

**GÖTTINGER  
BODENKUNDLICHE  
BERICHTE  
115**

**Eike Stefan Dobers**

**Methoden der Standorterkundung als Grundlage  
des DGPS-gestützten Ackerbaus**

Eine Fallstudie aus dem Lössgebiet des Mittleren Fläming

**2002**

**ISSN 0340-4153**

**Herausgeber: Brunk Meyer**

**Im Selbstverlag**

**(Bestelladresse)**

**Institut für Bodenwissenschaften**

**Universität Göttingen**

**Von-Siebold-Str. 4**

**D - 37075 Göttingen**

# **Methoden der Standorterkundung als Grundlage des DGPS-gestützten Ackerbaus**

Eine Fallstudie aus dem Lössgebiet des Mittleren Fläming

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Fakultät für Agrarwissenschaften  
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Eike Stefan Dobers

geboren in Neumünster

Göttingen 2002

Referent: Prof. Dr. B. Meyer  
Korreferent: Prof. Dr. M. Kappas

Tag der mündlichen Prüfung: 27.6.2002

Für Rasmus und Lea

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>PROBLEMSTELLUNG</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>STANDORTEIGENSCHAFTEN IM UNTERSUCHUNGSGBIET</b>	<b>2</b>
2.1	LAGE DES UNTERSUCHUNGSGBIETES	2
2.2	EIGENSCHAFTEN DER BÖDEN IM UNTERSUCHUNGSGBIET	3
2.2.1	<i>Material und Methoden</i>	3
2.2.2	<i>Ergebnisse</i>	5
2.2.2.1	Lössmächtigkeit	5
2.2.2.2	Bodentypen	7
2.2.2.3	Korngrößenanalyse	9
2.2.2.4	Bodenwasserhaushalt	10
2.3	WITTERUNGSBEDINGUNGEN IM UNTERSUCHUNGSGBIET	12
2.3.1	<i>Daten der Wetterstation</i>	12
2.3.2	<i>Beobachtungen und sonstige Mitteilungen</i>	12
2.4	DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	13
<b>3</b>	<b>METHODEN DER STANDORTERKUNDUNG IM ACKERBAU</b>	<b>19</b>
3.1	ERSTELLUNG VON STANDORTKARTEN	21
3.1.1	<i>Geometrische Auflösung der Standortkarte</i>	22
3.1.2	<i>Kartenerstellung</i>	23
3.1.3	<i>Interpolation - Literaturüberblick</i>	23
3.2	ERTRAGSKARTIERUNG	27
3.2.1	<i>Stand des Wissens</i>	27
3.2.2	<i>Material und Methoden</i>	33
3.2.3	<i>Ergebnisse</i>	35
3.2.3.1	Exemplarische Punkternten des Jahres 1999	35
3.2.3.2	Eichung der Ertragssensoren	37
3.2.3.3	Statistiken der Ertrags-Rohdaten	38
3.2.3.4	Exemplarische Analyse einer Druschspur: Ertragsdaten	39
3.2.3.5	Auslastung des Schneidwerks	43
3.2.3.6	Einfluss unterschiedlicher Gutfeuchte	44
3.2.3.7	Vergleich der Datensätze von zwei Mähdreschern	45
3.2.3.8	Exemplarische Analyse einer Druschspur: Semivarianzen	46
3.2.3.9	Exemplarische Analyse einer Druschspur: Autokorrelation	48
3.2.3.10	Interpolation: Variation der Rohdaten	49
3.2.3.11	Interpolation: Variation der Interpolationsparameter	57
3.2.4	<i>Diskussion</i>	60
3.2.5	<i>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</i>	71
3.3	BODENKARTIERUNG UND REICHSBODENSCHÄTZUNG	72
3.3.1	<i>Ziele der Reichsbodenschätzung</i>	72
3.3.2	<i>Methodik der Reichsbodenschätzung</i>	73
3.3.3	<i>Anwendung und Kritik der Reichsbodenschätzung</i>	74
3.3.4	<i>Digitalisierung der Karten der Reichsbodenschätzung</i>	75
3.3.5	<i>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</i>	76

3.4	APPARENTE ELEKTRISCHE LEITFÄHIGKEIT DES BODENS (ECA)	77
3.4.1	<i>Stand des Wissens</i>	77
3.4.2	<i>Material und Methoden</i>	82
3.4.3	<i>Ergebnisse</i>	83
3.4.3.1	Korrelationen zwischen ECa-Werten aus verschiedenen Messungen	83
3.4.3.2	Sichtung und Aufbereitung der Rohdaten	83
3.4.3.3	Exemplarische Analyse einer Fahrspur: Autokorrelationen	86
3.4.3.4	Kartenerstellung	87
3.4.3.5	Beziehungen zur Lössmächtigkeit und Horizontfolge	96
3.4.3.6	Vergleich der ECa-Daten mit einer Distelkartierung	99
3.4.4	<i>Diskussion</i>	100
3.4.5	<i>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</i>	109
3.5	FERNERKUNDUNG - LUFTBILDER	111
3.5.1	<i>Stand des Wissens</i>	111
3.5.2	<i>Datenmaterial und Verarbeitungsmethoden</i>	117
3.5.3	<i>Ergebnisse</i>	119
3.5.3.1	Allgemeine Beobachtungen	119
3.5.3.2	Vergleich von Klassifizierungsverfahren	125
3.5.3.3	Nutzung von Luftbild-Aufnahmen zurückliegender Termine	130
3.5.4	<i>Diskussion</i>	134
3.5.5	<i>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</i>	145
3.6	FERNERKUNDUNG - SATELLITENBILDER	146
3.6.1	<i>Einführung</i>	146
3.6.2	<i>Datenmaterial und Verarbeitungsmethoden</i>	147
3.6.3	<i>Ergebnisse</i>	147
3.6.4	<i>Diskussion</i>	154
3.6.5	<i>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</i>	156
<b>4</b>	<b>ANALYSE VON STANDORTKARTEN</b>	<b>157</b>
4.1	METHODIK	158
4.2	STANDORT-SPEZIFISCHE ERTRAGSERMITTLUNG	160
4.2.1	<i>Ertragskarten und Daten der Reichsbodenschätzung</i>	160
4.2.1.1	Material und Methode	160
4.2.1.2	Ergebnisse	160
4.2.1.3	Diskussion	162
4.2.2	<i>Ertragskarten und klassifizierte Luftbilder</i>	164
4.2.2.1	Material und Methode	164
4.2.2.2	Ergebnisse	164
4.2.2.3	Diskussion	168
4.3	ÜBERPRÜFUNG VON BODENKARTEN	170
4.3.1	<i>Reichsbodenschätzung</i>	170
4.3.1.1	Material und Methode	170
4.3.1.2	Ergebnisse	170
4.3.1.3	Diskussion	172

4.3.2	<i>ECa<sub>25</sub>-Karten</i> .....	174
4.3.2.1	Material und Methode.....	174
4.3.2.2	Ergebnisse.....	174
4.3.2.3	Diskussion und Ausblick .....	175
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>176</b>
<b>6</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>178</b>
<b>7</b>	<b>VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN</b> .....	<b>189</b>
<b>8</b>	<b>VERZEICHNIS DER TABELLEN</b> .....	<b>197</b>
<b>9</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>200</b>

## 1 Problemstellung

Dem praktischen Ackerbau sind seit Beginn der 1990er Jahre durch Entwicklungen der Land- und Computertechnik neue Chancen im Hinblick auf eine zukünftige, dem einzelnen Standort noch besser angepasste Landnutzung erwachsen. Diese veränderten Möglichkeiten werden unter Begriffen wie Teilschlag-, Ort- bzw. Standort-spezifischer Ackerbau oder auch Precision Farming mehr oder minder umfangreich zusammengefasst. Sie beinhalten die Möglichkeiten einer differenzierten Bodenbearbeitung und der variierten Bestandesführung auf mit einer Fruchtart bestellten Schlägen.

Diese Begriffe sprechen ein originär ackerbauliches Thema an, da es um die optimierte Führung von Pflanzenbeständen unter der Berücksichtigung der spezifischen Standortverhältnisse geht. Trotz dieser inhaltlichen Bindung der Thematik an den Acker- und Pflanzenbau waren die Anfangsjahre vornehmlich durch eine Technik-dominierte Entwicklung gekennzeichnet. Seit dem Ende der 1990er Jahre stehen erste praxistaugliche Geräte zur ortsspezifisch differenzierten Ausbringung von Saatgut oder Düngemittel zur Verfügung und auch das zur Ortung auf dem Feld verwendete DGPS-System (Differenciales Globales Positionierungs-System) arbeitet mit ausreichender Zuverlässigkeit und Genauigkeit. Die beginnende Anwendungsreife der Steuerungs- und Regelungstechnik rückt wieder vermehrt acker- und pflanzenbauliche Fragestellungen in den Vordergrund.

Eine Durchführung des Standort-spezifischen Ackerbaus auf Ackerschlägen in Marktfrucht-Betrieben steht momentan vor zwei Hauptproblemen: 1.) der effizienten Datenerhebung zur Beschreibung der räumlichen Verteilung von unterschiedlichen Standorten auf einem Schlag und 2.) der ackerbaulichen Interpretation der gefundenen Standortunterschiede.

Diese Probleme lassen sich vereinfacht durch folgende Fragen umschreiben:

- 1) 'Datenerhebung': Wie können ackerbaulich relevante Standortunterschiede kostengünstig und mit hohem Informationsgehalt ortsgenau erhoben werden?
- 2) 'Dateninterpretation': Welche praktische Relevanz für den Ackerbau besitzen die in ihrer flächenhaften Verbreitung erfassten Standorte und wie lassen sie sich in ein Standort-spezifisches Bewirtschaftungskonzept integrieren?

Angelehnt an diese Fragen ist die vorliegende Arbeit in drei Teile gegliedert:

Im ersten Teil wird das Untersuchungsgebiet im Hinblick auf seine Bodeneigenschaften und die typischen Witterungsbedingungen kurz vorgestellt. Daraus werden die Konsequenzen abgeleitet, die sich für eine weitere Optimierung der Pflanzenproduktion in dieser Region ergeben.

Im zweiten Teil werden fünf verschiedene Methoden der landwirtschaftlichen Standorterkundung untersucht. Dabei wird jeweils auf die Erhebung der Daten, das Auftreten und die Beseitigung von möglichen Fehlern sowie die Erstellung von Karten eingegangen.

Der dritte Teil der Arbeit beschäftigt sich mit methodischen Fragen der Datenanalyse und der Dateninterpretation. An Beispielen wird gezeigt, wie aus den Standort-Karten Informationen gewonnen werden können, und wie diese bei der Standort-spezifischen Gestaltung von Bewirtschaftungsmaßnahmen Berücksichtigung finden können.

## 2 Standorteigenschaften im Untersuchungsgebiet

### 2.1 Lage des Untersuchungsgebietes

Die Untersuchungen fanden im Lössgebiet des Fläming auf den ackerbaulich genutzten Feldern der Nuthequelle GmbH Niedergörsdorf statt.

Der Fläming ist Teil des südlichen Landrückens, dessen deutscher Teil mit der Lüneburger Heide beginnt, sich über die Altmark und den Fläming nach Osten erstreckt und im Lausitzer Grenzwall endet. Im Norden wird er begrenzt durch das Baruther Urstromtal, im Süden durch das Magdeburger Urstromtal. Die westliche Grenze zur Altmark wird durch den Verlauf der Elbe gebildet. Der Übergang zum Lausitzer Grenzwall wird durch den Fluss Dahme in der Umgebung der gleichnamigen Stadt markiert (LIEDTKE (1960/1961)).

Innerhalb des ca. 130 km in WE-Richtung und ca. 30-50 km in NS-Richtung sich erstreckenden Gebietes, das geologisch durch Sanderflächen und Endmoränen des Warthestadiums der Saale-Eiszeit geprägt ist, befindet sich ein Löss-Streifen. Dieser Streifen hat eine Ausdehnung von ca. 50 km in WE und 3-5 km in NS-Richtung (LINSTOW (1902)). Das Untersuchungsgebiet liegt im Übergangsbereich vom Hohen Fläming zum Niederen Fläming, südwestlich von der Stadt Jüterbog. Die Geländehöhe über NN beträgt etwa 75 bis 100 m. In der Abb. 1 sind die Bodenarten gemäß Reichsbodenschätzung, die Feldgrenzen der Nuthequelle GmbH und die Siedlungsflächen im Untersuchungsgebiet dargestellt. Deutlich erkennbar ist der von WNW nach ESE verlaufende Löss-Bereich, der durch die Bodenart 'stark sandiger Lehm' (SL) gekennzeichnet ist und im Norden und Süden von sandigeren Bodenarten (S, Sl, IS) begrenzt wird.

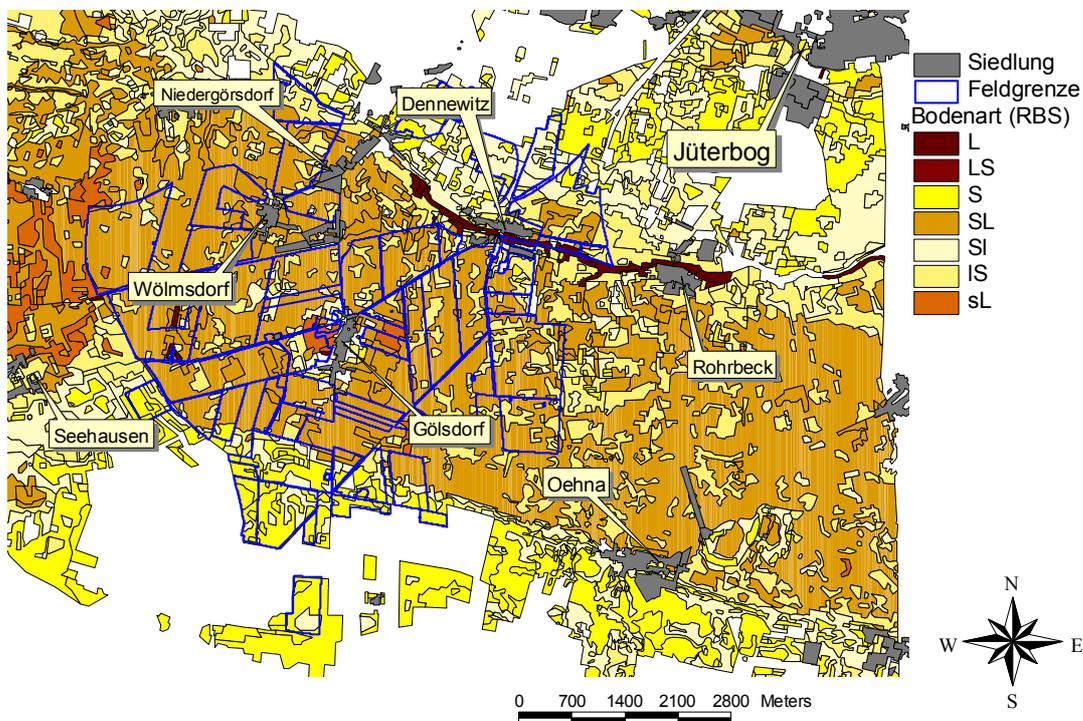


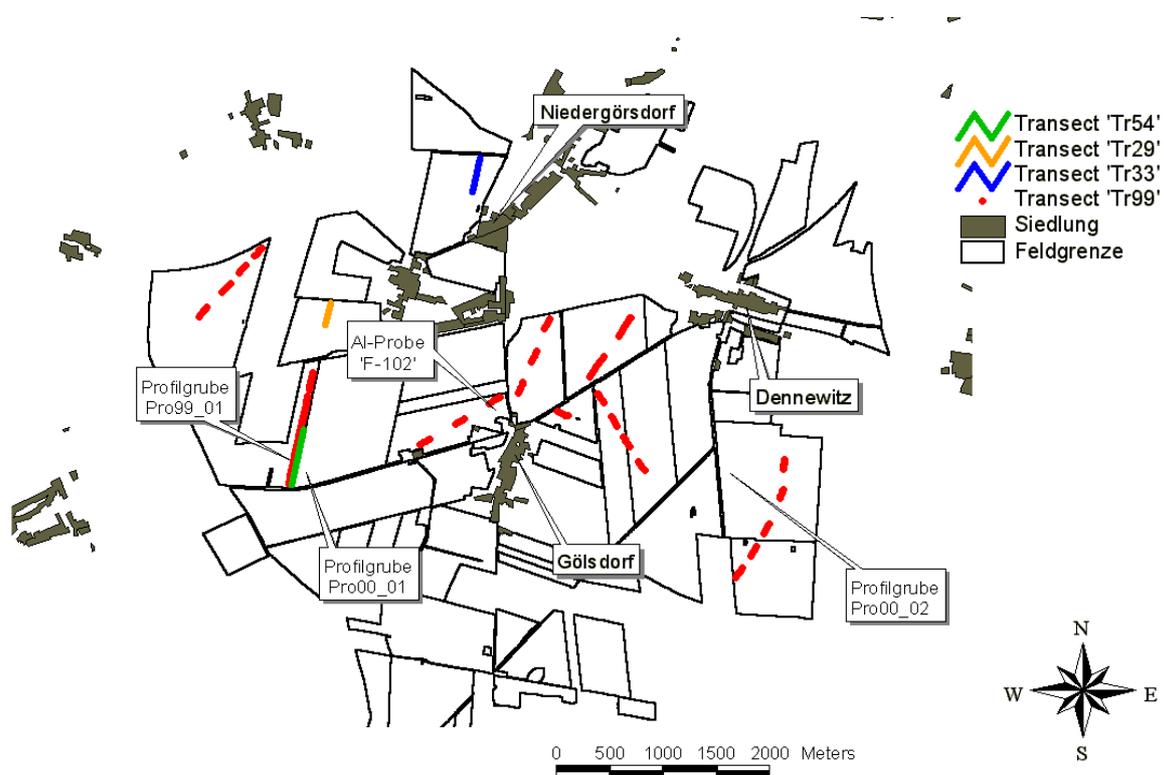
Abb. 1: Karte der Bodenarten gemäß der Reichsbodenschätzung, Feldgrenzen der Nuthequelle GmbH und Siedlungsflächen für den Bereich des Untersuchungsgebietes

## 2.2 Eigenschaften der Böden im Untersuchungsgebiet

### 2.2.1 Material und Methoden

#### Lössmächtigkeit / Bodenhorizonte

Im Untersuchungsgebiet sind auf elf Schlägen Beprobungen mit dem Pürckhauer Bohrstock bis zu einer Tiefe von 100cm vorgenommen worden. Die Mächtigkeit der Lössdecke und die Tiefenlagen der einzelnen Bodenhorizonte wurden kartiert. Die Beprobungsorte des Transectes 'Tr99' sind in Klein-Transecte mit jeweils sechs Punkten aufgeteilt. Die Entfernung der Punkte in diesen Klein-Transecten beträgt 20m. Zwischen den Teil-Transecten eines Feldes liegen 150-300m. Die Transecte 'Tr54', 'Tr33' und 'Tr29' sind nicht weiter unterteilt. Die Punktentfernung beträgt für 'Tr54' 10 m, für 'Tr33' und 'Tr29' 5m. Einen Überblick über die Lage und Orientierung der Transecte vermittelt die Karte in der Abb. 2.



**Abb. 2: Lage der Transecte mit den Beprobungsorten für die Bohrstock-Kartierung und der Profilgruben für die Entnahme von Bodenproben.**

#### Korngrößen-Analyse

An drei Stellen wurden Profilgruben ausgehoben, aus denen Bodenmaterial für die Korngrößen-Analyse entnommen wurde (Abb. 2). Die Profilgrube Pro99\_01 befindet sich auf dem Feld '300' in der Nähe der Transect-Punkte. Die Profilgruben Pro00\_01 (Feld 200) und Pro00\_02 (Feld 1000) sind unabhängig von den Verläufen der Transecte angelegt. Zusätzlich wurden drei weitere Bodenproben in die Analyse mit einbezogen: Das auf einer Drillmaschine im Verlauf eines Arbeitstages im Herbst 1999 akkumulierte Bodenmaterial vom Feld 400 ('F-400'), eine Al-Probe aus einem Al+Bt-Verzahnungshorizont vom Feld 102 ('F-102') sowie eine Probe aus der Krume von einem Feld nahe Dahme ('Dahme'; der Ort liegt ca. 25 km östlich des Untersuchungsgebietes).

20 g Boden wurden bei 105°C getrocknet und dienten als Ausgangsmaterial der Korngrößenanalyse. Bei mehr als 1% organische Substanz wurde diese mit Wasserstoffperoxid zerstört. Die Bodensubstanz wurde nach weiterer Vorbehandlung in einer Lösung aus 1g Na-Dithionit, 5ml 1.25 %-igem NaOH und 30ml 0.3 molarem Na-Citrat von verkittendem FE-Oxid befreit. Die verschiedenen Fraktionen im Korngrößenbereich von 2000µm bis 20µm wurden durch Siebung, die feineren Fraktionen durch wiederholtes Sedimentieren in demineralisiertem Wasser im Sedimentationsverfahren nach ATTERBERG bestimmt.

#### Bodenwasserhaushalt

Im Frühjahr 1999 wurden die gravimetrischen Feuchten ausgewählter Bodenhorizonte an den Orten des Transectes 'Tr99' bestimmt. Im Frühjahr 2000 wurde diese Beprobung wiederholt, jedoch erfolgte die Bodenentnahme nicht Horizont-spezifisch sondern in regelmäßigen Tiefenabschnitten von jeweils 10cm. In den Sommermonaten der Jahre 1999, 2000 und 2001 wurden die Orte des Transectes 'Tr99' direkt nach der Ernte erneut beprobt. Wiederum erfolgte die Bodenentnahme in Tiefenabschnitten von jeweils 10cm bis zu einer Tiefe von 100cm. Das Bodenmaterial wurde in Gläsern bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Aus dem Gewichtsverlust wird die gravimetrische Bodenfeuchte errechnet. Bezugsbasis der Feuchte ist der trockene Boden.

## 2.2.2 Ergebnisse

### 2.2.2.1 Lössmächtigkeit

Statistische Angaben zu den kartierten Lössmächtigkeiten der vier Transecte sind in der Tab. 1 wiedergegeben. Die arithmetischen Mittelwerte liegen zwischen 60 und 65cm. Die Mediane unterscheiden sich nur geringfügig und liegen zwischen 61.5 und 63.0cm. Die minimalen Werte von 25, 27 bzw. 28cm sind durch die Methodik der Kartierung bedingt und daher als Artefakte anzusehen. Da auch in Sand-Böden zum Teil erhebliche Schluff-Beimengungen in der Krume auftreten, wurde an diesen Beprobungsorten die Lössmächtigkeit mit der Krumenmächtigkeit gleichgesetzt. Die Kartierung erfolgte nur bis zu einer Tiefe von 100cm. Wenn der Substratwechsel von Löss zu Sand nicht in diesem Bereich auftrat, wurde die Lössmächtigkeit mit '>100cm' vermerkt. Daher sind die Daten der Tab. 1 einer gewissen Verzerrung unterworfen.

Um den verzerrenden Einfluss der Kartiermethodik auf die mittleren Lössmächtigkeiten abzuschätzen, wurden alle Orte mit einer Lössmächtigkeit von weniger als 35cm aus dem Datensatz 'Tr33' ausgeschlossen. Der Mittelwert und der Median stiegen dadurch um jeweils etwa 4cm auf 69 bzw. 66cm an. Das Ergebnis weist auf einen tendenziell unterschätzenden Einfluss der Kartiermethodik auf die Mittelwerte der Lössmächtigkeit hin. Der Einfluss ist jedoch gering.

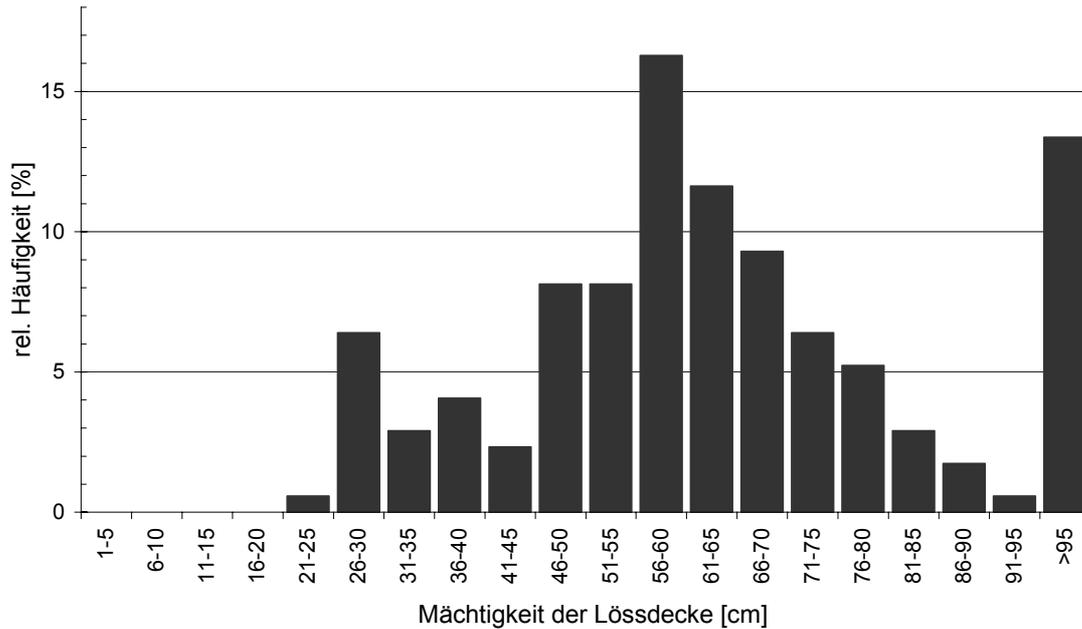
An den Orten des Transectes 'Tr29' wurde der Substratwechsel von Löss zu Sand immer unterhalb des Ap-Horizontes gefunden, reine Sand-Böden traten nicht auf.

**Tab. 1: Ergebnisse der Kartierung der Lössmächtigkeit an Transect-Punkten**

	Einheit	Tr99	Tr54	Tr33	Tr29
Mittelwert	[cm]	64.0	60.4	64.9	62.5
Median	[cm]	62.5	62.5	61.5	63.0
Minimum	[cm]	25	27	28	47
Maximum	[cm]	> 100	> 100	> 100	84
Varianz	[cm <sup>2</sup> ]	412	409	555	68
Variationskoeff.	[%]	32	34	36	13
Anzahl	[-]	172	54	60	34

Die Abb. 3 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der kartierten Lössmächtigkeiten des Transectes 'Tr99' mit einer Klassenbreite von 5cm.

