl der Fernerkundungsquelle und das Verfahren der Klassifikation von spektralen Signaturen. In Kapitel 4.2.2 wird dann speziell auf die in dieser Arbeit ermittelten Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierten Bodenbildern und Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit sowie Ertragsdaten eingegangen, bevor in Kapitel 4.2.3 die Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierten Vegetationsbildern und Bodenparametern bzw. Ertragsdaten beurteilt werden.

4.2.1 Kritische Betrachtung der verwendeten Fernerkundungsdaten

Die Flexibilität des Aufnahmezeitpunktes war eines der wichtigsten Kriterien für die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen. Grund hierfür ist, dass bei Bestandesbeobachtungen mit Methoden der Fernerkundung phänologische Daten bzw. der physiologische Entwicklungszustand des Bestandes, und im Falle von Bodenbeobachtungen auch der Zustand des Wasserhaushaltes aufgezeichnet werden sollte. Fernerkundung mit Satelliten kann dieses Kriterium nur sehr eingeschränkt oder gar nicht berücksichtigen, so dass für die Untersuchungen dieser Arbeit Luftaufnahmen aus einem Flugzeug als ideales Verfahren gewählt wurde. Abbildung 3-5 (Kap. 3.2) vermittelt einen Eindruck, wie sich spektrale Signaturen entsprechend des Aufnahmezeitpunktes verändern. In Kapitel 3.3 und 4.3 wird näher auf die Aufnahmezeitpunkte von Luftbildern eingegangen.

Weitere entscheidende Aspekte waren, die Kosten des Verfahrens gering zu halten, ein Mosaiking von Schlägen zu vermeiden und einen möglichst kurzen Zeitraum von der Datengewinnung bis zum Auswertungsergebnis zu gewährleisten. Das Vermeiden des Mosaiking ermöglicht eine große Zeitersparnis, da neben der räumlichen Anpassung zweier oder mehrerer Bilder insbesondere die spektrale Anpassung zeitaufwendig ist. Außerdem kann eine spektrale Anpassung die Klassifikationsergebnisse beeinflussen.

Das verwendete Verfahren wird somit dem von SCHMIDT (1994) vorgestelltem ‚Low-Cost-System‘ zur kostengünstigen und den Bedingungen von PA angepassten Aufzeichnung spektraler Signaturen von Böden und Pflanzenbeständen gerecht.

ATKINSON (1997) schlägt als räumliche Auflösung einen Richtwert von 0,5 bis 3 m vor, wenn Luftbilder für die Erfassung von Heterogenitäten innerhalb eines Schläges eingesetzt werden. Dieser wurde bei allen Aufnahmen der Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee erreicht. Nach dem Scannen der 6x6 cm Dias wurde eine räumliche Auflösung von 0,5 bis 1 m bestimmt.

In der Literatur werden eine Vielzahl unterschiedlichster Wellenlängenbereiche für spezifische landwirtschaftliche Fragestellungen beschrieben, die mit modernen Sensortechniken von verschiedensten Plattformen (Satellit, Flugzeug, Fahrzeug) aufgezeichnet werden können. Eine Zusammenstellung möglicher Anwendung für Precision Agriculture findet sich bei MORAN et al. (1997).

Spektrale Signaturen von Pflanzenbeständen offenbaren keine kausalen Zusammenhänge, da sie durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren geprägt sind, wozu sämtliche Habitus und Inhaltsstoff beeinflussende Wachstumsfaktoren gehören (GOBRON et al., 1997; ASNER, 1998 und CUTLER und CURRAN, 2000). Umfassende Erläuterungen über weitere

reflexionsbeeinflussende Faktoren bei Luftaufnahmen, wie z.B. Tageszeit, Atmosphäre und Oberflächenbeschaffenheit werden bei MULDER (1987) beschrieben.

Dementsprechend ist es nicht möglich, Veränderungen spektraler Signaturen eindeutig einem Faktor zuzuordnen. Dies zeigt sich in Tabelle 3-2 (Kap. 3.2), in der exemplarisch für einen Schlag die signifikanten Zusammenhänge zwischen unüberwacht klassifizierte Luftbildern und Bodendaten aufgeführt sind. Der Wert von Luftaufnahmen für Precision Agriculture besteht somit im Lokalisieren von Heterogenitäten, deren kausale Ursachen aber stets durch Analysen von Proben aus Böden und Beständen zu klären ist.

In der vorliegenden Arbeit wurde Echtfarbenbildern der Vorzug vor Falschfarben- oder Infrarotaufnahmen gegeben. Ein nicht zu unterschätzender Vorteil von Echtfarbenbildern liegt im Wahrnehmungsverhalten des Menschen. Da auf Echtfarbenbildern die Umwelt (der Schlag) in einer für das menschliche Auge gewohnten Weise abgebildet wird, kann der Landwirt in die Bewertung der Bilder mit einbezogen werden. Hierdurch kann oftmals schon im Vorfeld weiterer Auswertungen eine Begründung für Auffälligkeiten von spektralen Signaturen (z.B. Wildschäden, Frostschäden, unterirdische Leitungen, Lagerung von Düngemitteln oder ehemalige Mietenplätze) geliefert werden.

Auf den Einsatz der Bodendaten von 1995 für eine überwachte Klassifikation wurde verzichtet, da es ein Ziel der vorliegenden Arbeit war, einen reproduzierbaren und zu automatisierenden Prozess zu finden, der ohne umfassendes Vorwissen die Möglichkeit bietet, Variabilität verursachende Faktoren im Schlag zu lokalisieren und zu bestimmen. Die Vorteile von Fernerkundungsdaten werden insbesondere in der Abbildung von großen Gebieten und der damit verbundenen Möglichkeit der Datenerhebung über große Flächen gesehen, von denen im allgemeinen keine entsprechenden Bodendaten vorliegen. Aus diesem Grund wurde eine unüberwachte Klassifikation der Luftbilder vorgenommen. Nach der Zusammenfassung der Wahrscheinlichkeiten für eine richtige Klassifikation (Kap. 2.5.2) wurden für alle Bilder zwischen 75 % und 88 % der Pixel mit einer Sicherheit von mehr als 50 % der richtigen Klasse zugeordnet. Für den Versuchsstandort Mariensee erfolgte eine Limitierung der Klassenanzahl auf maximal fünf Klassen. Eine größere Anzahl war aufgrund der vorhandenen Heterogenitäten nicht sinnvoll, da der Flächenanteil für Extreme zu gering wurde, als dass Beprobungen einen entscheidenden Vorteil erbracht hätten. In Gebieten mit stärker ausgeprägten Heterogenitäten und mit in den Schlag eingeschlossenen, nicht der Kultur zugehörigen Reflexionsgegenständen (z.B. Teiche, Hochspannungsmasten) muss die Klassenanzahl jedoch gegebenenfalls erhöht werden bzw. eine Ausmaskierung dieser Flächen erfolgen. Unabhängig von der durchgeführten Klassifikationsart kamen CONGALTON (1991)

und STEHMAN (1992) bei Studien über die Genauigkeit von Klassifikationsergebnissen zu dem Schluss, dass Verifikationen vor Ort unerlässlich ist.

4.2.2 *Beziehungen zwischen Bodenbildern und Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit*

Ein besonderes Problem der Auswertung von Luftbildern für bodenkundliche Zwecke ist, dass die bisher publizierten Zusammenhänge zwischen Reflexionsverhalten und Bodenmerkmalen überwiegend unter Laborverhältnissen untersucht wurden. Beispiele hierfür sind das von GERBERMANN und NEHER (1979) beschriebene Reflexionsverhalten verschiedener Gemische aus Tonböden und Sand, die von PLANET (1970) untersuchten Feuchtegrade, der Gehalt an organischer Substanz (KRISHNAN et al., 1980) und deren Wechselwirkungen mit Eisengehalten (STONER und BAUMGARDNER, 1981).

Im Gegensatz zu Laboruntersuchungen kommt es bei Geländeaufnahmen zu Überlagerungen mehrerer Effekte. WEBSTER und BECKETT (1964) und BARNES et al. (1996) kommen daher zu dem Schluss, dass eine direkte Ableitung quantitativer Aussagen über Merkmale der Bodenfruchtbarkeit aus Reflexionsmessungen nicht möglich ist. Obwohl die Berechnung von Düngeempfehlungen aus Luftaufnahmen von Schlägen mit hoher Variabilität möglich scheint (ZHENG und SCHREIER, 1988), beruhten auch diese Untersuchungen auf einem Vergleich von Luftbildern mit Reflexionsmessungen und Analysen im Labor. Eine einfache Übertragung der ermittelten Ergebnisse auf andere Schläge lehnen die Autoren aus diesem Grund ab und gehen davon aus, dass ihr Verfahren für andere Schläge bzw. Gebiete nur nach erneuten Untersuchungen vor Ort anwendbar ist.

Für die 23 auf elf Schläge des Versuchsbetriebes in Mariensee verteilten Bodenbilder, konnten die meisten Zusammenhänge zu den Bildklassen für die Bodenparameter Ton und Mg ermittelt werden (Abb. 3-6). Demgegenüber wurde für den Parameter organische Substanz die geringste Anzahl Signifikanzen zwischen den Bildklassen berechnet. Ebenso gaben die Bildklassen nur bedingt und von Jahr zu Jahr variierend die auftretenden Ertragsunterschiede wider (Tab. A3).

Betrachtet man die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Landschaftsgebiete Leinetal und Nienburger Geest bestätigt sich die Aussage von ZHENG und SCHREIER (1988), dass eine Ableitung von Nährstoffgehalten aus Bodenbildern bestenfalls unter der Berücksichtigung von vorhandenen Bodentypen und deren Variabilität vorgenommen werden kann. Die Quantifizierung der Nährstoffgehalte muss in jedem Fall mittels Bodenanalysen vorgenommen werden. Es zeigte sich, dass in der Nienburger Geest, die sich im Gegensatz zum Leinetal stärker in unterschiedliche Bodentypen gliedert (Bodenkarte von Niedersachsen, 1:25 000), für

fünf der acht untersuchten Bodenparameter ein höherer Anteil Signifikanzen zu den Bildklassen auftrat (Abb. 3-7).

Eine strenge Abgrenzung unterschiedlicher Bodentypen wird insbesondere durch Effekte der Bodenbearbeitung und Abtrocknung erschwert. Auffällig wird dies bei der Betrachtung der ermittelten Signifikanzen von zwei oder mehreren Bodenaufnahmen des gleichen Schlages. So können die Unterschiede für den Duvenwinkel zwischen der Aufnahme vom 25.09.1997 und 15.05.2000 folgendermaßen interpretiert werden. Das Bild vom 25.09.1997 zeigt den Duvenwinkel nach der Silomaisernte. Außer einer Stoppelbearbeitung haben keine bodenbearbeitenden Prozesse stattgefunden. Demgegenüber zeigt das Bild vom 15.05.2000 das vorbereitete Saatbett für die Aussaat von Silomais. Hinzu kommt, dass zwischen dem 09.09.1997 und dem 25.09.1997 nur 1,5 mm Niederschlag (13.09.1997) gefallen waren, wohingegen am 30.04.2000 und 01.05.2000 Niederschlagsmengen von 12 mm fielen. Da der Feuchtegehalt des Bodens, ebenso wie der Bearbeitungszustand entscheidende Faktoren für das Verhalten spektraler Signaturen sind (PLANET, 1970; BARNES et al., 1996), ist davon auszugehen, dass diese beiden Faktoren zumindest anteilig das Reflexionsverhalten des Bodens beeinflusst und somit zu den unterschiedlichen Ergebnissen bei der einfaktoriellen Varianzanalyse geführt haben. Das aber durchaus noch weitere Faktoren einen entscheidenden Einfluss auf das Reflexionsverhalten von Böden haben müssen, zeigt der Vietingskamp, bei dem es trotz unterschiedlicher Niederschlagsmengen und Bearbeitungszuständen zu einem weitestgehend einheitlichen Ergebnis der einfaktoriellen Varianzanalyse bei allen vier Aufnahmen gekommen ist.

4.2.3 Beziehungen zwischen Vegetationsbildern und Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit

Die vielfältigen Ursachen für Unterschiede von spektralen Signaturen innerhalb eines Feldes werden bei den meisten bisher publizierten Untersuchungen nicht berücksichtigt. Vielmehr wird nur ein Faktor oder eine begrenzte Anzahl Faktoren berücksichtigt, so dass die mögliche Komplexität des Ursachengefüges vernachlässigt wird. Einige Beispiele stellen die Versuche von BARET et al. (1988), BAUSCH et al. (1997) und BARET und FOURTY (1997) dar, die Stickstoffkonzentrationen von Pflanzen und Pflanzendecken über Reflexionsparameter schätzten. Weitere Beispiele liefern DEMETRIADES-SHAH und STEVEN (1988) zu Wachstum und Chlorosen in Zuckerrüben, HEATH et al. (2000) zum Nematodenbefall von Kartoffeln, JONES et al. (2000) zum Wasser- und Stickstoffmangel bei Kartoffeln und RIPPLE (1986) zum Wassermangel in Blättern. Eine umfassende Überblick über bisher

durchgeführte Untersuchungen an spektralen Signaturen von Vegetationsdecken gibt MORAN et al. (1997).

In der vorliegenden Arbeit wurden die Ergebnisse daher nicht entsprechend den zuvor beschriebenen Auswertemöglichkeiten interpretiert. Es wurde vielmehr der Frage nachgegangen, ob sich Unterschiede in spektralen Signaturen von Beständen dazu eignen, Bodenheterogenitäten zu erfassen. In Kapitel 4.4 wird dann diskutiert, ob unüberwacht klassifizierte Fernerkundungsdaten zur Ableitung von MPZ geeignet sind.

Die 65 untersuchten Luftbilder bildeten von Zwischenfrüchten bis Wintergetreide alle in Mariensee angebauten Kulturarten in unterschiedlichen Wachstumsstadien ab. Die aus der unüberwachten Klassifizierung hervorgegangenen Bildklassen der Vegetationsbilder wurden ebenso mit den untersuchten Bodenparametern der Rasterbeprobung von 1995 verschnitten wie die Bodenaufnahmen. Dabei gilt zu bedenken, dass Bodenaufnahmen nur Reflexionseigenschaften der Oberfläche des A_h-Horizontes widerspiegeln und somit zu den Oberbodenproben von 1995 in einem engeren Zusammenhang stehen, als Reflexionseigenschaften von Pflanzen, die indirekt auch Bodenheterogenitäten in Bodenschichten durch die Wasser- und Nährstoffaufnahme ihrer Wurzeln widerspiegeln. Darüber hinaus sind Pflanzen einer Vielzahl nicht vom Boden beeinflusster Faktoren wie z.B. Wildschäden, Pflanzenkrankheiten oder Hagel ausgesetzt.

Die zwischen den Bildklassen ermittelten Signifikanzen erklärten, mit Ausnahme des Gehaltes an organischer Substanz, zwischen 52 % und 62 % der Unterschiede in den Bodenparametern (Abb. 3-8, Kap. 3.2.2). Womit ein ähnlicher Anteil signifikanter Unterschiede ermittelt wurde wie zwischen den Klassen der Bodenbilder. Es stellte sich also heraus, dass trotz der oben angeführten größeren Anzahl Einflussfaktoren, Aufnahmen der Vegetation in gleichem Maße geeignet sind Bodenheterogenitäten zu erfassen, immer vorausgesetzt, dass eine Beprobung zur Verifikation und Quantifikation erfolgt.

Betrachtet man die ermittelten Signifikanzen getrennt für die Landschaftsgebiete Nienburger Geest und Leinetal (Abb. 3-9, Kap. 3.2.2), so ergibt sich zu den Bodenaufnahmen (Abb. 3-7, Kap. 3.2.1) ein widersprüchliches Ergebnis. Für die Klassen der Vegetationsbilder wurde für die Schläge der Nienburger Geest nur für zwei der acht Bodenparameter (OS, Mg) eine höhere Anzahl Signifikanzen ermittelt (Bodenbilder = vier), während für das Leinetal fünf Bodenparameter (Ton, pH, K., Zn, Cu) einen höheren Anteil aufwiesen (Bodenbilder = vier). Der P-Gehalt verhielt sich für die Vegetationsbilder in beiden Landschaftsgebieten gleich.

Hinsichtlich der Häufigkeit signifikanter Unterschiede zwischen Bildklassen und Erträgen erwiesen sich die Bodenbilder (Abb. 3-6, Kap. 3.2.1) vorteilhaft im Vergleich zu den

Vegetationsbildern (Abb. 3-8, Kap. 3.2.2). Für die Vegetationsbilder in den Landschaftsgebieten Leinetal und Nienburger Geest kommt es zu starken Schwankungen, insbesondere in den Jahren 1998 und 1999 (Abb. 3-10, Kap. 3.2.2). Vergleicht man die Niederschlagsverteilungen dieser Jahre in Mariensee (Abb. 2-6, Kap. 2.2.3), so deutet sich zumindest einer der Gründe für diese uneinheitlichen Ergebnisse an. Während 1998 die Monate März, April und Juni erhöhte Niederschlagsmengen verzeichneten, der Mai aber weit unter dem langjährigen Mittel lag, verhielten sich die Niederschläge 1999 abgesehen von einer Trockenperiode im Mai und Juni entsprechend dem langjährigen Mittel. Dies lässt darauf schließen, dass sich die vermehrten Niederschläge 1998 in eine entsprechende zeitliche Variabilität des Ertragspotentials auf dem Schlag niederschlug.