Es sind lokale Maxima in den Klassen '26-30cm', '36-40cm', '56-60cm' und '>95cm' zu unterscheiden. Das Maximum in der ersten Klasse ist methodisch bedingt (s.o.) und repräsentiert Sand-Böden mit Schluffbeimengungen in der Krume. Im Bereich von 46-80cm tritt der Großteil der kartierten Lössmächtigkeiten auf. Relativ selten sind Mächtigkeiten im Bereich von 31-45cm und 80-95cm.

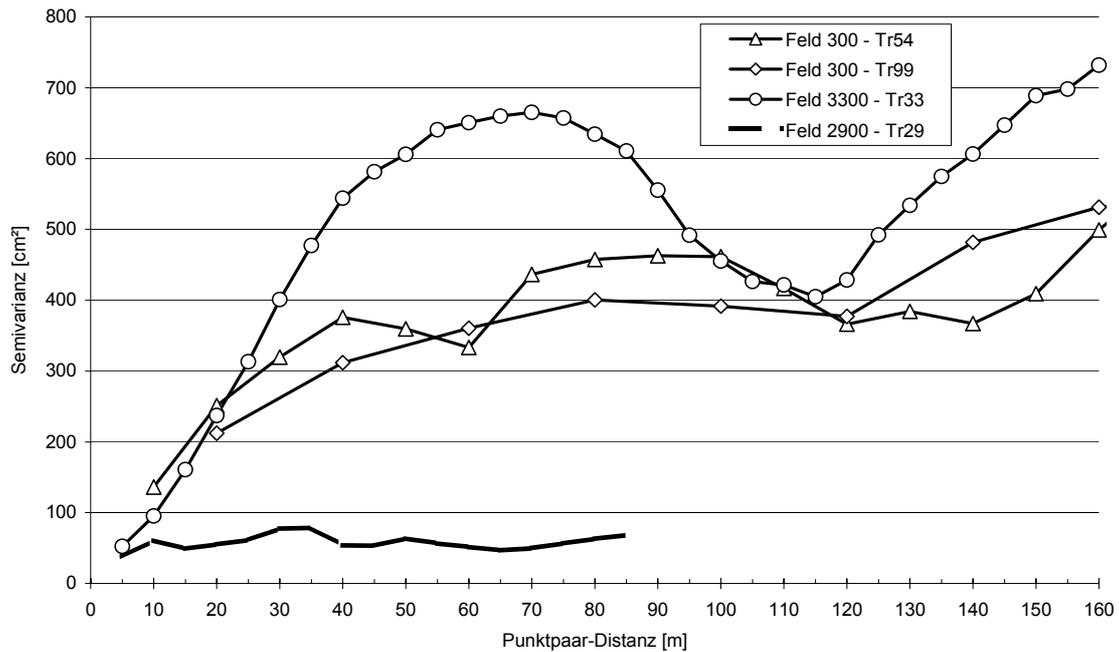


**Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der kartierten Lössmächtigkeit über Sand an den Orten des Transectes 'Tr99'**

Für die Daten der Transecte 'Tr54', 'Tr33' und 'Tr29' wurden die empirischen Semivariogramme berechnet (STEIN (1995)). Ebenso wurde die Berechnung der Semivarianzen für die Lössmächtigkeit mit den Daten des Transectes 99 durchgeführt, die auf dem Feld '300' erhoben wurden. Die Ergebnisse sind in der Abb. 4 dargestellt.

Für das Variogramm des Transectes 'Tr29' läßt sich keine Veränderung der Semivarianzen mit steigender Punktpaarabstand erkennen. Für die Daten der Transecte 'Tr54' und 'Tr33' ergeben sich ähnliche Verläufe der Semivariogramme. Die Semivarianzen liegen für die Daten des Transectes 'Tr33' auf einem höheren Niveau. Auffällig an beiden Semivariogrammen ist der zunächst ansteigende Verlauf der Werte auf den ein lokales Minimum bei einer Punktpaarabstand von ca. 105-120m ('Tr33') bzw. 120-140m ('Tr54') folgt. Im Anschluss daran steigen die Werte wieder. In dem Verlauf der Semivarianzen des Transectes 'Tr54' lässt sich noch ein weiteres lokales Minimum bei 60m erkennen.

An den Semivarianzen des Transectes 'Tr99' auf dem Feld '300' ist dieser alternierende Verlauf nicht zu erkennen. Die Werte steigen bis zu einer Punktpaarabstand von ca. 70m kontinuierlich an und verbleiben auf dem Niveau von ca. 400cm<sup>2</sup> bis zu einer Distanz von 120m. Für größere Werte als 120 m errechnen sich wieder steigende Semivarianzen.



**Abb. 4: Empirische Semivariogramme für die Daten der Lössmächtigkeit über Sand an den Orten von vier Transecten (Transect-Verlauf in NS-Richtung)**

### 2.2.2.2 Bodentypen

Aufgrund der Bohrstock-Kartierungen und der Anlage von Profilgruben lassen sich für das Untersuchungsgebiet sechs typische Böden ausweisen (Tab. 2).

An Standorten ohne Lössdecke kommen Parabraunerden, Bänder-Parabraunerden oder Braunerden aus Sandersanden vor. Auf Standorten mit Lössdecke hängt der Bodentyp von der Mächtigkeit der Lössbedeckung ab.

In den Fällen, in welchen eine bis zu 50cm mächtige Lössdecke vorhanden ist, treten im Grenzbereich zwischen Löss und Sand und im unterliegenden Sand häufig Tonbänder auf. Der Bodentyp dieser Standorte wird daher als eine Bänder-Parabraunerde aus geringmächtigem Löss über Sand angesprochen. Dieser Bodentyp nimmt nur relativ geringe Flächenanteile im Untersuchungsgebiet ein.

**Tab. 2: Typische Böden im Untersuchungsgebiet**

Nr.	Bodentyp	Löss-Mächtigkeit
1	Bänder-Parabraunerde aus Löss über Sand	< 50 cm
2	Parabraunerde aus Löss über Sand	50-80 cm
3	Parabraunerde aus Löss über Sand	>> 80 cm
4	Parabraunerde aus Löss-Kolluvium über fossiler Parabraunerde aus Löss (wahrscheinlich über Sand)	>> 80 cm
5	Parabraunerde aus Flugsand über Löss über Sand	ca. 30cm / eingeschaltet
6	Bänder-Parabraunerde oder Braunerde aus Sand	keine Löss-Auflage

An Standorten mit Lössmächtigkeiten zwischen ca. 50 und 90cm wird häufig ein Al- und ein Bt-Horizont kartiert. Es treten aber auch Bodenprofile auf, an denen die Trennung dieser

beiden Horizonte anhand des Bohrstockbefundes schwierig ist. In diesen Fällen wurde ein AlBt-Horizont vermerkt. Grundsätzlich ist für die Standorte mit durchschnittlicher Lössmächtigkeit daher von einer Parabraunerde aus Löss über Sand auszugehen. Deutliche Tonbänderungen sind im Löss selten, jedoch treten Verzahnungshorizonte (Al+Bt) auf. Letztere können aber nur mit Hilfe von Profilgruben eindeutig angesprochen werden. Häufig ist zwischen dem Sand und dem Löss eine Steinsohle eingeschaltet, in der zum Teil deutliche Windkanter auftreten.

Am Transect 'Tr29' wurde fast ausschließlich die Parabraunerde aus Löss vom Typ 2 (siehe Tab. 2) kartiert. Daher erfolgte an den dort erhobenen Daten die Ermittlung der spezifischen Horizont-Mächtigkeiten. Die Tab. 3 gibt die Ergebnisse der Berechnungen wieder.

**Tab. 3: Statistische Werte für die Mächtigkeiten typischer Horizonte der Parabraunerde aus Löss an den Orte des Transectes 'Tr29'**

	Einheit	Ap-Horizont	Al-Horizont	Bt-Horizont	Bt-Horizont (>7cm)*
Mittelwert	[cm]	31.3	20.0	13.1	15.0
Median	[cm]	31.0	20.0	13.0	14.0
Minimum	[cm]	28.0	9.0	2.0	8.0
Maximum	[cm]	34.0	33.0	27.0	27.0
Varianz	[cm <sup>2</sup> ]	2.4	28.5	36.4	22.7
Variationskoeff.	[%]	5	27	46	32
Anzahl	[-]	34	34	29	24

\*: siehe Erläuterung im Text

Die typischen Ap-, Al- und Bt-Horizonte dieser Parabraunerden haben durchschnittliche Mächtigkeiten von 31, 20 bzw. 13cm. Der Bt-Horizont ist nicht in allen Fällen ausschließlich im Löss ausgebildet. Zum Teil beginnt er erst in den untersten Zentimetern der Lössauflage und erstreckt sich noch einige Zentimeter in den unterliegenden Sand. Wenn die Orte aus den Berechnungen ausgeschlossen werden, an denen die Bt-Horizonte im Bereich des Substratwechsels auftreten, so steigt die mittlere Mächtigkeit des Bt-Horizontes (Spalte 'Bt-Horizont (>7cm)' der Tab. 3).

An den Orten, an denen der Substratwechsel von Löss zu Sand unterhalb von 80cm gefunden wird, sind zwei grundsätzlich verschiedene Bodentypen kartiert worden. Einerseits treten überdurchschnittlich mächtige Parabraunerden auf, die durch eine deutliche Trennung in Al- und Bt-Horizont gekennzeichnet sind. Andererseits werden Löss-Kolluvien gefunden. Ein bis zu 50-60cm mächtiges Kolluvium bedeckt an diesen Orten einen 10-20cm mächtigen, fossilen Ah-Horizont (fAh), der Teil einer fossilen Parabraunerde ist.

Am südlichen Rand des Untersuchungsgebietes wurde im Frühjahr 2002 ein weiterer Bodentyp gefunden. Es handelt sich dabei um eine Parabraunerde aus Flugsand über Löss über Sandersand. Die Flugsandschicht ist 40cm mächtig. Sie bedeckt eine ca. 30cm mächtige Lössschicht, in der ein Al- und ein Bt-Horizont deutlich zu unterscheiden sind. Der Bt-Horizont im Löss wird durch eine Steinsohle von dem unterliegenden Sand getrennt. Über die

flächenhafte Verbreitung dieses Bodentyps im Untersuchungsgebiet liegen bislang keine Erkenntnisse vor.

### 2.2.2.3 Korngrößenanalyse

In der Tab. 4 sind die Entnahmeorte, die beprobten Horizonte, die Tiefenlage der Horizonte, die Humusgehalte, die Kiesanteile sowie die relativen Anteile der Hauptbodenarten am kiesfreien Material aufgeführt. Eine vollständige Zusammenstellung aller bestimmten Korngrößen-Fractionen befindet sich im Anhang in Tab. A-1.

**Tab. 4: Ergebnisse der Korngrößenanalyse für die untersuchten Bodenproben**

Ort	Horizont	Tiefe der Entnahme [cm]	Humus [%]	Kies [m%]	Sand [m%]	Schluff [m%]	Ton [m%]
Pr99_01	MAp	0-33	1.7	0.0	14.6	74.8	10.6
	MAI	33-43	0.8	1.6	11.3	75.9	12.8
	fAh	43-55	9.0	0.0	16.0	79.1	4.9
	Al	55-83	0.3	1.5	14.8	79.6	5.6
	Bt 1	133	0.2	0.0	11.8	72.5	15.7
	Bt 2	141	0.3	0.0	11.3	65.1	23.5
	II Bbt	145	0.1	0.4	80.3	14.5	5.2
Pr00_01	Ap 1	18-22	1.3	0.0	16.4	75.1	8.4
	Ap 2	30-34	1.0	0.0	15.8	75.9	8.3
	AlBt	50-54	0.2	0.0	12.1	83.3	4.5
	Bt	74-86	1.0	0.0	8.9	51.2	38.6
Pr00_02	Ap 1	14	1.5	0.0	26.2	67.6	6.2
	Ap 2	30	0.9	0.0	23.8	70.1	6.1
	Al	36	0.3	0.0	11.7	77.6	10.7
	AlBt 1	45	0.2	0.0	13.8	73.4	12.8
	AlBt 2	55	0.2	0.0	12.3	71.9	15.8
	II Bbt	78	0.2	0.0	66.9	26.0	7.1
Dahme	Ap	20-30	1.7	0.0	32.1	63.9	4.0
F-102	Al	70	0.2	0.0	25.4	69.6	5.0
F-400	Ap	ca. 0-10	1.3	0.0	11.8	83.2	4.9

Die Humusgehalte der untersuchten Ap-Horizonte liegen im Bereich von 1.3 bis 1.7%. In dem fossilen Ah-Horizont im Profil Pr99\_01 werden 9% ermittelt. Freier Kalk konnte nicht gefunden werden. Kies war selten nachzuweisen und erreichte in Ausnahmefällen knapp 2% der Gesamtboden-Einwaage.

Die Ergebnisse der Korngrößenverteilung in den Fraktionen < 2000µm Partikeldurchmesser lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Die aus dem Löss von Niedergörsdorfer gebildeten Bodenhorizonte bestehen aus etwa 10-25% Sand, 50-85% Schluff und 5-40% Ton. Die Sandfraktion wird deutlich vom Feinsand-Anteil (200-63µm) dominiert. Dieser ist mit 4-10% meist zwei- bis dreimal so groß wie der Mittelsand-Anteil. Grobsand tritt selten in Anteilen von mehr als 2% auf. Vier Löss-Proben

haben Sandanteile von mehr als 20%. Bei diesen Proben besteht in zwei Fällen ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen dem Anteil an Fein- und Mittelsand (Ort: Pro00\_02; Proben 'Ap 1' & 'Ap 2'). In den beiden anderen Fällen ist zwar das typische Verhältnis zwischen Fein- und Mittelsand von 2-3:1 vor, der Feinsandanteil ist mit mehr als 15% aber deutlich größer als bei allen übrigen Proben. Die Zusammensetzung der Schluff-Fraktion unterscheidet sich dagegen nicht wesentlich von den Werten der anderen Proben (s.u.).

Deutliche Unterschiede im Schluffgehalt werden zwischen dem Bodenmaterial aus Bt-Horizonten einerseits und aus Ap-, Al- oder AlBt-Horizonten andererseits festgestellt. Die letztgenannten Horizonte haben typische Gesamt-Schluffgehalte von 65-85%. In Bt-Horizonten kann dieser Wert auf bis zu 50% sinken. Die Schluff-Fraktion weist i.d.R. die zwei- bis dreifache Menge an Grobschluff gegenüber Mittelschluff auf. Der Grobschluff setzt sich zu etwa gleichen Teilen aus grobem (63-35 $\mu$ m) und feinem (35-20 $\mu$ m) Grobschluff zusammen. In offensichtlich durch Wassererosion verlagertem Löss-Material ist der Anteil des Feinschluffs gegenüber dem des Grobschluffes deutlich erhöht.

Die Tongehalte liegen zwischen 5 und 40%. Die gefundenen Werte lassen sich in vier Gruppen gliedern, die im Bezug zu den Horizontbezeichnungen und damit zur Bodengenese stehen: 1) Ap-/Al-Horizonte; 2) Bt-Horizonte; 3) AlBt-Horizonte; 4) MAp/MAI-Horizonte.

In Ap- und Al-Horizonten beträgt der Tongehalt im allgemeinen zwischen 5 und 8%. Bt-Horizonte weisen Gehalte von 15-40% auf. AlBt-Horizonte bilden in Abhängigkeit von dem Ausmaß der Tonverlagerung den Übergang zwischen den beiden vorgenannten Gruppen, weisen aber meist Tongehalte von deutlich weniger als 20% auf. In kolluvialem Lössboden-Material betragen die Tongehalte 10-13%.

#### **2.2.2.4 Bodenwasserhaushalt**

Die Mittelwerte der Horizont-spezifischen Bodenfeuchten für den Zustand der Frühjahrs-Sättigung und das nicht pflanzenverfügbare Totwasser sind in der Abb. 5 dargestellt. Die Mittelwerte sind in absteigender Reihenfolge geordnet.

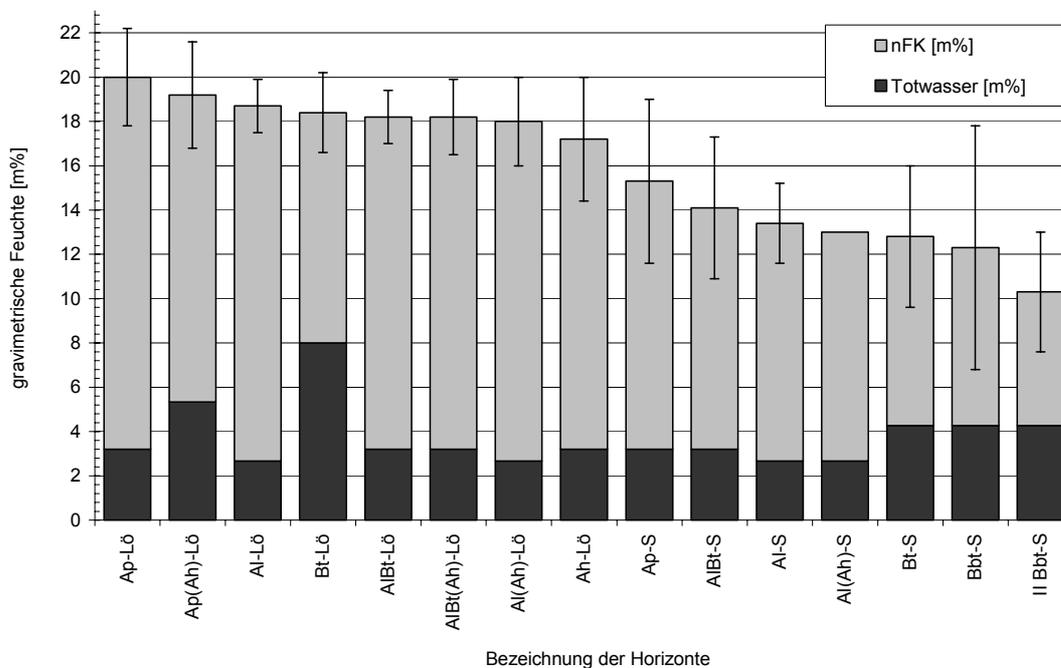
Die Bodenproben der Ap-Horizonte von Löss-Böden erreichten im Zustand der Feldkapazität mit durchschnittlich 20 % der Bodentrockenmasse (m%) den höchsten Wert. Die übrigen Horizonte von Löss-Böden lagen bei 17-19m%. Die größten Streuungen der Einzelwerte treten in Löss-Horizonten auf, in denen fossiles Ah-Material vorhanden ist. Die durchschnittlichen Bodenfeuchten der Sandboden-Horizonte liegen zwischen 15m% (Ap-S) und 10m% (II Bbt-S). Alle Mittelwerte der Feuchten in den Horizonten von Sand-Böden haben große Streuungen.

Die Ergebnisse der Bestimmung der Bodenfeuchte nach der Ernte lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Grundsätzlich ist die Feuchte bis zu einer Bodentiefe von ca. 50cm sehr stark von dem jeweiligen Verlauf der Niederschläge in den Wochen vor der Probenahme abhängig. Daher ist die Berechnung durchschnittlicher Feuchten für diese Tiefen über die drei Jahre nicht sinnvoll. Jedoch ist das Jahr 1999 geeignet, spezifische Grenzwerte abzuleiten, da die Getreideernte unter sehr trockenen Witterungsbedingungen stattfand. Die im Sommer 1999 gewonnenen Feuchtedaten zeigen, dass Ap-, Al- und tonarme AlBt-Horizonte aus Lössmaterial durch die Pflanzenwurzeln bis zu einer Restfeuchte von ca. 3-4m% ausgeschöpft werden können. Steigende Tongehalte in den jeweiligen Horizonten führten zu erhöhten Restfeuchten. Eine Besonderheit bilden fossile Ap-Horizonte im Löss. Relativ hohe

Restfeuchten nach der Ernte konnten nicht durchweg mit entsprechenden Tongehalten erklärt werden.

Horizonte der Sand-Böden wurden im Sommer 1999 bis zu einem Restwassergehalt von ca. 3m% ausgeschöpft. Abweichungen von diesem Wert traten wiederum auf, wenn Tonbänderungen im Boden vorlagen.

Das Ausmaß der Ausschöpfung variiert in den drei Untersuchungsjahren mit der jeweils angebauten Pflanzenart. Nach Winterraps werden im allgemeinen die geringsten Bodenfeuchten gemessen. Die Restfeuchten nach Wintergetreide zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der jeweiligen Vorfrucht des Getreides. Nach einer Getreidevorfrucht sind die im Boden bestimmten Restfeuchten tendenziell größer als nach Raps, Erbse, Kartoffel oder Zuckerrübe. Dies trifft auch für das Erntejahr 2000, in dem eine extreme Frühsommer-Trockenheit herrschte. Der Einfluss der Vorfrucht auf die Restfeuchte nach der Ernte ist jedoch nur in lössbürtigen Böden zu finden. Auf Sand-Böden wurde das Wasser grundsätzlich bis zur Ausschöpfungsgrenze entzogen.



**Abb. 5: Nutzbare Feldkapazität (nFK) und nicht-pflanzenverfügbares Bodenwasser einzelner Bodenhorizonte von Löss- (Lö) und Sand-Böden (S) im Untersuchungsgebiet (Fehlermaß: Standardabweichung)**

## **2.3 Witterungsbedingungen im Untersuchungsgebiet**

### **2.3.1 Daten der Wetterstation**

In der Abb. A-1 bis Abb. A-4 sind die Dekaden-Mittelwerte der Temperaturen und die Summen der Niederschläge für den Zeitabschnitt April 1999 bis Mai 2002 dargestellt. In den Jahren 1999, 2000 und 2001 wurden insgesamt 365, 440 bzw. 422mm Niederschlag gemessen. Der Median der Dekaden-Niederschlagssummen liegt bei 9mm, in 50% der Dekaden werden Summen zwischen 5 und 18mm ermittelt. Im Jahr 2000 trat eine Frühsommertrockenheit in Verbindung mit überdurchschnittlich hohen Temperaturen auf (Abb. A-2). In dieser Periode lagen die Dekadensummen der Niederschläge über einen längeren Zeitabschnitt hinweg deutlich unter 10mm. Die Zeit von Juli bis August des Jahres 1999 war vergleichsweise niederschlagsarm.

Der erste Frost tritt in dem erfassten Zeitabschnitt Ende Oktober oder Anfang November auf. Mittlere Tagestemperaturen von weniger als Null Grad Celsius treten bis etwa Ende Januar auf, minimale Temperaturen unter dem Gefrierpunkt sind in allen Jahren bis in den April hinein zu verzeichnen. Im Januar 2002 begann am 18.1. durch ansteigende Temperaturen vergleichsweise rasch die Schneeschmelze, die durch die Niederschläge des 20.1. noch verstärkt wurde.

### **2.3.2 Beobachtungen und sonstige Mitteilungen**

Aus privaten Aufzeichnungen eines Mitarbeiters des Betriebes 'Nuthequelle' am Standort Gölsdorf, die rückwirkend bis 1995 vorlagen, wurde der Niederschlagsverlauf für den Zeitraum rekonstruiert. Der mittlere Jahresniederschlag lagen von 1995 bis 1999 im Bereich von 365mm (1999) bis 607mm (1998). Der Mittelwert für die Jahresniederschlagssumme über den Zeitraum von 1995 bis 2001 beträgt 475 mm.

In Gesprächen mit Ortsansässigen über die typische Witterung in der Region wurde sehr oft die Bedeutung der Niederschlagsmenge und -verteilung für den Erfolg des regionalen Ackerbaus betont. Besonders hervorgehoben wurde die zerstörerische Wirkung der Schmelzwässer zu Beginn der Schneeschmelze, die Möglichkeit von Ertragseinbußen durch eine Trockenperiode im Frühsommer und die Bedeutung ausreichender Niederschläge nach der Ernte für eine erfolgreiche Bodenbearbeitung und Aussaat.

## **2.4 Diskussion und Schlussfolgerungen**

Der einführende Abschnitt über die Standortverhältnisse im Untersuchungsgebiet soll die Rahmenbedingungen für die gegenwärtige landwirtschaftliche Pflanzenproduktion im Untersuchungsgebiet deutlich machen, soweit diese in den Bodeneigenschaften oder dem Witterungsverlauf begründet sind.

### Eigenschaften der auftretenden Bodenarten

Die meist insel- oder streifenförmigen Lössvorkommen im Gebiet des südlichen Landrückens werden im allgemeinen als Flottsand- oder Sandlössgebiete bezeichnet (ALTERMANN (1993), FIEDLER & ALTERMANN (1964), KOWALKOWSKI (1967), LANG (1990), VIERHUFF (1967)). FIEDLER & ALTERMANN (1964) definieren Sandlöss als äolisches Schluff-Sediment mit einem Sandgehalt von mindestens 15%. Die Bodenkundliche Kartieranleitung definiert Sandlöss als ein äolisch transportiertes Material mit mindestens 20% Sandgehalt (BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (1994)). Weiterhin wird von verschiedenen Autoren eine Zweigipfeligkeit in der Korngrößen-Häufigkeitsverteilung von Sandlöss gefunden, deren Maxima in den Körnungsklassen des Mittelsandes und Grobschluffes liegen (FIEDLER & ALTERMANN (1964), LINSTOW (1902)). Bei der Arbeit von LINSTOW (1902) ist zu berücksichtigen, dass die Definition der Grenzen der Körnungsklassen von dem heutzutage verwendeten System abweicht. Eine Zweigipfeligkeit ist trotzdem zu finden.

Da der Sandgehalt für die aus dem Raum Niedergörsdorf stammenden Proben häufig unterhalb von 20%, zum Teil auch unterhalb von 15% liegt, ist die generelle Bezeichnung als 'Sandlöss' für die Proben aus dem Untersuchungsgebiet abzulehnen. Das untersuchte Material stammt vornehmlich aus dem zentralen Bereich des Löss-Streifens. Wenn der unterschiedlich hohe Sandanteil im Löss oder Sandlöss als lokale Komponente gedeutet wird (VIERHUFF (1967)), könnte die Entfernung vom nördlichen und südlichen Rand des Löss-Streifens die abnehmenden Sandgehalte im Löss erklären. Da Sand durch den Wind nur über vergleichsweise kurze Strecken transportiert werden kann, wäre es denkbar, dass im Verlauf der Löss-Sedimentation der zunächst flächendeckend an der Bodenoberfläche vorhandene Sandersand in das antransportierte, an Grobschluff reiche Material eingemischt wurde. Sobald eine relativ geschlossene Lössdecke vorhanden war, konnten nur noch die nördlich und südlich der Sedimentationszone gelegenen Bereiche als Liefergebiete für den Sand dienen. Daher ist das aus dem zentralen Bereich des Lössgebietes stammende Material relativ sandarm.