In den Untersuchungen zeigte sich wiederholt, dass eine starke Interaktion zwischen Witterungsverläufen und spektralen Signaturen sowie der Ertragsbildung vorlag. Soll eine Bestandesbeobachtung zur Aufdeckung von Variabilität erfolgen, wäre diese nur durch ein online System zur Erfassung von spektralen Signaturen, wie z.B. das ‚LASSIE‘-System (SCHNUG et al., 2000), möglich. Unter LASSIE versteht man eine stationär errichtete digitale Kamera auf einem erhöhten Punkt, die stufenweise rotierend zu jedem beliebigen Zeitpunkt über eine Fernauslösung spektrale Signaturen der Umgebung aufzeichnet und online auf einen PC überträgt.

4.3 Räumlich und zeitlich wiederkehrende spektrale Signaturen

Nachdem in Kapitel 4.2 signifikante Unterschiede zwischen unüberwacht klassifizierten Boden- bzw. Vegetationsbildern und ausgewählten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit diskutiert wurden, soll in Kapitel 4.3 auf das räumliche und zeitliche Verhalten von spektralen Signaturen eingegangen werden. Direkte Methoden zum Vergleich von klassifizierten Fernerkundungsdaten unterschiedlicher Zeitpunkte, wie sie von SINGH (1989) für Landnutzungskartierungen mittels Fernerkundungsdaten vorgestellt wurden, sind auf die Klassifikation von Unterschieden von spektralen Signaturen, die aufgrund von Heterogenitäten innerhalb eines Schlags auftreten, nicht anwendbar.

Dafür sind zwei Ursachen verantwortlich, zum einen werden die Klassenbezeichnungen willkürlich vergeben, zum anderen gibt es innerhalb eines Schlags nur selten scharfe Abgrenzungen zwischen den unterschiedlichen spektralen Signaturen. Ein im Abtrocknen begriffener Boden wird z.B. sein Aussehen jeden Tag verändern, so dass es schon bei Aufnahmen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen zu Abweichungen der

Klassifikationsergebnisse kommen kann. Wie eine Studie von MILFRED und KIEFER (1976) und auch Beobachtungen von CLOUTIS et al. (1996) über Veränderungen von Bildmustern während einer Vegetationsperiode zeigen, findet eine permanente Musteränderung innerhalb eines Feldes statt. Entscheidend für die Kontinuität auftretender spektraler Signaturen ist der bzw. sind die reflexionsbeeinflussenden Faktoren. Ein Beispiel dafür wäre ein zu Beginn der Vegetationsperiode aufgezeichneter Nährstoffmangel, der im Laufe der Vegetationsperiode durch Düngung ausgeglichen wird. Ebenso können auf Bildern früh im Vegetationsjahr Frostschäden abgebildet sein, die auf späteren Bildern nicht mehr zu lokalisieren sind. Demgegenüber geben spätere Bilder häufig Hinweise auf das Wasserhaltevermögen von Böden, da sie Trockenstress abbilden können.

In den vorliegenden Untersuchungen sollten Aussagen über die räumliche und zeitliche Variabilität von spektralen Signaturen getroffen werden, wobei sich, aus oben genannten Gründen, die Vergleiche auf Aufnahmen von gleichen Kulturen zu gleichen Terminen auf verschiedenen Schlägen (Kap. 3.3.1), einzelnen Kulturen während des Vegetationsverlaufes (Kap. 3.3.2) und die Bestimmung von signifikanten Zusammenhängen zwischen Bildklassen und Rasterbeprobungen zu verschiedenen Zeitpunkten (Kap. 3.3.3) beschränkten.

Der Vergleich einer Kultur (Wintergerste), in verschiedenen Wachstumsstadien abgebildet, wurde in Kapitel 3.3.1 vorgenommen. Demnach wurde der größte Anteil (79 %) signifikanter Unterschiede zwischen den Bildklassen und den Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit bei den Bildern festgestellt, die während des Schossens der Wintergerste am 15.05.2000 aufgezeichnet wurden (Abb. 3-11, Kap. 3.3.1). Ein fast ebenso hoher Anteil (74 %) wurde bei den Aufnahmen vom 19.10.1999 ermittelt (Abb. 3-11, Kap. 3.3.1). Bei letzteren Bildern ist zu bedenken, dass noch keine vollständige Bodendeckung durch die Wintergerste erfolgt war und sich somit auch das Reflexionsverhalten des Bodens stärker in den Aufnahmen widerspiegelt. Zusammenfassen bleibt festzuhalten, dass sich im Laufe der Vegetationsperiode das Verhältnis zwischen signifikanten Klassenunterschieden und Bodenparametern sowie Ertragsdaten verschiebt. Stellt sich zu Beginn der Vegetationsperiode noch ein höherer Prozentsatz Signifikanzen für die Bodenparameter ein (19.10.1999 und 10.04.2000), so wurde mit Annäherung an den Erntetermin ein größerer Anteil Signifikanzen zu den Ertragsdaten ermittelt. Wie die Abbildungen 3-11 (Kap. 3.3.1) und auch 3-5 (Kap. 3.2, alle Flugtermine, Vegetations- und Bodenbilder) verdeutlichen, eigneten sich Aufnahmetermine im Mai am besten zur Erfassung der räumlichen Variabilität der untersuchten Bodenparameter und Erträge. Eine generelle Empfehlung für einen günstigen Befliegungszeitpunkt ist daraus aber nicht abzuleiten, da sich bei Fruchtfolgen mit anderen Kulturen (Raps, Kartoffeln) andere

Termine als besser für die Aufzeichnung von Variabilität eigenen können. Die von GRENZDÖRFFER (1999) mitgeteilten geeigneten Zeiträume zur Erfassung von Heterogenitäten zeigen ebenfalls, dass im Mai die größte Zahl reflexionsbeeinflussender Faktoren zu erwarten ist.

Der Einfluss von Niederschlagsverläufen wurde beim Vergleich der beiden Abbildungen der Wintergerste auf dem Gr. Fuchsberg vom 21.07.1996 und dem 13.07.1998 deutlich. Beide Bilder wiesen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bildklassen und den Bodenparametern auf. Jedoch wurden zu fünf der sechs Ertragskarten signifikante Unterschiede zu den Bildklassen ermittelt. Die Ausnahme bildete das Jahr 1998. Obwohl eines der Bilder kurz vor der Ernte 1998 aufgezeichnet wurde, konnte keine Signifikanz zwischen dem Bild und den Ertragsdaten festgestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass auch in diesem Fall die hohen Juniniederschläge 1998 (Abb. 2-6 und Kap. 4.2.3) zu einer Beeinflussung der spektralen Signaturen des Bildes führte, so dass zwischen Ertragskarte und den Reflexionseigenschaften keine signifikanten Zusammenhänge festgestellt werden konnten.

In Kapitel 3.3.2 wurde die Konstanz der Beziehungen zwischen spektralen Signaturen und Boden- und Bestandesparametern im Verlauf einer Vegetationsperiode geprüft. Betrachtet man die Witterungsverhältnisse in Mitteleuropa und die daraus resultierenden Probleme bei der Durchführung von Befliegungen, bzw. die Wolkenbedeckung von Satellitenbildern, wird deutlich, dass über längere Zeiträume konstante Reflexionseigenschaften ein großer Vorteil für den Einsatz von spektralen Signaturen zur Erfassung von räumlicher Variabilität darstellen würden. Die in Tabelle 3-4 (Kap. 3.3.2) vorgestellten Ergebnisse zeigen allerdings deutlich die am Anfang dieses Kapitels erwähnte Musteränderung von Vegetationsdecken im Verlauf einer Vegetationsperiode. Um Aussagen über die Geschwindigkeit von Musteränderungen zu treffen, wäre es notwendig, spektrale Signaturen in kurzen Zeitintervallen (1-2 Tage) aufzuzeichnen, was im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war und selbst bei ausreichenden finanziellen Ressourcen aufgrund der Wetterbedingungen nicht durchzuführen gewesen wäre. In der Zukunft könnte dieses Problem durch den Einsatz von stationären online Systemen zur Bestandesbeobachtung, wie z.B. LASSIE, gelöst werden (SCHNUG et al., 2000).

Bei der Auswahl der MPZ anhand von klassifizierten Luftbildern war daher zu berücksichtigen, diese möglichst zentral innerhalb einer Klasse zu positionieren, da es sich bei den Klassengrenzen wie oben erläutert nicht um klar definierte und feststehende Grenzen handelt.

In Kapitel 3.3.3 wurde untersucht, ob es durch die zunehmende Zeitdifferenz zwischen der Rasterbeprobung 1995 und den aufgezeichneten Luftbildern zu einem zeitabhängigen negativen Effekt kommt. Wie in Abbildung 3-14 (Kap. 3.3.3) deutlich zu sehen ist, nimmt der Anteil Signifikanzen mit zunehmender zeitlicher Entfernung zwischen dem Beprobungstermin 1995 und den Luftbildern zu. Erneut stellt sich der Aufnahmetermine im Mai als der Termin mit dem größten Anteil signifikanter Zusammenhänge heraus. Dies legt die Schlussfolgerung nahe, dass für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Bodenparameter der Zeitpunkt der Aufnahme im Vegetationsverlauf entscheidender, als die Zeitdifferenz zwischen Luftaufnahme und Beprobung war. Dies wiederum bedeutet, dass auch ältere Luftaufnahmen durchaus relevante Heterogenitäten eines Schlages abbilden können.

Letztendlich bestätigte dies auch der zeitliche Vergleich von signifikanten Zusammenhängen für die beiden 1995 und 1998 beprobten Schläge. Durch die zwei Beprobungstermine für diese Schläge lagen Luftbilder vor, die sowohl vor, als auch nach der Beprobung aufgezeichnet wurden (Tab. 3-6, Kap. 3.3.3). Auch diese Untersuchung zeigte keine Tendenzen in Bezug auf die Zeitdifferenz zwischen der Luftaufnahme und der Beprobung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei den vorliegenden Untersuchungen zwar eine zeitliche Differenz zwischen der Rasterbeprobung 1995 und den Befliegungen von maximal fünf Jahren liegt, diese aber aufgrund der ausgewählten lang- bzw. mittelfristig stabilen Bodenparameter keine Auswirkungen auf die Ergebnisse hatte.

Um zu Aussagen über den maximalen Zeitunterschied zwischen Luftaufnahme und Beprobung in Abhängigkeit des untersuchten Bodenparameters zu gelangen, wäre es notwendig größere Zeiträume zu betrachten, was im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war.

4.4 Monitorpedozellen zur Erfassung der räumlichen Variabilität

Für die Durchführung von variablen Maßnahmen im Feld ist eine effiziente Erfassung von räumlicher Variabilität notwendig. Rasterbeprobungen zur Erfassung der räumlichen Variabilität werden aufgrund des hohen Aufwandes in Frage gestellt. Aus ökonomischer Sicht sind Rasterweiten unter 100 m für einen landwirtschaftlichen Betrieb nicht tragbar. Außerdem können durch Rasterbeprobungen unterschiedlich stark auftretende Heterogenitäten nur bedingt erfasst werden (GRIFFIN, 1999). So wurden in den letzten Jahren verschiedenste Ansätze und Versuche zur kostengünstigen Variabilitätserfassung beschrieben. Die Versuche reichen von auf Fahrzeugen montierten Systemen zur Erfassung von z.B. geophysikalischen Merkmalen

(TYNDALE-BISCOE et al., 1998; LÜCK und EISENREICH, 1999) bis zur Definition von Bewirtschaftungseinheiten durch den Landwirt (FLEMING et al., 1999).

Das von SCHNUG et al. (1994 und 1998), POCKNEE et al. (1996), MULLA (1997) und HANEKLAUS et al. (2000a) beschriebene Verfahren des Directed-Sampling zur effizienten Erfassung von räumlicher Variabilität wurde durch die Festlegung von MPZ erweitert und mit drei verschiedenen Ansätzen auf dem Versuchsbetrieb Mariensee untersucht (Kap. 3.4). Die Festlegung der MPZ wurde nach den in Kapitel 2.6.2, 2.6.3 und 2.6.4 beschriebenen Verfahren manuell vorgenommen. Bei einer Automatisierung der vorgestellten Verfahren, wäre es notwendig auch die MPZ automatisch zu bestimmen. Dieses würde einige weitere Schritte zur Datenglättung erfordern, wie sie z.B. durch ‚Blow-shrink-Methoden‘ oder durch Tiefpassfilter ermöglicht werden, bevor eine automatische Zentroidbestimmung erfolgen kann (BARTELME, 2000). Mehrere Kriterien müssten erfüllt sein, bevor ein Zentroid festgelegt wird. Generell sollten pro Klasse drei bis fünf MPZ festgelegt werden. Über ‚Wenn-Dann-Bedingungen‘ muss sichergestellt werden, dass den größten Flächen ein Zentroid (MPZ) zugewiesen wird. Ebenso muss eine maximale Klassengröße (Flächenanteil) bestimmt werden, für den MPZ festgelegt werden. Auch muss berücksichtigt werden, dass Klassen mit großen Flächenanteilen die sich auf wenige Flächen beschränken, evtl. mehr als eine MPZ pro Fläche zugewiesen werden muss. Eine Automatisierung der Prozesse ist möglich, war im Rahmen dieser Arbeit aber nicht vorgesehen.

4.4.1 Fernerkundungsdaten

Generell wird dem Einsatz von Fernerkundungsdaten zur Erfassung von räumlicher Variabilität für Precision Agriculture ein hoher Stellenwert eingeräumt (ANONYM, 1997). Verschiedene Berichte anderer Autoren zur Nutzung von Fernerkundungsdaten beurteilten den Fernerkundungseinsatz für die Steuerung von Probenahmen zur Identifizierung von im Reflexionsverhalten unterschiedlichen Stellen im Feld als gut. So legten YANG und ANDERSON (1996) Bearbeitungsgebiete innerhalb eines Hirsefeldes fest, TAYLOR et al. (1997) beprobte Transekte, nachdem er Pflanzenvariabilität aufzeichnete, und quantifizierte damit Stickstoffgaben. MORAGHAN et al. (2000) nutzte das Reflexionsverhalten der Vorfrucht Zuckerrübe zur Ableitung der Stickstoffversorgung eines Weizenfeldes und STEPHENS et al. (2000) ermittelten den Nematodenbefall eines Kartoffelfeldes.

Eigene Ergebnisse aus der Verschneidung von unüberwacht klassifizierten Luftbildern und Bodendaten der Rasterbeprobung (Kap. 3.2 und 4.2) ergaben in über 50 % der Fälle einen Zusammenhang zwischen Bildklassen und untersuchten Bodenparametern sowie Erträgen.

Daher kann angenommen werden, dass sich MPZ anhand von klassifizierten Luftbildern eignen, kleinräumige Heterogenitäten von lang- und mittelfristigen Bodenparametern sowie von Pflanzeninhaltsstoffen zu erfassen.

Für drei der Versuchsflächen in Mariensee wurden MPZ anhand von unüberwacht klassifizierten Luftbildern bestimmt und geokodierte Probenahmen an den entsprechenden Stellen durchgeführt (Kap. 3.4.1). Die Ergebnisse zeigten, dass ein größerer Anteil signifikanter Zusammenhänge zwischen den Bildklassen und den untersuchten Pflanzenparametern ermittelt wurde als zu den Bodenparametern. Dieses Ergebnis überraschte nicht, da sich im Reflexionsverhalten der Pflanzen, alle das Wachstum und Aussehen beeinflussenden Faktoren, und nicht nur die Bodeneigenschaften des Standortes, widerspiegeln.

An den Ergebnissen des Schlags Moorkamp wird deutlich, dass sofern Mangelsymptome im Bestand vorhanden sind, diese durch die ausgewählten MPZ aufgezeigt werden können. Problematisch erwies sich die Erkenntnis, dass aber gerade in diesem Fall, das zur Ableitung verwendete Luftbild keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bildklassen und den Mg-Gehalten im Boden und in der Pflanze aufwies. Somit wäre diese Klassifizierung nicht zur Ableitung von Equifertilen und damit zur Durchführung von variablen Düngemaßnahmen geeignet. Allerdings zeigte sich, dass die festgelegten MPZ geeignet waren, zusammen mit aktuellen Luftbildern und Analysewerten Equifertilen abzuleiten und damit auch zur Umsetzung für variable Maßnahmen während der Vegetationsperiode eingesetzt werden könnten.

Dies ist als positiv zu bewerten, da nach den Untersuchungen zur Raumstabilität in Kapitel 3.3 und 4.3 nicht davon ausgegangen werden konnte, raumstabile Muster über längere Zeiträume zu klassifizieren. Da das Konzept der Beprobung nach MPZ vorsieht, über lange Zeiträume wiederholt Beprobungen durchzuführen, um Veränderungen im Schlag verfolgen zu können, zeigt sich an den Ergebnissen, dass die gewählten Positionen durchaus die Variabilität des Schlags erfasste. Bei Betrachtung der deskriptiven Statistiken ergab sich, dass durch die Auswahl der MPZ eine große Spannweite an Nährstoffgehalten erfasst wurde. Die Umsetzung der analysierten Werte in Maßnahmen im Feld konnte anhand dieser allerdings ohne weitere aktuelle Luftbilder nicht automatisiert werden.

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen war, dass auch bei ausreichender Nährstoffversorgung von Pflanzen signifikante Zusammenhänge zwischen Bildklassen und Boden- sowie Pflanzenparametern ermittelt wurden. Dies zeigt, dass andere Faktoren als die

Nährstoffversorgung ertragswirksam wurden und betont die Notwendigkeit, Ursachen für Unterschiede der spektralen Signaturen zu ermitteln, bevor die Ergebnisse in variable Düngungsmaßnahmen umgesetzt werden.