Auch eine Zweigipfeligkeit der Häufigkeitsverteilungen ist in keiner der untersuchten Proben aus dem Raum Niedergörsdorf zu beobachten. LANG (1990) berichtet aus dem Raum Celle ebenfalls über Häufigkeitsverteilungen der Korngrößen von Sandlöss-Proben, bei denen die deutliche Zweigipfeligkeit nicht auftritt. Die Probe 'Dahme' stammt aus dem ca. 25km östlich gelegenen Grenzgebiet des Niederen Fläming zum Lausitzer Grenzwall. Diese Probe ist als typischer Sandlöss anzusprechen, eine Zweigipfeligkeit liegt hier vor. MAUDREI (1968) kommt bei Korngrößenanalysen an Proben des Niederen Fläming zu ähnlichen Ergebnissen.

Die eigenen Untersuchungsergebnisse zum Schluff- und Tongehalt der Proben befinden sich in Übereinstimmung mit den Berichten anderer Autoren. Es dominiert der Grobschluff.

Feinschluff und Ton treten nur in sehr geringen Anteilen auf. Ausgenommen von dieser Feststellung sind hierbei die Bt-Horizonte.

Bereits in der ersten systematischen bodenkundlichen Untersuchung des Fläming wird von der leichten Zerstorbarkeit des Lösses durch Wasser berichtet (LINSTOW (1902)). Auch FIEDLER & ALTERMANN (1964) schätzen die Erosionsanfälligkeit der schluffreichen Fläming-Lösse ebenso hoch ein wie die von anderen Lössvorkommen.

Im Verlauf der dreijährigen Untersuchungszeit wurden auf vielen Feldern die Verschlammung der Bodenoberfläche nach starken Regenfällen beobachtet. Dies war vor allem auf Feldern der Fall, auf welchen Zuckerrübe, Kartoffel oder Erbsen angebaut wurden. Wiederholt trat Bodenerosion durch Wasser in unterschiedlichem Ausmaß auf. Vor allem der von Pflanzen während des Winterhalbjahres nahezu unbedeckte Boden war dafür besonders anfällig. Wie die detaillierte Korngrößenverteilung der obersten Horizonte der Profilgrube Pro99\_01 (Tab. 4) zeigt, überwiegt in erosiv umgelagertem Material der feine Grobschluff (gUf) den Anteil des groben Grobschluffes, während er bei den übrigen Proben annähernd gleich groß oder geringer ist. Wahrscheinlich liegt ein Teil der gUf-, mU- und fU- sowie der Ton-Fraktion im Löss aggregiert vor (FREYTAG & JÄGER (1995)). Diese Aggregate hätten dann oberhalb der eigentlichen Korngrößen liegende Durchmesser. Die Umlagerung von solchen Aggregaten durch Bodenerosion hätte am Akkumulationsort eine tendenzielle gUg-Verarmung zur Folge. Die Staubprobe von 'F-400' gibt ebenfalls Hinweise auf eine Aggregation von feinen Schluffpartikeln. Das untersuchte Bodenmaterial wurde während der Bearbeitung aufgewirbelt und sedimentierte auf der Maschine.

#### Untersuchungen zur Lössmächtigkeit

Die im Untersuchungsgebiet kartierten Lössmächtigkeiten von durchschnittlich etwa 65cm stimmen mit Angaben anderer Autoren für das Gebiet des Fläming überein (FIEDLER & ALTERMANN (1964), LINSTOW (1902), MAUDREI (1968)). LINSTOW (1902) und MAUDREI (1968) berichten über plötzliche Zunahmen der Lössmächtigkeiten, die sich nicht aus der Reliefposition des Bodenprofils ableiten lassen. Weiterhin erwähnen die beiden Autoren die lössfreien Kuppen, auf denen Sandermaterial ansteht. Diese Beobachtungen stimmen mit der mehrmodalen Form der Häufigkeitsverteilung der Lössmächtigkeiten überein (Abb. 3). Der erste Gipfel in der Klasse von 26-30cm entsteht durch die Kartiermethodik und repräsentiert die Sand-Böden, in deren Krume sich zwar unterschiedliche Schluffanteile finden, auf denen jedoch keine originäre Lössauflage mehr anzutreffen ist. Der zweite Gipfel in der Verteilungskurve bei 56-60cm entspricht etwa dem von anderen Autoren mitgeteilten Mittelwert. Der deutliche Rückgang der Häufigkeiten oberhalb von 80cm Lössmächtigkeit und das Auftreten von Profilen mit mehr als einem Meter Lössauflage entspricht wahrscheinlich der Beobachtung der anderen Autoren von 'plötzlichen' Zunahmen (LINSTOW (1902)) oder 'topfartigen Vertiefungen' (MAUDREI (1968)). Das nur schwach ausgeprägte Verteilungsmaximum in der Klasse 36-40cm kann nicht mit den Beobachtungen anderer Autoren erklärt werden.

### Kartierung von Bodentypen

Die Berichte anderer Autoren über die im Lössgebiet des Fläming vorherrschenden Bodentypen und Horizonte können grundsätzlich bestätigt werden. FIEDLER & ALTERMANN (1964) sprechen die Böden als Fahlerden und Lessivés an. In den eigenen Untersuchungen wurde ein deutlicher Ael-Horizont, der das diagnostische Merkmal der Fahlerde ist, selten gefunden. Daher werden die Böden als Parabraunerden angesprochen. KOWALKOWSKI (1967) nimmt für die Böden aus Sandlöss im weiter östlich gelegenen polnischen Katzengebirge eine Vergangenheit als Schwarzerde an, aus der sich in Abhängigkeit von der lokalen Niederschlagsituation und dem Ausgangsmaterial bzw. der Sandlössmächtigkeit Braunerden und pseudovergleyte Böden entwickelt haben. Für das Untersuchungsgebiet lassen sich die typischen Ap- und Al-Horizonte nur aufgrund ihres Humusgehaltes und damit ihrer verschiedenen dunklen Farbe unterscheiden. Die Ergebnisse der Analyse der Korngrößen und die Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt zeigen sehr große Ähnlichkeiten zwischen den beiden Horizonten. Erst bei deutlich ansteigenden Tongehalten nimmt die nutzbare Feldkapazität ab, und anhand der Farbe ist der Horizont zu unterscheiden. Auf Aggregat-Bruchflächen aus Unterboden-Horizonten fanden sich deutlich schwarze Beläge, sodass für die Böden des Untersuchungsgebietes ebenfalls eine Schwarzerde-Vergangenheit vermutet werden kann. Bänderförmige Ton-Anreicherungen im Unterboden finden sich in Sandhorizonten unter flachgründigen Lössprofilen oder bei vollständig fehlender Lössauflage. Wahrscheinlich handelt es sich dabei um tiefenverlagerten Ton aus den ehemals die Sande überdeckenden Lösshorizonten, die heutzutage bereits vollständig erodiert sind.

ALTERMANN (1993) und FIEDLER & ALTERMANN (1964) trennen die kartierten Lössprofile aufgrund der Mächtigkeit und der Unterboden-Horizonte in zwei Klassen. Nach den Angaben der Autoren zeigen geringmächtige Sandlöss-Profile über Sand im Unterboden deutliche kryogene Spuren. Erst bei ansteigenden Mächtigkeiten der Lössauflage auf mehr als 90cm komme es zu einer deutlichen Ausbildung eines Bt-Horizontes und zum Fehlen der kryogenen Überprägung. Diese Ergebnisse können durch die eigenen Kartierungen und Aufgrabungen grundsätzlich bestätigt werden. Eine deutliche Trennung in Al- und Bt-Horizonte war vornehmlich in mächtigen Lössauflagen entwickelt.

Eine deutliche Pseudovergleyung in Form von ausgeprägten Sw- oder Sd-Horizonten wurde nicht gefunden. Meist beschränkte sich eine auftretende Marmorierung und Fleckigkeit auf wenige Zentimeter im Übergangsbereich von der Krume in den Unterbodenhorizont. Diese hydromorphen Merkmale sind wahrscheinlich als Folge einer anthropogenen Verdichtung durch mechanische Auflast zu interpretieren. FIEDLER & ALTERMANN (1964) erklären das Fehlen von typischen Pseudogley-Parabraunerden mit der guten Dränwirkung des unter dem Löss anstehenden Sandes. Bei Aufgrabungen wurde in AlBt- oder Bt-Horizonten im Löss regelmäßig eine hohe Dichte an vertikalen Grobporen beobachtet, sodass ein vertikaler Wassertransport in den Unterbodenhorizonten wahrscheinlich nahezu unbehindert stattfindet.

### Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Böden

Berichte anderer Autoren über Messwerte zu Bodenfeuchten oder der nutzbaren Feldkapazitäten für die Böden im Fläming konnten nicht gefunden werden. Jedoch enthalten

einige Arbeiten Hinweise darauf, in wieweit die landwirtschaftliche Produktion und die menschliche Siedlungstätigkeit durch den Wasserhaushalt des Standortes beeinflusst wurden.

WEIBE (1995) nennt den Fläming 'bodentrocken' und berichtet, dass aufgrund von Wassermangel ein Großteil der Siedlungen des Zentralfläming in den vergangenen Jahrhunderten wieder aufgegeben worden sei. Wahrscheinlich beziehen sich seine Angaben aber auf die Sandgebiete des Fläming und nicht auf das in dieser Arbeit untersuchte Lössgebiet.

HEMPEL (1956) und LIEDTKE (1960/1961) zitieren das verbreitete Sprichwort von der Landschaft des Fläming: "Reich an Korn, arm an Born [Brunnen, Anmerkung des Autors]". Die beiden Autoren schlussfolgern daraus, dass Wassernot ein prägender Faktor für das Leben im Fläming gewesen sei. Nimmt man die Angabe von LIEDTKE (1960/1961) hinzu, nach der das Grundwasser im Fläming etwa in 40-60m Tiefe zu finden sei, ist das Sprichwort für eine korrekte Interpretation in zwei Teile zu gliedern. Der tiefe Grundwasserstand ('arm an Born') hat die menschliche Siedlungstätigkeit tendenziell eher negativ beeinflusst. Daraus erklärt sich wahrscheinlich auch die eigene Beobachtung, dass im Untersuchungsgebiet viele der Siedlungen in Geländedepressionen zu finden sind. Dort sind Grundwasser-führende Schichten möglicherweise näher an der Oberfläche. HEMPEL (1956) erwähnt einen 15m tiefen Brunnen in Gölsdorf. Die hohe Wasserspeicherkapazität der Löss-Böden drückt sich dagegen in der Zeile 'reich an Korn' aus. LINSTOW (1902) bezieht sich in seiner Arbeit direkt auf den Boden und berichtet über eine 'lockere Struktur' und die hohe 'wasserhaltende Kraft' die eine hohe Fruchtbarkeit bedinge. Daraus erkläre sich auch, dass das Lössgebiet des Fläming ausnahmslos in landwirtschaftlicher Nutzung stehe und Pflanzenarten wie z.B. Weizen, Gerste, Klee, Rüben und Mais angebaut würden.

Die Horizont-spezifischen Werte der Feldkapazität und des nicht pflanzenverfügbaren Restwassers nach der Getreideernte in Verbindung mit den jährlichen Niederschlagsmengen unterstreichen die Bedeutung der Lössmächtigkeit für den Bodenwasserhaushalt. Wenn vereinfachend eine einheitliche Dichte des Bodens für die verschiedenen Horizonte unterstellt wird, können Ap- und Al-Horizonte aus Löss im Vergleich zu Sandboden-Horizonten die anderthalb- bis zweifache Menge an pflanzenverfügbarem Wasser speichern. Eine Bestimmung der Bodendichten wurde nur exemplarisch durchgeführt, zeigte aber eine nur geringe Fehlschätzung der volumetrischen Wassergehalte bei Unterstellung einheitlicher Bodendichten. Daher sind die Abschätzungen zur Wasser-Speicherkapazität der Bodenhorizonte als Anhaltspunkte zu verstehen. Die gefundenen Werte der nutzbaren Feldkapazität stimmen in der Größenordnung mit den Angaben der KA4 überein (BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (1994)).

Die Unterschiede in der Ausschöpfung des Bodenwassers durch verschiedene Fruchtarten und nach variierenden Vorfrüchten weisen darauf hin, dass der Umfang und der Verlauf der Nutzung des gespeicherten Bodenwassers nicht allein von den physikalischen Eigenschaften des jeweiligen Bodens und den Witterungsbedingungen abhängen. Auch die Gestaltung der landwirtschaftlichen Produktion hat darauf einen Einfluss. Über Fruchtarten-spezifische Unterschiede in der Nutzung des Bodenwassers sind in der Literatur keine weiteren Ergebnisse gefunden worden.

### Flächenhafte Variabilität der Böden

Über die flächenhafte Variabilität der Lössmächtigkeit im Untersuchungsgebiet sind in der Literatur keine genaueren Angaben zu finden. Die in den Transecten gefundene maximale Reichweite der räumlichen Abhängigkeit von 60-70m, die vergleichbar mit der Autokorrelationsdistanz ist, unterstreicht die kleinräumig auftretenden Schwankungen der Lössmächtigkeit. Eine Ausnahme bildete der Transect 'Tr29'. Hier war lediglich eine Nugget-Varianz von 40-60cm<sup>2</sup> zu finden. Dieser Wert bedeutet, dass die Bestimmung der Lössmächtigkeit über Sand mit der in dieser Untersuchung praktizierten Methode der Bohrstock-Kartierung mit einer Genauigkeit von ca. 7cm möglich ist.

Der alternierende Verlauf der Semivarianzen (Abb. 4) wird in der Geostatistik 'hole-Effekt' genannt. Laut DUTTER (1985) tritt dieser Effekt auf, wenn verschiedene Raumskalen der Variabilität vorliegen. Diese Form des Variogramms trat auch bei verschiedenen anderen Messwerten auf. Die Variogramm-Analyse der Daten der Ertragskartierung und der EC<sub>a</sub>-Messungen ergab in einigen Fällen ebenfalls einen hole-Effekt. Da LIEDTKE (1960/1961) und MAUDREI (1968) für die Geologie des Fläming sowohl Flächensander als auch zum Teil Endmoränen bzw. Stauch-Endmoränen annehmen, wäre es denkbar, dass sich in dem spezifischen Verlauf des Variogramms regionale Regelmäßigkeiten des Untergrund-Reliefs abzeichnen.

Nach VIERHUFF (1967) und LANG (1990) findet die Sedimentation von Löss gleichmäßig statt und ist nicht von der Oberflächenform des Geländes abhängig. Auch LINSTOW (1902) geht von einer ursprünglich einheitlichen Lössmächtigkeit aus. Eine zum Zeitpunkt der Lösssedimentation durchgeführte Mächtigkeitskartierung hätte somit als Ergebnis reine Nugget-Effekte im Variogramm zur Folge haben müssen. Die typischen Erosionstäler im Hohen Fläming ('Rummeln') haben sich nach LIEDTKE (1960/1961) erst seit dem Beginn des 13. Jahrhunderts durch die menschliche Landnutzung gebildet. BODE (2001) stellte im östlichen Bereich des Untersuchungsgebietes für einen fossilen Ah-Horizont in ca. 60 cm Bodentiefe durch eine C<sup>14</sup>-Datierung von Holzkohle fest, dass das untersuchte Material aus der Zeit von 620 bis 850 n. Chr. stammt. Daher wäre es denkbar, dass der ursprünglich gleichmäßig verteilte Löss spätestens mit dem Zeitpunkt der beginnenden Ostkolonisation um ca. 1100 n. Chr. aufgrund veränderter Landbewirtschaftung verlagert wurde. Bedeutsam dürfte vor allem die Einführung des wendenden Pfluges durch die deutschen und flämischen Neusiedler sein. Für die ursprünglich in diesem Raum ansässige slawische Bevölkerung wird davon ausgegangen, dass nur lockernde, aber keine wendenden Bodenbearbeitungsgeräte zum Einsatz kamen (HEMPEL (1956), HENNING (1994)). Durch die wendende Wirkung des Pfluges werden die biologisch stabilisierten Aggregate der Bodenoberfläche vergraben und leichter erodierbares Material an die Oberfläche gebracht. Dieses kann durch oberflächlich abfließendes Wasser verlagert werden. Auf diese Weise ist im Verlauf der Jahrhunderte die ehemalige Landoberfläche nivelliert worden, und in den kartierten Lössmächtigkeiten prägen sich sekundär die Reliefeigenschaften des Untergrundes durch.

Anhand des in der Abb. A-4 (siehe Anhang) dargestellten Witterungsverlaufes für die letzte Dekade im Januar 2002 kann exemplarisch erläutert werden, welchen Einfluss Schmelzwässer für die Bodenerosion haben kann: Bei der innerhalb kurzer Zeit einsetzenden Schneeschmelze und bei zusätzlichen Niederschlägen ist das Infiltrationsvermögen der Böden für die auftretenden Wassermengen zu gering, so dass es zu starkem oberflächlichem Wasserabfluss

kommt. Der aufgrund der Körnungsbesonderheiten leicht erodierbare Lössboden wird dabei bereits bei sehr geringen Neigungen der Bodenoberfläche verlagert. Ein eindrucksvolles Bild für eine Rillenerosion führt BODE (2001) aus dem Frühjahr 2000 in seiner Arbeit auf. Die Prozesse spielen sich aber auch großräumig ab, wie die Luftbildaufnahme der Abb. 51 anhand der Landschaftsstruktur vom westlichen Rand des Untersuchungsgebietes demonstriert.

Dass die Witterung zum Zeitpunkt der Schneeschmelze bereits seit langer Zeit eine große Bedeutung für die Landschaft des Mittleren Fläming besitzt, zeigt sich auch in dem Grabensystem, welches das Dorf Gölsdorf umgibt. Die Siedlung befindet sich in einer Geländedepression über relativ undurchlässigem Material. HEMPEL (1956) berichtet, dass Hochwassersituationen schon immer das Leben in dem Dorf geprägt haben. Nach heftigen Regenfällen oder zum Zeitpunkt der Schneeschmelze sammelte sich das Wasser in der Senke, in welcher der Ort Gölsdorf liegt. Der Wasserzufluss erfolgt vor allem aus westlicher Richtung. Mit gezielten Anstichen der Grabensysteme sei zu früheren Zeiten eine langsame Versickerung erzielt worden.

#### Konsequenzen für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion

Die spezifischen Eigenschaften der Löss-Böden und die Witterungsbedingungen im Fläming haben eine große Bedeutung für die effiziente Gestaltung der regionalen landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion.

Aufgrund der geringen jährlichen Niederschlagsmengen, der Gefahr einer Frühsommertrockenheit und der häufig bereits im Mai auftretenden hohen Temperaturen hat die im Boden speicherbare Wassermenge eine zentrale Bedeutung für die Höhe und Sicherheit der erzielbaren Erträge. Zu geringe Niederschlagsmengen können durch Beregnungssysteme nur bedingt und in Verbindung mit zusätzlichen Kosten ausgeglichen werden. Daher sollte eine weitere Optimierung des Pflanzenbaus vor allem die variierenden Bodeneigenschaften berücksichtigen und die Bewirtschaftung mittelfristig an diese als eine als unveränderlich anzusehende Größe anpassen.

Eine zukünftige Optimierung des Pflanzenbaus unter Berücksichtigung der jeweiligen Bodeneigenschaften beinhaltet im Lössgebiet des Fläming daher zwei Aspekte.

- 1.) Es ist einer weiteren Heterogenisierung der Lössmächtigkeiten in der Landschaft entgegen zu wirken. Zentraler Ansatzpunkt dieses Aspektes der Optimierung ist die möglichst vollständige Verhinderung von Erosion durch Wasser, die sich vor allem auf die Löss-Böden erstrecken muss.
- 2.) Die Intensität der ackerbaulichen Bewirtschaftungsmaßnahmen sollte den jeweiligen standörtlich unterschiedlichen Ertragsersparungen angepasst werden, um die eingesetzten Produktionsmittel effizient zu nutzen und eine Beeinträchtigung der Umwelt weitestgehend zu vermeiden.

Für die beiden Wege der Optimierung bieten sich Lösungsmöglichkeiten mit der nichtwendenden Bodenbearbeitung einerseits und den zukünftigen Möglichkeiten des DGPS-gestützten Ackerbaus andererseits.

### **3 Methoden der Standorterkundung im Ackerbau**

Für den Standort-spezifischen Ackerbau ist die Kenntnis der innerhalb eines Feldes variierenden Standortbedingungen und deren Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum notwendig. Diese Kenntnis kann auf verschiedene Weise erlangt werden und ist wahrscheinlich niemals erschöpfend.

Neben der im Verlaufe mehrere Jahre gesammelten praktischen Anbauerfahrung gibt es verschiedene weitere Datenquellen. Diese sind häufig inhaltlich weniger komplex als die menschliche 'Erfahrung' und daher prinzipiell einfacher digital zu erfassen und einer (teil-) automatisierten Verarbeitung mit dem Computer zugänglich zu machen.

Im folgenden Teil der Arbeit sind einige Methoden der Standorterkundung näher beschrieben. Für die Auswahl der betrachteten Methoden wurden unterschiedliche Kriterien herangezogen, die im folgenden kurz erläutert werden.

Prinzipiell wird davon ausgegangen, dass der Mensch auf Dauer der Hauptentscheidungsträger im landwirtschaftlichen Produktionsprozess bleibt. Unter 'relevanten Standorterkundungsmethoden' verstehe ich daher Informationsquellen, die dem Bewirtschafter

- 1) in seinen ortsspezifisch variierenden Entscheidungen effizient unterstützen und
- 2) seinen bisherigen Erfahrungsschatz nutzen und erweitern.

Aus diesen Anforderungen ergibt sich, dass die Methoden auf Prozessen und/oder Phänomenen basieren sollten, die dem Entscheidungsträger zumindest teilweise bereits vertraut sind. Ohne diese Grundvoraussetzung ist eine fruchtbare Kommunikation zwischen dem Entscheidungsträger bzw. dem Dienstleister und der neuen, ortsspezifisch fließenden Informationsquelle kaum denkbar. Es sind zunächst nur Methoden verwendet worden, die bereits als praxisreif im Sinne der Datenerhebung bezeichnet werden können.

Aufgrund der bisher genannten Erwägungen werden in dieser Arbeit folgende Datenquellen und Erkundungsmethoden auf ihre praktische Einsatzzeichnung am Standort Niedergörsdorf hin näher untersucht:

1. Mähdrusch-Ertragskartierung (Vektor-Punktdaten)
2. Luftbilder aus aktuellen und weiter zurückliegenden Befliegungen (Rasterdaten)
3. Satellitenbilder vergangener Jahre (Rasterdaten)
4. Daten der Reichsbodenschätzung (Vektor-Polygondaten)
5. Messung der apparenten elektrischen Bodenleitfähigkeit (Vektor-Punktdaten)

Generell müsste als ein weiteres Kriterium für die Auswahl der Methoden auch der Kostenaspekt berücksichtigt werden. Dies ist jedoch aus verschiedenen Gründen grundsätzlich schwierig und wird daher hier nicht weiter verfolgt. Die sowohl hinsichtlich der Kosten als auch der Möglichkeiten zum Teil noch immer schnell ablaufenden Entwicklungen im Bereich der Mess- und Rechentechnik bedingen eine nur sehr kurzfristige Gültigkeit einmal kalkulierter Preise. Des Weiteren ist die Kalkulation eines Arbeitslohnes

problematisch. Nebst variierenden Löhnen oder Lohnansätzen ist die aufgewendete Zeit für ein angestrebtes Ergebnis, z.B. die Datenerhebung, -aufbereitung und Kartenerstellung für eine Messgröße, sehr variabel. Unterschiedlich umfangreich ausgewertete und/oder interpretierte Daten haben darüber hinaus Auswirkungen auf den weiteren Entscheidungs- und Lernprozess und können so zu späteren Zeitpunkten sowohl Kosten als auch Einsparungen nach sich ziehen. Eine ausführlichere Beleuchtung des finanziellen Aspektes der Standorterkundung bleibt daher anderen Arbeiten vorbehalten.

### **3.1 Erstellung von Standortkarten**

Standortkarten vermitteln einerseits die räumliche Information über die Merkmalsvariation. Diese Veränderungen können kontinuierlich oder abrupt vor sich gehen und sind von dem betreffenden Merkmal abhängig (BOUCNEAU ET AL. (1998)). Andererseits besitzen Standortkarten sachliche Informationen hinsichtlich der Merkmalsausprägung an den jeweiligen Orten. Für beide Datenbereiche (Sach- und Ortsinformation) ist grundsätzlich mit gewissen Ungenauigkeiten zu rechnen. GERTHSEN (1999) merkt an, dass "Eine völlig genaue Messung einer kontinuierlichen Größe [...] nicht möglich [ist...]. Die Kunst des Experimentators liegt darin, den Fehler klein zu halten und den unvermeidlichen Fehler sauber abzuschätzen" (ebd. S.5).

Daher sind bei der Erstellung von Standortkarten drei Aspekte zu berücksichtigen:

1. die inhaltliche Qualität der Rohdaten,
2. die geometrische Auflösung der Standortkarte und
3. das eigentliche Verfahren der Kartenerstellung.

Die inhaltliche Qualität der Daten hängt von der jeweiligen Methode sowie den Umständen der Datenerhebung ab. Nähere Angaben zu den einzelnen Methoden werden daher im jeweiligen Kapitel gemacht. Zu den Aspekten 'geometrische Qualität' und 'Verfahren der Kartenerstellung' sind allerdings einige grundsätzliche Überlegungen anzustellen, die im folgenden kurz umrissen werden.

### 3.1.1 Geometrische Auflösung der Standortkarte

#### Maßstab

Bei der Erstellung von Standortkarten für Ackerbaubetriebe befindet man sich im Bereich der Plankarten, deren Maßstab mit 1:10.000 oder größer angegeben wird. Für diesen Maßstabsbereich liegt die Grenze der Darstellbarkeit bei ca. einem Meter (WILHELMY (1990), S. 37). Kleinere Erscheinungen seien für kartographische Darstellungen bedeutungslos. Obwohl die Verarbeitung von Vektordaten im GIS mit dem Computer prinzipiell maßstabslos ist, erlangt diese Anmerkung Bedeutung, wenn es um die Sichtung und Interpretation der Karten durch den Menschen geht.

#### DGPS-Genauigkeit

Momentan am Markt verfügbare und in der landwirtschaftlichen Praxis eingesetzte Satellitengestützte Ortungssysteme mit Korrektursignal (DGPS-Systeme) arbeiten im Bereich einer wiederholbaren Ortsgenauigkeit von ein bis drei Metern (LECHNER & BAUMANN (2000)). Eigene, mehrjährig wiederholte Vermessungen von Feldgrenzen im Untersuchungsgebiet zeigen Streuungen der Messpunkte im Bereich von deutlich weniger als einem Meter. Dabei wurde ein DGPS-Empfänger der Firma AgLeader (GPS 2100) eingesetzt. Das Korrektursignal wurde über die Firma OMNISTAR in Form der VCR- bzw. Agri-license-Vereinbarung bezogen. Diese Genauigkeit betrifft daher die Datenerhebung und Ortung durch die ausbringenden Geräte im Verlauf der Standort-spezifischen Bewirtschaftung.