Aufgrund der Musteränderungen sowohl vom Bestand während der Vegetationsperiode, als auch von Bodenbildern, stellt sich die Frage, ob sich zur Ableitung von MPZ andere, stabiler zu klassifizierende Parameter besser eignen. Ein solcher Parameter wäre das Gelände, das weder zeit- noch witterungsabhängig ist und einen starken Einfluss auf die Bodenparameter und damit auch auf die Bestände hat.

4.4.2 Ertragskarten

Ertragskarten sind das Ergebnis aller ertragsbeeinflussenden Faktoren einer Vegetationsperiode und können zur Ableitung von Equifertilenkarten herangezogen werden. Sie sind also das Ergebnis aller Einflüsse auf das Wachstum des Bestandes, bedingt u. a. durch Änderung der verfügbaren Nährstoffgehalte, Wasserhaltevermögen des Bodens oder die Nährstoffaufnahme der Pflanze. Hinzu kommen biotische und abiotische Faktoren wie Schädlingsbefall, Sorte etc. Aus diesem Grund konnte davon ausgegangen werden, dass Ertragskarten, insbesondere mehrjährige Ertragskarten, eine gute Basis für die Ableitung von MPZ darstellen. In Kapitel 2.4 wurde die Ertragsgewinnung und Ertragsbereinigung beschrieben. Weitgehend unberücksichtigt blieb bei der Datenbereinigung die Problematik der ‚wahren Positionsaufzeichnung‘ während des Mähdrusches (PANTEN et al., 2001). So kommt es zu einer räumlichen Unschärfe der Lage der Equifertilen und damit auch der MPZ.

Zweijährige Ergebnisse, auf relativen Ertragskarten basierender MPZ, für drei Schläge des Versuchsbetriebes lagen vor (Kap. 3.4.2) und werden in diesem Kapitel diskutiert. Die deskriptiven Statistiken befinden sich in den Tabellen A9, A10, A11 und A12 im Anhang, die Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalysen zwischen den ermittelten Boden- und Pflanzenparametern und den Ertragsklassen in den Tabellen 3-11, 3-12 und 3-13 in Kapitel 3.4.2.

Auffällig an den Ergebnissen der einfaktoriellen Varianzanalyse ist, ebenso wie bei den MPZ nach Fernerkundungsdaten, dass besonders viele signifikante Zusammenhänge zwischen den Ertragsklassen und den Pflanzeninhaltsstoffen der Korn- und Strohproben ermittelt wurden. Dieses Ergebnis zeigte sich auf allen drei Beispielschlägen, unabhängig ob die MPZ anhand von drei Ertragskarten (Schlag 2), von einer Ertragskarte (Schlag 7) oder von vier

Ertragskarten und einem Luftbild (Großer Fuchsberg) abgeleitet wurden. So wird deutlich, dass die Auswahl von MPZ auch auf Basis einzelner Ertragskarten möglich ist, wenn davon ausgegangen werden kann, dass es sich um eine ‚typische‘, dem Jahresmittel entsprechende Ertragskarte handelt. Unter diesen Voraussetzungen können die Aussagen von SWINDELL (1997), dass nur mehrjährige Ertragskarten das Ertragspotenzial eines Feldes widerspiegeln, nicht bestätigt werden. Ein entscheidender Einfluss auf das Ertragsbild sind wiederum die Witterungsverhältnisse, was erneut zu dem Schluss führt, dass es vorteilhaft wäre, MPZ von einem witterungsunabhängigen Parameter wie z.B. einem Digitalen Geländemodell abzuleiten. Dadurch würden auch die Ungenauigkeiten bei der Positionierung während der Ertragsaufzeichnung bedeutungslos.

Kritisch zu berücksichtigen beim obigen Vergleich sind die voneinander abweichenden Anzahlen von MPZ. So flossen in die Berechnungen der Signifikanzen für Schlag 2 (13,9 ha) nur 14 MPZ ein, für Schlag 7 (11,7 ha) aber 28 MPZ ein und beim Gr. Fuchsberg (7,9 ha) wurden 1999 33 MPZ und 2000 16 MPZ berücksichtigt. Vergleicht man die Ertragsstruktur der Relativertragskarten für Schlag 2 und Schlag 7 (Abb. 3-18 und 3-19) zeigt sich, dass bei mehrjährigen relativen Ertragskarten eine Glättung stattfindet, die eine bessere Positionierung der MPZ erlaubte. Die unruhige Ertragsstruktur von Schlag 7 in der einjährigen Ertragskarte wurde durch ein erhöhtes Probenvolumen ausgeglichen. Die höhere Beprobungsdichte im Jahre 1999 auf dem Gr. Fuchsberg lässt sich durch die Verwendung der Daten zur Ertragskartierung erklären. An diesem Beispiel wird aber auch deutlich, dass eine Reduzierung der Probenpunkte problemlos mit Hilfe der gewonnenen Information aus Analysen sowie weiteren Ertragskarten oder Fernerkundungsdaten möglich war, was durch den Vergleich der analysierten Bodenparameter, insbesondere der Spannweiten zwischen den Minima und Maxima des jeweiligen Nährstoffes deutlich wird.

Das Beispiel des Gr. Fuchsberg zeigt außerdem eine Anzahl signifikanter Zusammenhänge zu den Bodenparametern, die zumindest teilweise auch reproduzierbare Ergebnisse über mehrere Probenahmen lieferten. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass es sinnvoller erscheint, zu Beginn eine größere Anzahl MPZ zu definieren, die dann nach den ersten Untersuchungsergebnissen entsprechend reduziert werden.

In Anbetracht des von NISSEN und SÖDERSTRÖM (1999) durchgeführten Vergleiches von Ertragskartierungssystemen sollte bei der Zusammenfassung von Einzelertragskarten zu mehrjährigen relativen Ertragskarten darauf geachtet werden, dass die Einzelertragskarten aus dem gleichen Ertragskartierungssystem stammen.

4.4.3 Digitale Geländemodelle

Der Einfluss von Geländemerkmale wie z.B. Hangneigung, Wölbung, Exposition und Hanglänge auf die Variabilität und Verteilung von Nährstoffen und anderen Bodenparametern ist allgemein und seit langem bekannt (KUGLER, 1974). Durch die Notwendigkeit, räumliche Variabilität für Precision Agriculture Maßnahmen zu erfassen, gewinnen Informationen aus Geländeanalysen eine neue Bedeutung. Die Erstellung von hochauflösenden DGM ist technisch durch den Einsatz von ‚real time kinematic GPS (RTK-DGPS)‘ kein Problem und wird in naher Zukunft auch kostengünstig möglich sein (GEBBERS und SCHMIDT, 1999). Daten aus DGM werden seit vielen Jahren für verschiedenste Fragestellungen genutzt und z.B. für Erosionsmodellierungen eingesetzt. Wie eine Vielzahl von Publikationen der letzten Jahre zeigt, wird zunehmend über die Einsatzmöglichkeit von DGM im Bereich Precision Agriculture nachgedacht. So berichteten NOLAN et al. (1998) und PENNOCK et al. (1998) über die Verwendung von Geländeklassen zur variablen N- und P-Düngung. TIMLIN et al. (1998) beschreibt Zusammenhänge zwischen Geländeklassen und Maiseerträgen, während WILSON et al. (1998) DGM verschiedener Rasterweiten und die damit verbundenen Probleme bei Geländeanalysen vergleicht. Einen umfassenden Überblick über Einsatzmöglichkeiten von DGM für Precision Agriculture geben NUGTEREN und ROBERT (1999), die unter anderem die Möglichkeit der gezielten Probenahme und die Einteilung von Schlägen in Bearbeitungseinheiten erwähnen. Da für den Versuchsbetrieb Mariensee ein DGM vorlag, soll in dieser Arbeit die Nutzung von Fernerkundungsdaten, Ertragsdaten und Geländeparametern vergleichend diskutiert werden.

Die Ergebnisse der Ableitung von MPZ nach der Durchführung einer Geländeanalyse mittels des ARC/INFO TIN Modells (ANONYM, 1991) wurden in Kapitel 3.4.3 dargestellt. Die Ergebnisse der Verschneidung von Geländeparametern für zwölf der 17 Versuchsflächen in Mariensee mit den Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit der Rasterbeprobung von 1995 ließen darauf hoffen, dass die Festlegung von MPZ anhand der Geländemerkmale signifikante Aussagen über die Variabilität innerhalb eines Schrages zulassen. Die Probenahme auf drei Schlägen mit zwölf MPZ auf Schlag 7 (11,7 ha), 20 MPZ auf Schlag 5 + 6 + Kultur II (24,0 ha) und 25 MPZ auf Stall 7 (12,2 ha) erfolgte zu Vegetationsbeginn 1999. Die in Tabelle A14 aufgeführte deskriptive Statistik zeigt, dass ein hohes Maß an Variabilität erfasst wurde. Die Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse in Tabelle 3-14 spiegeln den unterschiedlichen Erfolg der Festlegung von MPZ nach Geländeparametern für den Standort Mariensee wider. Beim Schlag 5 + 6 + Kultur II für den die Bodenparameter organische Substanz, N_{\min} , N_{ges} und

Mg signifikante Unterschiede zwischen den Geländeklassen aufweisen, scheinen die 20 ausgewählten MPZ die Variabilität des Schlages gut zu repräsentieren. Die zwölf MPZ von Schlag 7, welcher direkt neben Schlag 5 + 6 + Kultur II liegt, geben allerdings keine signifikanten Unterschiede zwischen den Geländeklassen wieder. Die 25 MPZ des Schlages Stall 7 wiesen zumindest signifikante Unterschiede zwischen den Geländeklassen für die Bodenparameter N_{ges} und Mg auf, obwohl die absoluten Höhenunterschiede und Neigungen im Leinetal wesentlich geringer sind als bei den meisten Schlägen der Nienburger Geest. Inwieweit die Anzahl der pro Schlag festgelegten MPZ einen Einfluss auf dieses Ergebnis hatte, bleibt unklar. Es erschien jedoch auch bei diesem Verfahren sinnvoll, zu Beginn eine höhere Anzahl MPZ zu definieren und diese dann später zu minimieren.

Da die eingeschränkten Möglichkeiten des ARC/INFO TIN Modells zur Geländeanalyse bekannt waren, wurde die Möglichkeit genutzt, für drei Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee eine Geländeanalyse mit dem LandMapR™ Programm (MACMILLAN et al., 2000) zu berechnen. Dieses speziell für Precision Agriculture entwickelte Programm führt eine Geländeklassifikation in maximal 15 Klassen unter Anwendung von Fuzzy-Regeln durch. Vergleicht man die Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (Tab. 3-15) für die drei Schläge mit den Ergebnissen für die Geländeklassen nach dem ARC/INFO TIN Modell (Tab. A13), so stellt sich heraus, dass sich für die Klassen des LandMapR™ Programms zu fast allen untersuchten Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit signifikante Unterschiede zwischen den Geländeklassen ergaben. Prozentual ausgedrückt weisen 96 % der untersuchten Bodenmerkmale der Rasterbeprobung von 1995 auf insgesamt drei Schlägen signifikante Unterschiede zu den Geländeklassen des LandMapR™ Programms auf, aber nur 58 % zu den Klassen des ARC/INFO TIN Modells. Es ist daher anzunehmen, dass sich Geländeklassen des LandMapR™ Programms besser zur Auswahl und Beprobung von MPZ eignen. Damit einhergehen dürfte eine Reduzierung der Klassenzahl für die Festlegung von MPZ. MACMILLAN et al. (2000) unterbreitet Vorschläge zur sinnvollen Zusammenfassung der mit LandMapR™ erzeugten Geländeklassen in 3 ‚Oberklassen‘ entsprechend der zu erwartenden Wasserflüsse im Gelände. Bei Anwendung des Programms stellte sich außerdem heraus, dass nicht für jeden Schlag eine Klassifikation in alle 15 möglichen Klassen erfolgte.

4.4.4 Vergleich der Methoden

Bei einem Vergleich der Fernerkundungsmethode mit der Ertragsmethode fällt auf, dass für Schlag 2 etwa die Hälfte aller Signifikanzen zwischen Boden- und Pflanzenparametern und den

Klasseneinteilungen sowohl mit der Fernerkundungsmethode, als auch mit der Ertragsmethode ermittelt wurden.

Obwohl zur Definition der MPZ nach Ertragskarten für Schlag 7 nur eine Ertragskarte berücksichtigt wurde, konnte besonders in Bezug auf die Ertragsklassen von 2000 ein recht hoher Prozentsatz (46 %) Signifikanzen in Bezug auf alle untersuchten Parameter festgestellt werden (Tab. 3-12, Kap. 3.4.2). Im Gegenteil dazu wurden zwar ebenfalls 48 % Signifikanzen zu den Bildklassen des Bildes vom 21.07.1996 ermittelt, aber zu den Bildern aus dem Jahre 2000 nur 10 % bzw. 18 % (Tab. 3-10, Kap. 3.4.1). Betrachtet man die Ergebnisse der MPZ nach Geländemerkmale für Schlag 7, so fällt im Gegensatz zu den anderen beiden Schlägen auf, dass zu keinem der untersuchten Bodenparameter signifikante Zusammenhänge zu den Geländeklassen ermittelt wurden. Es zeigte sich also, dass gerade für Schlag 7, der deutliche Reliefmerkmale aufweist, die Methode der Geländeanalyse mit dem ARC/INFO TIN Modell keine hinreichend genauen Ergebnisse liefert. Zur Ursachenforschung müsste verschiedenen Fragestellungen nachgegangen werden. Zum einen, ob die geringe Probenzahl Auswirkungen auf das Ergebnis hatte, zum anderen, ob sich Klassifikationen mit dem LandMapR™ besser für die Ableitung von MPZ eignen, wovon aufgrund der Ergebnisse der Rasterbeprobungen auszugehen ist.

Eine endgültige Beurteilung, welches Verfahren besser geeignet ist, die räumliche Variabilität innerhalb eines Schlages zu erfassen, ist daraus jedoch aufgrund der unterschiedlichen Probenanzahl und der Versuchsanlage nicht möglich. Allerdings besitzen alle drei Verfahren ein hohes Potenzial, die Variabilität reflektierenden Stellen im Schlag zu lokalisieren und sie damit zur Ursachenforschung nutzen zu können. Am Beispiel Gr. Fuchsberg wurde gezeigt, dass auch eine Kombination zweier Verfahren möglich ist und gute Ergebnisse liefern kann. Speziell unter dem Gesichtspunkt der reduzierten Anzahl von Probenahmepunkten scheint es durchaus gelungen zu sein, die Stellen mit den größten Extremen innerhalb des Feldes beibehalten zu haben.

Betrachtet man die auftretenden Probleme der Musteränderung bei spektralen Signaturen im Zeitverlauf, der Positionierung bei der Ertragsaufzeichnung sowie den Einfluss der Witterung auf das Ertragsbild und die Reflexionswerte, ist abzuwägen, ob ein anderes Verfahren zur Ableitung von MPZ genauere Ergebnisse liefert.

Die Verwendung von Geländeanalysen mit oder ohne Fernerkundungsdaten bzw. Ertragsdaten zur Auswahl von MPZ erscheint hierbei ein vielversprechender Ansatz. Zur Bestimmung von Geländeparametern erwies sich dabei das speziell für Precision Agriculture entwickelte Programm LandMapR™ als besseres Analysewerkzeug.

5 Zusammenfassung

Fernerkundung ermöglicht die effiziente Beschaffung von Information über große Räume. Dies ist insbesondere im ‚Precision Agriculture‘ gefragt, wo u.a. die räumliche Variabilität von Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit zur besseren Steuerung der Verteilung von Düngernährstoffen auf landwirtschaftlichen Böden herangezogen werden soll.

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob sich spektrale Signaturen aus Luftbildern zur Lokalisierung der räumlichen Variabilität von Böden und Beständen, und damit als Hilfsmittel zur Informationsbeschaffung für Precision Agriculture, eignen.

Ein besonders erfolgversprechendes Anwendungsfeld für Fernerkundung im Precision Agriculture ist das ‚Directed-Sampling‘-Verfahren, bei dem mit Informationen über räumliche Variabilität die Effizienz der Probenahmen von Böden und Pflanzen erhöht wird.

Im Rahmen der Arbeit wurden Beziehungen zwischen spektralen Signaturen und physikalischen sowie chemischen Bodeneigenschaften sowie die Veränderungen der räumlichen Variabilität spektraler Signaturen im Zeitverlauf untersucht. Geprüft wurde auch, ob sich aus Bildinformationen ohne Geländebeobachtungen (= ground truth) produktionstechnische und ökologisch relevante Informationen ableiten lassen. An Fallbeispielen wurde die Definition von Monitorpedozellen auf der Basis von spektralen Signaturen und Ertragsdaten sowie von Geländeparametern verifiziert und bewertet.

Die Untersuchungen wurden von 1995 bis 2000 auf dem Versuchsbetrieb Mariensee des Institutes für Tierzucht und Tierverhalten der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft durchgeführt und erbrachten folgende Ergebnisse:

1. Die aus Luftbildern durch unüberwachte Klassifikationen bestimmten Boden- und Bestandesunterschiede wiesen in mehr als 50 % der Fälle auf signifikante Unterschiede in Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit hin.
2. Boden- und Vegetationsbilder zeigen annähernd gleich häufig signifikante Beziehungen zwischen spektralen Signaturen und Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit auf.
3. Signifikante Beziehungen zwischen spektralen Signaturen und Bodenparametern wurden im Leinetal (Auenboden) geringfügig häufiger als in der Nienburger Geest (Braunerde) gefunden.
4. Ohne Geländebeobachtungen sind keine Rückschlüsse auf Kausalitäten spektraler Signaturen möglich.

5. Spektrale Signaturen einer Kulturart korrelierten entsprechend des Aufnahmezeitpunktes unterschiedlich stark mit Boden- und Bestandesparametern. Die größte Anzahl varianzanalytisch gesicherter Unterschiede wurde im Mai ermittelt. Als Grund hierfür wird die in diesem Zeitraum stärkste Wüchsigkeit der Bestände vermutet.
6. Die Muster spektraler Signaturen verhalten sich im Verlauf einer Vegetationsperiode nicht konstant und sind, ebenso wie Ertragsmuster, stark witterungsabhängig.
7. Mit Annäherung des Aufnahme- an den Erntetermin erhöhte sich der Anteil Signifikanzen zwischen Bildklassen und Erträgen.
8. Die Häufigkeit signifikanter Beziehungen zwischen spektralen Signaturen und Boden- sowie Bestandesmerkmalen war unabhängig vom Zeitraum zwischen Beprobung und Aufnahme.
9. Monitorpedozellen abgeleitet aus klassifizierten Luftbildern oder aus relativen Ertragskarten erfassten die gesamte Bandbreite an Nährstoffgehalten in Böden und Pflanzen.
10. Monitorpedozellen spiegelten Unterschiede von Pflanzenparametern besser wider als von Bodenparametern.
11. Sollen anhand spektraler Signaturen von Pflanzenbeständen während der Vegetationsperiode Handlungsanweisungen für die Bestandesführung gegeben werden, ist es aufgrund der permanenten Musteränderungen im Schlag notwendig, diese in kürzesten Abständen aufzuzeichnen. Möglichkeiten hierzu bieten nur unterhalb der Wolkengrenze operierende stationäre online Fernerkundungssysteme.
12. Einjährige Ertragsdaten eignen sich ebenfalls zur Ableitung von Monitorpedozellen, wenn die Ertragsdaten das übliche Ertragsbild des Schlages widerspiegeln
13. Die Ableitung von Monitorpedozellen aus Geländeparametern erscheint eine stabilere Grundlage als die Aufzeichnung von zeit- und witterungsabhängigen Boden- und Bestandesmerkmalen zu sein. Hierbei bestehen jedoch große Unterschiede hinsichtlich der Qualität der Ergebnisse verschiedener Systeme zur Berechnung von Geländeparametern aus Digitalen Geländemodellen.

Fernerkundung bietet ein großes Potenzial für die Beschaffung raumbezogener Informationen von Böden und Pflanzenbeständen. Entscheidend für die Verwertbarkeit dieser Informationen zur Steuerung raumvariabler Systeme im Precision Agriculture wird jedoch sein, ob die zeitliche und räumliche Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten den Bedürfnissen landwirtschaftlicher Produktionsabläufe angepasst werden kann.

Das Konzept der Monitorpedozellen kann helfen, das Defizit der Kausalität zwischen Fernerkundungsdaten und Boden- sowie Pflanzenparametern zu beheben. Die Untersuchungen dieser Arbeit haben gezeigt, dass es von Vorteil ist, Monitorpedozellen auf der Basis von stabilen Geländeparametern aus Digitalen Geländemodellen auszuwählen und das in der Entwicklung von Verfahren zur Auswahl von Monitorpedozellen ein hohes Potenzial steckt. Hier eröffnet sich ein erfolgversprechendes Arbeitsgebiet für zukünftige Forschung im Bereich von Precision Agriculture.

Remote sensing of spatial variable soil and crop features

Summary

Remote sensing is an efficient tool for gathering information about large areas. In precision agriculture, information about the spatial variability of soil and plant features is required in order to develop strategies for variable rate applications of fertilisers.

It was the aim of the presented investigations to evaluate whether the patterns in remote sensed images reflect the spatial variability of soil and plant characteristics and if they are a suitable source of information for precision agriculture. A particularly promising field of the application of remote sensing techniques is directed sampling, a strategy to increase the efficiency of sampling campaigns.

The presented investigations deal with relationships between patterns in remote sensed images and physical as well as chemical soil properties. Additionally, the temporal variation of the spatial variability was examined and the possibility to transform reflectance characteristics into agronomic and ecological data without accompanying ground evidence was studied. Last but not least the suitability of remotely sensed images, classified yield data and geomorphology to define so called 'monitor pedo cells' was compared.

The investigations were carried out on the experimental station of the Institute for Animal Science and Animal Husbandry of the Federal Agricultural Research Centre in Mariensee during 1995 to 2000. The research yielded the following main results:

1. Unsupervised classified aerial images revealed in more than 50 % of all cases significant differences of soil parameters.
2. Soil and vegetation images yielded approximately the same number of significant relationships between reflectance patterns and soil parameters.
3. Significant relationships between patterns in remote sensed images and soil features were determined more frequently on soils (fluvisols) in the river Leine valley than on soils (cambisols) of the Nienburger Geest.
4. Causal interpretation of patterns in remote sensed images was not found to be possible without ground truth data.

5. Temporal differences were determined with a view to evaluating the relationship between patterns in remote sensed images and soil or plant parameters. In May the highest number of significant differences was found, most likely due to highest growth rates during this time of the vegetation period.
6. Patterns in remote sensed images change during the vegetation period and annually. Like the spatial patterns of crop yield, they depend very much on climatic conditions.
7. The closer images were taken to harvest, the more often significant relationships between patterns in remote sensed images and yield data were found.
8. The number of significant relationships between patterns in remote sensed images and soil as well as plant parameters was independent of the time span between data acquisition.
9. Monitor pedo cells (pedons representing areas of same or similar soil features) which were defined by means of aerial images and yield maps provided information about the whole range of nutrient concentrations in soils and plants.
10. Monitor pedo cells reflected significant differences of plant parameters more consistently than those of soil features.
11. Patterns in remote sensed images changed rapidly during the vegetation period so that the direct transformation of reflectance data into application maps requires a higher frequency of aerial imagery. Only a continuous, real time operating remote sensing system beyond the cloud border would provide such option.
12. Annual yield data were also suitable for the definition of monitor pedo cells, if the data reflected long-term stable yield patterns.
13. Geomorphological data were found to be suitable for the definition of monitor pedo cells too, but the investigations also revealed great quality differences between different terrain model analysing systems.

Remote sensing has a high potential for the provision of spatial soil and plant information. The transformation of this information into agronomic spatial variable field operations for precision agriculture however, depends on the temporal and spatial availability of the data.

6 Literatur

- Afek Y, Brand A** (1998) Mosaicking of Orthorectified Aerial Images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 64 (2): 115-125
- Akin H, Siemes H** (1988) *Praktische Geostatistik: Eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 304 p, ISBN 3-540-19085-6
- Anonym** (1973) (reprint) *Aerial-Photo Interpretation in Classifying and Mapping Soils*. Washington D. C.: U. S. Government Printing Office, 89 p, Agriculture Handbook 294
- Anonym** (1987) Bestimmung von mineralischem (Nitrat-) Stickstoff in Bodenprofilen (N_{\min} -Labormethode). VDLUFA-Mitteilungen
- Anonym** (1991) *Surface Modeling with TIN: Surface Analysis and Display*. Redlands: ESRI, 276 p
- Anonym** (1994 und 1995) *Bodenkarte auf der Grundlage der Bodenschätzung 1:5000 – Blatt Nr. 3422-11 Hagen-Ost, 3422-12 Wulfelade-West, 3422-17 Mariensee-West, 3422-18 Mariensee, 3422-24 Suttorf-Nord, 3423-13 Basse und 3423-19 Basse-Scharnhorst. Umfassende Aktualisierung 1994 und 1995*. Hannover: Katasteramt Hannover
- Anonym** (1997) *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. Washington D. C.: National Academy Press, 118 p, ISBN 0-309-05893-7
- Anonym** (1998) *Düngungsrichtlinien der Landwirtschaftskammer Hannover, Referat Boden, Düngung, Beregnung*. Stand August 1998
- Anonym** (1999) *Erfassung der kleinräumigen Heterogenität: KTBL/ATB-Workshop vom 15. bis 16. Januar 1998 in Potsdam*. Münster: KTBL, 122 p, ISBN 3-7843-1993-9, KTBL Arbeitspapier 264
- Asner G P** (1998) Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment* 64: 234-253
- Atkinson P M** (1997) Selecting the Spatial Resolution of Airborne MSS Imagery for Small-Scale Agricultural Mapping. *International Journal of Remote Sensing* 18 (9): 1903-1917
- Bähr H-P, Vögtle Th** (1998) *Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung*. Heidelberg: Wichmann, 360 p, ISBN 3-87907-270-1
- Ball G H, Hall D J** (1965) *Isodata, a novel method of data analysis and pattern classification*. Technical report, Stanford Research Institute, Menlo Park, California, 73 p
- Baret F, Andrieu B, Guyot G** (1988) A Simple Model for Leaf Optical Properties in Visible and Near-Infrared: Application to the Analysis of Spectral Shifts Determinism. In: Lichtenthaler H K (ed) *Applications of Chlorophyll Fluorescence*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp 345-351
- Baret F, Fourty Th** (1997) Radiometric Estimates of Nitrogen Status of Leaves and Canopies. In: Lemaire G (ed) *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp 201-227
- Baret F, Weiss M, Troufleau D, Prevot L, Combal B** (2000) Maximum Information Exploitation for Canopy Characterisation by Remote Sensing. *Aspects of Applied Biology* 60: 71-82
- Barnes E M, Moran M S, Pinter P J, Clarke T R** (1996) Multispectral Remote sensing and Site-Specific Agriculture: Examples of Current Technology and Future Possibilities. In: Robert P C, Rust R H, Larson W E (eds) *Precision Agriculture: Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, 23-26 of June 1996*. Madison: ASA-CSSA-SSSA, pp 845-854, ISBN 0-89118-132-6
- Bartelme N** (2000) *Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 419 p, ISBN 3-540-65988-9
- Bausch W C, Duke H R, Heermann D F** (1997) Assessing and Mapping the Plant Nitrogen Status in Irrigated Corn. In: Stafford J V (ed) *Precision Agriculture '97, Part 2; Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture, Warwick, 7-10 of September 1997*. Oxford: BIOS, pp 677-685, ISBN 1-85996-136-3
- Beckett P H T, Webster R** (1971) Soil Variability: A Review. *Soils and Fertilizers* 34: 1-15

- Beverly R B** (1996) Video Image Analysis as a Nondestructive Measure of Plant Vigor for Precision Agriculture. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27 (3&4): 607-614
- BK 25** (1984) Bodenkarte von Niedersachsen 1:25000 – Blatt Nr. 3422 Neustadt am Rübenberge. Hannover (NLfB)
- BK 25** (1985) Bodenkarte von Niedersachsen 1:25000 – Blatt Nr. 3423 Otterndorf. Hannover (NLfB)
- Bonau U, Dietrichs I, Radegast M** (1988) Zur effektiven Nutzung hydroklimatischer, hydrologischer und hydrogeologischer Daten für die Luftbildinterpretation. *Wiss. Z. WPU, N-Reihe* 37 (4): 42-44
- Burrough P A** (1993) Soil variability: a late 20th century view. *Soils and Fertilizers* 56 (5): 529-562
- Cloutis E A, Connery D R, Major D J, Dover F J** (1996) Airborne Multi-Spectral Monitoring of Agricultural Crop Status: Effect of Time of Year, Crop Type and Crop Condition Parameter. *International Journal of Remote Sensing* 17 (13): 2579-2601
- Congalton R C** (1991) A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment* 37 (1): 35-46
- Cutler M E J, Curran P J** (2000) Specular and Anisotropic Reflectance Effects on the Relationship between Remotely Sensed Data and Wheat Canopy Chlorophyll Concentration. *Aspects of Applied Biology* 60: 115-122
- Dampney P M R, Froment M A, Dawson C J** (1997) The Variability of pH, and Available Phosphorus, Potassium and Magnesium in Soils within Arable Fields in England. In: Stafford J V (ed) *Precision Agriculture '97, Part 1; Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture, Warwick, 7-10 of September 1997*. Oxford: BIOS, pp 79-86, ISBN 1-85996-136-3
- Demetriades-Shah T H, Steven M D** (1988) High Spectral Resolution Indices for Monitoring Crop Growth and Chlorosis. In: *Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Aussois, France, 18-22 of January 1988*, pp 299-302
- Finck A** (1979) *Dünger und Düngung: Grundlagen, Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen*. Weinheim, New York: Chemie, 442 p, ISBN 3-527-25805-1
- Finck A** (1991) *Pflanzenernährung in Stichworten*. Berlin, Stuttgart: Ferdinand Hirt, 200 p, ISBN 3-443-03100-5
- Fleming K L, Westfall D G, Wiens D W, Rothe L E, Cipra J E, Heermann D F** (1999) Evaluating Farmer Developed Management Zone Maps for Precision Farming. In: Robert P C, Rust R H, Larson W E (eds) *Precision Agriculture, Part A; Proceedings of the 4th International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, 19-22 of July 1998*. Madison: ASA-CSSA-SSSA, pp 335-343, ISBN 0-89118-140-7
- Früchtenicht K, Heyn J, Kuhlmann H, Laurenz L, Müller S** (1993) *Pflanzenernährung und Düngung*. In: *Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau*, Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag GmbH, pp 254-295, ISBN 3-7843-2512-2
- Gebbers R, Schmidt F** (1999) DGM-Erfassung mittels RTK-DGPS und Nutzung in der Landwirtschaft. In: Bill R, Grenzdörffer G, Schmidt F (eds) *Sensorsysteme im Precision Farming; Tagungsband zum Workshop, Rostock, 27.-28. September 1999*, pp 167-184
- Gerbermann A H, Neher D D** (1979) Reflectance of Varying Mixtures of a Clay Soil and Sand. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 45: 1145-1151
- GK 25** (1973) Geologische Karte von Niedersachsen 1:25000 – Blatt Nr. 3423 Otterndorf. Hannover (NLfB)
- GK 25** (1980) Geologische Karte von Niedersachsen 1:25000 – Blatt Nr. 3422 Neustadt am Rübenberge. Hannover (NLfB)
- Gobron N, Pinty B, Verstraete M M** (1997) Theoretical Limits to the Estimation of the Leaf Area Index on the Basis of Visible and Near-Infrared Remote Sensing Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35 (6): 1438-1445
- Grenzdörffer G** (1999) Dokumentation und Analyse kleinräumiger Heterogenität mit Fernerkundung und GIS. In: *Erfassung der kleinräumigen Heterogenität; KTBL/ATB-Workshop vom 15. bis 16. Januar 1998 in Potsdam*, Münster: KTBL, pp 93-105, ISBN 3-7843-1993-9
- Grenzdörffer G J, Gebbers R I B** (2001) Seven years of yield mapping: analysis and possibilities of multi year yield mapping data. In: Grenier G, Blackmore S (eds) *Precision Agriculture '01, Part 1; Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 18-20 of June 2001*. Montpellier: agro, pp 31-36, ISBN 2-900792-13-4

- Griepentrog H-W** (1999) Ertragsermittlung im Mähdrescher. In: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität; KTBL/ATB-Workshop vom 15. bis 16. Januar 1998 in Potsdam, Münster: KTBL, pp 68-77, ISBN 3-7843-1993-9
- Griffin S J** (1999) Directed Soil Sampling as a Means of Increasing Nutrient Map Accuracy Using Complementary Precision Farming Data. In: Stafford J V (ed) Precision Agriculture '99, Part 1; Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense, 11-15 of July 1999. Sheffield: Sheffield, pp 141-149, ISBN 1-84127-042-3
- Heath W L, Haydock P P J, Wilcox A, Evans K** (2000) The Potential Use of Spectral Reflectance from the Potato Crop for Remote Sensing of Infection by Cyst Nematodes. *Aspects of Applied Biology* 60: 185-188
- Haneklaus S, Rühling I, Schröder D, Schnug E** (1997): Studies on the Variability of Soil and Crop Fertility Parameters and Yields in Different Landscapes of Northern Germany. In: Stafford J V (ed) Precision Agriculture '97, Part 2; Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture, Warwick, 7-10 of September 1997. Oxford: BIOS, pp 785-792, ISBN 1-85996-136-3
- Haneklaus S, Paulsen H M, Schröder D, Leopold U, Schnug E** (1998) Self-Surveying: A strategy for efficient mapping of the spatial variability of time constant soil parameters. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29 (11-14): 1593-1601
- Haneklaus S, Schnug E** (2000) Nachhaltige Landbewirtschaftung mittels Precision Agriculture. *Landbauforschung Völkenrode SH 212*: 171-181
- Haneklaus S, Schnug E, Panten K** (2000a) Evaluation of structural coincidences of patterns in remote sensing images and yield maps for the identification of sampling locations. *Aspects of Applied Biology* 60: 37-44
- Haneklaus S, Lilienthal H, Panten K, Haveresch E, Schnug E** (2000b) Routines for efficient yield mapping. In: Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, 16-19 of July 2000 [CD-ROM]
- Jones H G, Anderson J M, Casa R** (2000) Multispectral and Multiangular Remote Sensing of Crop Canopy Stress. *Aspects of Applied Biology* 60: 155-162
- Jordan H** (1980) Geologische Karte von Niedersachsen 1:25000 - Erläuterungen zu Blatt Nr. 3422 Neustadt am Rübenberge. Hannover: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 88 p
- Jørgensen R N, Jørgensen J R** (2001) Design of a grain sampling device for combines equipped with a differential global positioning system (DGPS) and a yield meter. In: Grenier G, Blackmore S (eds) Precision Agriculture '01, Part 2; Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 18-20 of June 2001. Montpellier: agro, pp 809-814, ISBN 2-900792-14-2
- Kraus K** (1996) Photogrammetrie: Verfeinerte Methoden und Anwendungen, Band 2. Bonn: Ferd. Dümmler, 488 p, ISBN 3-427-78653-6
- Kreft G** (1997) Mariensee – Das Klosterdorf. Hrsg.: TSV Mariensee/Wulfelade.
- Krishnan P, Alexander J D, Butler B J, Hummel J W** (1980) Reflectance Technique for Predicting Soil Organic Matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1282-1285
- Kücke M, Przemeczek E** (1982) Ein mikrobiologischer Nitratnachweis für Serienuntersuchungen an Pflanzenextrakten. *Ldw. Forsch.* 36 (1-2): 140-150
- Kugler H** (1974) Das Georelief und seine kartographische Modellierung. Dissertation B, Fakultät für Naturwissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle/Wittenberg, Halle/Saale
- Lamp J, Capelle A, Ehlert D, Jürschik P, Kloepfer F, Nordmeyer H, Schröder D, Werner A** (1999) Erfassung der kleinräumigen Heterogenität in der teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion. In: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität; KTBL/ATB-Workshop vom 15. bis 16. Januar 1998 in Potsdam, Münster: KTBL, pp 7-32, ISBN 3-7843-1993-9
- Lillesand Th M, Kiefer R W** (1994) Remote Sensing and Image Interpretation. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, 750 p, ISBN 0-471-57783-9
- Löffler E** (1994) Geographie und Fernerkundung. Stuttgart: Teubner, 251 p, ISBN 3-519-13423-3
- Lück E, Eisenreich M** (1999) Kartierung der elektrischen Leitfähigkeit zur Erfassung räumlicher Variationen von Bodenparametern. In: Bill R, Grenzdörffer G, Schmidt F (eds) Sensorsysteme im Precision Farming; Tagungsband zum Workshop, Rostock, 27.-28. September 1999. pp 109-119
- Macmillan R A, Pettapiece W W, Nolan S C, Goddard T W** (2000) A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems* 113 (1): 81-109