#### Genauigkeit der Digitalisierung

Georeferenzierung und manueller Datenimport (Tisch- bzw. Bildschirm-Digitalisierung) sind mit Ungenauigkeiten verbunden, die von der Datenquelle und der jeweiligen Person abhängen. Die Unsicherheit in bezug auf die Genauigkeit wird bei Geodaten mit dem RMS-Fehler angegeben (RMS: 'root mean square' = Wurzel aus der Summe der Abweichungs-Quadrate), ein der klassischen Standardabweichung vergleichbares Konzept. Verfahren zur Berechnung des RMS-Fehlers verschiedener Datenquellen sind bei HAGAN ET AL. (1998) angeführt.

#### Landtechnische Begrenzungen der Datenerhebung bzw. -anwendung

Der Mähdrusch als Arbeitsgang der Ertragskartierung erfolgte mit 7.2 Metern breiten Schneidwerken. Die geringste Arbeitsbreite für mögliche, in ihrer Intensität variierte Anwendungen im Untersuchungsbetrieb liegt momentan bei sechs Metern (Drillmaschine). Zahlreiche Erhebungen während der Vegetationsperiode finden unter Benutzung der betriebseigenen Fahrgassen-Systeme statt. Diese betragen anfänglich 18m, seit dem Anbaujahr 2000/2001 24m. Diese Breiten definieren den Beprobungsabstand quer zur Fahrtrichtung.

#### Kleinräumigkeit der relevanten Variation

Die Kleinräumigkeit der relevanten Variation hängt prinzipiell von der zu erhebenden Größe und dem angestrebten Genauigkeitsniveau ab und lässt sich daher nicht pauschal angeben. Bei der auch in dieser Untersuchung im Betrachtungsmittelpunkt stehenden Größe 'Ertrag' fanden sich bedeutende Änderungen bereits in Abständen von wenigen Metern.

### 3.1.2 Kartenerstellung

Sämtliche Daten einer Kartierung, die geographische Koordinaten mitsamt der Sachinformation in einer bestimmten Frequenz aufzeichnen (z.B. Ertragskartierung, ECa-Messung, Reflexionsmessung vom Fahrzeug, Bodenbeprobungen), werden im GIS primär als Punktdaten behandelt. Zur Erzeugung von flächenhaften Karten aus diesen Punktdaten müssen Verfahren der Klassifizierung oder Interpolation für die nicht-kartierten Bereiche angewendet werden. Die jeweilige Auswahl des Verfahrens hängt vom Skalenniveau der Daten und der Art der Übergänge zwischen unterschiedlichen Merkmalsausprägungen ab. Karten für landwirtschaftliche Anwendungen fallen vornehmlich in den Bereich der thematischen Karten. Da sie kein Abbild der Erdoberfläche sind, liegt ein hohes Maß an wissenschaftlicher Verantwortung bei der die Karten erstellenden Person (WILHELMY (1990)). Als Kompromiss aus räumlicher Genauigkeit der Rohdaten, möglichen Mindestarbeitsbreiten der angesteuerten Maschinen und der lokal auftretenden Variabilität sowie der von WILHELMY (1990) genannten Darstellbarkeitsgrenze für Plankarten wurde ein konstantes Zielraster mit fünf Meter Seitenlänge der regelmäßigen Quadratrasterzellen gewählt. Um die Aufmerksamkeit auf die großräumige Änderung von Standortbedingungen zu lenken und kleinräumige, fehlerhafte Messwert-Schwankungen auszugleichen, wurden jeweils geeignete Glättungen untersucht.

Da die Entscheidungsfindung im Ackerbau immer auch etwas mit Risiko, Unsicherheit und unvollständiger Information zu tun hat, werden Meta-Informationen über die Verlässlichkeit der Sachdaten in Karten in der Zukunft möglicherweise eine höhere Bedeutung erlangen. Dies mag noch zusätzliches Gewicht erlangen, wenn die Fehlerfortpflanzung im Entscheidungsprozess betrachtet wird.

Unter Generalisierung wird die 'stoffgerechte Vereinfachung, Zusammenfassung, Schematisierung eines Verbreitungsbildes' verstanden. Es handelt sich hierbei vornehmlich um die Zusammenfassung von Daten oder Kategorien zu wenigen, im konkreten Anwendungsfall relevanten Klassen. Die inhaltlich korrekte Klassifizierung von qualitativen Merkmalen hängt in starkem Maße von dem fachlichen Wissen der jeweiligen Person ab, welche die Klassifizierung durchführt. Eine überblickartige Darstellung ist daher schwierig. Viele der im Rahmen des Standort-spezifischen Ackerbaus erhobenen Daten variieren jedoch kontinuierlich und können daher grundsätzlich interpoliert werden. Da eine Vielzahl von verschiedenen Routinen für diesen Arbeitsschritt verfügbar ist, wird im folgenden eine Übersicht gegeben, die wichtige Aspekte zum Einsatz von Interpolationsverfahren berücksichtigt.

### 3.1.3 Interpolation - Literaturüberblick

Unter 'Interpolation' wird die Berechnung von Werten unter Berücksichtigung benachbarter Werte verstanden. Dabei unterscheiden sich die vielfältigen, in der Literatur beschriebenen Verfahren vornehmlich in dem Ausmaß der Berücksichtigung der benachbarten Originaldaten zur Berechnung eines Wertes an einem nicht kartierten Ort.

Die Erzeugung einer interpolierten Karte aus Punktdaten ist aus verschiedenen Gründen sinnvoll bzw. notwendig:

- es liegen an einigen Orten des Gebietes keine empirischen Untersuchungsdaten vor (Weite des Beprobungsrasters, Sensorausfall, Datenverlust);
- die Punktdaten sind räumlich unregelmäßig erhoben, und es soll eine regelmäßige Rasterkarte erzeugt werden (Bodenbeprobung, Ertragsdaten);
- einzelne Messpunkte sind ungenau; durch die Berücksichtigung benachbarter Werte kann diese Ungenauigkeit verringert werden.

In der Literatur werden eine Vielzahl von Interpolationsverfahren aufgeführt. Zu nennen sind dabei vor allem das Verfahren der Inversen Distanzen (z.B. BIRELL ET AL. (1996), GOTWAY ET AL. (1996), WEBER & ENGLUND (1992)), verschiedene Kriging-Verfahren (z.B. BIRELL ET AL. (1996), WEBER & ENGLUND (1992), WEBER & ENGLUND (1994), WHELAN & MCBRATNEY (1998)), Splines (WEBER & ENGLUND (1994)), gleitende Mittelwert-Bildung (WHELAN ET AL. (2001)), Potential Mapping (BLACKMORE & MARSHALL (1996)), Koordinaten-Rundung (LARK & STAFFORD (1997)) u.a.. Von diesen haben in der praktischen landwirtschaftlichen Anwendung momentan wahrscheinlich die beiden ersten Verfahrenstypen die größte Verbreitung.

Die Methode der Inversen Distanzen und das Kriging sind beides lineare Interpolatoren. Sie unterscheiden sich in der Gewichtung der benachbarten Messpunkte. Während die Kriging-Interpolation die spezifische räumliche Korrelation berücksichtigt und den Einfluss der unterschiedlich weit entfernten Messpunkte auf das Interpolationsergebnis danach bestimmt, werden bei Inversen Distanzen die Entfernungen reziprok als Gewichtung integriert.

Beim Kriging wird die Gewichtung der Einzelwerte so gewählt, dass der Fehler der Schätzung minimiert wird. Dies geschieht über die Berechnung der empirischen Semivarianzen und Anpassung eines Variogramms an diese, womit die Stärke und der Verlauf der räumlichen Beziehungen beschrieben werden können (näheres zu Kriging und zu Variogrammen z.B. bei WEBSTER & OLIVER (1990) oder CRESSIE (1993)).

Verschiedene Autoren haben Vergleiche der beiden Verfahren mit jeweils unterschiedlichen Parametrisierungen und Datensätzen durchgeführt (z.B. WEBER & ENGLUND (1992), WEBER & ENGLUND (1994), BIRELL ET AL. (1996), GOTWAY ET AL. (1996)). Die Ergebnisse dieser Vergleiche lassen sich in folgender Weise zusammenfassen:

- die Auswahl des Interpolationsverfahrens beeinflusst die Güte der produzierten Karte (GOTWAY ET AL. (1996));
- die jeweilige Reihenfolge in der Bewertung der Interpolationsverfahren hängt von dem verwendeten Rohdatensatz ab (WEBER & ENGLUND (1992), WEBER & ENGLUND (1994), GOTWAY ET AL. (1996)), wobei die Verfahren der Inversen Distanzen deutlich auf schiefe Verteilungen reagieren (WEBER & ENGLUND (1994))
- Kriging-Verfahren erweisen sich als relativ robust und unabhängig von der Verteilungsform des Datensatzes (BIRELL ET AL. (1996), GOTWAY ET AL. (1996))
- Über die Auswahl eines optimalen Kriteriums zur Beurteilung der Güte der interpolierten Karte herrscht Unstimmigkeit (WEBER & ENGLUND (1992), WEBER & ENGLUND (1994))

Darüber hinaus ist zu beobachten, dass selbst bei sehr spezieller Auswahl des Verfahrens, der Datensätze und der Parametrisierung der Verfahren die Autoren subjektiven Eindrücken in ihrer Diskussion breiten Raum gewähren, um die Güte des jeweiligen

Interpolationsergebnisses einzustufen. So schreiben beispielsweise GOTWAY ET AL. (1996) über ein Ergebnis des Inverse Distanzen-Verfahrens (reziprok doppelt-quadratische Gewichtung der Abstände, ID-4) in ihrer Studie: "Although the ID-4 method gave very accurate results for the Buffalo County organic matter data, it is difficult to believe that this type of pattern provides realistic characterization of the field.". WEBER & ENGLUND (1992) fanden es ein "surprising result", dass die beiden in ihrer Untersuchung getesteten Inverse Distanzen-Verfahren die 'besten Karten' im Vergleich von 15 verschiedenen Interpolationsmethoden erzeugten, Kriging dagegen erst auf den mittleren Rängen zu finden war. Sie lehnen aber eine Verallgemeinerung der Ergebnisse ab. Daraus wird deutlich, dass nicht allein mathematische Größen sondern auch Erfahrungswerte der bearbeitenden Person bei der Bewertung der Ergebnisse eine gewichtige Rolle spielen.

Als Vorteil der Inverse Distanzen-Verfahren wird die hohe Rechengeschwindigkeit genannt. Zudem müssen keine Annahmen hinsichtlich der räumlichen Struktur der Variation gemacht werden. Nachteilig sei jedoch die Erzeugung von unplausiblen, runden und lokal sehr begrenzt auftretenden Strukturen, sogenannten "bull's eyes" (GOTWAY ET AL. (1996), WHELAN & MCBRATNEY (1998)).

Der Vorteil des Kriging-Verfahrens wird einerseits in seiner Ausreißer-unabhängigen Arbeitsweise bei sehr unterschiedlichen Datenkonstellationen gesehen. Andererseits kann gerade durch die Berücksichtigung der räumlichen Struktur der Variation über die Variogramm-Modellierung eine Fehlerangabe für jeden geschätzten Wert gemacht werden (WEBER & ENGLUND (1994), BIRELL ET AL. (1996)). Dieses Verlässlichkeitsmaß sollte nach den Vorstellungen von GOTWAY ET AL. (1996) in Zukunft in die weiteren Entscheidungsprozesse im Rahmen des Standort-spezifischen Ackerbaus integriert werden. Ein wichtiger Nachteil des Kriging ist nach GOTWAY ET AL. (1996) die nicht immer einfache und schwierig zu automatisierende Schätzung und Modellierung der notwendigen Variogramme. Zu dieser Schlussfolgerung gelangen auch JÜRSCHIK ET AL. (1998). Diese Autoren führen weiterhin an, dass die von ihnen untersuchten Ertragsdaten anisotrope, d.h. in verschiedenen Raumrichtungen unterschiedliche, Verläufe der empirischen Semivarianzen zeigten. und sich die zu ihrer Modellierung notwendigen Variogramme in der Parametrisierung unterschieden.

Dass der Prozess der optimalen Interpolation - wie JÜRSCHIK ET AL. (1998) für die Variogramm-Modellierung bemerken - sehr von den jeweiligen Erfahrungen des Datenbearbeiters abhängt, wird auch auf eindrucksvolle Weise durch die Untersuchung von ENGLUND (1990) unterstrichen. Er hatte einen synthetischen Datensatz an verschiedene Bearbeiter mit Erfahrungen in Interpolationsverfahren verschickt und 'möglichst gute' Karten erbeten. In seiner Untersuchung hatte sich das häufig verwendete Ordinary Kriging als ein gutes Verfahren herausgestellt, das nur noch von dem nur einmal angewendeten Indikator Kriging übertroffen wurde.

Kriging beruht auf der Theorie der regionalisierten Variablen (CRESSIE (1993)). Viele der bislang zum Kriging erwähnten Untersuchungen setzen, explizit oder implizit, voraus, dass die Grundannahmen dieser Theorie erfüllt sind. Voraussetzung für die Gültigkeit des Krige-Schätzers als bester, unverzerrter, linearer Schätzer (BLUP - best linear unbiased predictor) ist die Stationarität der Verteilungsmomente des zu interpolierenden Datensatzes (CRESSIE (1993), WEBSTER (2000)). Darauf, dass dies nicht der Fall sein muss und die Annahmen

wahrscheinlich auch nicht generell zutreffen, weisen HOOSBEEK ET AL. (1998) und WEBSTER (2000) hin. Bei WEBSTER (2000) findet sich eine ausführliche Differenzierung der verschiedenen Arten von Stationarität und der jeweiligen Raumskalen, auf denen sie zu erwarten sind. Er schlägt für die robuste Berechnung der Variogramme und Krige-Schätzer eine lokale Umgebung vor. Für die Berechnung des Schätzwertes kommt der Autor zu dem Schluss: "[...] we do not need to worry greatly." (dass die Voraussetzungen nicht erfüllt sind; Anmerkung des Autors). Die fehlende Stationarität der Varianz innerhalb eines Gesamtdatensatzes habe jedoch für Konfidenzbetrachtungen, also die Berechnung der Krige-Varianzen als Gütekriterium der jeweiligen Krige-Schätzer, eklatante Bedeutung. Diesem Problem könne man zum Teil mit einer Datentransformation begegnen, um die Varianzen zumindest etwas zu stabilisieren. Dass Variogramme nicht für beliebig große Regionen uneingeschränkte Gültigkeit besitzen, haben auch bereits WEBSTER & OLIVER (1990) herausgestellt (S. 265).

Den Gedanken der lokalen Variogramm-Modellierung und Berechnung der Krige-Schätzer haben WHELAN ET AL. (2001) weiter verfolgt und in dem frei verfügbaren Computer-Programm VESPER (MINASNY ET AL. (1999)) umgesetzt. In dieses ist auch das Block-Kriging-Verfahren integriert, welches gemäß WHELAN & MCBRATNEY (1998) in der Vergangenheit seitens der Bodenkunde unverständlicherweise stiefmütterlich behandelt worden sei. Beim Block-Kriging wird den Einzel-Messwerten kein so hohes Gewicht beigemessen, vielmehr werden diese in einer kleinen räumlichen Umgebung (dem Block) zusammengefasst. Durch diese Vorgehensweise wird Variabilität 'herausgefiltert', die auf einem geringeren räumlichen Niveau als dem betrachteten Block auftritt. Auch WEBSTER & OLIVER (1990) weisen darauf hin, dass durch Block-Kriging unerwünschte Diskontinuitäten der Kriging-Werte vermieden werden. Diese durch Punkt-Kriging vorgetäuschte höhere Variabilität auf kleinräumigem Niveau sei ein "sampling effect" (WEBSTER & OLIVER (1990) S. 271).

Die von denselben Autoren auf der Seite 270 gemachte Äußerung "There is no justification for using crude or inappropriate methods of interpolation because of shortage of time on a computer." mag für die weitere Entwicklung der Interpolations-Software wegweisend sein. Möglicherweise wird in der Zukunft ein Programm vom Typ VESPER dahingehend erweitert, dass für jeden Interpolationspunkt nicht nur ein lokales Variogramm geschätzt wird, sondern auch verschiedene Variogramm-Modelle miteinander verglichen werden, inwieweit sie eine optimale Anpassung an die empirischen Semivarianzen darstellen. Damit würden sich die Schätzwerte wahrscheinlich nur unbedeutend verändern, wohl aber die Sicherheit der Schätzung zunehmen. Sollten zukünftige komplexe Systeme der Entscheidungshilfe für den Bereich des Standort-spezifischen Ackerbaus neben den jeweiligen Sachdaten vermehrt auch deren Verlässlichkeit bei der Entscheidungsfindung berücksichtigen, könnten solcherart gestaltete Interpolations-Programme eine hohe Bedeutung erlangen.

## **3.2 Ertragskartierung**

### **3.2.1 Stand des Wissens**

Diese einführende Literaturübersicht zur Ertragskartierung lehnt sich an die Schematisierung von BLACKMORE & MARSHALL (1996) an. Während die Autoren die Erstellung von Ertragskarten in zwei große Untereinheiten, Rohdatenerhebung/Kalibration/Datenkorrektur und Präsentation/Interpretation, gliedern, soll der folgende Abschnitt in sechs Punkte unterteilt werden:

- 1) Motivation der Erstellung von Ertragskarten
- 2) Gewinnung der Rohdaten: Sensortyp, Eichung, Fehlerquellen während des Drusches
- 3) Aufbereitung der Daten: Plausibilitätsprüfung, Fehlerkorrektur
- 4) Interpolation der Daten: Verfahrenswahl, Interpolationsparameter
- 5) Darstellung: Klassifizierung, Rasterweite, Legende
- 6) Analyse & Interpretation: Grundverständnis, Verfahrenswahl

#### Motivation

Dass Ertragsunterschiede innerhalb von Feldern auftreten, ist keine neue Erkenntnis. LARK & STAFFORD (1997) zitieren mit MERCER & HALL (1911) eine Arbeit vom Beginn des 20. Jahrhunderts zu dieser Thematik. Diese Arbeit wiederum entstand als eine unter mehreren in Folge der seit der Mitte des 19. Jahrhunderts zunehmenden, systematischen Durchführung von Feldversuchen und der damit einhergehenden Erkenntnis, dass kleinflächige Standortunterschiede innerhalb der Parzellen die Ernteergebnisse beeinflussen (BÖHM (1990)). Mit der Einführung des Mähdrusches in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts sei nach AUERNHAMMER & DEMMEL (1993) anfänglich ein Informationsgewinn für den Landwirt verbunden gewesen. Durch die zunehmende Automatisierung und Arbeitsteilung bedeute der heutige Erntevorgang jedoch einen Informationsverlust. Die kontinuierliche Messung der Druschmengen und ortsbezogenen Speicherung der Daten stelle diese Informationsmöglichkeit aber wieder her.

Die flächenhaft automatisierte Erfassung und Darstellung von Erträgen innerhalb eines Feldes durch Systeme der Ertragskartierung nimmt im System des Standort-spezifischen Ackerbaus eine zentrale Stellung ein (BIRELL ET AL. (1996), GRIEPENTROG (1998)). Durch sie werden die für die Steuerung der Bewirtschaftung erforderlichen Entscheidungsprozesse beeinflusst (BLACKMORE & MARSHALL (1996)). In der Literatur ist die Meinung verbreitet, dass aus mehrjährig durchgeführten Ertragskartierungen Rückschlüsse auf die ertragsbeeinflussenden, meist bodengebundenen Standortfaktoren gezogen werden können (z.B. BIRELL ET AL. (1996), REITZ (1992), STAFFORD ET AL. (1996)). Eine Nutzung sei aber des Weiteren auch in mehr oder minder direkter Weise möglich, indem die ortsspezifische Ausbringung von Nährstoffen auf Basis mehrjähriger Ertragskarten durchgeführt wird (REITZ (1992), STAFFORD ET AL. (1996)). Dabei werden die Ertragskarten als Entzugskarten interpretiert. Über die Nutzung als Planungsinstrument hinaus sehen BIRELL ET AL. (1996) in Ertragskarten auch ein Bewertungsinstrument für ortsspezifisch variierte Anbaumaßnahmen in ökologischer oder ökonomischer Hinsicht. Die von einigen Autoren zum Teil auch sehr diffus und vage ausgeführten Erwartungen an die Ertragskartierungen werden in Aussagen wie der folgenden

deutlich: "It is *hoped*, that yield map will provide information on the spatial variation of conditions within a field which *might aid* management [...]" (LARK & STAFFORD (1997), S.111, Hervorhebungen durch den Autor).

### Gewinnung von Rohdaten

GRIEPENTROG (1998) weist darauf hin, dass im Zuge der sogenannten 'Ertragskartierung' nicht Erträge, sondern Durchsatzmengen in regelmäßigen Zeitabständen erfasst werden. Zu der Ertragsangabe komme es erst durch Bezug der gemessenen Menge auf eine von Schneidwerksbreite und Vorfahrtgeschwindigkeit abhängige Referenzfläche. Der Autor gibt eine detaillierte Übersicht über mögliche Fehlerquellen bei der Ertragsmessung und quantifiziert einige. Ebenso finden sich bei BLACKMORE & MARSHALL (1996) und BLACKMORE & MOORE (1999) Aufstellungen und Quantifizierungen bzw. Rangierungen möglicher Einflussfaktoren. Abgesehen von der Güte des verwendeten Sensortyps und entsprechender Eichung wird die unvollständige Schneidwerksfüllung, der Materialfluss im Drescher, die Gutfeuchte sowie weitere Größen für die Qualität der Ertragsdaten als entscheidend angesehen. Eine unzulängliche Ortungsgenauigkeit war anscheinend zu Beginn der 1990er Jahre ein Problem (vgl. AUERNHAMMER & DEMMEL (1993)). Mit Verbesserung des DGPS-Systems taucht diese Fehlerquelle in neueren Veröffentlichungen kaum mehr auf.

Die häufig getesteten Volumen- und Kraft-Impuls-Messsysteme ergeben bei sorgfältiger Kalibration Abweichungen von weniger als fünf bis sieben Prozent (AUERNHAMMER & DEMMEL (1993), BLACKMORE & MOORE (1999), KRILL (1996)). Diese Abweichungen sind immer auf eine oder mehrere Bunkerfüllungen des Mähdreschers und nicht auf einzelne Ertragsmesspunkte bezogen (GRIEPENTROG (1998)). Da es sich bei der Ernte um eine zerstörerische Beprobung handelt, sei eine Überprüfung von Einzelwerten insgesamt schwierig (BIRELL ET AL. (1996)).

Auf die Abhängigkeit des Messwertes vom Schüttgewicht, der Hangneigung sowie geringer Durchsatzmengen bei Verwendung des Volumensensor-Systems machen verschiedene Autoren aufmerksam (AUERNHAMMER & DEMMEL (1993), GRIEPENTROG (1998), ISENSEE & KRIPPAHL (2001)). Die Kalibration müsse mehrfach am Tag wiederholt werden, um eine dem Masse-Impuls-Sensor annähernd vergleichbare Genauigkeit zu erzielen (AUERNHAMMER & DEMMEL (1993), Literatur-Durchsicht bei BLACKMORE & MOORE (1999)).

Auf Fehlermöglichkeiten, die durch die Konstruktionsweise von Masse-Impuls-Sensoren (auch als Prallplatten-Sensoren bezeichnet) bedingt sind, weisen ISENSEE & KRIPPAHL (2001) sowie STRUBBE ET AL. (1996) hin. Dies betrifft vor allem die Oberflächeneigenschaften des Druschgutes. Letztgenannte Autoren stellen eine veränderte Konstruktion vor, die diese Einflüsse komplett ausschalten soll.

Den Weg der Durchsatzermittlung durch Kraft- oder Volumenmessung verlassen STAFFORD ET AL. (1996) und messen die Änderung der Dielektrizitätskonstante bei variierenden Gutströmen. Auch die Abschwächung einer Strahlungsquelle sowie weitere Methoden finden oder fanden in der Praxis Anwendung (REITZ (1992)). Nach Ansicht der meisten Autoren sollte das Aufzeichnungsintervall bei 1-3 Sekunden liegen.

Diverse Autoren weisen darauf hin, dass die Feuchte des Erntegutes im Tagesverlauf als auch innerhalb eines Feldes Schwankungen unterliegt (AUERNHAMMER & DEMMEL (1993),

ISENSEE & KRIPPAHL (2001)). GRIEPENTROG (1998) vertritt die Ansicht, dass "Korndurchsatzsysteme ohne Feuchtekomensation [...] keine ausreichend genaue Ertragsermittlung [erlauben]". Interessanterweise taucht dieser Einflussfaktor in den Aufstellungen von BLACKMORE & MARSHALL (1996) und BLACKMORE & MOORE (1999) gar nicht auf.

Auf dem Weg vom Messerbalken des Schneidwerkes bis zum Ertragssensor im Mähdrescher wird das Mäh- und Druschgut mit zeitlich vorher und nachher gedroschenem Material vermengt (engl. convolution). Dadurch kommt es zu zeitlicher Verzögerung und Abschwächung von Variabilität, was besonders bei abrupten Wechslen zur Verfälschung führt (BOYDELL ET AL. (1996)). Diese Verzögerungszeiten sind gemäß BLACKMORE & MOORE (1999) unterschiedlich. Die Autoren finden in der Literatur Werte zwischen zehn und 40 Sekunden. BOYDELL ET AL. (1996) berichten über zehn Sekunden Verzögerung und können den Effekt mit Fourier-Transformationen beseitigen. GRIEPENTROG (in: LINSEISEN & STEINMAYR (2000)) meint, dass die genauere Beschreibung des Materialstroms im Mähdrescher als Funktion von unterschiedlichen Einflussfaktoren für die Beseitigung dieses Effektes hilfreich sei.

Die reine Zeitdifferenz, die zwischen Speicherung der Ortskoordinaten und Messung des Ertrages am Sensor auftritt und die nicht mit dem convolution-Prozess verwechselt werden sollte, läßt sich durch einen Maschinen-typischen Wert einfach korrigieren (BOYDELL ET AL. (1996)).