- McBratney A B, Pringle M J** (1997) Spatial Variability in Soil: Implications for Precision Agriculture. In: Stafford J V (ed) Precision Agriculture '97, Part 1; Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture, Warwick, 7-10 of September 1997. Oxford: BIOS, pp 3-31, ISBN 1-85996-136-3
- McBratney A B, Whelan B M, Walvoort D J J, Minasny B** (1999) A Purposive Sampling Scheme for Precision Agriculture. In: Stafford J V (ed) Precision Agriculture '99, Part 1; Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense, 11-15 of July 1999. Sheffield: Sheffield, pp 101-110, ISBN 1-84127-042-3
- Milfred C J, Kiefer R W** (1976) Analysis of Soil Variability with Repetitive Aerial Photography. Soil Sci. Soc. Am. J. 40 (4): 553-557
- Moraghan J T, Sims A, Smith L** (2000) Remote Sensing of Sugarbeet Canopies for Improved Nitrogen Fertilizer Recommendations for a Subsequent Wheat Crop. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 31 (7&8): 827-836
- Moran M S, Inoue Y, Barnes E M** (1997) Opportunities and Limitations for Image-Based Remote Sensing in Precision Crop Management. Remote Sensing of Environment 61: 319-346
- Mulders M A** (1987) Remote Sensing in Soil Science. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier, 379 p, ISBN 0-444-40882-X
- Mulla D J** (1997) Geostatistics, remote sensing and precision farming. In: Lake J V, Bock G R (eds) Precision agriculture: spatial and temporal variability of environmental quality. Chichester, New York: John Wiley & Sons, pp 100-119, ISBN 0-471-97455-2
- Murphy D P, Schnug E, Haneklaus S** (1995) Yield Mapping: A Guide to Improved Techniques and Strategies. In: Robert P C, Rust R H, Larson W E (eds) Proceedings of the 2nd International Conference on Site-Specific Management for Agricultural Systems, Minneapolis, 27-30 of March 1994. Madison: ASA-CSSA-SSSA, pp 33-47
- Myers V I, Allen W A** (1968) Electrooptical Remote Sensing Methods as Nondestructive Testing and Measuring Techniques in Agriculture. Applied Optics 7: 1819-1838
- Nissen K, Söderström M** (1999) Mapping in Precision Farming: From the Farmer's Perspective. In: Stafford J V (ed) Precision Agriculture '99, Part 2; Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense, 11-15 of July 1999. Sheffield: Sheffield, pp 655-664, ISBN 1-84127-042-3
- Noack P O, Muhr T, Demmel M** (2001) Long term studies on determination and alimation of errors occuring during the process of georeferenced yield data collection on combine harvesters. In: Grenier G, Blackmore S (eds) Precision Agriculture '01, Part 2; Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 18-20 of June 2001. Montpellier: agro, pp 833-837, ISBN 2-900792-14-2
- Nolan S C, Goddard Th W, Penney D C, Green F M** (1998) Yield Response to Nitrogen within Landscape Classes. In: Robert P C, Rust R H, Larson W E (eds) Precision Agriculture, Part A; Proceedings of the 4th International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, 19-22 of July 1998. Madison: ASA-CSSA-SSSA, pp 479-485, ISBN 0-89118-140-7
- Nugteren A A, Robert P C** (1999) Usefulness and Feasibility of High Accuracy Digital Elevation Models for Precision Management. In: Stafford J V (ed) Precision Agriculture '99, Part 2; Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense, 11-15 of July 1999. Sheffield: Sheffield, pp 561-669, ISBN 1-84127-042-3
- Obenauf S** (1987) Variabilität von Bodenfruchtbarkeitskennziffern während der Vegetationszeit im Ap sandiger Ackerböden. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 31 (3): 137-145
- Pannatier Y** (1996) Variowin: Software for Spatial Data Analysis in 2D. New York: Springer, 91 p, ISBN 0-387-94679-9
- Panten K** (1996) Extraktion von Formparametern aus einem DGM für ein Lokales Ressourcen Management im landwirtschaftlichen Bereich. Diplomarbeit. (Unveröffentlicht)
- Panten K, Haneklaus S, Schnug E** (2001) Spatial accuracy of online yield mapping. Landbauforschung Völkenrode. (In Vorbereitung)
- Pennock D J, Walley F L, Solohub M P, Hnatowich G** (1998) Yield Response of Wheat and Canola to a Topographically Based Variable Rate Fertilization Program in Saskatchewan. In: Robert P C, Rust R H, Larson W E (eds) Precision Agriculture, Part A; Proceedings of the 4th International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, 19-22 of July 1998. Madison: ASA-CSSA-SSSA, pp 797-805, ISBN 0-89118-140-7
- Planet W G** (1969-1970) Some Comments on Reflectance Measurements of Wet Soils. Remote Sensing of Environment 1: 127-129

- Pocknee S, Boydell B C, Green H M, Waters D J, Kvien C K** (1996) Directed Soil Sampling. In: Robert P C, Rust R H, Larson W E (eds) Precision Agriculture; Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, 23-26 of June 1996. Madison: ASA-CSSA-SSSA, pp 159-168, ISBN 0-89118-132-6
- Richards J A, Jia X** (1999) Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Berlin, Heidelberg: Springer, 363 p, ISBN 3-540-64860-7
- Ripple W J** (1986) Spectral Reflectance Relationships to Leaf Water Stress. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 52 (12): 1669-1675
- Rossel R A V** (2001) Development of a proximal soil sensing system for the continuous management of acid soil. Dissertation, University of Sydney
- Rühling I** (1999) Räumlich-zeitliche Variabilität von physikochemischen Bodeneigenschaften und Pflanzenmerkmalen in einer norddeutschen Landschaft. Braunschweig: Landbauforschung Völkenrode SH 205, 253 p, ISBN 3-933140-27-7
- Schachtschabel P** (1954) Das pflanzenverfügbare Magnesium im Boden und seine Bestimmung. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 67: 9-23
- Schlichting E, Blume H P** (1966) Bodenkundliches Praktikum. Berlin, Hamburg: Paul Parey, 209 p
- Schmerler J, Wartenberg G, Ehlert D, Heisig M** (1998) Wissenschaft testet in der Praxis. In: Ackerbau satellitengestützt. Berlin: Bauernzeitung, Wissen kompakt, pp 12-15, SH
- Schmidt A** (1994) ‚Low-Cost Photogrammetry‘ for Field Monitoring in Agriculture. In: Proceedings of the First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Volume 3, Strasbourg, 11-15 of September 1994. pp 346-356
- Schmidt R, Haase G** (1980) Die Heterogenität der Bodendecke und ihr Einfluss auf Bodenfruchtbarkeit, Melioration und Landeskultur. *Petermanns geogr. Mitteilungen – Gotha* 124 (1): 11-18
- Schnug E, Haneklaus S** (1992) Sulphur and light element determination in plant material by X-ray fluorescence spectroscopy. *Phyton* 32: 123-126
- Schnug E, Haneklaus S** (1996a) A rapid method for the indirect determination of the organic matter content of soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27 (5-8): 1693-1705
- Schnug E, Haneklaus S** (1996b) A rapid method for the indirect determination of the clay content by X-ray fluorescence spectroscopic analysis of rubidium in soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27 (5-8): 1707-1719
- Schnug E, Haneklaus S, Murphy D P L** (1994) Equifertiles - an innovative concept for efficient sampling in the local resource management of agricultural soils. *Aspects of Applied Biology* 37: 63-72
- Schnug E, Panten K, Haneklaus S** (1998) Soil sampling and nutrient recommendations – the future. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29 (11-14): 1455-1462
- Schnug E, Panten K, Haneklaus S** (2001) A database on spatial variability of soil and crop parameters. Landbauforschung Völkenrode SH. (In Vorbereitung).
- Schnug E, Haneklaus S, Lilienthal H, Panten K** (2000) LASSIE – an innovative approach for the continuous remote sensing of crops. *Aspects of Applied Biology* 60: 147-153
- Schroeder D** (1992) Bodenkunde in Stichworten. Berlin, Stuttgart: Ferdinand Hirt in der Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, 175 p, ISBN 3-443-03103-X
- Schröder D** (1999) Strategien zur Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. In: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität; KTBL/ATB-Workshop vom 15. bis 16. Januar 1998 in Potsdam, Münster: KTBL, pp 47-52, ISBN 3-7843-1993-9
- Schüller H** (1969) Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 123: 48-63
- Singh A** (1989) Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data. *International Journal of Remote Sensing* 10 (6): 989-1003
- SPSS** (1998) SPSS für Windows, Release 8.0.0. Online-Hilfe
- Stehman St V** (1992) Comparison of Systematic and Random Sampling for Estimating the Accuracy of Maps Generated from Remotely Sensed Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 58 (9): 1343-1350

Steinmayr T, Auernhammer H, Demmel M (2001) Discussion of a standardized algorithm to improve the quality of local yield data. In: Grenier G, Blackmore S (eds) Precision Agriculture '01, Part 2; Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 18-20 of June 2001. Montpellier: agro, pp 863-868, ISBN 2-900792-14-2

Stephens M, Wood G A, Taylor J C (2000) Opportunities for Targeted Control of Potato Cyst Nematode Using Remote Sensing. Aspects of Applied Biology 60: 213-218

Stoner E R, Baumgardner M F (1981) Characteristic Variations in Reflectance of Surface Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 1161-1165

Svensson H (1972) The Use of Stress Situations in Vegetation for Detecting Ground Conditions on Aerial Photographs. Lund Studies in Geography, Ser. A: Physical Geography 52: 75-87

Swindell J E G, (1997) Mapping the Spatial Variability in the Yield Potential of Arable Land Through GIS Analysis of Sequential Yield Maps. In: Stafford J V (ed) Precision Agriculture '97, Part 2; Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture, Warwick, 7-10 of September 1997. Oxford: BIOS, pp 827-834, ISBN 1-85996-136-3

Taylor J C, Thomas G, Wood G A (1997) Diagnosing Sources of Within-field Variation with Remote Sensing. In: Stafford J V (ed) Precision Agriculture '97, Part 2; Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture, Warwick, 7-10 of September 1997. Oxford: BIOS, pp 705-712, ISBN 1-85996-136-3

Timlin D J, Pachepsky Y A, Snyder V A, Bryant R B (1998) Soil Surface Curvature and the Spatial and Temporal Variability of Corn Grain Yields on a Hillslope. In: Robert P C, Rust R H, Larson W E (eds) Precision Agriculture, Part A; Proceedings of the 4th International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, 19-22 July 1998. Madison: ASA-CSSA-SSSA, pp 203-214, ISBN 0-89118-140-7

Tyndale-Biscoe J P, Moore G A, Western A W (1998) A System for Collecting Spatially Variable Terrain Data. Computers and Electronics in Agriculture 19: 113-128

Villwock G (1993) Untersuchungen zur Kennzeichnung der standörtlichen Heterogenität landwirtschaftlicher Nutzflächen mit Methoden der Geofernerkundung. Dissertation, Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg

Vink A P A (1962) Die Bodenkartierung mit Hilfe der Luftbildinterpretation unter europäischen Verhältnissen. Berichte zur Deutschen Landeskunde 29 (1): 131-164

Webster R, Beckett P H T (1964) A Study of the Agronomic Value of Soil Maps Interpreted from Air Photographs. In: Proceedings of the 8th International Congress of Soil Science, Bucharest, 1964. pp 795-803

Webster R, Oliver M A (1990) Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford: Oxford University Press, 316 p, ISBN 0-19-823317-5

Weise K, Reinhold A, Schulz R (1989) Fernerkundungsverfahren in der Pflanzenproduktion. agra Empfehlungen für die Praxis, Landwirtschaftsausstellung der DDR. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Markkleeberg

Westerhoff H (1954/55) Beitrag zur Kupferbestimmung im Boden. Landw. Forsch. 7: 190-193

Wilson J P, Spangrud D J, Nielsen G A, Jacobsen J S, Tyler D A (1998) Global Positioning System Sampling Intensity and Pattern Effects on Computed Topographic Attributes. Soil Sci. Soc. Am. J. 62: 1410-1417

Yang C, Anderson G L (1996) Determining Within-field Management Zones for Grain Sorghum Using Aerial Videography. In: Proceedings of the 26th Symposium on Remote Sensing Environment, Vancouver, 25-29 of March 1996. pp 606-611

Zheng F, Schreier H (1988) Quantification of Soil Patterns and Field Soil Fertility Using Spectral Reflection and Digital Processing of Aerial Photographs. Fertilizer Research 16: 15-30

7 Anhang

Tab. A1: Deskriptive Statistik ausgewählter Merkmale der Bodenfruchtbarkeit des Versuchsstandortes Mariensee, Rasterbeprobung (30x30 m) des Oberbodens 1995.

Schlag	Statistik	pH	mg kg ⁻¹ P	mg kg ⁻¹ K	mg kg ⁻¹ Mg	mg kg ⁻¹ Zn	mg kg ⁻¹ Cu
Duvenwinkel	Min-Max	5,0-7,2	33,5-401,4	72,6-291,0	55,7-190,9	1,0-17,4	2,8-15,2
	arithm. Mittel	5,9	91,6	162,8	109,6	5,5	6,9
	CV %	7,2	50,8	27,4	28,6	71,2	45,6
Gr. Fuchsberg	Min-Max	5,3-5,8	86,9-165,4	113,0-269,0	39,3-74,1	7,5-16,3	2,3-4,7
	arithm. Mittel	5,6	124,6	202,9	59,7	11,8	3,5
	CV %	2,0	14,6	13,2	10,9	12,4	13,3
Kultur IV	Min-Max	5,3-6,0	77,0-196,0	52,0-165,0	20,1-76,0	3,6-15,7	1,7-4,8
	arithm. Mittel	5,7	139,7	88,4	38,5	8,6	2,7
	CV %	3,0	19,3	21,8	24,7	27,6	20,6
Moorkamp	Min-Max	5,3-6,2	79,0-127,0	23,8-83,2	35,2-54,8	3,1-7,6	2,0-5,0
	arithm. Mittel	5,7	95,9	40,0	42,4	5,2	3,7
	CV %	2,3	11,7	25,1	10,7	16,2	16,6
Schlag 1	Min-Max	6,1-7,3	105,5-394,9	200,0-305,0	26,6-47,2	5,1-17,1	3,3-8,0
	arithm. Mittel	6,6	207,8	202,3	34,3	10,0	4,6
	CV %	3,9	30,3	16,8	16,6	29,3	18,1
Schlag 1 a hinten	Min-Max	5,6-6,4	47,9-221,2	86,0-240,0	81,4-185,6	10,1-44,1	4,6-10,5
	arithm. Mittel	6,3	79,4	137,4	115,8	23,7	7,0
	CV %	2,1	31,9	22,5	13,8	25,6	17,0
Schlag 2	Min-Max	5,3-6,8	57,5-198,9	74,6-266,4	19,8-73,4	4,3-13,1	2,3-6,1
	arithm. Mittel	6,1	99,2	136,7	30,5	8,1	3,1
	CV %	5,2	24,8	28,4	26,6	27,4	15,6
Schlag 3	Min-Max	4,9-6,0	92,0-308,8	64,6-257,0	29,9-67,8	7,4-18,3	4,4-8,9
	arithm. Mittel	5,6	121,9	96,1	48,8	10,4	5,6
	CV %	3,9	20,4	32,9	14,7	15,7	12,2
Schlag 5 + 6	Min-Max	6,0-7,1	81,0-325,3	81,0-290,4	23,1-48,7	5,9-12,4	2,1-5,0
	arithm. Mittel	6,4	128,4	117,0	32,9	8,5	3,2
	CV %	3,1	29,4	23,3	18,9	15,2	13,8
Schlag 5 + Kultur II	Min-Max	5,9-7,2	86,9-239,3	215,0-473,0	28,8-95,8	4,4-13,6	2,1-3,7
	arithm. Mittel	6,4	145,3	319,7	44,4	8,5	2,6
	CV %	3,2	28,5	16,3	27,3	27,1	11,6
Schlag 7	Min-Max	5,9-6,6	59,0-168,0	57,0-155,0	22,4-48,3	4,1-8,1	1,3-3,4
	arithm. Mittel	6,2	89,0	83,5	30,0	6,1	2,0
	CV %	2,0	20,8	19,7	17,1	14,6	17,8
Stall 2	Min-Max	5,4-6,7	29,0-222,4	81,0-251,6	38,6-122,6	7,2-19,2	2,3-6,2
	arithm. Mittel	6,0	64,5	146,9	64,5	11,0	4,1
	CV %	3,8	33,2	24,5	24,6	16,0	18,5
Stall 3	Min-Max	5,8-6,7	39,2-109,7	112,2-259,4	88,5-177,5	15,4-34,2	3,0-19,1
	arithm. Mittel	6,2	67,4	157,2	130,9	21,9	7,3
	CV %	2,5	24,8	17,6	14,8	15,5	32,2
Stall 5 a + b	Min-Max	5,9-6,9	32,2-158,9	101,2-341,4	36,7-119,7	4,7-17,6	1,8-5,9
	arithm. Mittel	6,4	95,1	226,2	79,9	9,1	3,6
	CV %	2,9	27,4	23,7	24,6	29,9	26,9
Stall 6 b	Min-Max	5,9-6,4	94,3-221,8	88,2-289,2	41,9-88,6	5,6-10,0	1,7-4,9
	arithm. Mittel	6,1	130,5	140,0	53,6	8,4	2,9
	CV %	2,0	18,7	31,1	18,3	11,9	23,8
Stall 7 + 8	Min-Max	5,8-6,9	62,0-340,0	69,0-377,0	36,1-100,7	3,5-36,4	2,1-14,3
	arithm. Mittel	6,4	156,7	165,7	54,5	8,1	4,1
	CV %	3,2	29,1	29,8	17,7	38,0	37,5
Vietingskamp	Min-Max	5,8-6,4	49,5-190,2	58,0-295,0	26,4-89,7	2,4-10,7	1,2-3,8
	arithm. Mittel	6,1	100,8	107,8	53,4	7,0	2,6
	CV %	2,2	27,3	39,1	17,6	25,4	17,9