Während der Ernte auftretende, unvollständige Schneidwerksfüllungen werden häufig als Fehlerquelle genannt (z.B. BLACKMORE & MARSHALL (1996), GRIEPENTROG (1998), REITZ (1992)). ISENSEE & KRIPPAHL (2001) beobachten 30-40 cm ungenutzte Schnittbreite und beziffern den Fehler auf ca. 5%. Dies lässt auf eine Schneidwerksbreite von 6 bis 8 Metern schließen. Während BLACKMORE & MARSHALL (1996) die variierende Auslastung an erster Stelle der Fehlermöglichkeiten nennen, ohne sie weiter zu quantifizieren, wird bei BLACKMORE & MOORE (1999) von 1.2% Abweichung ausgegangen. STAFFORD ET AL. (1996) bezeichnen den Fehler durch Materialmischung (convolution) und variierende Schneidwerksauslastung als schwer zu quantifizieren und nennen ca. 10% als Größenordnung. Auch GRIEPENTROG (1998) nennt dieses Problem ohne zahlenmäßige Abschätzung, geht aber davon aus, dass technische Lösungen zur automatischen Erkennung der Schneidwerksfüllung zum Zeitpunkt seiner Veröffentlichung noch nicht praxisreif seien. Auch ISENSEE & KRIPPAHL (2001) berichten etwa drei Jahre später über Versuche der landtechnischen Forschung, dieses Problem zu lösen. Bisher sei aber lediglich eine Lenkunterstützung des Fahrers durch Laser-Technologie im praktischen Einsatz. BLACKMORE & MOORE (1999) empfehlen, in den Computer der Ertragskartierung als effektive Schnittbreite nur etwa 95% der tatsächlichen Schneidwerksbreite einzugeben. Sie weisen ferner darauf hin, dass auch die zum Teil angebotenen Hilfsfunktionen für die Datenaufzeichnung, mit denen der Fahrer die jeweils tatsächliche Auslastung des Schneidwerkes ortsgenau und stufenweise vermerken kann, nur sinnvoll sind, wenn diese während der Erntearbeiten auch konsequent genutzt werden. BLACKMORE & MARSHALL (1996) stellen ein 'potential mapping' genanntes Darstellungsverfahren vor, das von der jeweiligen Schneidwerksfüllung und der damit verbundenen Fehlberechnung des Ertrages unberührt bleibt.

Man kann die unterschiedlichen Berichte über Fehlermöglichkeiten der Ertragskartierung mit STAFFORD ET AL. (1996) zusammenfassen, die der Meinung sind, dass die Einführung der Ertragskartierung in die Praxis mit Limitationen im Datenbereich zurecht kommen müsse.

### Aufbereitung der Daten

Um jedoch zumindest einen Teil der mit Fehlern behafteten Daten zu korrigieren, zu eliminieren oder deren Wirkung zu mildern, werden in der Literatur Filterroutinen (BLACKMORE & MOORE (1999), GRIEPENTROG (1998), LARSCHEID & BLACKMORE (1996), LINSEISEN & STEINMAYR (2000), NOACK ET AL. (2001)), Glättungsalgorithmen (LARK & STAFFORD (1997), STAFFORD ET AL. (1996)) oder nicht näher erläutertes Expertenwissen (GRENZDÖRFER & GEBBERS (2001)) empfohlen.

### Interpolation

Während sich die überwiegende Anzahl der Autoren einig darin ist, dass man Ertragsrohdaten interpolieren sollte (z.B. BIRELL ET AL. (1996)), fehlen zumeist systematische Vergleiche von Verfahren der Interpolation und Parametrisierungen der Verfahren. Es werden Inverse Distanzen (BLACKMORE & MOORE (1999), GRENZDÖRFER & GEBBERS (2001), NOACK ET AL. (2001), STAFFORD ET AL. (1996)), verschiedene Kriging-Verfahren (BIRELL ET AL. (1996), BLACKMORE (2000), WHELAN ET AL. (2001)) oder lokal mittelnde Verfahren ohne Berücksichtigung der näheren Umgebung (BLACKMORE & MARSHALL (1996), LARK & STAFFORD (1997)) zur Interpolation und Erstellung von Ertragskarten aufgrund unterschiedlicher Argumente, zum Teil auch ohne Begründung, eingesetzt. BLACKMORE & MOORE (1999) bezeichnen Kriging als das bessere Interpolationsverfahren, benutzen in ihrer Untersuchung aber Inverse Distanzen mit anschließender Glättung.

BIRELL ET AL. (1996) und WHELAN ET AL. (2001) berichten über verschiedene Kriging-Verfahren und kommen zu dem Schluss, dass mittels Kriging die lokale Variabilität gut abgebildet werden kann. WHELAN ET AL. (2001) merken darüber hinaus an, dass exakte Interpolatoren (z.B. Inverse Distanzen, Kriging ohne Nugget-Varianz) den einzelnen Rohdaten zu hohes Gewicht verleihen und das daher für momentan verfügbare Echt-Zeit-erfasste Ertragsrohdaten ein Block-Kriging mit lokaler Variogramm-Schätzung optimal sei.

### Darstellung & Klassifizierung

Über die optimale Rasterweite für interpolierte Ertragskarten herrschen unterschiedliche Vorstellungen. BIRELL ET AL. (1996) merken an, dass ein Austauschverhältnis zwischen Informationsgehalt und Aussagesicherheit bestehe, weisen in derselben Arbeit aber auch darauf hin, dass einzig das Kriging-Interpolationsverfahren ein Verlässlichkeitsmaß für die interpolierten Ertragsdaten liefere. Sie benutzen anfänglich ein Raster mit 10 m Kantenlänge der Einzelzellen, kommen aber zu dem Schluss, dass die generelle räumliche Ertragsstruktur besser erfasst werden könne, wenn ein gröberes Raster gewählt werde. Auch BLACKMORE (2000) nutzt ein 10x10 m Raster, doch merkt er an, dass die Daten im Anschluss an die Interpolation stark geglättet werden, um größere, an praktischen Erwägungen orientierte Areale herauszuarbeiten. BLACKMORE & MOORE (1999) wenden ein 'potential mapping'

genanntes Verfahren auf ein 10 m Raster an. GRIEPENTROG (1998) stellt fest, dass die räumliche Auflösung maximal bei 20x20 m liegen sollte, sonst sei der Fehler der einzelnen Interpolationswerte inakzeptabel hoch. LARK & STAFFORD (1997) mitteln im Umkreis von 5 m. Auch GRENZDÖRFER & GEBBERS (2001) interpolieren auf ein Raster von 20x20m. Ein vornehmlich von deutschen Wissenschaftlern besuchter Workshop zur Gewinnung und Verarbeitung von ortsbezogenen Ertragsdaten kommt im Herbst 2000 zu dem Schluss, dass die Frage einer optimalen Rasterweite kontrovers sei, aus praktischen Erwägungen 20-35m, für spezielle Datenlagen jedoch weitaus geringere Rasterweiten zu wählen seien (LINSEISEN & STEINMAYR (2000)). STAFFORD ET AL. (1996) interpolieren auf ein 1x1 m Raster. Zum Teil werden räumlich hoch auflösend interpolierte Karten durch eine anschließende Klassifizierung (STAFFORD ET AL. (1996)) oder entsprechende Legenden-Gestaltung (LARSCHIED & BLACKMORE (1996)) in ihrem Detail-Reichtum reduziert.

NOACK ET AL. (2001) beobachteten sich von 0.29 auf 0.87 erhöhende Korrelationskoeffizienten zwischen Ertragskarten, wenn die Rasterweiten von 3x3m auf 25x25m stiegen. Die Karten wurden aus Daten verschiedener Ertragssensoren mit dem Verfahren der Inversen Distanzen interpoliert.

Eine inhaltliche Klassifizierung der interpolierten Ertragsdaten wird von den Autoren i.d.R. nicht ausdrücklich vorgenommen, jedoch findet sich häufig eine Legenden-Gestaltung, die Ertragsintervalle von  $10 \text{ dt} \cdot \text{ha}^{-1}$  berücksichtigt.

### Analyse & Interpretation

Für Ertragsdaten einzelner Felder werden in der Literatur sowohl schiefe (STAFFORD ET AL. (1996)) mehr oder minder normal-verteilte (BIRELL ET AL. (1996)) als auch mehrmodale Verteilungsformen (STAFFORD ET AL. (1996)) berichtet. LINSEISEN & STEINMAYR (2000) fassen ein Experten-Gespräch zu diesem Aspekt in der Form zusammen, dass es über die Verteilungsform von Ertragsdaten (normal- oder nicht-normalverteilt) unterschiedliche Ansichten gebe. In der Literatur werden eher selten Angaben zur Verteilungsform der Ertragsdaten gemacht, sondern das Augenmerk zumeist auf die Analyse und Interpretation der räumlichen Struktur gerichtet.

Bei der Analyse und Interpretation von räumlichen Ertrags-Strukturen sind zwei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze zu finden, die im folgenden exemplarisch dargestellt werden. Zwischen diesen bestehen zum Teil fließende Übergänge.

Der eine Ansatz versucht, über statistische Auswertungen 'stabile' Hoch- und Geringertrags-Areale innerhalb eines Feldes auszuweisen und führt als dritte Zonenbezeichnung in ihrer Ertragsreaktion 'instabile' Areale ein. Zur Auswertung kommen im allgemeinen Karten von Relativerträgen, wobei eine zum Teil unterschiedliche Verwendung der Begriffe 'Standardisierung' und 'Normierung' von Daten zu finden ist. Als Abgrenzungskriterium zwischen den Klassen wird der Variationskoeffizient benutzt, der sich aus den mehrjährig vorliegenden (Relativ-) Ertragskarten für einzelne Rasterzellen der interpolierten Karten berechnen lässt. Durch diese Analysemethode verlieren die räumlichen Ertragsmuster des Einzeljahres für das Gesamtergebnis an Bedeutung. Beispiele sind z.B. bei GRENZDÖRFER & GEBBERS (2001) oder BLACKMORE (2000) zu finden. Deutlich limitiert wird die Interpretationstiefe der Ergebnisse durch die Anzahl der verwendeten Ertragskarten, wofür die

Äußerung von GRENZDÖRFER & GEBBERS (2001) beredtes Zeugnis ist: "However it has to be mentioned, that even a seven year time series may rather be short, because in this case in the crop rotation winter wheat is greatly overrepresented.". Auch JÜRSCHIK ET AL. (1998) nennen diese wichtige Einschränkung.

Ein grundsätzlich anderes Verständnis der Interpretation von Ertragskarten lässt sich aus dem Ansatz ersehen, für den die Publikationen von KARLEN ET AL. (1990) oder LARK & STAFFORD (1997) exemplarisch sind. Diese betrachten Einzeljahre nicht als Ausreißer oder Störfaktoren des Erkenntnisprozesses. KARLEN ET AL. (1990) berücksichtigen bei der Diskussion der einzelnen Ertragskarten ausdrücklich die Wirkungen des jeweiligen Verlaufs der Jahreswitterung auf das Pflanzenwachstum. LARK & STAFFORD (1997) betonen, dass die Ertragskarte eine Darstellung aller bis zur Ernte wirksam gewordenen Einflüsse in Form akkumulierter Effekte widerspiegelt und führen zur Mehrjahres-Auswertung an: "Sources of intrinsic yield variation are unlikely to be identified simply by looking for regions of consistently high, low or average yield.". Sie diskutieren die Ertragsbildung unter dem Aspekt des jeweiligen Zeitpunktes, zu dem unterschiedliche Einflussfaktoren während der Vegetationsperiode wirksam werden. Ihre mathematische Methode ist eine Fuzzy-Clusterung. Für ein Feld mit drei Ertragskarten von Wintergerste in aufeinanderfolgenden Jahren scheint die Methode nach Ansicht der Autoren ein generelles Muster der Ertragsvariation herausgearbeitet zu haben. Auch die Arbeit von STAFFORD ET AL. (1996) zeigt auf, inwiefern eine sorgfältige statistisch-mathematische Datenaufbereitung mit produktionsökologischen Überlegungen kombiniert werden kann. Die Autoren stellen neben der Jahres- und Vorfruchtbedingten Ertragsvariation auch ein Zeitskalen-Konzept der Variabilitätsveränderung zur Diskussion. Das eher enttäuschende Ergebnis der Prüfung von vier verschiedenen Konsistenzmaßen steht in dieser Arbeit im Gegensatz zu der plausiblen, die Witterung, die Vorgeschichte sowie Bodeneigenschaften berücksichtigenden Diskussion und Erklärung der gefundenen Ertragsmuster. Die Autoren betonen den komplexen Charakter der Materie.

### 3.2.2 Material und Methoden

Auf den Ackerflächen der Nuthequelle GmbH wurden in den Jahren 1999, 2000 und 2001 Ertragskartierungen durchgeführt. Das Verfahren wurde zur Ernte 1999 erstmalig eingesetzt. Die Ernte wurde mit zwei Mähdreschern der Firma New Holland von der Baureihe TX68 (1999) bzw. TX68plus (2000 & 2001) und den Sensoren der Firma LH Agro (Typ LH 565) durchgeführt. Der Sensor ist zwischen Korn-Elevator und Korntank-Befüllschnecke installiert und erfasst den Gutstrom über die Krafteinwirkung (Impuls) desselben auf eine Prallplatte. Der Feuchte-Sensor befindet sich am Ende der Befüllschnecke. Die von den Sensoren gelieferten Daten werden im 2- (1999 & 2000) bzw. 3-Sekunden-Takt (2001) auf einer 1 Megabyte PCMCIA-Karte gespeichert. Die parallel gespeicherten Ortskoordinaten kommen von einem GPS-Empfänger (AgLeader GPS 2000/2001), der das Korrektur-Signal des Omnistar-Satelliten zur Erzeugung von DGPS-Daten nutzt. Am jeweils folgenden Morgen erfolgt i.d.R. die Sicherung der Daten des Vortages. Die gesamte Druschfläche des Betriebes wurde in den drei Jahren kartiert, soweit es die Ernteorganisation zuließ, eine genauere Aufstellung ist in Tab. 5 zu sehen.

**Tab. 5: Aufstellung der in den drei Untersuchungsjahren Ertrags-kartierten Fruchtarten**

Fruchtart	Erntejahr 1999	Erntejahr 2000	Erntejahr 2001
Wintergerste	x	x	x
Winterroggen	x	x	x
Winterweizen	x	x	x
Winterraps	x	(x)*	(x)*
Körnererbse	x	x	x
Öllein	x	-	-
Lupine	-	x	x

\*: wegen Sensor-Verkrustung keine Messdaten aufgezeichnet

Zu Beginn der Ernte jeder Fruchtart wurde in jedem Jahr eine Kalibration mit vier Probeladungen je Drescher durchgeführt. Lediglich bei Öllein im Jahr 1999 und bei Körnererbse in 2001 fand dies aus Termingründen nicht statt. Feuchtekalibrationen erfolgten während des Drusches laufend in Eigenregie der Mähdrescherfahrer.

Zur Sichtung, Kontrolle und weiteren Verarbeitung der Daten wurden diverse Computerprogramme eingesetzt, die in der Tab. 6 aufgelistet sind. Eine genauere Beschreibung der einzelnen Schritte in den jeweiligen Programmen befindet sich im Anhang in Tab. A-2.

Für die Erstellung von Ertragskarten aus den Mähdrescher-Rohdaten müssen diese aufbereitet werden. Die Aufbereitung umfasst das etwaige Zusammenfügen getrennter Datensätze (verschiedene Mähdrescher, unterschiedliche Abspeicherungstermine), die Überprüfung der Daten bezüglich offensichtlicher Fehler (z.B. Ortskoordinaten, Ertragswerte,

Feuchtemessungen, bei Einsatz mehrerer Sensoren auch Sensor-Differenzen zwischen den Systemen, Teilbreitenkorrektur, sonstige Fehler) sowie die Transformation in ein metrisches geographisches Koordinatensystem (hier: Gauß-Krüger-Koordinaten).

Begleitend wurden einzelne Punkternten durchgeführt, um an ausgewählten Standorten das Ertragsniveau und Informationen zur Ertragsstruktur exemplarisch zu erfassen. Viertel-Quadratmeter-Schnitte in vierfacher Wiederholung (im ungefähren Umkreis von 1-2 Metern) dienten als Probenmaterial eines Punktes. An den Proben erfolgte die Bestimmung folgender Parameter: Ährenzahl, Korngewicht, TKM, gesamte und basal sowie apikal reduzierte Spindelstufenanzahl.

**Tab. 6: Aufstellung der zur Ertragsdaten-Prozessierung verwendeten Computerprogramme**

Name (Version)	allgemeine Funktion	Bemerkung
PrecisionMap2000 (3.3)	Kalibrationsdatenkontrolle	im Lieferumfang der Sensoren
DataLogisk AgroSat (2.0)	Schnellsichtung & Übersichts-Kartenerstellung	im Lieferumfang der Sensoren
ALBYD (BetaVersion)	Komplett-Extraktion der binären Ertragsdatei und ASCII-Speicherung	freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Peter Treue, Universität Kiel
MS-Excel 97	Dezimal-Formatierung, DBF-Export	
ArcView (3.1)	DBF-Shape-Konvertierung,	
IDRISI32 (1.11)	Koordinaten-Transformation, Datenbank-Operationen, ASCII-Export, Darstellung / Analyse der Ertragskarten	
MS WORDPAD (1.0)	Verknüpfung von ASCII-Dateien	
VESPER (1.0c)	Kriging der ASCII-Dateien	<a href="http://www.usyd.edu.au/su/agric/a/cpa">http://www.usyd.edu.au/su/agric/a/cpa</a>

### 3.2.3 Ergebnisse

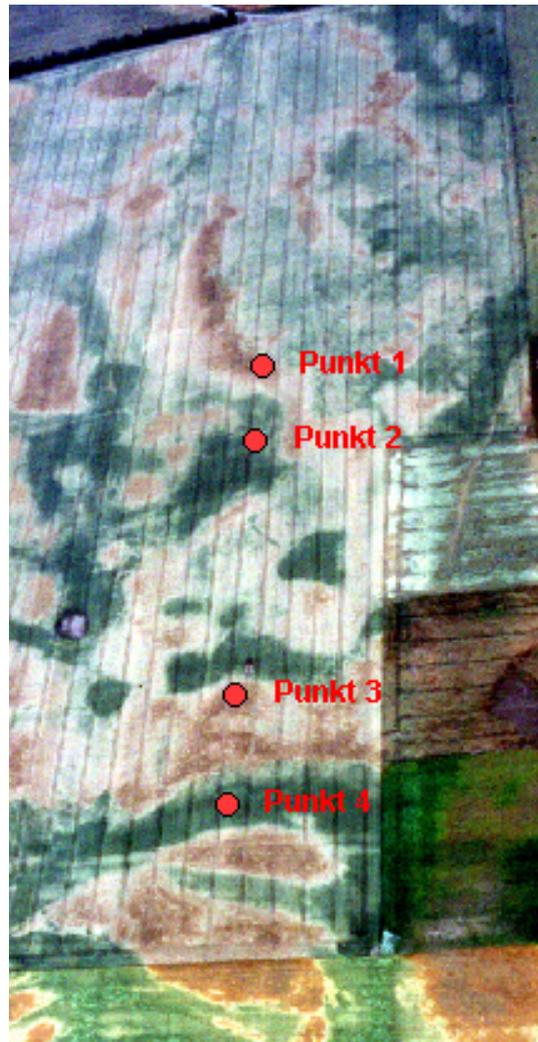
#### 3.2.3.1 Exemplarische Punkternten des Jahres 1999

Die auf dem Feld '1000' im Erntejahr 1999 in Winterweizen durchgeführten Punktbeerntungen ergaben rechnerische Erträge zwischen 10 und 108 dt\*ha<sup>-1</sup>, wobei die Unterschiede innerhalb kleiner räumlichen Distanzen zu finden waren. Die Abb. 6 vermittelt ein Bild der Anordnung der Beprobungspunkte. Die senkrecht (West-Ost) verlaufenden dünnen Striche auf dem Luftbild sind die Fahrgassen, die einen Abstand von 18 m zueinander haben. Zusammenfassende Statistiken sind in der Tab. 7 aufgeführt.

**Tab. 7: Statistiken des Ertrages und ausgewählter Kenngrößen der Ertragsstruktur der Viertelquadratmeter-Punkternten vom Feld '1000' im Erntejahr 1999 (Winterweizen)**

Parameter	Punkt-Nr.	n	Mittel	s	s <sub>x</sub>	Min.	Max.	KI (95%)
Ertrag [dt*ha <sup>-1</sup> ]	1	4	16.7	6.8	3.4	10.2	23.5	6.0 - 27.5
	2	4	96.1	4.5	2.2	90.3	101.1	89.0 - 103.2
	3	4	19.2	7.7	3.9	12.7	30.0	7.0 - 31.5
	4	4	98.2	7.1	3.6	91.2	107.7	86.8 - 109.5
	<b>gesamt</b>	<b>16</b>	<b>57.6</b>	<b>41.3</b>	<b>10.3</b>	<b>10.2</b>	<b>107.7</b>	<b>35.5 - 79.6</b>
Ährendichte [Ähren*m <sup>2</sup> ]	1	4	387	40	20	340	436	323 - 451
	2	4	652	43	22	592	684	583 - 721
	3	4	326	31	16	280	352	275 - 377
	4	4	622	105	52	528	768	455 - 789
	<b>gesamt</b>	<b>16</b>	<b>497</b>	<b>157</b>	<b>39</b>	<b>280</b>	<b>768</b>	<b>413 - 580</b>
TKM [g]	1	20	34.0	4.1	0.92	26.2	41.1	32.1 - 35.9
	2	20	33.8	2.0	0.43	30.9	36.8	32.9 - 34.7
	3	20	37.9	1.2	0.26	36.1	40.5	37.3 - 38.4
	4	20	35.0	2.2	0.50	32.5	41.1	34.0 - 36.1
	<b>gesamt</b>	<b>80</b>	<b>35.2</b>	<b>3.0</b>	<b>0.34</b>	<b>26.2</b>	<b>41.1</b>	<b>34.5 - 35.8</b>
Spindelstufen gesamt [Stk*Ähre <sup>-1</sup> ]	1	60	19.9	3.4	0.4	13	26	19.0 - 20.7
	2	60	23.6	3.1	0.4	4	26	22.8 - 24.4
	3	60	20.9	3.6	0.5	12	27	20.0 - 21.9
	4	60	24.1	1.4	0.2	21	27	23.7 - 24.4
	<b>gesamt</b>	<b>240</b>	<b>22.1</b>	<b>3.47</b>	<b>0.22</b>	<b>4</b>	<b>27</b>	<b>21.7 - 22.6</b>
Spindelstufen basal reduziert [Stk*Ähre <sup>-1</sup> ]	1	60	4.2	1.7	0.2	0	7	3.8 - 4.7
	2	60	3.7	1.5	0.2	1	8	3.3 - 4.0
	3	60	5.0	1.5	0.2	2	9	4.6 - 5.4
	4	60	3.8	1.1	0.1	2	6	3.5 - 4.1
	<b>gesamt</b>	<b>240</b>	<b>4.2</b>	<b>1.6</b>	<b>0.1</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>4.0 - 4.4</b>
Spindelstufen apikal reduziert [Stk*Ähre <sup>-1</sup> ]	1	60	3.0	2.6	0.33	0	10	2.4 - 3.7
	2	60	0.1	0.4	0.05	0	2	0.0 - 0.2
	3	60	3.4	2.4	0.31	0	9	2.8 - 4.0
	4	60	1.1	2.1	0.27	0	7	0.5 - 1.6
	<b>gesamt</b>	<b>240</b>	<b>1.9</b>	<b>2.4</b>	<b>0.16</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>1.6 - 2.2</b>

Die Erträge sind vor allem an den Orten mit geringem Ertragsniveau (Punkt 1 und 3) mit relativ hohen Streuungen behaftet. Mittelwertvergleiche ergeben einen signifikanten Unterschied der Erträge ( $p=0.05$ ) zwischen den je zwei Punkten mit geringen und hohen Erträgen (Punkt 1 & 3 gegenüber 2 & 4). Dasselbe war für die Ährendichten der Fall. Die Tausendkornmassen unterscheiden sich nicht so stark und ergeben auch in der Varianzanalyse (Faktor 'Punkt') den im Vergleich geringsten F-Wert, obwohl auch dieser mit  $p < 0.001$  signifikant ist. Die TKM-Mittelwerte lassen sich in zwei Gruppen trennen, wobei sich der höhere Wert an Punkt 3 von den drei anderen signifikant unterscheidet ( $p=0.05$ ).



**Abb. 6: Luftbildausschnitt mit den Orten der Punktbeerbungen 1999 vom Feld '1000' (Winterweizen, Termin der Aufnahme 7.7.1999; Flughöhe 700m; Ost-West-Erstreckung der Szene ca. 1100m; Blickrichtung nach Westen)**

Die an 15 zufällig ausgewählten Ähren je Probe durchgeführten Erhebungen zur Gesamtzahl sowie der basal und apikal reduzierten Spindelstufen zeigt für die beiden Punkte im Geringertragsbereich deutlich weniger Gesamtspindelstufen, von denen wiederum mehr basal und - noch deutlicher - apikal reduziert sind als im Hohertragsbereich (Mann-Whitney U-Test,  $p=0.05$ ). Die Punkte 1 und 3 (Geringertragsbereich) unterscheiden sich in der Anzahl basal reduzierter Stufen signifikant, die Gesamtstufenanzahl ist mit  $p=0.08$  nur tendenziell verschieden. Die apikale Reduktion ist statistisch nicht signifikant verschieden. Die Punkte 2 und 4 (Hohertragsbereich) zeigen nur bei den apikal reduzierten Stufen signifikante Unterschiede.

### 3.2.3.2 Eichung der Ertragssensoren

In der Tab. 8 sind die mittleren Abweichungen der Kalibrationsladungen für einzelne Fruchtarten im Jahr 1999 aufgelistet. Es handelt sich dabei um den Median von vier gesondert erfassten Bunkerladungen nach Anpassung der Kalibrationsfunktion durch den LH 565-Computer für zwei Mähdrescher.

Die mediane Abweichung aller 55 Probeladungen diese Erntejahres beträgt 0.25% (Minimum -6.08%; Maximum 19.24%; n=55). Lässt man die offensichtlich fehlerhaften Daten der Wintergerste-Kalibration des einen Dreschers unberücksichtigt, ergeben sich für die Statistiken der verbleibenden 52 Daten 0.17%, -6.08% bzw. 4.87%.

Die Kalibration des Sensors für Winterraps glückte nur im Erntejahr 1999. In den beiden Folgejahren kam es durch Grünanteile und Fremdbesatz bei insgesamt feuchteren Erntebedingungen zur Krustenbildung auf dem Sensor, und die Sensibilität ging vollständig verloren. Dies geschah zum Teil innerhalb einer Distanz von wenigen hundert Metern, so dass die Daten komplett verworfen werden müssen. Im Sommer 1999 herrschte fast durchgehend trockenes Erntewetter, und die Kalibration gelang problemlos.

Die prozentualen Abweichungen der einzelnen Kalibrationsladungen sind im Anhang in Tab. A-3 aufgeführt.

**Tab. 8: Mediane Abweichungen der LH 565 Ertragsmessungen im Erntejahr 1999 bei verschiedenen Fruchtarten und zwei Mähdreschern mit je vier Probeladungen**

Fruchtart	Abweichung [%]	Anzahl Ladungen [Drescher 1 / Drescher 2]
Wintergerste	0.27 (0.11)*	4 / 3 (4 / 0)*
Winterraps	-1.03	(4 / 4)
Körnererbse	1.36	(4 / 4)
Populationsroggen (2fach)	1.45 / -0.25	(4 / 4) / (4 / 4)
Hybridroggen	-0.02	(4 / 4)
Winterweizen	2.95	(4 / 4)

\*: ein Drescher hatte extrem hohe, unerklärliche Abweichungen, die bei der Berechnung weggelassen wurden (siehe dazu auch den Text)

### 3.2.3.3 Statistiken der Ertrags-Rohdaten

Einfache statistische Lage- (Mittelwert, Median), Streuungs- (Variationskoeffizient) und Verteilungsparameter (Extremwerte, Quantile, Schiefe) aus den aufbereiteten Rohdatensätzen sind in Tab. A-4 aufgeführt. Es handelt sich dabei um Ertragsdaten von zwölf verschiedenen Feldern aus zum Teil mehreren Jahren (je nach Fruchtartenfolge).

Die Mittelwerte der Datensätze liegen in der Regel unterhalb der Mediane, die Differenz beträgt gut 3% des Mittelwertes. Daraus ergeben sich tendenziell linksschiefe Verteilungen der Ertragsrohdaten, worauf auch die in der Regel negativen Werte für die Schiefe hinweisen. Die Hälfte der Datensätze hat -0.68 oder geringere Schiefe-Momente und ist somit leicht linksschief einzustufen. Durch den Ausschluss der jeweils 2% größten und kleinsten Werte ändern sich die Mittelwerte nur unbedeutend.

Aufgrund der Möglichkeit des Auftretens von Ausreißern in den Datensätzen sind neben den Minima und Maxima auch die 2% und 98% Quantile angegeben, um einen groben Eindruck von der Spannweite der Daten zu erlangen. Die Spanne der Quantile weist das 0.8 bis 1.5fache des Mittelwertes auf (Median: 1.1fach).

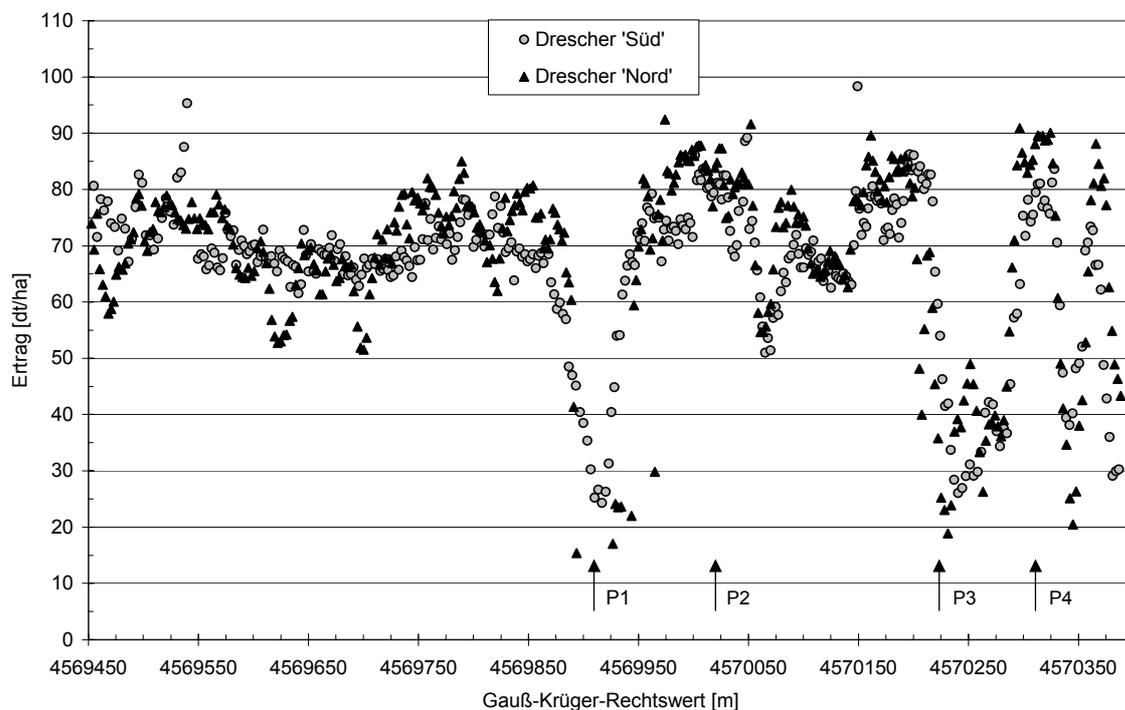
Die Variationskoeffizienten der 25 Datensätze liegen bis auf drei Ausnahmen (Feld '600' in 1999, Feld '1100' in 1999 und 2001) oberhalb von 20%, in fünf Fällen oberhalb von 30% (Feld '501' (2000), Feld '700' (2000), Feld '1000N' (2000), Feld '1000S' (2000), Feld '3300' (2000)). Der extrem hohe Wert im Erntejahr 2000 auf Feld '501' ist auf die Vereinigung von Wintergersten- und Sommergersten-Daten in einem Datensatz zurückzuführen.

Stellt man die Mittelwerte der Ertragsrohdaten der einzelnen Felder den über die eingelagerten Tonnagen errechneten mittleren Erträge der Betriebsbuchführung gegenüber, so ergeben sich Abweichungen von -20% bis +17% der Buchführungswerte (Median +5%). Die Wintergerste-Tonnagen wurden jedoch nur geschätzt, da sie aufgrund der Erntelogistik nicht über die betriebseigene Brückenwaage gefahren werden konnten.

### 3.2.3.4 Exemplarische Analyse einer Druschspur: Ertragsdaten

Durch Hinzunahme der gespeicherten Ortsinformation können die Ertragsrohdaten in ihrem nachbarschaftlichen Bezug zueinander dargestellt und ein Eindruck von der räumlichen Variabilitäts-Ausprägung gewonnen werden. Dies ist in Abb. 7 mit zwei Datensätzen verschiedener Mähdrescher geschehen. Die Werte stammen von dem Feld '1000' (Ernte 1999, Winterweizen) und befinden sich nördlich und südlich der Orte der Punktbeerntungen (siehe auch Kapitel 3.2.3 bzw. Abb. 6). Die Pfeile in der Abbildung markieren die zu den jeweiligen Punkternten korrespondierenden ungefähren Positionen. Die Mähdrescher fahren in einem seitlichen Abstand von sieben Metern zueinander, da der Bereich der Punkternten bereits von einem dritten Mähdrescher beerntet worden war.

Deutlich wird, dass die Wiedergabe der Ertragszonen bei beiden Mähdreschern etwa gleich verläuft. Von links beginnend folgt auf eine anfänglich relativ konstant bei 70-80 dt/ha liegende Zone ein Wechsel in einen Bereich mit geringeren, innerhalb kurzer Distanz auf ca. 20 dt\*ha<sup>-1</sup> abfallenden Erträgen (Punkternte 1). Anschließend wird wieder das Ertragsniveau von 80 dt\*ha<sup>-1</sup> erreicht (Punkternte 2) und es folgen im weiteren Verlauf Schwankungen zwischen 60 und 100 dt\*ha<sup>-1</sup>, die bei beiden Mähdreschern ähnlicher verlaufen als noch am Anfang der Messspur. Nach einem erneuten starken Abfall auf 20-30 dt\*ha<sup>-1</sup> (Punkternte 3) und einem sofortigen starken Wiederanstieg (Punkternte 4) wird nach einer weiteren Schwankung auf recht geringem Ertragsniveau das Vorgewende erreicht und die Aufzeichnung beendet.



**Abb. 7: Ertragsrohdaten von zwei Mähdreschern (Abstand 7m) auf dem Feld '1000' (Ernte 1999, Winterweizen) in Abhängigkeit von der geographischen Position auf dem Feld sowie die Orte der vier Punktbeerntungen**

Statistische Parameter der Druschspur 'Drescher Süd' sind in Tab. 9 aufgeführt. Bereinigt man die Daten um etwaige, unplausible Ausreißer (z.B. zu Beginn der Druschspur mit ca. 98

dt\*ha<sup>-1</sup>, Abb. 8) durch gleitende Mittelwert- oder Medianbildung, ändert sich an den statistischen Parametern außer am Maximalwert nichts Wesentliches. Die Aggregation der Daten erfolgte über jeweils fünf benachbarte Werte, so dass ein Bereich in Richtung der Druschspur von 5.6 bis 18.9m zusammengefasst wird (Median 9.6 m).

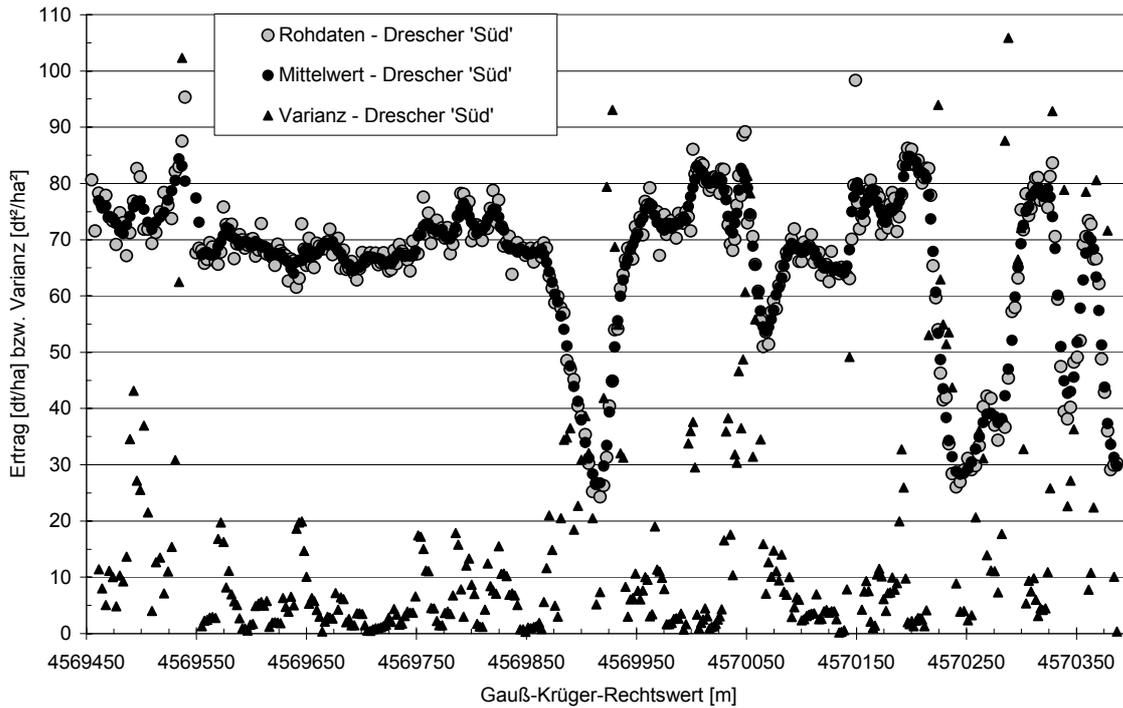
**Tab. 9: Statistische Kenngrößen der Ursprungs-Ertragsdaten, der Distanz, die je 5 Werte umfasst, und berechneter Größen von über fünf Werte geglätteten Ertragsdaten der Druschspur 'Drescher Süd' (n=378)**

Parameter	Ertrag Rohdaten (einzeln)	Distanz über 5 Werte	Mittel des Ertrages (n=5)	Median des Ertrages (n=5)	Varianz des Ertrages (n=5)	CV des Ertrages (n=5)
Mittelwert	67.0 dt*ha <sup>-1</sup>	9.9 m	66.9 dt*ha <sup>-1</sup>	66.8 dt*ha <sup>-1</sup>	23.0 dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup>	6.2%
Minimum	24.3 dt*ha <sup>-1</sup>	5.6 m	26.5 dt*ha <sup>-1</sup>	26.3 dt*ha <sup>-1</sup>	0.2 dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup>	0.7%
2%-Quantil	29.1 dt*ha <sup>-1</sup>	7.4 m	29.8 dt*ha <sup>-1</sup>	29.1 dt*ha <sup>-1</sup>	0.6 dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup>	1.1%
Median	69.2 dt*ha <sup>-1</sup>	9.6 m	69.0 dt*ha <sup>-1</sup>	68.9 dt*ha <sup>-1</sup>	7.3 dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup>	3.9%
98%-Quantil	85.3 dt*ha <sup>-1</sup>	14.3 m	83.1 dt*ha <sup>-1</sup>	83.1 dt*ha <sup>-1</sup>	158 dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup>	22.2%
Maximum	98.3 dt*ha <sup>-1</sup>	18.6 m	84.9 dt*ha <sup>-1</sup>	84.7 dt*ha <sup>-1</sup>	313 dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup>	29.4%
Var.koeff.	19.9%	18.9%	18.9%	19.3%	175%	93.1%
Schiefe	-1.37	1.56	-1.53	-1.55	3.21	1.82

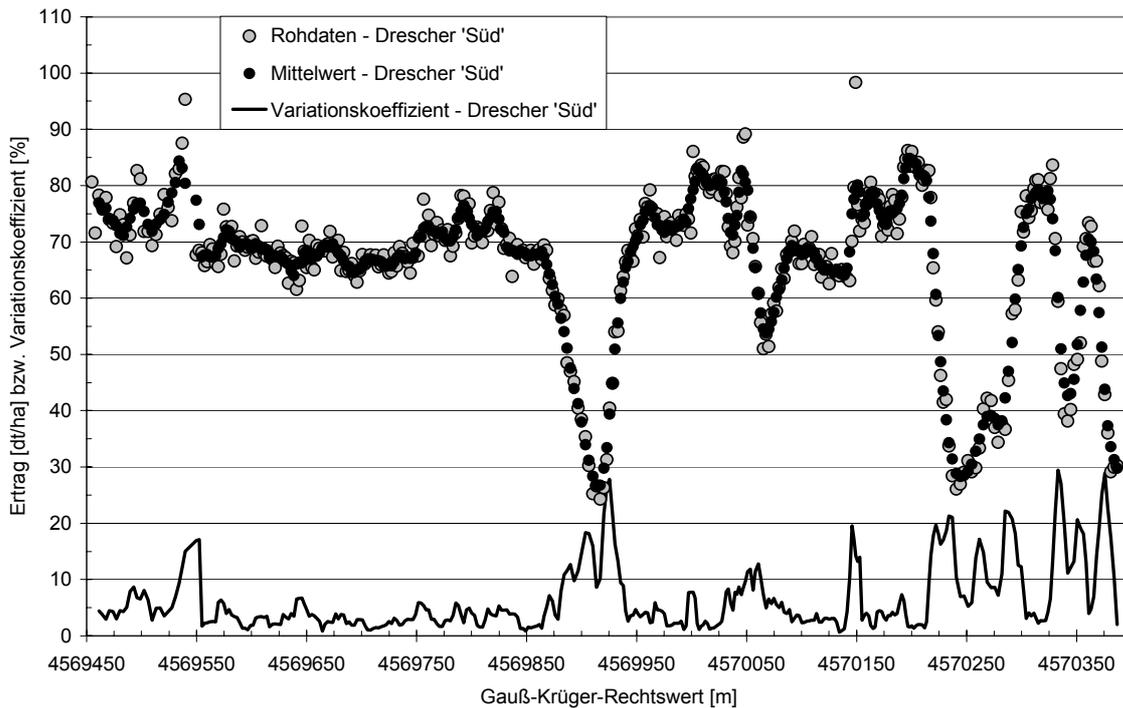
In Abb. 8 und Abb. 9 sind die Rohdaten sowie die über fünf Werte gleitend berechneten Mittelwerte, Varianzen und Variationskoeffizienten im Verlauf der Druschspur dargestellt. Abb. 10 stellt den über fünf Wert gleitend berechneten Mittelwert und Standardfehler des Mittelwertes sowie das daraus geschätzte 95%-Konfidenzintervall dar, wobei die fünf für die Berechnung verwendeten Werten jeweils 15 Messpunkte voneinander entfernt sind.

Die Varianzen schwanken zum Teil erheblich zwischen 0.18 dt<sup>2</sup>\*ha<sup>-2</sup> (2%-Quantil 0.58 dt<sup>2</sup>\*ha<sup>-2</sup>) und 313 dt<sup>2</sup>\*ha<sup>-2</sup> (98%-Quantil 158.1 dt<sup>2</sup>\*ha<sup>-2</sup>). Sie sind deutlich rechtsschief verteilt mit einem Median von 7.26 dt<sup>2</sup>\*ha<sup>-2</sup>. Aus der Abb. 8 wird ersichtlich, dass die höchsten Varianzen bei starken Ertragsänderungen auftreten. Sind die jeweils unterschiedlichen Ertragszonen aber in ihrer räumlichen Ausdehnung groß genug, findet sich innerhalb dieser ein recht ähnliches und von der absoluten Ertragshöhe unabhängiges Varianzniveau von weniger als 10 dt<sup>2</sup>\*ha<sup>-2</sup>. Die daraus errechneten lokalen Variationskoeffizienten liegen im Mittel bei 6.2% (Median 3.9%) und sind ebenfalls stark rechtsschief verteilt. Sobald starke und kleinräumige Ertragsänderungen auftreten, steigen diese Werte auf deutlich mehr als 10%, zum Teil über 20% an (Abb. 9).

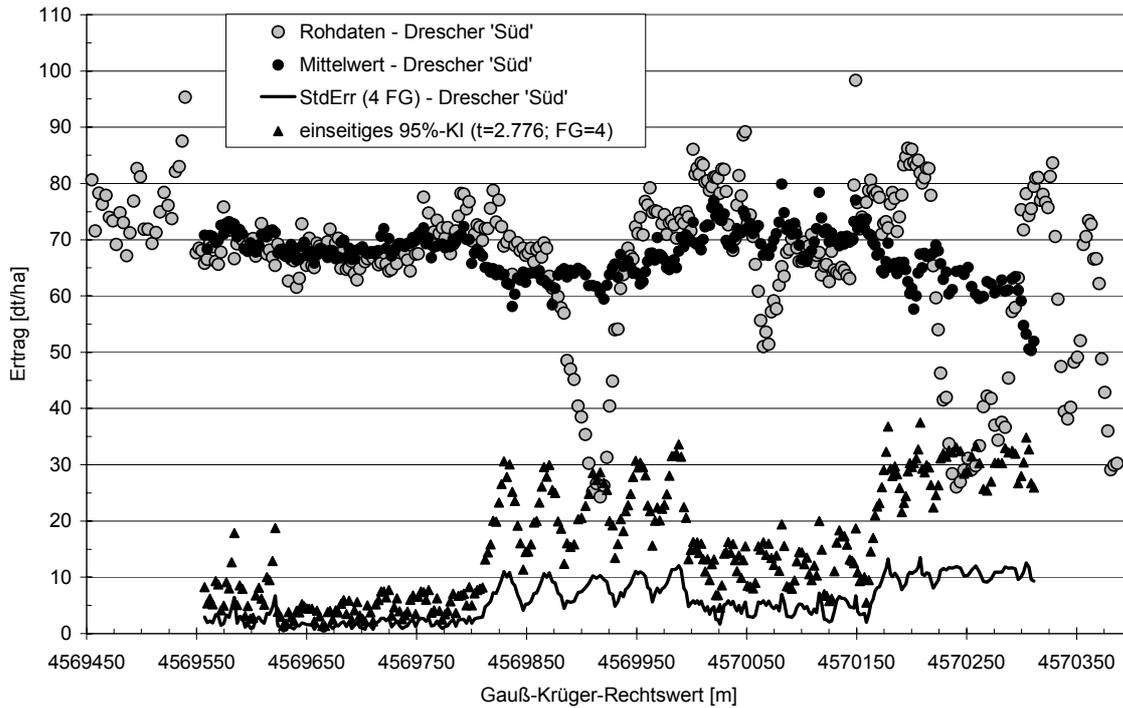
Der Mittelwert und der Median des gleitend berechneten Standardfehlers des Mittelwertes liegen bei 4.6 bzw. 3.3 dt\*ha<sup>-1</sup>. Aufgrund der größeren Streckung des Berechnungsbereiches der gleitenden Werte, gibt der Mittelwert bei starken kleinräumigen Ertragsänderungen nicht den Verlauf der Rohdaten wieder. Der Verlauf der Standardfehler und Konfidenzintervalle hat daher ein zackenförmiges Aussehen, sobald stark unterschiedliche Ertragszonen in den Berechnungsbereich einbezogen werden. Im relativ konstanten Anfangsbereich der Ertragsspur liegt das 95%-Konfidenzintervall für den gleitenden Mittelwert deutlich unterhalb von 10 dt\*ha<sup>-1</sup>.



**Abb. 8: Ertragsrohdaten der Druschspur 'Süd' (Feld '1000', Ernte 1999, Winterweizen) sowie über fünf Werte gleitend berechneter Mittelwert und Varianz der Rohdaten**



**Abb. 9: Ertragsrohdaten der Druschspur 'Süd' (Feld '1000', Ernte 1999, Winterweizen) sowie über fünf Werte gleitend berechneter Mittelwert und Variationskoeffizient der Rohdaten**



**Abb. 10: Ertragsrohdaten der Druschspur 'Süd' (Feld 1000, Ernte 1999, Winterweizen) sowie über fünf jeweils 15 Messpunkte voneinander entfernte Werte gleitend berechneter Mittelwert und Standardfehler des Mittelwertes sowie aus diesem abgeleitetes 95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert (FG=4)**

### 3.2.3.5 Auslastung des Schneidwerks

Für die 7.20 m breiten Schneidwerke der New Holland Mährescher wurde im LH 565-Computer die Breite von 7.01 m gewählt. Des Weiteren konnte das Schneidwerk virtuell in sechs Teilbreiten unterteilt werden. Eine nicht vollständige Auslastung des Schneidwerkes während des Drusches (Keildrusch, unvollständige Restspuren) wurde vom Fahrer über Tasten am Ertragskartierungs-Computer vermerkt. In Tab. 10 sind für die verschiedenen Druschkonstellationen die zu erwartenden prozentualen Fehler der errechneten Erträge angegeben, die sich theoretisch aus einer zufälligen Schwankung der Auslastung um +/- 20 cm während des Drusches ergeben würden. Mit sinkender Anzahl aktiver Teilbreiten nimmt die Abweichung aufgrund der praktisch bedingten Ungenauigkeit beim Druschvorgang von anfangs 2.9% auf über 17% zu.

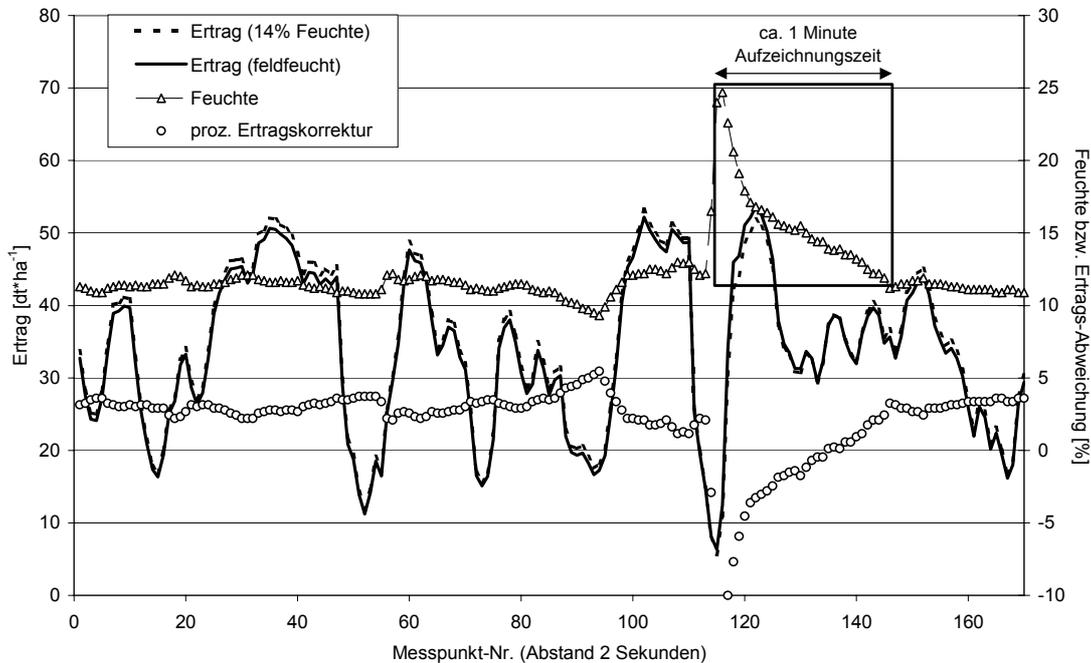
Exemplarisch wurden die Ertragsrohdaten gesondert nach Teilbreiten hinsichtlich ihrer mittleren Erträge untersucht. Dies ist möglich, da die ALBYD-Software in einem Tabellenfeld der Export-Datei die jeweils aktivierte Schnittbreite in Zoll speichert. Es zeigte sich beim Teilbreiten-differenzierten Ertragsvergleich, dass die mittleren Erträge mit sinkender Anzahl aktiver Teilbreiten tendenziell ansteigen (Werte nicht dargestellt). Im Verlauf der Aufbereitung der Rohdaten für die Ertragskartenerstellung werden daher Messwerte, die gemäß der Einstellung durch den Fahrer nicht mit der vollen Schneidwerksbreite erhoben wurden, pauschal verworfen.

**Tab. 10: Prozentuale Abweichung der errechneten von den tatsächlichen Erträgen für eine schwankende Auslastung des Schneidwerks um +/- 20 Zentimeter bei Nutzung der vom LH 565 unterstützten Teilbreitenschaltung**

aktive Teilbreiten [-]	Schneidwerksbreite [cm]	Schwankungsbereich [cm]	+/- Abweichung [%]
6	701	681 - 721	2.9
5	584	564 - 604	3.4
4	468	448 - 488	4.3
3	351	331 - 371	5.7
2	234	214 - 254	8.5
1	117	97 - 137	17.1

### 3.2.3.6 Einfluss unterschiedlicher Gutfeuchte

In Abb. 11 sind die Rohdaten (Ertrag und Feuchte) einer Druschspur des Feldes 200 (Ernte 2000, Winterweizen) sowie die auf 14% Feuchte korrigierten Erträge und die auf das feldfeuchte Erntegut bezogene prozentuale Differenz zwischen erntefeuchter und Feuchte-korrigierter Ware dargestellt.