Tab. A2: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Bodenparameter der Rasterbeobachtung 1995 und Ertragsdaten 1995-2000 gemessen in Luftbildklassen der Vegetationsbilder des Versuchsbetriebes Mariensee.

Schlagname	Aufnahme- datum	OS	Ton	pH	verf. P	verf. K	verf. Mg	verf. Zn	verf. Cu	Ertrag 1995	Ertrag 1996	Ertrag 1997	Ertrag 1998	Ertrag 1999	Ertrag 2000
Duvenwinkel	07.06.1996	WG	n.S.	*	***	***	n.S.	n.S.	n.S.	**	n.S.	-	n.S.	-	-
Duvenwinkel	21.07.1996	WG	n.S.	n.S.	**	n.S.	**	**	**	n.S.	***	-	**	-	-
Duvenwinkel	13.07.1998	Hafer	n.S.	*	n.S.	**	**	**	**	n.S.	n.S.	-	n.S.	-	-
Großer Fuchsberg	07.06.1996	WG	n.S.	**	n.S.	*	n.S.	n.S.	n.S.	***	***	***	*	***	***
Großer Fuchsberg	21.07.1996	WG	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	***	**	**	n.S.	***	***
Großer Fuchsberg	13.07.1998	WG	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	***	**	**	n.S.	***	***
Großer Fuchsberg	19.10.1999	ZR	n.S.	n.S.	*	**	**	n.S.	n.S.	**	***	***	*	*	**
Großer Fuchsberg	15.05.2000	Hafer	n.S.	*	***	n.S.	*	n.S.	n.S.	n.S.	*	n.S.	**	**	n.S.
Kultur IV	21.07.1996	AB	***	***	***	n.S.	**	***	***	-	*	**	***	-	*
Kultur IV	10.04.2000	WW	n.S.	***	***	n.S.	**	n.S.	*	-	***	***	n.S.	-	**
Kultur IV	15.05.2000	WW	n.S.	***	*	n.S.	*	*	*	-	***	n.S.	***	-	**
Moorkamp	21.07.1996	ZR	n.S.	n.S.	***	n.S.	***	***	n.S.	-	-	n.S.	***	-	n.S.
Moorkamp	19.10.1999	WG	***	***	***	n.S.	***	***	***	-	-	***	***	-	***
Moorkamp	10.04.2000	WG	**	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	-	-	n.S.	n.S.	-	n.S.
Moorkamp	15.05.2000	WG	n.S.	n.S.	*	n.S.	n.S.	**	***	-	-	*	n.S.	-	**
Schlag 1	21.07.1996	ZR	n.S.	***	***	n.S.	n.S.	***	***	n.S.	-	n.S.	n.S.	-	**
Schlag 1	10.04.2000	WW	n.S.	***	*	n.S.	n.S.	***	*	n.S.	-	**	n.S.	-	*
Schlag 1	15.05.2000	WW	***	***	***	***	*	***	***	***	-	***	n.S.	-	***
Schlag 1 a hinten	17.07.1995	WW	n.S.	n.S.	n.S.	*	n.S.	n.S.	n.S.	**	n.S.	**	-	-	**
Schlag 1 a hinten	25.09.1997	Brache	n.S.	n.S.	*	**	**	n.S.	*	**	n.S.	*	-	-	***
Schlag 1 a hinten	10.04.2000	WW	***	n.S.	*	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	*	n.S.	-	-	***
Schlag 1 a hinten	15.05.2000	WW	n.S.	***	n.S.	n.S.	**	n.S.	**	n.S.	*	n.S.	-	-	n.S.
Schlag 2	07.06.1996	WW	***	***	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	-	n.S.	*	-	n.S.	**
Schlag 2	21.07.1996	WW	n.S.	**	n.S.	***	***	***	***	-	***	***	-	***	***
Schlag 2	19.10.1999	WG	*	***	***	*	***	***	***	-	***	***	-	***	***
Schlag 2	10.04.2000	WG	n.S.	**	*	n.S.	n.S.	**	**	-	**	**	-	**	***
Schlag 2	15.05.2000	WG	n.S.	***	**	***	***	***	*	-	***	***	-	***	***
Schlag 3	07.06.1996	WG	n.S.	**	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	***	-	n.S.	-	***	-	-
Schlag 3	21.07.1996	WG	n.S.	n.S.	**	n.S.	n.S.	*	n.S.	-	n.S.	-	**	-	-
Schlag 3	13.07.1998	Hafer	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	*	*	-	n.S.	-	***	-	-
Schlag 5 + 6	07.06.1996	Mais	*	n.S.	n.S.	***	n.S.	n.S.	n.S.	**	-	***	-	n.S.	*

Schlag 5 + 6	21.07.1996	Mais	***	***	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	-	***	-	n.S.	*
Schlag 5 + 6	19.10.1999	WG	**	***	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	-	***	-	***	***
Schlag 5 + 6	10.04.2000	WG	***	***	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	-	***	-	n.S.	n.S.
Schlag 5 + 6	15.05.2000	WG	***	***	***	***	n.S.	***	n.S.	-	***	-	***	***
Schlag 5 + Kultur II	07.06.1996	Erbsen	***	***	***	***	n.S.	***	n.S.	-	n.S.	-	-	***
Schlag 5 + Kultur II	21.07.1996	Erbsen	n.S.	***	***	***	n.S.	***	n.S.	-	n.S.	-	-	n.S.
Schlag 5 + Kultur II	19.10.1999	WG	***	***	***	***	n.S.	***	n.S.	-	n.S.	-	-	**
Schlag 5 + Kultur II	10.04.2000	WG	***	***	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	-	n.S.	-	-	*
Schlag 5 + Kultur II	15.05.2000	WG	*	***	**	***	n.S.	***	n.S.	-	n.S.	-	-	n.S.
Schlag 7	07.06.1996	WG	***	***	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	**	n.S.	-	n.S.	n.S.
Schlag 7	21.07.1996	WG	***	***	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	**	n.S.	-	n.S.	***
Schlag 7	25.09.1997	ZR	n.S.	n.S.	n.S.	*	n.S.	*	n.S.	n.S.	n.S.	-	n.S.	***
Schlag 7	13.07.1998	Hafer	n.S.	n.S.	n.S.	***	n.S.	*	n.S.	n.S.	n.S.	-	n.S.	***
Schlag 7	15.05.2000	Hafer	n.S.	n.S.	n.S.	***	n.S.	*	n.S.	n.S.	n.S.	-	n.S.	***
Stall 2	07.06.1996	WV	n.S.	n.S.	*	n.S.	n.S.	***	n.S.	*	***	-	***	***
Stall 2	21.07.1996	WV	n.S.	*	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	***	***	-	***	*
Stall 3	10.04.2000	WV	n.S.	**	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	*	-	n.S.	-	-
Stall 5 a + b	17.07.1995	WG	n.S.	***	n.S.	**	n.S.	***	n.S.	***	-	-	-	***
Stall 5 a + b	07.06.1996	Hafer	n.S.	**	***	***	n.S.	***	n.S.	*	-	-	-	n.S.
Stall 5 a + b	21.07.1996	Hafer	*	n.S.	*	n.S.	*	***	n.S.	***	-	-	-	***
Stall 5 a + b	25.09.1997	Gras	n.S.	n.S.	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	***	-	-	-	**
Stall 5 a + b	19.10.1999	WG	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	*	n.S.	-	-	n.S.
Stall 5 a + b	10.04.2000	WG	n.S.	n.S.	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	n.S.	-	-	-	n.S.
Stall 5 a + b	15.05.2000	WG	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	***	-	-	-	***
Stall 6 b	07.06.1996	AB	n.S.	**	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	*	***	-	***	-
Stall 6 b	21.07.1996	AB	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	*	n.S.	-	***	-
Stall 6 b	25.09.1997	Zw.fr.	n.S.	n.S.	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	n.S.	*	n.S.	n.S.	-
Stall 6 b	19.10.1999	Zw.fr.	n.S.	**	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	*	***	-	***	-
Stall 6 b	15.05.2000	Erbsen	n.S.	n.S.	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	*	***	-	***	-
Stall 7 + 8	07.06.1996	WG	**	***	***	***	n.S.	***	n.S.	*	***	-	***	-
Stall 7 + 8	21.07.1996	WG	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	*	n.S.	-	***	-
Vietingskamp	07.06.1996	Mais	***	***	n.S.	***	n.S.	***	n.S.	-	***	-	***	-
Vietingskamp	21.07.1996	Mais	*	n.S.	**	***	n.S.	***	n.S.	-	***	-	***	-
Vietingskamp	13.07.1998	WG	***	n.S.	**	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	-	**	n.S.	-	-

> 5,0% n.s. = nicht signifikant
 ≤ 5,0% * = schwach signifikant
 ≤ 1,0% ** = signifikant
 ≤ 0,1% *** = hoch signifikant

Tab. A.3: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Bodenparameter der Rasterbeobachtung 1995 und Ertragsdaten 1995-2000 gemessen in Luftbildklassen der Bodenbilder des Versuchsbetriebes Mariensee.

Schlagname	Aufnahme- datum	OS	Ton	pH	verf. P	verf. K	verf. Mg	verf. Zn	verf. Cu	Ertrag 1995	Ertrag 1996	Ertrag 1997	Ertrag 1998	Ertrag 1999	Ertrag 2000
Duvenwinkel	25.09.1997	n.S.	n.S.	**	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	***	***	-	***	-	-
Duvenwinkel	15.05.2000	**	***	***	***	***	***	***	***	***	***	-	***	-	-
Großer Fuchsberg	25.09.1997	**	***	n.S.	***	*	**	**	*	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.
Großer Fuchsberg	10.04.2000	n.S.	***	n.S.	n.S.	**	**	n.S.	*	***	***	**	*	**	n.S.
Kultur IV	19.10.1999	n.S.	***	***	***	*	***	n.S.	***	-	***	n.S.	***	-	***
Moorkamp	07.06.1996	n.S.	***	***	***	*	***	n.S.	***	-	-	***	***	-	***
Moorkamp	25.09.1997	n.S.	*	***	***	n.S.	***	n.S.	n.S.	-	-	*	***	-	n.S.
Schlag 1	19.10.1999	n.S.	***	**	*	n.S.	*	**	***	***	-	n.S.	n.S.	-	**
Schlag 3	25.09.1997	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	-	*	-	n.S.	-	-
Schlag 3	10.04.2000	n.S.	**	n.S.	***	***	*	***	***	-	***	-	**	-	-
Schlag 3	15.05.2000	n.S.	**	n.S.	***	***	**	***	***	-	***	-	***	-	-
Schlag 7	10.04.2000	***	**	n.S.	***	***	***	n.S.	***	***	***	-	***	**	n.S.
Stall 2	19.10.1999	n.S.	n.S.	*	n.S.	***	**	***	***	-	**	n.S.	-	n.S.	*
Stall 2	10.04.2000	n.S.	***	*	n.S.	**	n.S.	***	*	-	***	***	-	***	n.S.
Stall 2	15.05.2000	n.S.	***	***	***	***	***	n.S.	***	-	***	**	-	***	**
Stall 3	07.06.1996	n.S.	***	n.S.	**	***	***	**	n.S.	***	-	-	*	-	-
Stall 3	25.09.1997	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	*	n.S.	n.S.	**	-	-	n.S.	-	-
Stall 3	19.10.1999	n.S.	***	*	n.S.	*	***	*	*	***	-	-	***	-	-
Stall 6 b	10.04.2000	n.S.	*	*	***	***	n.S.	n.S.	**	-	n.S.	n.S.	-	n.S.	-
Vietingskamp	25.09.1997	***	***	**	**	**	***	***	n.S.	-	-	***	***	-	-
Vietingskamp	19.10.1999	***	***	*	*	n.S.	*	***	n.S.	-	-	***	***	-	-
Vietingskamp	10.04.2000	***	*	***	**	n.S.	**	***	n.S.	-	-	***	***	-	-
Vietingskamp	15.05.2000	***	***	**	***	***	***	***	n.S.	-	-	***	***	-	-

> 5,0% n.s.

= nicht signifikant

≤ 1,0% **

= signifikant

≤ 5,0% *

= schwach signifikant

≤ 0,1% ***

= hoch signifikant

Tab. A4: Vergleich von Ergebnissen der einfaktoriellen Varianzanalyse zwischen unüberwacht klassifizierten Luftbildern von zwei Terminen einer Vegetationsperiode und den Bodendaten der Rasterbeprobung 1995 sowie den Ertragsdaten 1995-2000 auf Schlägen des Versuchsbetriebes Mariensee.

Schlagname	Gruppe	Abgebildete Kultur	Einfließende Parameter		Bodenparameter		Erträge 1995-2000	
			ges.	ident.	ges.	ident.	ges.	ident.
Duvenwinkel	1996	WG	11	2	8	2	3	0
Gr. Fuchsberg	1996	WG	14	10	8	5	6	5
Moorkamp	2000	WG	11	4	8	3	3	1
Kultur IV	2000	WW	12	9	8	7	4	2
Schlag 1	2000	WW	12	7	8	4	4	3
Schlag 1 a h	2000	WW	12	4	8	1	4	3
Schlag 2	1996	WW	12	4	8	2	4	2
Schlag 2	2000	WG	12	11	8	7	4	4
Schlag 3	1996	WG	10	7	8	5	2	2
Schlag 5 + 6	1996	Mais	12	7	8	4	4	3
Schlag 5 + 6	2000	WG	12	7	8	6	4	1
Schlag 5 + Kultur II	1996	Erbsen	11	8	8	6	3	2
Schlag 5 + Kultur II	2000	WG	11	5	8	4	3	1
Schlag 7	1996	WG	13	9	8	6	5	3
Stall 2	1996	WW	12	9	8	5	4	4
Stall 5 a + b	1996	Hafer	11	7	8	5	3	2
Stall 5 a + b	2000	WG	11	7	8	7	3	0
Vietingskamp	1996	Mais	10	7	8	5	2	2

Gruppe 1996 = Bilder vom 07.06.96 + 21.07.96

Gruppe 2000 = Bilder vom 10.04.00 + 15.05.00

ges. = Gesamtzahl berücksichtigter Parameter

ident. = Übereinstimmende Parameter

WW = Winterweizen

WG = Wintergerste

Tab. A.5. Statistische Sicherheiten (F-Test) für Boden- und Bestandesparameter der Rasterproben 1998 und 2000 gemessen in Luftbildklassen von Schlag 3, Schlag 5 + 6 + Kultur II und Stall 3.