**Abb. 11: Verlauf der gemessenen und Feuchte-korrigierten Rohertragsdaten und der Feuchte sowie die berechnete, prozentuale Abweichung der Feuchte-korrigierten Erträge einer Druschspur auf Feld 200 (Ernte 2000, Winterweizen)**

Das Ertragsmittel (erntefeucht) der betrachteten Spur beträgt  $33.8 \text{ dt}\cdot\text{ha}^{-1}$  bei 12.2% mittlerer Feuchte. Die 10 und 90%-Quantile der Feuchte liegen bei 10.9 bzw. 15.0%, die entsprechenden Werte für die prozentuale Ertragskorrektur bei -1.2 bzw. 3.6% bezogen auf den feldfeuchten Ertrag.

Deutlich sichtbar ist ein wahrscheinlich durch Unkrautpflanzen auf dem Feuchte-Sensor verursachter, unplausibel hoher Feuchtwert von ca. 25% am Messpunkt 119. Die Feuchte nimmt im Anschluss daran im Zeitraum von ca. einer Minute wieder kontinuierlich auf ein Niveau von 11-12% ab. Für die Feuchte-korrigierten Ertragsdaten ergeben sich bei automatischer Korrektur Abweichungen von im Mittel 2%. Lediglich am Ort der hohen Feuchte werden die Daten um mehr als 10% verringert.

### 3.2.3.7 Vergleich der Datensätze von zwei Mähdreschern

Während der Ernte auf den Feldern der Nuthequelle GmbH kamen in den Erntejahren 1999 bis 2001 mindestens drei Mähdrescher gleichzeitig zum Einsatz, von denen zwei mit baugleichen Systemen der Ertragskartierung ausgestattet waren. Vor allem in den Daten der ersten beiden Jahre des Einsatzes zeigt sich, dass die von den Drescherfahrern eigenständig kalibrierten Feuchtesensoren häufiger einen deutlichen Niveauunterschied aufweisen, der bis zu 4%-Punkte Differenz betragen konnte. Im dritten Jahr nach erneuter Einweisung der Drescherfahrer liegt der Unterschied der Feuchtemessung im Bereich von weniger als einem Prozentpunkt.

Auch die mittleren Erträge der Gesamtdatensätze eines Feldes weichen in einigen Fällen um 10-20% voneinander ab, obwohl die Kalibrationsgenauigkeit der Sensoren vergleichbar war.

Ein besonders deutlicher Fall trat auf, als ein Mähdrescher im Jahr 1999 (Winterraps) über längere Zeit mit falsch eingegebener Gesamtschnittbreite gefahren wurde (457 cm anstelle 701 cm) und die Erträge demzufolge über 50% höher lagen als beim korrekt eingestellten Mess-System. Von dem betroffenen Datensatz wurden exemplarisch vier Druschspuren (je ca. 780 m) selektiert, zu denen direkt benachbart Messwerte des korrekt eingestellten Dreschers existieren. Diese wurden Punkt-weise kombiniert (geringste Distanz) und aus den Wertepaaren die in Tab. 11 dargestellten Statistiken berechnet.

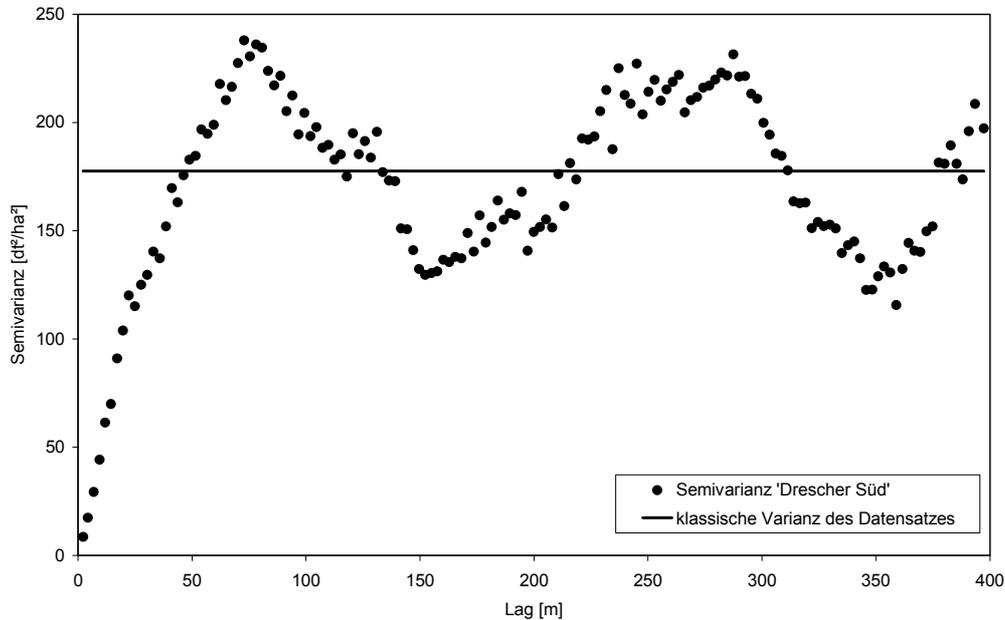
**Tab. 11: Mediane der feldfeuchten Erträge und Gutfeuchten von vier Druschspuren zweier Mähdrescher des Feldes '2600' (Ernte 1999, Winterraps)**

Datensatz	Drescher 1 Schnittbreite = 701 cm			Drescher 2 Schnittbreite = 457 cm			Quotient		Punkt-Distanz
	N	Ertrag (feucht)	Feuchte	N	Ertrag (feucht)	Feuchte	Ertrag1/ Ertrag2	Feuchte1/ Feuchte2	
	[-]	[dt*ha <sup>-1</sup> ]	[%]	[-]	[dt*ha <sup>-1</sup> ]	[%]	[-]	[-]	[cm]
Druschspur 1-4 gesamt	181 2	36.0	6.4	181 2	57.7	6.9	0.62	0.93	712
Druschspur 1	521	37.6	8.6	521	58.4	7.8	0.64	1.10	723
Druschspur 2	424	32.7	6.0	424	54.7	6.6	0.60	0.91	694
Druschspur 3	446	37.1	6.4	446	54.2	6.9	0.68	0.93	730
Druschspur 4	421	35.5	5.6	421	61.3	6.1	0.58	0.92	708

Für die mittleren Erträge des erntefeuchten Gutes (Median) aller Druschspuren errechnet sich ein Quotient von 0.62, der mit dem theoretisch zu erwartenden Quotienten von 0.65 annähernd übereinstimmt. Betrachtet man die vier Druschspuren gesondert, schwanken die Quotienten zwischen 0.58 und 0.68. Da die Mähdrescher über erntefeuchte Ertragsdaten kalibriert werden, kommt bei der Quotientenbildung eine unterschiedliche Kalibrierung der Feuchtesensoren nicht zur Auswirkung. Die mittleren Distanzen der Punkte in den jeweiligen Druschspuren liegen zwischen 694 und 730 cm. Die Höhe der Ertragsquotienten zeigt je Druschspur keine Abhängigkeit von der Distanz zwischen den Ertragsmesspunkten oder vom Ertragsniveau.

### 3.2.3.8 Exemplarische Analyse einer Druschspur: Semivarianzen

Zur Beschreibung des räumlichen Zusammenhanges von Daten wird die empirische Semivarianz herangezogen. Die Semivarianz ist ein Maß für die Varianz, die innerhalb der Wertepaare auftritt, deren Punkte einen bestimmten Abstand ( $h$ ) voneinander haben. Sie kann in Abhängigkeit von dieser Distanz grafisch als Variogramm dargestellt werden.



**Abb. 12: Empirische Semivarianzen der Rohertragsdaten der Druschspur 'Drescher Süd' vom Feld '1000' (Ernte 1999, Winterweizen) in Abhängigkeit von der Distanz der Punktpaare sowie die klassische Varianz des gesamten Datensatzes**

In Abb. 12 sind die empirischen Semivarianzen der Druschspur 'Drescher Süd' in Abhängigkeit von dem Abstand der Punktpaare dargestellt. Außerdem ist die klassische Gesamtvarianz des Datensatzes eingezeichnet, deren Berechnung nicht die räumlichen Beziehungen zwischen den Punkten berücksichtigt.

Bis zu einer Punktpaar-Distanz von gut 40 m sind die berechneten Semivarianzen geringer als die Gesamtvarianz des Datensatzes. Darüber hinaus treten zwei sogenannte hole-Effekte bei ca. 100 bis 180 m und ab ca. 320 m auf.

Zerlegt man die Druschspur in drei gleich lange Abschnitte von ca. 300 m Länge (Abb. 13) und berechnet die empirischen Semivarianzen dieser Abschnitte einzeln, ergibt sich das in Abb. 14 dargestellte Bild. Die Semivarianzen der drei Teilspuren unterscheiden sich deutlich in ihrem Verlauf mit zunehmender Distanz der Punktpaare. Während für den ersten Abschnitt (Teil 1) insgesamt vergleichsweise geringe Semivarianzen berechnet werden, zeigen die Werte der Teile 2 und 3 ein deutlich höheres Niveau, das auch die Werte der Gesamspur übersteigt.

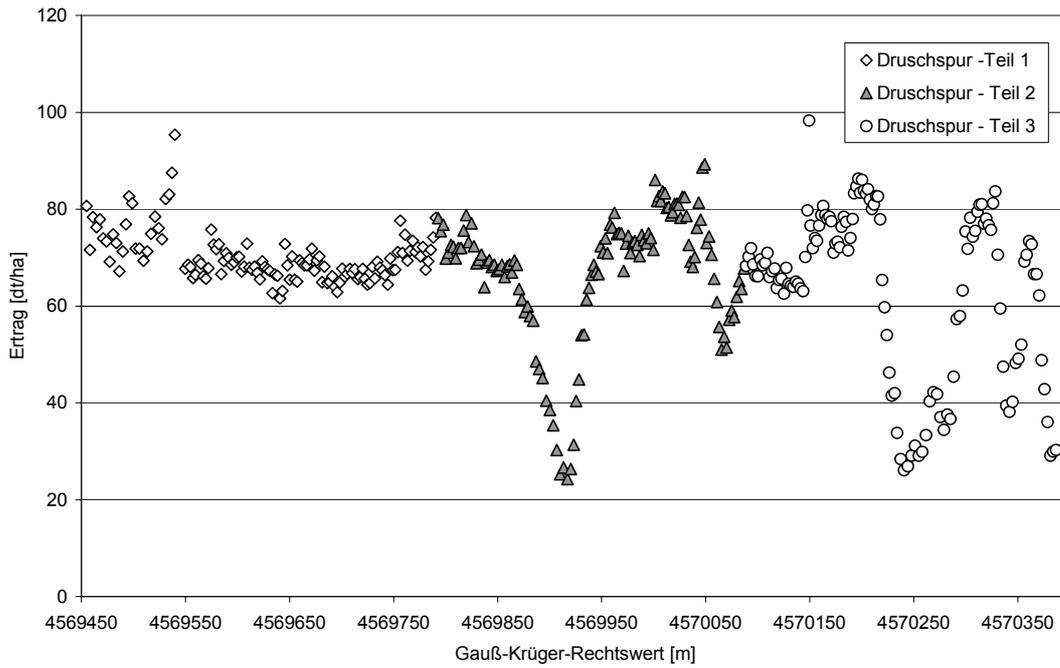


Abb. 13: Aufteilung der Druschspur 'Drescher Süd' des Feldes '1000' (Ernte 1999, Winterweizen) in drei Spurenabschnitte

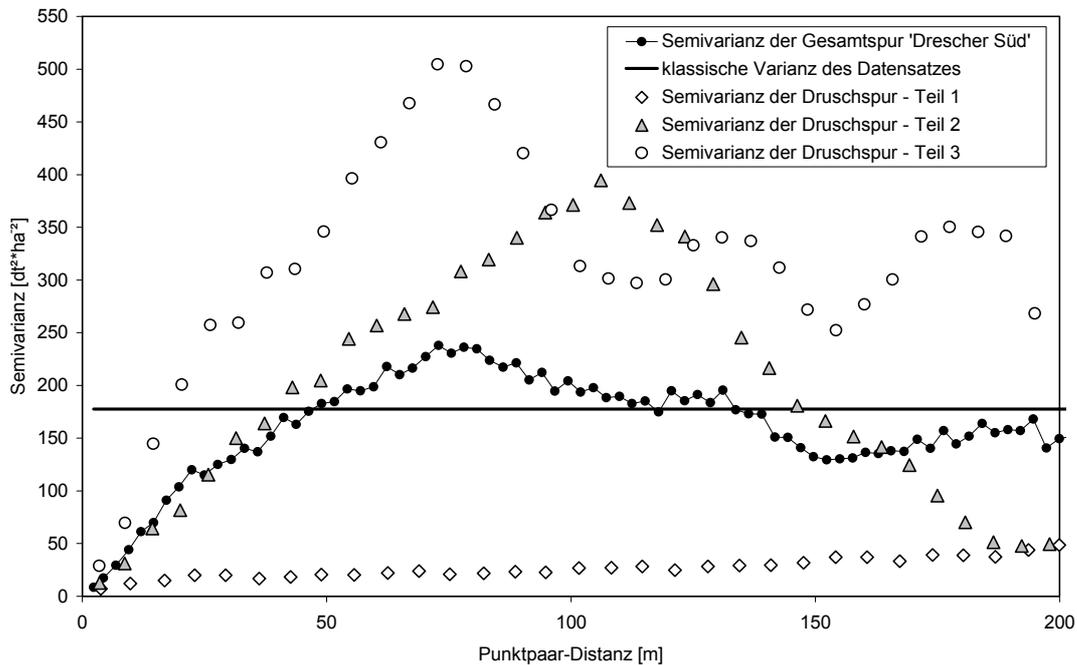
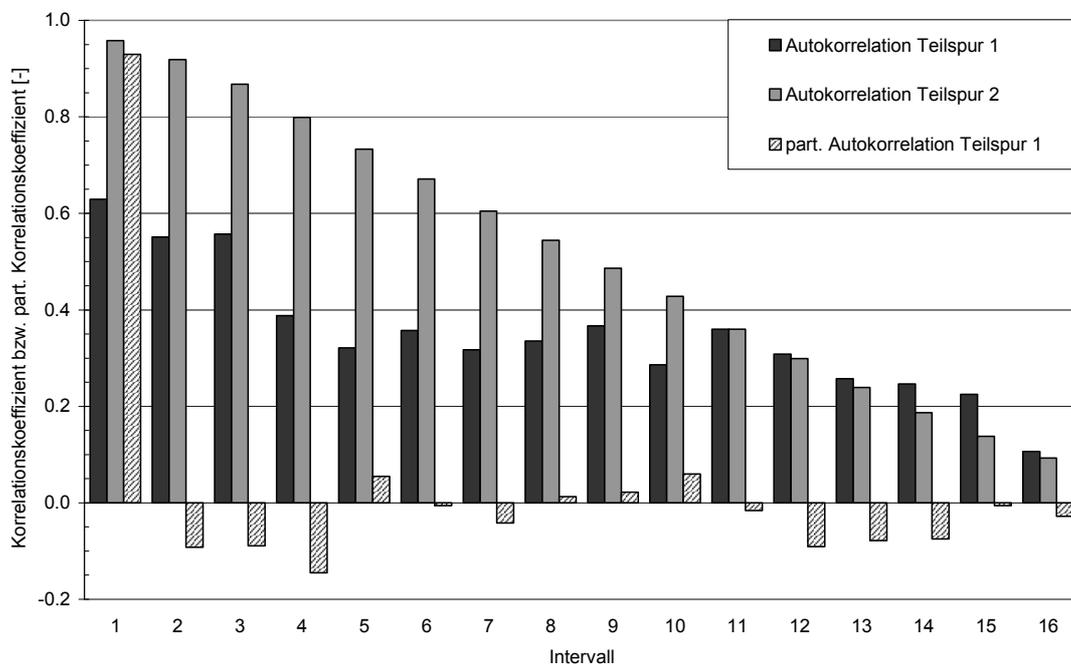


Abb. 14: Empirische Semivarianzen der Rohertragsdaten der Druschspur 'Drescher Süd' und der drei Spurenabschnitte des Feldes '1000' (Ernte 1999, Winterweizen) in Abhängigkeit von der Punktpaar-Distanz sowie die klassische Varianz des Datensatzes

### 3.2.3.9 Exemplarische Analyse einer Druschspur: Autokorrelation

Für die in Kapitel 3.2.3.8 unterschiedenen Teilspuren 1 und 2 der Druschdaten wurden statistische Analysen hinsichtlich der Autokorrelation durchgeführt. In Abb. 15 ist die Autokorrelation und die partielle Autokorrelation in Abhängigkeit von dem Intervallabstand dargestellt. Jede Einheit auf der Abszisse stellt ein Messintervall dar, das bei der verwendeten Frequenz der Datenaufzeichnung von 0.5 Hz etwa 2 m Fahrstrecke entspricht.

Die gefundene maximale Distanz der Autokorrelation für die gesamte Druschspur beträgt etwa 15 Intervalle, was somit ca. 30 m entsprechen würde. Die partielle Korrelation ist ein Maß für Korrelation zwischen Daten unterschiedlich weit entfernter Punkte (Entfernung in Intervall-Einheiten), das nicht bereits durch die Korrelation auf einer geringeren Intervallstufe erklärt werden kann. Gemäß der Grafik sind direkt nacheinander aufgezeichnete Daten miteinander korreliert ( $r=0.93$ ), für alle anderen Zeitintervalle existiert keine darüber hinausgehende Korrelation.



**Abb. 15: Koeffizienten der Autokorrelation und partiellen Autokorrelation für die Ertragsdaten der Druschspur 'Drescher Süd' von Feld '1000' (Ernte 1999, Winterweizen)**

Die beiden Teilspuren unterscheiden sich im Niveau ihrer Autokorrelations-Koeffizienten, nicht jedoch in der Reichweite der Autokorrelation, die bei beiden Datensätzen etwa 15 Intervalle beträgt.

### 3.2.3.10 Interpolation: Variation der Rohdaten

Um den Einfluss der Rohdaten-Güte auf das Interpolationsergebnis einschätzen zu können, wurden aus den Ertragsdaten der Ernte 1999 vom Feld '2600' (Winterraps) verschiedene Datensätze neu erstellt. Variiert wurde die Güte der Übereinstimmung der beiden Mährescher-Dateien sowie der Ortsinformation.

Wie in Kapitel 3.2.3.7 dargestellt, treten auf dem Feld '2600' bedingt durch eine fehlerhafte Einstellung der Referenz-Schneidwerksbreite des einen Mähreschers deutliche Unterschiede in den kartierten Erträgen auf. Die gesonderte Fahrspuranalyse ergibt als Median der Ertragsquotienten zwischen benachbarten Punkten den empirischen Wert von 0.633, der geringfügig von dem theoretischen Wert 0.652 abweicht.

Der Referenzdatensatz der nachfolgenden Analyse besteht aus Ertragsdaten des Dreschers A (Code: A) sowie den mit 0.633 multiplizierten Ertragsdaten des Dreschers B (Code: B063). Weiterhin bleiben für diesen Datensatz all die Messpunkte unberücksichtigt, die nicht mit der vollen Teilbreiten-Anzahl erhoben wurden (Code: TB). Für die korrekte Zuordnung der gespeicherten Ertragsmessungen zu den Ortskoordinaten müssen spezifische Verzögerungszeiten berücksichtigt werden. Diese treten auf, weil sich zum Zeitpunkt der Koordinatenspeicherung die Pflanzensubstanz erst am Messerbalken befindet, die aktuell am Sensor gemessene Ertragshöhe aber zu bereits vorher geerntetem Material gehört. Für die in dieser Arbeit verwendeten Ertragsmess- und Erntetechnik beträgt die Verzögerungszeit ca. 12 Sekunden. Des Weiteren wurden Vor- und Nachlaufzeiten von 5 Sekunden angenommen, die sich jeweils auf das Ausheben und das Absenken des Schneidwerkes beziehen. Die Schneidwerkshöhe bestimmt, ob überhaupt Ertragsdaten aufgezeichnet werden. Die so korrigierten Ertragsdaten erhalten den Code 1255. Somit ergibt sich für den Referenzdatensatz die Bezeichnung A\_B063\_TB\_1255.

Alternativ wurden die durchgeführten Aufbereitungs- und Korrekturschritte gezielt weggelassen, so dass sich die in der Tab. 12 aufgeführten Varianten von Datensätzen ergeben. Einfache Statistiken dieser Rohdatensätze enthält die Tab. 13.

**Tab. 12: Bezeichnung der Rohdaten-Varianten für die vergleichende Interpolation**

Datensatz-Nr.	Codierung	Bemerkung
1	A_B063_TB_1255	optimal korrigierter Referenzdatensatz (siehe Text)
2	A_B_TB_1255	keine Korrektur der unterschiedlichen Sensoreinstellung von Drescher B
3	A_B065_TB_1255	Nutzung des theoretischen Korrekturfaktors 0.652 für Drescher B
4	A_B063_alle_1255	kein Ausschluss von mit Teilbreiten-Schaltung erhobenen Ertragsdaten
5	A_B063_TB_000	keine Korrektur der Verzögerung zwischen Orts- und Ertragsdaten-Speicherung

Aus den Rohdatensätzen wurden mit dem Programm VESPER (MINASNY ET AL. (1999)) Ertragswerte auf ein 5x5m-Raster interpoliert (Ordinary Block Kriging, 10x10m Blöcke, automatische, lokale Anpassung eines sphärischen Variogramm-Modells). Zur Begründung des Interpolationsverfahrens wird auf das Kapitel 3 verwiesen.

In der Tab. A-6 und Tab. A-7 sind zusammenfassende Statistiken der Interpolationsergebnisse angegeben, in der Tab. A-8 sind diese ins Verhältnis zu den Statistiken der jeweiligen Rohdatensätze gestellt. Die relativen Krige-Varianzen werden in der Tab. A-9 auf die Variante bezogen, welche die höchsten Krige-Varianzen aufweist, in Tab. A-10 alternativ auf die Variante mit den nächst geringeren. In der Abb. 16 und Abb. 17 sind die aus den Datensätzen 1 und 2 bzw. 4 und 5 (siehe Tab. 12) interpolierten Ertragskarten zu sehen.

**Tab. 13: Statistiken der unterschiedlich aufbereiteten Ertrag-Rohdatensätze (zur Erläuterung der Codierung siehe Tab. 12 sowie den Text)**

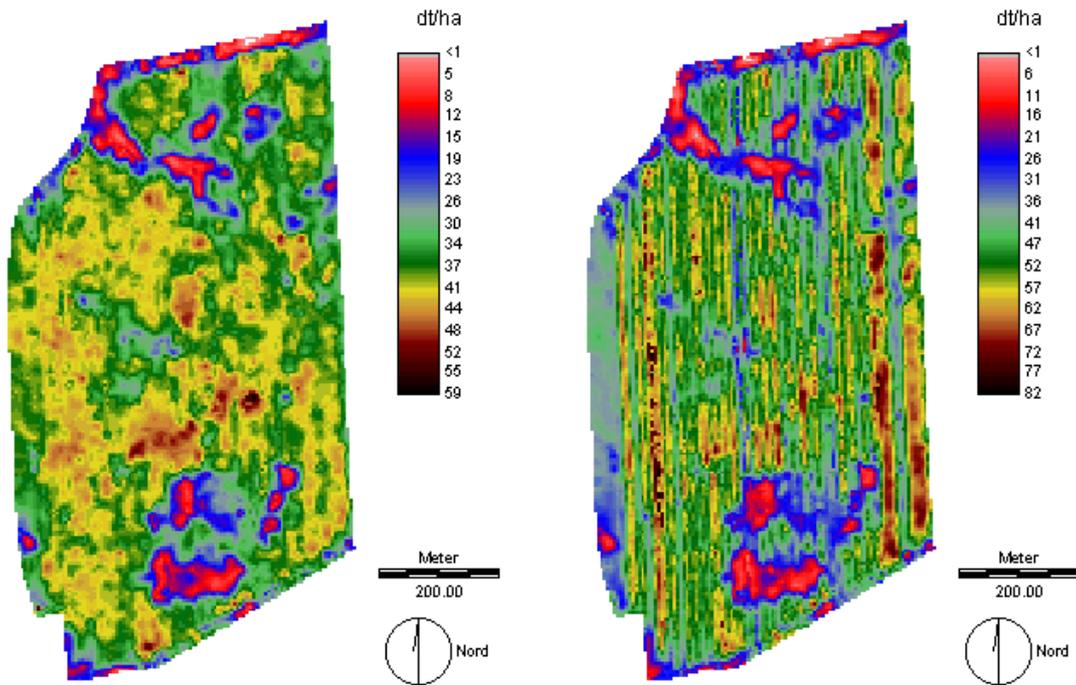
Codierung	Mittel	Median	CV	2%-Quant.	98%-Quant.	Maximum
	[dt*ha <sup>-1</sup> ]	[dt*ha <sup>-1</sup> ]	[%]	[dt*ha <sup>-1</sup> ]	[dt*ha <sup>-1</sup> ]	[dt*ha <sup>-1</sup> ]
A_B063_TB_1255	36.8	38.4	22.4	11.5	48.9	110.6
A_B_TB_1255	47.7	44.1	32.6	13.5	73.9	119.0
A_B065_TB_1255	37.3	38.9	22.5	11.7	49.8	110.6
A_B063_alle_1255	37.2	38.5	23.8	11.6	53.4	125.2
A_B063_TB_000	36.5	38.2	24.6	11.0	51.3	118.2

Die Ausgangdaten unterscheiden sich vornehmlich in den Ausreißer-sensitiven Statistiken (Mittelwert, Variationskoeffizient, Maximum). Die deutlich größeren Lagemaße (Mittelwert, Median) im Datensatz A\_B\_TB\_1255 sind durch die nicht angepassten Ertragsdaten zu erklären, die etwa 50% des Gesamtdatensatzes ausmachen. Nach der Korrektur mit dem Faktor 0.633 oder 0.652 unterscheiden sich die Statistiken nur noch unbedeutend. Der Einfluss der unvollständigen Auslastung des Schneidwerks (siehe auch 3.2.3.5) wird zwischen den Datensätzen A\_B063\_TB\_1255 und A\_B063\_alle\_1255 offenbar: durch Ausschaltung der in Teilbreiten-Schaltung kartierten Erträge verringern sich die Maximal- und 98%-Quantil-Werte deutlich, während die Lagemaße und der Variationskoeffizient nur mit einer schwachen Abnahme reagieren. Durch diesen Aufbereitungsschritt werden im betrachteten Beispiel etwa 6% der Werte ausgeschlossen.