Schlagname	Aufnahme- datum	Kultur	Boden				Korn				Stroh					
			OS	pH	N _{ges}	verf. P	verf. K	verf. Mg	N _{ges}	P	K	Mg	N _{ges}	P	K	Mg
Schlag 3	07.06.1996	WG	***	*	***	n.S.	n.S.	**	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	*	n.S.	n.S.
Schlag 3	21.07.1996	WG	***	n.S.	n.S.	**	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	*
Schlag 3	25.09.1997	Boden	**	**	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	*	n.S.	n.S.
Schlag 3	13.07.1998	Hafer	***	n.S.	***	n.S.	n.S.	*	n.S.	*	**	n.S.	n.S.	n.S.	***	*
Schlag 3	10.04.2000	Boden	***	n.S.	***	n.S.	n.S.	**	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.
Schlag 3	15.05.2000	Boden	***	*	***	n.S.	**	***	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	*	**	n.S.
Schlag 5 + 6 + Kultur II	19.10.1999	WG	***	***	***	***	***	***	***	-	-	-	-	-	-	-
Schlag 5 + 6 + Kultur II	10.04.2000	WG	*	n.S.	***	n.S.	n.S.	**	n.S.	-	-	-	-	-	-	-
Schlag 5 + 6 + Kultur II	15.05.2000	WG	***	***	***	*	***	***	***	-	-	-	-	-	-	-
Stall 3	07.06.1996	Boden	***	***	***	n.S.	n.S.	***	n.S.	***	***	n.S.	n.S.	*	*	n.S.
Stall 3	25.09.1997	Boden	***	n.S.	**	n.S.	n.S.	n.S.	n.S.	***	*	n.S.	n.S.	***	**	***
Stall 3	19.10.1999	Boden	***	n.S.	***	n.S.	n.S.	***	***	***	n.S.	*	n.S.	***	n.S.	*
Stall 3	10.04.2000	WW	n.S.	*	n.S.	**	**	***	***	n.S.	n.S.	**	n.S.	n.S.	n.S.	**

> 5,0% n.s. = nicht signifikant

≤ 5,0% * = schwach signifikant

≤ 1,0% **

= signifikant

≤ 0,1% ***

= hoch signifikant

Schlag 3: Probenahme 1998: Hafer
 Schlag 5 + 6 + Kultur II: Probenahme 2000: Wintergerste
 Stall 3: Probenahme 1998: Winterweizen

Tab. A6: Deskriptive Statistik für die anhand des unüberwacht klassifizierten Luftbildes vom 25.09.1997 festgelegten und 1999 und 2000 beprobten Monitorpedozellen auf dem Schlag Moorkamp.

Parameter	Minimum	Maximum	arithm. Mittel	CV %
<i>10.08.1999: Boden</i>				
C %	1,5	5,4	2,5	42,0
pH	5,4	6,1	5,8	3,4
N _{min} kg ha ⁻¹	27,0	59,8	37,8	26,3
N _{ges} g kg ⁻¹	1,2	2,7	1,6	24,7
P mg kg ⁻¹	56,1	79,6	68,0	10,1
K mg kg ⁻¹	37,9	175,8	84,7	33,1
Mg mg kg ⁻¹	30,1	74,3	37,9	27,1
<i>02.03.2000: Boden</i>				
pH	5,2	6,1	5,9	3,7
N _{min} kg ha ⁻¹	7,6	44,8	17,2	49,0
P mg kg ⁻¹	61,7	94,7	74,4	15,0
K mg kg ⁻¹	69,2	148,8	108,0	17,8
Mg mg kg ⁻¹	31,8	70,2	42,0	20,6
<i>17.04.2000: Boden</i>				
pH	5,5	6,1	5,8	2,8
N _{min} kg ha ⁻¹	12,0	42,8	22,8	30,3
N _{ges} g kg ⁻¹	1,1	2,3	1,4	22,4
P mg kg ⁻¹	61,0	106,3	77,8	14,8
K mg kg ⁻¹	64,8	125,4	93,0	15,9
Mg mg kg ⁻¹	35,0	73,8	43,3	20,1
<i>17.04.2000: Wintergerste</i>				
N ‰	29,7	48,6	35,4	15,4
P ‰	2,8	3,4	3,1	5,2
S ‰	2,5	4,0	2,9	14,5
K ‰	29,8	41,9	35,8	8,6
Ca ‰	4,1	6,6	5,2	13,8
Mg ‰	0,6	1,1	0,8	16,0
Cl ‰	4,1	10,0	5,4	28,0
<i>26.06.2000: Wintergerste, Korn</i>				
N ‰	17,8	20,5	18,9	3,8
P ‰	2,8	3,2	2,9	3,9
S ‰	1,4	1,6	1,5	4,1
K ‰	5,0	5,7	5,4	4,3
Ca ‰	0,4	0,6	0,5	9,0
Mg ‰	0,7	0,9	0,8	6,6
Cl ‰	0,9	1,3	1,0	11,1
<i>26.06.2000: Wintergerste, Stroh</i>				
N ‰	5,4	8,0	6,2	12,4
P ‰	1,9	2,1	1,9	2,1
S ‰	0,9	1,3	1,1	9,8
K ‰	14,0	27,5	18,4	18,7
Ca ‰	5,1	7,8	6,3	12,7
Mg ‰	0,3	0,6	0,4	18,2
Cl ‰	1,5	4,0	2,3	29,1
<i>05.07.2000: Boden</i>				
pH	5,7	6,2	5,9	2,8
N _{min} kg ha ⁻¹	13,9	108,3	28,8	79,6
P mg kg ⁻¹	26,0	65,2	40,6	26,5
K mg kg ⁻¹	64,0	239,6	97,8	40,5
Mg mg kg ⁻¹	33,1	80,4	41,1	26,2

Tab. A7: Deskriptive Statistik für die anhand des unüberwacht klassifizierten Luftbildes vom 07.06.1996 festgelegten und 2000 beprobten Monitorpedozellen auf Schlag 2.

Parameter	Minimum	Maximum	arithm. Mittel	CV %
<i>27.03.2000: Boden</i>				
pH	5,7	6,4	6,1	3,0
N _{min} kg ha ⁻¹	5,5	13,5	8,2	29,8
P mg kg ⁻¹	88,9	124,8	104,7	11,4
K mg kg ⁻¹	97,4	182,0	140,4	18,8
Mg mg kg ⁻¹	35,5	69,9	50,4	22,3
<i>26.04.2000: Wintergerste</i>				
N ‰	32,7	37,7	35,4	4,8
P ‰	3,5	3,6	3,5	1,3
S ‰	1,9	2,5	2,2	6,1
K ‰	36,1	43,1	40,2	5,6
Ca ‰	3,9	4,8	4,2	6,9
Mg ‰	1,0	1,1	1,1	4,2
Cl ‰	5,2	9,1	6,8	18,8
<i>26.06.2000: Wintergerste, Korn</i>				
N ‰	16,1	21,5	18,8	10,6
P ‰	3,0	3,2	3,1	2,7
S ‰	1,2	1,4	1,3	6,8
K ‰	5,1	6,3	5,7	6,5
Ca ‰	0,5	0,7	0,6	9,0
Mg ‰	0,7	1,0	0,9	11,3
Cl ‰	1,1	1,4	1,3	7,6
<i>26.06.2000: Wintergerste, Stroh</i>				
N ‰	5,8	9,9	7,3	20,6
P ‰	2,0	2,4	2,2	6,5
S ‰	0,7	1,0	0,8	10,1
K ‰	16,4	29,0	23,1	16,7
Ca ‰	4,8	6,5	5,5	10,5
Mg ‰	0,4	0,8	0,6	22,3
Cl ‰	2,7	6,9	4,2	31,0
<i>10.07.2000: Boden</i>				
C %	0,7	1,1	0,9	16,0
pH	5,9	6,3	6,1	2,0
N _{min} kg ha ⁻¹	21,7	85,6	42,1	49,8
P mg kg ⁻¹	41,0	112,7	75,1	26,1
K mg kg ⁻¹	91,6	159,6	124,7	16,1
Mg mg kg ⁻¹	39,1	60,8	50,2	14,2

Tab. A8: Deskriptive Statistik für die anhand des unüberwacht klassifizierten Luftbildes vom 21.07.1996 festgelegten und 2000 beprobten Monitorpedozellen auf Schlag 7.

Parameter	Minimum	Maximum	arithm. Mittel	CV %
<i>23.02.2000: Boden</i>				
pH	6,2	6,9	6,4	2,6
N _{min} kg ha ⁻¹	42,7	82,3	60,2	20,4
P mg kg ⁻¹	49,0	153,8	77,5	34,4
K mg kg ⁻¹	131,2	231,2	157,6	20,1
Mg mg kg ⁻¹	43,4	79,8	55,9	18,3
<i>15.05.2000: Boden</i>				
C %	1,0	3,2	1,6	44,8
pH	5,9	6,2	6,1	1,4
N _{min} kg ha ⁻¹	63,5	180,5	118,4	27,5
P mg kg ⁻¹	45,4	142,9	70,1	36,0
K mg kg ⁻¹	145,0	223,0	174,0	13,2
Mg mg kg ⁻¹	47,8	84,6	60,4	16,6
<i>15.05.2000: Hafer</i>				
N ‰	33,1	52,5	43,0	12,7
P ‰	3,1	3,7	3,5	4,7
S ‰	2,9	4,3	3,7	12,9
K ‰	41,2	58,0	50,5	9,9
Ca ‰	3,8	9,6	5,1	31,9
Mg ‰	1,1	2,0	1,6	16,3
Cl ‰	12,7	28,3	21,0	23,5
<i>04.08.2000: Hafer, Korn</i>				
N ‰	15,5	25,4	20,1	12,3
P ‰	3,1	3,4	3,2	2,6
S ‰	1,9	2,4	2,1	7,2
K ‰	4,4	5,5	4,9	5,9
Ca ‰	0,7	1,1	0,8	12,7
Mg ‰	0,8	1,1	1,0	8,4
Cl ‰	0,6	0,8	0,7	8,2
<i>04.08.2000: Hafer, Stroh</i>				
N ‰	4,2	12,5	6,6	35,9
P ‰	2,0	2,6	2,3	7,9
S ‰	1,0	2,1	1,3	22,7
K ‰	13,7	28,1	20,8	20,3
Ca ‰	3,4	5,5	4,3	14,6
Mg ‰	0,6	1,2	0,8	21,5
Cl ‰	5,5	18,6	10,6	34,4
<i>07.08.2000: Boden</i>				
C %	1,0	3,0	1,6	41,5
pH	6,0	6,6	6,2	2,2
N _{min} kg ha ⁻¹	24,8	68,6	37,3	29,3
P mg kg ⁻¹	38,3	174,4	82,2	54,8
K mg kg ⁻¹	121,6	248,4	173,0	21,9
Mg mg kg ⁻¹	49,8	92,9	65,0	18,4

Tab. A9: Deskriptive Statistik der Monitorpedozellen nach relativen Ertragsdaten 1999 und 2000 von Schlag 2.

Parameter	Minimum	Maximum	arithm. Mittel	CV %
<i>09.08.1999: Boden</i>				
C %	0,8	1,2	1,0	13,9
pH	5,6	6,3	6,0	2,9
N _{ges} g kg ⁻¹	0,7	1,2	0,9	13,0
P mg kg ⁻¹	78,0	136,8	98,0	17,3
K mg kg ⁻¹	72,4	168,2	116,9	22,9
Mg mg kg ⁻¹	31,5	64,7	42,1	20,2
<i>26.04.2000: Wintergerste</i>				
N ‰	31,7	39,2	35,2	6,2
P ‰	3,4	3,7	3,5	2,6
S ‰	1,9	2,4	2,2	5,8
K ‰	37,7	41,9	39,3	2,9
Ca ‰	3,5	5,7	4,2	6,5
Mg ‰	0,9	1,2	1,1	5,9
Cl ‰	5,0	8,2	6,6	14,3
<i>26.06.2000: Wintergerste, Korn</i>				
N ‰	16,6	21,5	18,5	8,9
P ‰	2,9	3,2	3,0	2,5
S ‰	1,1	1,5	1,3	9,4
K ‰	5,2	6,4	5,7	6,1
Ca ‰	0,5	0,6	0,6	8,2
Mg ‰	0,7	0,9	0,9	7,5
Cl ‰	1,2	1,4	1,3	5,6
<i>26.06.2000: Wintergerste, Stroh</i>				
N ‰	5,2	9,2	7,1	20,6
P ‰	2,0	2,4	2,2	5,9
S ‰	0,8	1,0	0,8	7,2
K ‰	17,0	27,7	22,4	13,4
Ca ‰	4,6	6,7	5,5	10,4
Mg ‰	0,4	0,8	0,6	22,2
Cl ‰	2,6	5,9	3,9	27,6
<i>07.07.2000: Boden</i>				
C %	0,7	1,1	0,9	14,8
pH	5,9	6,2	6,0	1,9
P mg kg ⁻¹	58,6	128,0	84,5	21,2
K mg kg ⁻¹	90,2	140,4	118,2	12,2
Mg mg kg ⁻¹	34,9	73,2	49,2	17,9

Tab. A10: Deskriptive Statistik der Monitorpedozellen nach relativen Ertragsdaten 1999 und 2000 von Schlag 7.

Parameter	Minimum	Maximum	arithm. Mittel	CV %
<i>22.07.1999: Boden</i>				
C %	1,0	3,0	1,5	32,1
pH	6,0	6,4	6,2	1,6
N _{ges} g kg ⁻¹	0,9	2,0	1,2	19,0
P mg kg ⁻¹	41,4	96,3	61,9	20,8
K mg kg ⁻¹	71,8	142,0	105,1	14,9
Mg mg kg ⁻¹	38,4	73,0	49,5	14,6
<i>15.05.2000: Boden</i>				
C %	0,9	4,3	2,2	31,7
pH	5,7	6,4	6,1	2,8
P mg kg ⁻¹	39,6	98,1	59,5	22,6
K mg kg ⁻¹	83,8	184,8	123,8	22,7
Mg mg kg ⁻¹	40,7	87,9	56,6	18,6
<i>15.05.2000: Hafer</i>				
N ‰	34,7	50,7	42,8	10,0
P ‰	3,2	3,8	3,5	4,0
S ‰	2,7	4,5	3,7	11,0
K ‰	38,5	56,3	49,6	8,1
Ca ‰	3,8	14,3	5,8	41,4
Mg ‰	1,2	2,0	1,5	12,4
Cl ‰	11,0	26,3	20,8	17,5
<i>04.08.2000: Hafer, Korn</i>				
N ‰	16,8	27,7	20,9	13,0
P ‰	3,1	3,5	3,3	2,6
S ‰	1,9	2,4	2,2	5,8
K ‰	4,3	6,2	5,1	9,3
Ca ‰	0,7	1,2	0,9	16,8
Mg ‰	0,9	1,1	1,0	6,2
Cl ‰	0,6	0,8	0,7	9,4
<i>04.08.2000: Hafer, Stroh</i>				
N ‰	3,5	16,1	7,5	43,5
P ‰	2,1	2,8	2,3	8,2
S ‰	1,0	2,3	1,4	24,8
K ‰	10,0	27,9	18,9	27,9
Ca ‰	3,1	7,2	4,7	22,1
Mg ‰	0,5	1,3	0,9	25,8
Cl ‰	2,5	15,7	8,7	44,0
<i>04.08.2000: Boden</i>				
C %	1,1	3,1	1,5	29,6
pH	5,8	6,5	6,3	2,6
P mg kg ⁻¹	39,5	96,7	58,3	24,1
K mg kg ⁻¹	135,0	248,4	186,3	17,7
Mg mg kg ⁻¹	43,5	79,3	57,0	13,5

Tab. A11: Deskriptive Statistik der 33 Monitorpedozellen nach relativen Ertragsdaten 1999 vom Gr. Fuchsberg.

Parameter	Minimum	Maximum	arithm. Mittel	CV %
<i>21.10.1999: Boden</i>				
C %	1,3	2,1	1,6	13,0
pH	5,7	6,2	6,0	2,3
N _{ges} g kg ⁻¹	0,9	1,7	1,3	13,0
P mg kg ⁻¹	67,0	133,2	105,9	14,9
K mg kg ⁻¹	93,2	299,8	151,1	28,6
Mg mg kg ⁻¹	43,6	71,3	55,4	10,0
<i>21.10.1999: Zuckerrübe, Körper</i>				
N ‰	5,3	11,6	7,2	17,6
P ‰	1,2	2,2	1,7	13,7
K ‰	5,7	13,5	7,1	19,9
Mg ‰	1,2	2,0	1,5	12,4
<i>21.10.1999: Zuckerrübe, Blatt</i>				
N ‰	20,5	30,1	25,5	9,7
P ‰	2,9	5,9	3,9	18,2
K ‰	39,0	65,7	49,6	13,1
Mg ‰	2,8	4,5	3,7	13,2

Tab. A12: Deskriptive Statistik der anhand von Analyseergebnisse 1999 und dem unüberwacht klassifizierten Luftbild vom 07.06.1996 von 33 auf 16 reduzierten Monitorpedozellen 2000 vom Gr. Fuchsberg.

Parameter	Minimum	Maximum	arithm. Mittel	CV %
<i>23.02.2000: Boden</i>				
pH	5,8	6,5	6,1	3,0
N _{min} kg ha ⁻¹	26,9	82,1	53,3	28,6
P mg kg ⁻¹	101,4	156,8	129,3	12,5
K mg kg ⁻¹	113,4	299,4	203,0	23,7
Mg mg kg ⁻¹	39,6	86,0	71,7	19,2
<i>08.05.2000: Boden</i>				
pH	5,8	6,2	6,0	1,8
P mg kg ⁻¹	101,8	167,3	132,4	15,0
K mg kg ⁻¹	115,2	272,2	169,7	21,3
Mg mg kg ⁻¹	52,0	107,4	68,3	22,2
<i>08.05.2000: Hafer</i>				
N ‰	54,9	61,1	57,3	3,0
P ‰	4,2	4,8	4,5	3,8
S ‰	3,2	4,9	4,3	9,2
K ‰	46,0	53,4	49,9	4,6
Ca ‰	4,2	5,4	4,9	8,1
Mg ‰	1,6	2,2	1,9	8,7
Cl ‰	5,2	12,2	8,5	24,2
<i>28.07.2000: Hafer, Korn</i>				
N ‰	19,4	26,7	22,0	10,4
P ‰	3,2	3,6	3,3	2,9
S ‰	1,6	2,3	1,9	12,1
K ‰	6,3	7,5	6,8	5,1
Ca ‰	0,6	1,1	0,9	21,5
Mg ‰	0,9	1,3	1,1	10,1
Cl ‰	0,5	0,9	0,7	19,6
<i>28.07.2000: Hafer, Stroh</i>				
N ‰	6,4	15,9	9,5	32,1
P ‰	2,3	3,2	2,7	8,6
S ‰	1,0	1,9	1,3	17,6
K ‰	18,0	30,6	23,2	15,7
Ca ‰	3,7	6,1	4,6	13,4
Mg ‰	0,6	1,5	0,9	27,1
Cl ‰	2,2	6,3	3,9	29,5
<i>07.08.2000: Boden</i>				
C %	0,6	2,1	1,5	25,7
pH	5,9	6,4	6,2	2,0
N _{min} kg ha ⁻¹	33,9	85,5	53,4	27,2
P mg kg ⁻¹	67,2	129,7	105,7	15,0
K mg kg ⁻¹	110,8	277,4	180,9	22,4
Mg mg kg ⁻¹	36,8	81,4	63,1	20,1

Tab. A13: Statistische Sicherheiten (F-Test) für Bodenparameter der Rasterbeprobung von 1995 und Ertragsdaten von 1995-2000 gemessen in Geländeklassen des ARC/INFO TIN Modells für zwölf Schläge des Versuchsbetriebes Mariensee.

Schlagname	OS	Ton	pH	P	K	Mg	Zn	Cu	Ertrag					
									95	96	97	98	99	00
Gr. Fuchsberg	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Kultur IV	n.s.	**	***	***	n.s.	***	n.s.	*	-	**	n.s.	n.s.	-	-
Moorkamp	***	***	n.s.	***	n.s.	***	***	**	-	-	n.s.	***	-	n.s.
Schlag 1	**	n.s.	n.s.	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	*	-	n.s.	**	-	n.s.
Schlag 1 a hinten	*	***	*	***	***	n.s.	***	***	n.s.	*	n.s.	-	-	n.s.
Schlag 3	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	***	n.s.	n.s.	-	**	-	***	-	-
Schlag 5+6+Kultur II	***	n.s.	n.s.	*	***	*	***	***	-	-	-	-	***	***
Schlag 7	n.s.	***	***	***	***	***	*	**	-	-	-	-	***	***
Stall 5 a+b	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	-	-	-	n.s.
Stall 6 b	n.s.	***	n.s.	n.s.	***	***	***	***	-	n.s.	***	-	n.s.	-
Stall 7+8	***	***	n.s.	**	***	***	**	n.s.	-	n.s.	-	n.s.	-	-
Vietingskamp	***	n.s.	***	n.s.	***	***	***	***	-	-	n.s.	**	-	-

> 5,0% n.s. = nicht signifikant ≤ 1,0% ** = signifikant
 ≤ 5,0% * = schwach signifikant ≤ 0,1% *** = hoch signifikant

Tab. A14: Deskriptive Statistik der Monitorpedozellen nach Geländemerkmale für die Schläge Schlag 5 + 6 + Kultur II, Schlag 7 und Stall 7, beprobt im März 1999.

Parameter	Minimum	Maximum	arithm. Mittel	CV %
<i>Schlag 5 + 6 + Kultur II: 10.03.1999</i>				
C %	1,0	2,5	1,5	27,8
pH	6,1	6,5	6,3	2,0
N _{min} kg ha ⁻¹	12,3	51,2	30,2	33,1
N _{ges} g kg ⁻¹	0,9	1,8	1,2	21,1
P mg kg ⁻¹	76,0	180,0	121,1	25,4
K mg kg ⁻¹	83,3	175,0	129,5	22,5
Mg mg kg ⁻¹	28,3	67,3	52,5	16,8
<i>Schlag 7: 08.03.1999</i>				
C %	0,8	2,4	1,4	34,6
pH	6,1	6,6	6,3	2,3
N _{min} kg ha ⁻¹	20,0	38,6	30,8	17,3
N _{ges} g kg ⁻¹	0,9	1,6	1,1	17,5
P mg kg ⁻¹	50,5	104,2	72,7	20,1
K mg kg ⁻¹	65,6	125,9	90,8	19,4
Mg mg kg ⁻¹	41,3	59,0	48,9	10,5
<i>Stall 7: 08.03.1999</i>				
C %	0,8	2,0	1,1	29,0
pH	6,1	6,6	6,3	2,0
N _{min} kg ha ⁻¹	11,0	47,5	22,4	40,3
N _{ges} g kg ⁻¹	0,7	1,7	1,0	24,7
P mg kg ⁻¹	75,4	204,1	128,4	21,9
K mg kg ⁻¹	78,9	180,2	121,1	21,0
Mg mg kg ⁻¹	37,1	87,5	51,3	21,9

Bildtafel 1



Abb. A1: 17.07.95 Schlag 1 a h



Abb. A2: 17.07.95 Stall 5 a+b



Abb. A3: 07.06.96 Duvenwinkel

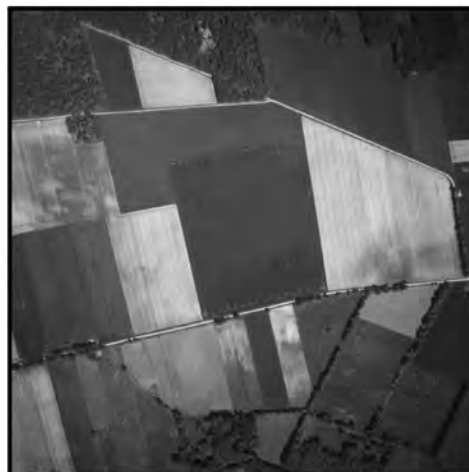


Abb. A4: 07.06.96 Gr. Fuchsberg

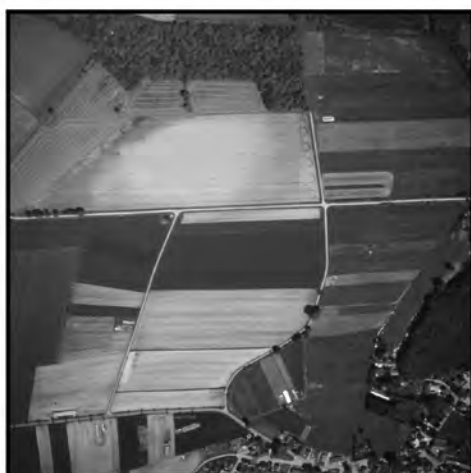


Abb. A5: 07.06.96 Moorkamp



Abb. A6: 07.06.96 Schlag 2 und Stall 2

Bildtafel 2

Abb. A7: 07.06.96 Schlag 3

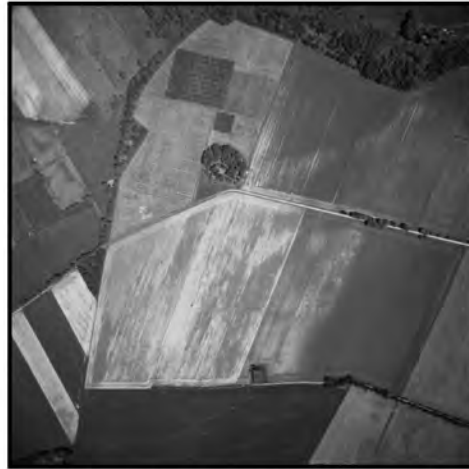
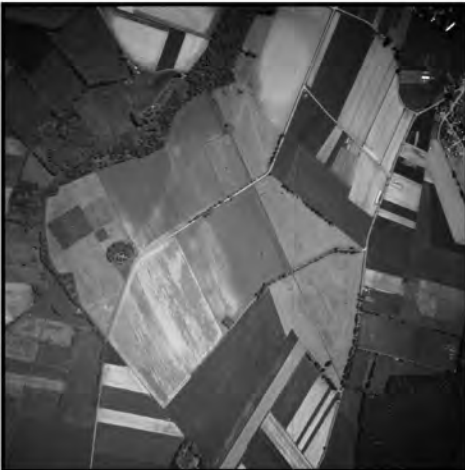
Abb. A8: 07.06.96 Schlag 5+6 und
Schlag 5+Kultur II

Abb. A9: 07.06.96 Schlag 7

Abb. A10: 07.06.96 Stall 3 und
Stall 5 a+bAbb. A11: 07.06.96 Stall 6 b und
Stall 7+8

Abb. A12: 07.06.96 Vietingskamp

Bildtafel 3



Abb. A13: 21.07.96 Duvenwinkel



Abb. A14: 21.07.96 Gr. Fuchsberg



Abb. A15: 21.07.96 Kultur IV



Abb. A16: 21.07.96 Moorkamp und Vietingskamp



Abb. A17: 21.07.96 Schlag 1



Abb. A18: 21.07.96 Schlag 2 und Stall 2

Bildtafel 4

Abb. A19: 21.07.96 Schlag 3

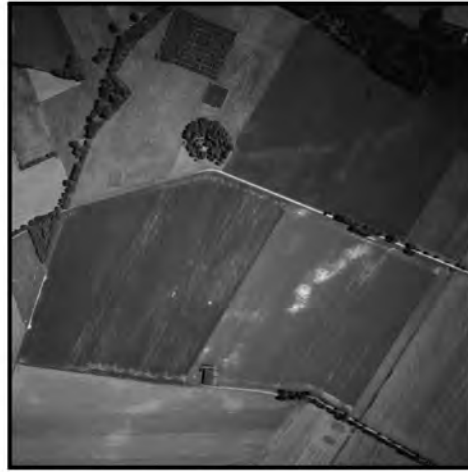
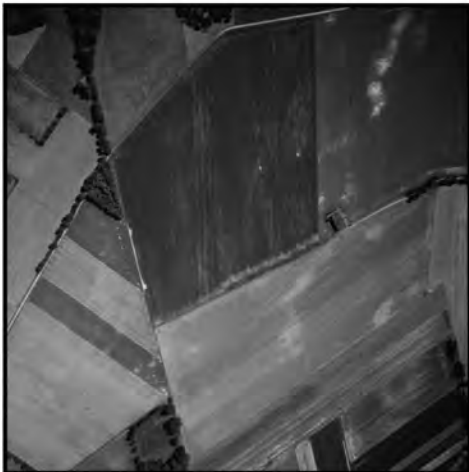
Abb. A20: 21.07.96 Schlag 5+6 und
Schlag 5+Kultur II

Abb. A21: 21.07.96 Schlag 7



Abb. A22: 21.07.96 Stall 5 a+b

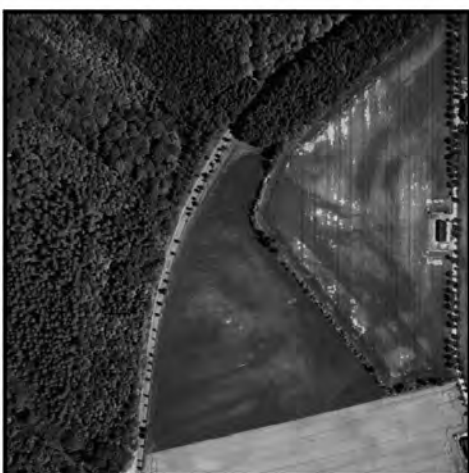


Abb. A23: 21.07.96 Stall 6 b



Abb. A24: 21.07.96 Stall 7+8

Bildtafel 5



Abb. A25: 25.09.97 Duvenwinkel



Abb. A26: 25.09.97 Gr. Fuchsberg



Abb. A27: 25.09.97 Moorkamp



Abb. A28: 25.09.97 Schlag 1 a h



Abb. A29: 25.09.97 Schlag 3



Abb. A30: 25.09.97 Stall 3

Bildtafel 6



Abb. A31: 25.09.97 Stall 5 a+b und
Stall 6 b



Abb. A32: 25.09.97 Vietingskamp



Abb. A33: 13.07.98 Duvenwinkel

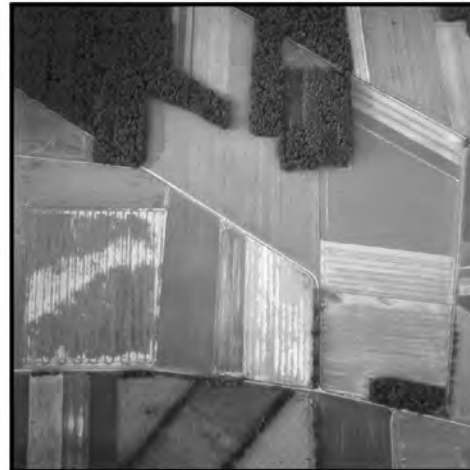


Abb. A34: 13.07.98 Gr. Fuchsberg



Abb. A35: 13.07.98 Schlag 3



Abb. A36: 13.07.98 Schlag 7

Bildtafel 7



Abb. A37: 13.07.98 Vietingskamp



Abb. A38: 19.10.99 Gr. Fuchsberg

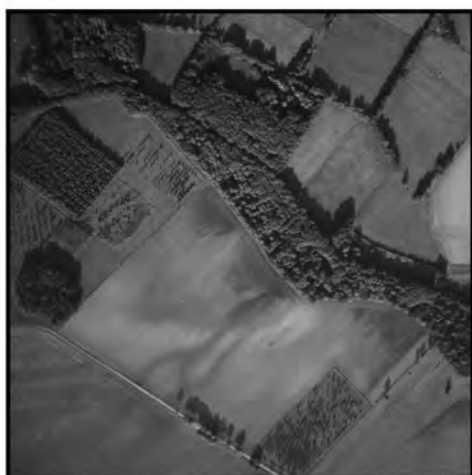


Abb. A39: 19.10.99 Kultur IV



Abb. A40: 19.10.99 Moorkamp



Abb. A41: 19.10.99 Schlag 1



Abb. A42: 19.10.99 Schlag 2

Bildtafel 8

Abb. A43: 19.10.99 Schlag 5+6 und
Schlag 5+Kultur II



Abb. A44: 19.10.99 Stall 2



Abb. A45: 19.10.99 Stall 3



Abb. A46: 19.10.99 Stall 5 a+b



Abb. A47: 19.10.99 Stall 6 b



Abb. A48: 19.10.99 Vietingskamp

Bildtafel 9

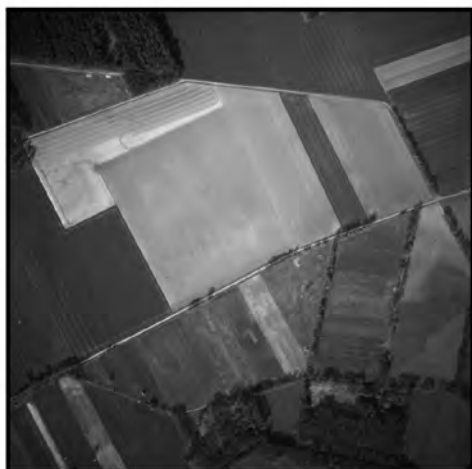


Abb. A49: 10.04.00 Gr. Fuchsberg



Abb. A50: 10.04.00 Kultur IV



Abb. A51: 10.04.00 Moorkamp



Abb. A52: 10.04.00 Schlag 1



Abb. A53: 10.04.00 Schlag 1 a h



Abb. A54: 10.04.00 Schlag 2

Bildtafel 10

Abb. A55: 10.04.00 Schlag 3

Abb. A56: 10.04.00 Schlag 5+6 und
Schlag 5+Kultur II

Abb. A57: 10.04.00 Schlag 7



Abb. A58: 10.04.00 Stall 2



Abb. A59: 10.04.00 Stall 3



Abb. A60: 10.04.00 Stall 5 a+b

Bildtafel 11



Abb. A61: 10.04.00 Stall 6 b



Abb. A62: 10.04.00 Vietingskamp



Abb. A63: 15.05.00 Duvenwinkel



Abb. A64: 15.05.00 Gr. Fuchsberg



Abb. A65: 15.05.00 Kultur IV



Abb. A66: 15.05.00 Moorkamp

Bildtafel 12



Abb. A67: 15.05.00 Schlag 1



Abb. A68: 15.05.00 Schlag 1 a h



Abb. A69: 15.05.00 Schlag 2



Abb. A70: 15.05.00 Schlag 3

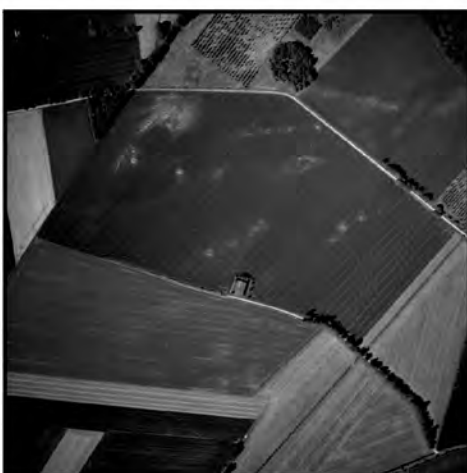
Abb. A71: 15.05.00 Schlag 5+6 und
Schlag 5+Kultur II

Abb. A72: 15.05.00 Schlag 7

Bildtafel 13



Abb. A73: 15.05.00 Stall 2



Abb. A74: 15.05.00 Stall 5 a+b



Abb. A75: 15.05.00 Stall 6 b



Abb. A76: 15.05.00 Vietingskamp