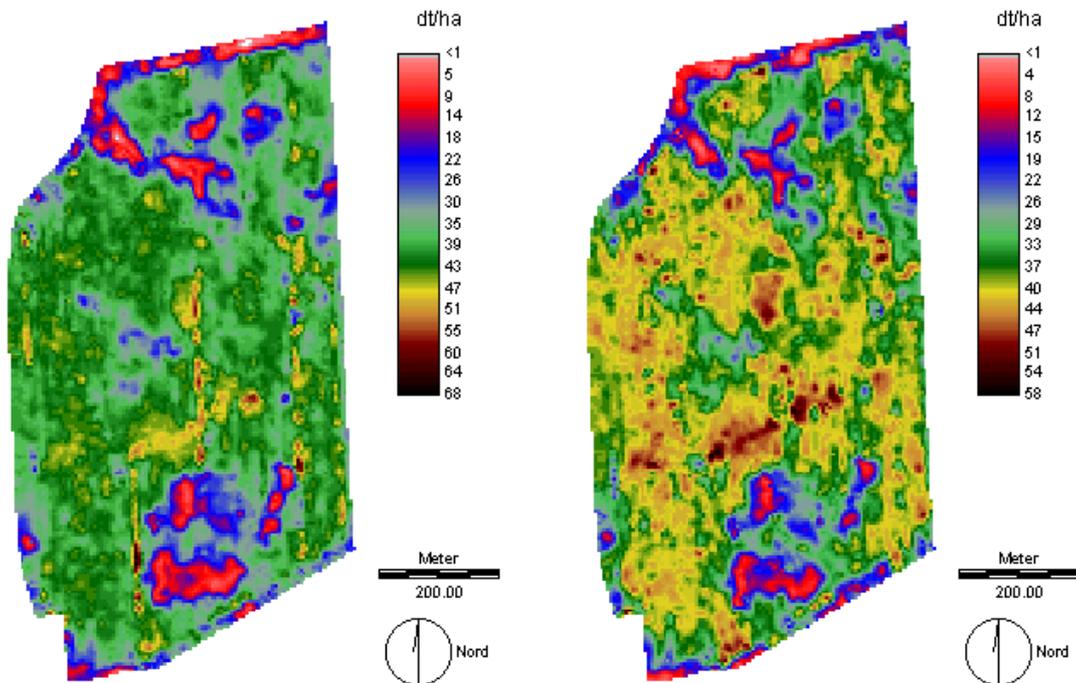
Eine Berücksichtigung der spezifischen Verzögerungs-, An- und Nachlauf-Zeiten beeinflusst die Statistiken kaum (Datensatz A\_B063\_TB\_000). Es kommt im Vergleich zum Referenzdatensatz zu einem unbedeutend verringerten Mittelwert und Median sowie tendenziell erhöhtem Extremwert und Variationskoeffizient.

Vergleicht man die Statistiken der Rohdaten und die interpolierten Werte miteinander (Tab. A-8), wird deutlich, dass durch das Block-Kriging vor allem die Maximalwerte verringert werden (auf 53-69% des Ausgangsniveaus). Auch die 98%-Quantile nehmen ab, wenn auch nur vergleichsweise gering. Stärker wiederum werden die 2%-Quantile verringert (Reduktion auf 82-91%). Die Mittelwerte nehmen in der Regel um 5-6% ab, während die Mediane sich nur um 1-3% verringern. In einem Fall (Datensatz A\_B\_TB\_1255) nimmt der Median um 6% zu, der Mittelwert um den gleichen Prozentsatz ab. Die Variationskoeffizienten der

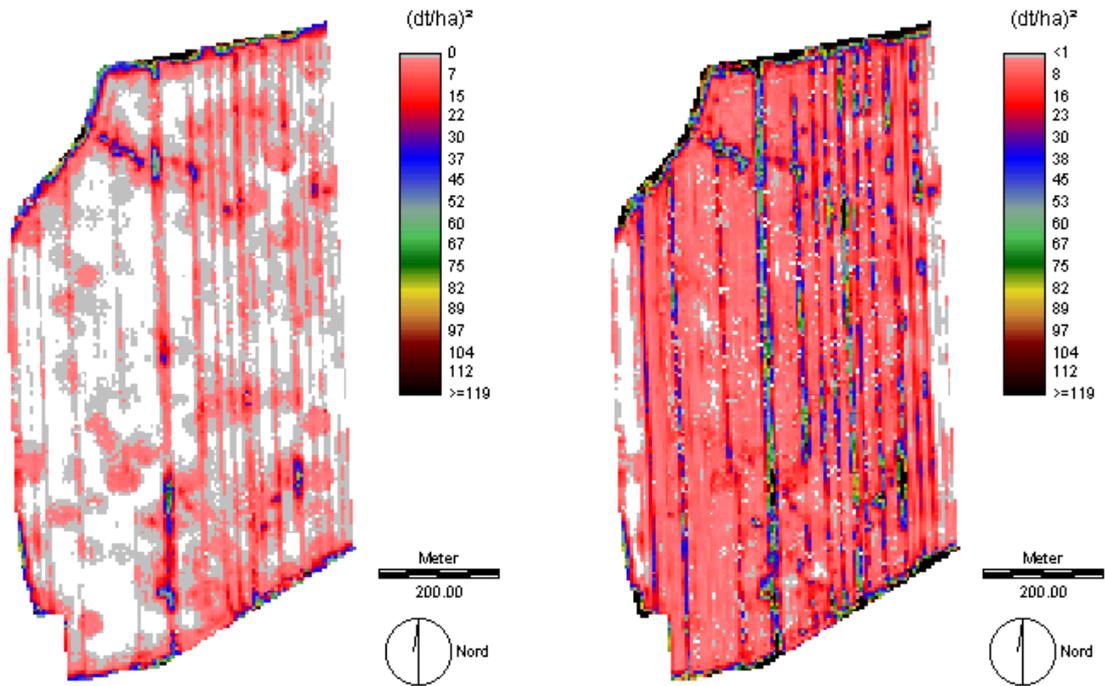
interpolierten Daten nehmen tendenziell zu (5-13%), nur für A\_B\_TB\_1255 ist eine ca. 10%ige Abnahme zu beobachten.



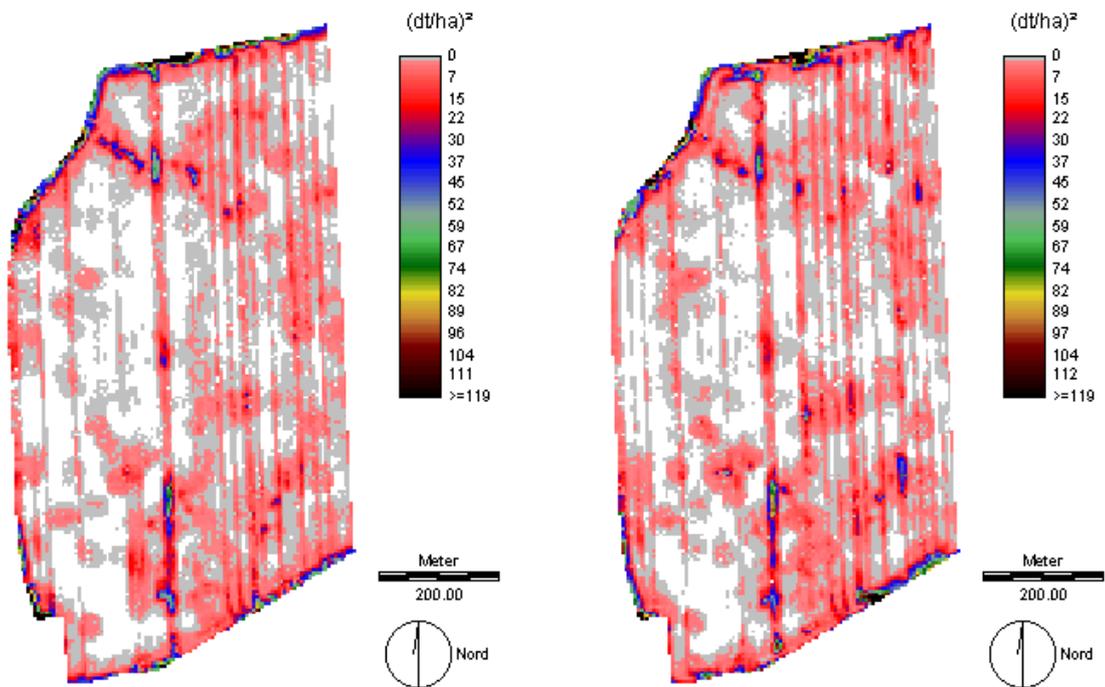
**Abb. 16: Kriging-interpolierte Ertragskarten für das Feld 2600 (46 ha) aus den Datensätzen 1 (links) und 2 (rechts) (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 12)**



**Abb. 17: Kriging-interpolierte Ertragskarten für das Feld 2600 (46 ha) aus den Datensätzen 4 (links) und 5 (rechts) (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 12)**



**Abb. 18: Karten der Krige-Varianzen für das Feld 2600 (46 ha) aus den Datensätzen 1 (links) und 2 (rechts) (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 12)**



**Abb. 19: Karten der Krige-Varianzen für das Feld 2600 (46 ha) aus den Datensätzen 4 (links) und 5 (rechts) (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 12)**

Um die Besonderheit der Ergebnisse der Ertragskarten-Interpolation besser darzustellen, wurden die Legenden auf den jeweiligen Wertebereich der Karte angewendet (Autoskalierung). Daher sind lediglich die Karten der Datensätze 1 und 5 auch farblich direkt

vergleichbar, während in der Karte des Datensatzes 2 sehr deutlich die Niveau-Unterschiede aufgrund der abweichenden Sensor-Eichung zwischen den Mähdreschern in Erscheinung treten. In der Karte des Datensatzes 4 weisen einzelne Fahrspur-Bereiche besonders hohe Erträge aus. Diese werden durch Rohdaten verursacht, die durch unzureichende Schneidwerksfüllung und/oder ungenaue Nutzung der virtuellen Teilbreiten-Schaltung fehlerhaft sind.

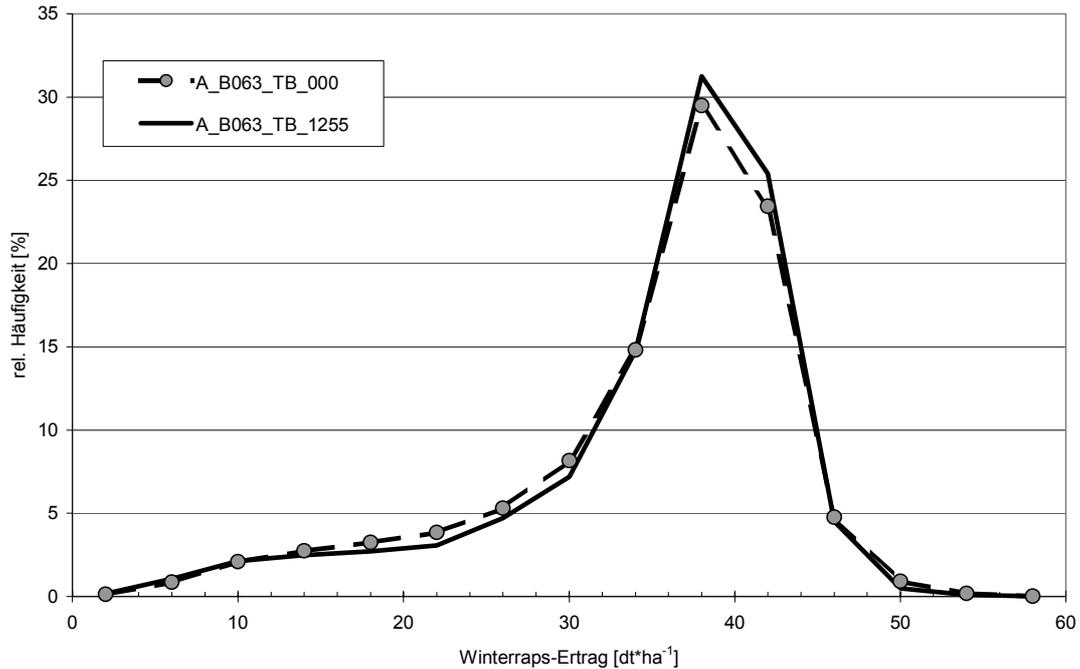
Die Karten der Krige-Varianzen (Abb. 18 & Abb. 19) sind farblich direkt miteinander vergleichbar, da die Legenden auf identische Wertebereiche skaliert wurden. Die Krige-Varianzen, die ein relatives Gütemaß der interpolierten Ertragswerte darstellen, sind besonders für den Datensatz 2 erhöht (Abb. 18, rechts). Dieser Datensatz beinhaltet Ertragsrohdaten von zwei Mähdreschern, die unterschiedliche Sensorkalibrationen besaßen, von denen eine fehlerhaft war. Durch die lokale Berechnung des Semivariogrammes werden Rohdaten aus stark unterschiedlichen Rohdaten miteinander vereint. Daraus resultiert für die Schätzung des Variogramm-Modells ein großer Nugget-Effekt, der sich in der Krige-Varianz deutlich niederschlägt.

Deutlich geringere Unterschiede in der Verlässlichkeit des Interpolationsergebnisses im Vergleich mit dem Referenzdatensatz zeigen die Karten der Krige-Varianzen der Datensätze 4 und 5 (Abb. 19). Für den Datensatz 4 finden sich tendenziell mehr graue und rötliche Bereiche über das Feld verteilt. Für den Datensatz 5 sind besonders im südlichen Feldbereich ausgeprägtere und zusammenhängende rote Zonen zu erkennen. Diese gehen auf die räumlich gegeneinander verschobenen Fahrspur-Daten zurück, was sich besonders in Zonen mit kleinräumig stark schwankenden Werten bemerkbar macht (siehe auch Abb. 23).

Vergleicht man die Mittelwerte der Interpolationsdaten mit den Mittelwerten der Felder aus der Betriebsbuchführung, so sind bei den interpolierten Daten 1-3% höhere Werte zu finden, die Mediane liegen sogar 8-10% über den jeweils mittleren Erträgen der Betriebsaufzeichnungen.

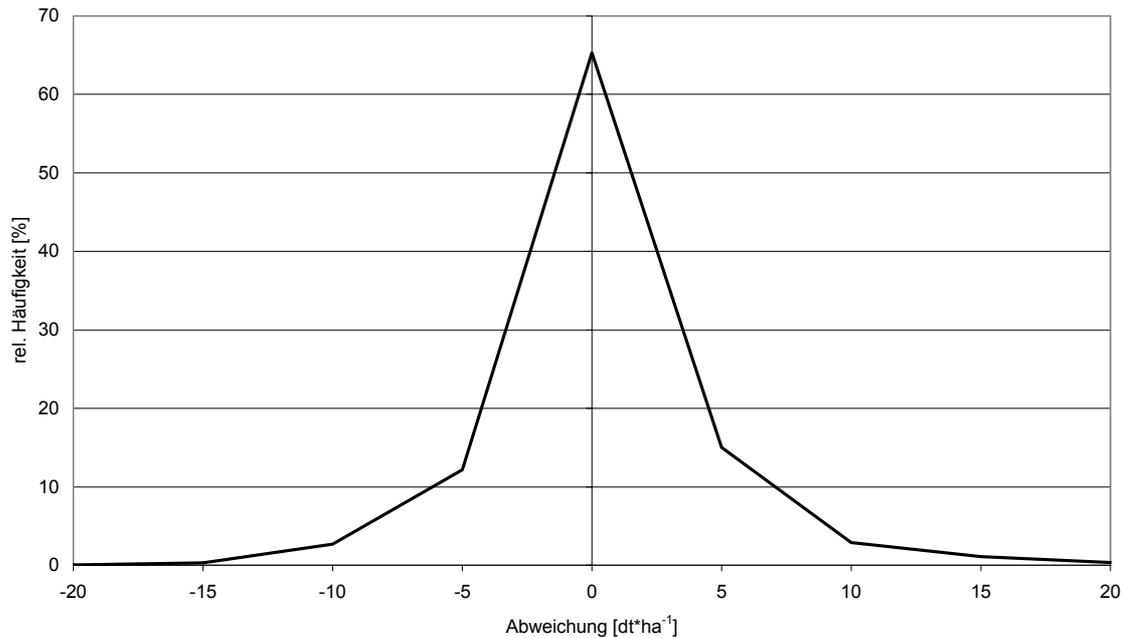
Die Krige-Varianzen der interpolierten Werte liegen - mit Ausnahme von A\_B\_TB\_1255 - im Mittel bei 4.4-5.2 dt<sup>2</sup>\*ha<sup>-2</sup> (Median 1.0-1.3). Die geringsten Werte zeigt der Datensatz A\_B063\_TB\_1255, gefolgt von A\_B065\_TB\_1255. Die Mediane der Krige-Varianzen lassen sich durch die Aufbereitung der Rohdaten um bis zu 86% reduzieren (A\_B063\_TB\_1255 vs. A\_B\_TB\_1255). Vergleicht man nicht mit der schlechtesten Variante, sondern mit der nächst besseren, so sind die Mediane noch um über 20% reduziert. Die beiden geringsten Mediane unterscheiden sich um ca. 10%.

Die Häufigkeitsverteilungen der Interpolationsdaten der Datensätze A\_B063\_TB\_1255 und A\_B063\_TB\_000 sind in der Abb. 20 dargestellt. Der etwas geringere Mittelwert des nicht ortskorrigierten Datensatzes kommt im Vergleich zum Referenzdatensatz durch weniger Werte im Bereich hoher Erträge und mehr Werte im Bereich geringer Erträge zustande. Trotzdem haben beide Verteilungen grundsätzlich die gleiche Form und sind deutlich linksschief.

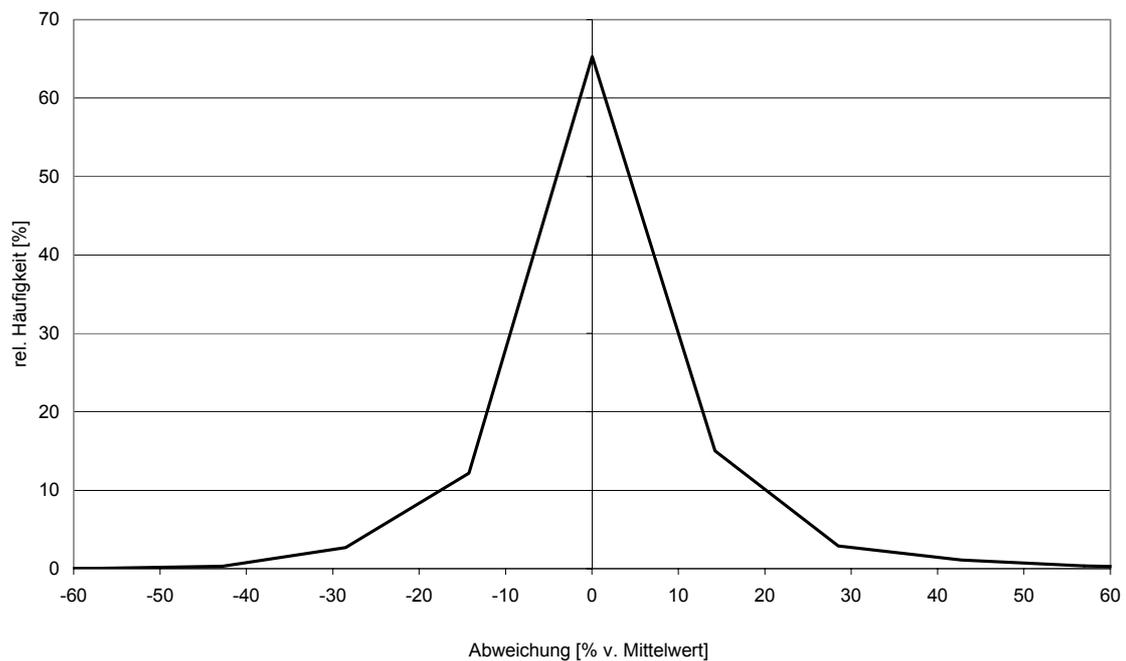


**Abb. 20: Häufigkeitsverteilungen der Interpolationsdaten der Datensätze A\_B063\_TB\_1255 und A\_B063\_TB\_000**

Für die beiden Interpolationsergebnisse (A\_B063\_TB\_1255 und A\_B063\_TB\_000) werden die geschätzten Erträge von jeweils korrespondierenden Rasterpunkten verglichen. In der Abb. 21 ist die Häufigkeitsverteilung der absoluten Differenzen, in Abb. 22 die Differenz in Prozent des jeweiligen Ertrages an dem Ort dargestellt (Bezugsbasis: A\_B063\_TB\_1255). Die Differenzen sind annähernd normal verteilt um 0 dt\*ha<sup>-1</sup>, ca. 65% der Werte liegen im Bereich von +/- 2.5 dt\*ha<sup>-1</sup> Abweichung.



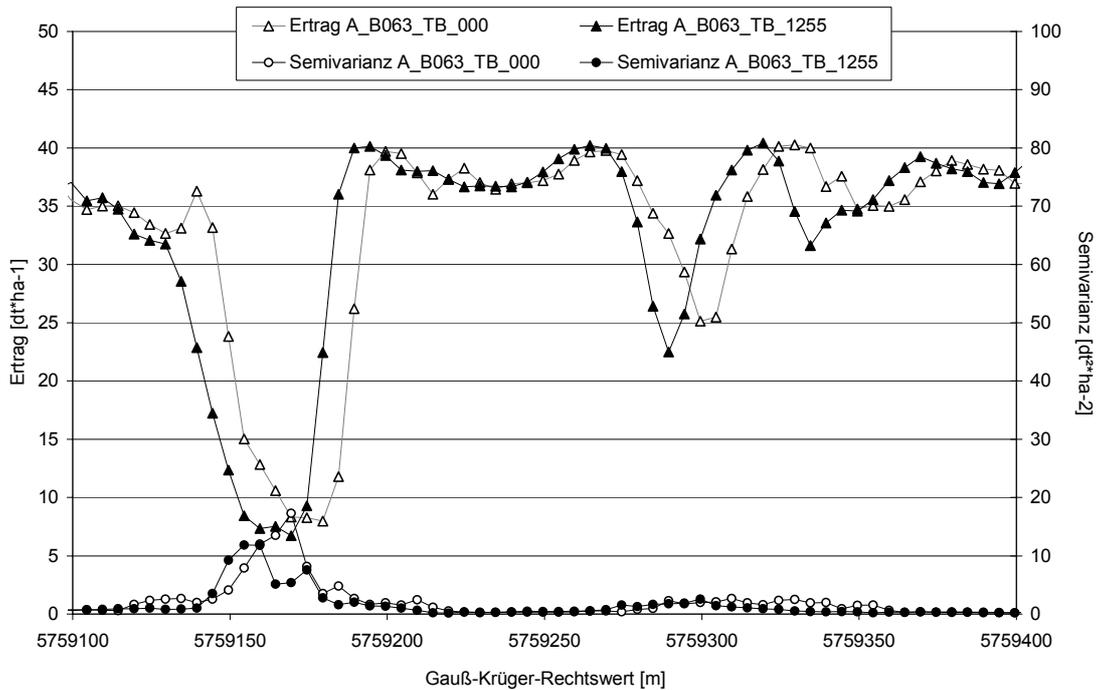
**Abb. 21: Häufigkeitsverteilung der absoluten Differenzen interpolierter Werte zwischen Ertrags-Rohdaten mit und ohne Ortskorrektur (Feld '2600', Ernte 1999, Wintertraps)**



**Abb. 22: Häufigkeitsverteilung der relativen Differenzen interpolierter Werte zwischen Ertrags-Rohdaten mit und ohne Ortskorrektur (Bezugsbasis: 'mit Ortskorrektur'; Feld '2600', Ernte 1999, Wintertraps)**

Betrachtet man eine Interpolationsreihe gesondert (Extraktion einer Rechtswert-Spalte aus den beiden Interpolationsdateien), so ergibt sich der in Abb. 23 dargestellte Ertragsverlauf. Durch die unterlassene Ortskorrektur der Rohdaten (A\_B063\_TB\_000) werden die Ergebnisse um ca. 10m nach Norden verschoben (größere Hochwerte auf der Abzisse). Besonders deutlich ist dies an starken Wechseln des Ertragsniveaus zu sehen. Die jeweilige

absolute Ertragshöhe bleibt in ihrem Verlauf aber nahezu identisch. Die korrespondierenden Krige-Varianzen unterscheiden sich ebenfalls vor allem bei sich stark ändernden Erträgen, liegen ansonsten aber in vergleichbarer Größenordnung. Im Bereich des ersten dargestellten Ertragsminimums werden für die beiden Übergangsbereiche (Abfall, Anstieg) bei Verwendung des Datensatzes A\_B063\_TB\_1255 höhere Krige-Varianzen berechnet, während diese im Zentrum der Geringertragszone wieder verringert sind. Dieser Verlauf findet sich bei Unterlassung der Ortskorrektur nicht: hohe Krige-Varianzen werden für den gesamten Bereich der etwa 30-40 m langen Geringertragszone ermittelt.



**Abb. 23: Verlauf der interpolierten Erträge und korrespondierenden Krige-Varianzen bei unterlassener Ortskorrektur der Rohertragsdaten (Feld '2600', Ernte 1999, Winterraps)**

### 3.2.3.11 Interpolation: Variation der Interpolationsparameter

Um den Einfluss abzuschätzen, den eine unterschiedliche Parametrisierung des Kriging-Verfahrens auf die interpolierten Werte und die dazugehörigen Krige-Varianzen haben kann, wurden die in der Tab. 14 erläuterten Varianten getestet. Als Rohdatensatz diente für alle Verfahren der unter 3.2.3.10 näher beschriebene Datensatz A\_B063\_TB\_1255. Die Ergebnisse der Erträge und Krige-Varianzen sind in Tab. A-11 und Tab. A-12 aufgeführt. Statistiken der Interpolationsdaten werden gegen den Rohdatensatz verglichen, Krige-Varianzen gegen das Verfahren mit den höchsten und zweithöchsten Krige-Varianzen (Tab. A-13; Tab. A-14; Tab. A-15).

Die räumliche Verteilung der Erträge für die Variante 1 der Tab. 14 (Block-Kriging, 10x10 Meter, sphärisches Variogramm-Modell) ist mit autoskaliertem Legende bereits in der Abb. 16 (links) zu sehen. In der Abb. 24 sind die Ertragskarten der Interpolationsergebnisse für die Varianten 2 und 4 der Tab. 14 wiedergegeben. Die Ertragskarte der Variante 1 ist mit veränderter Legenden-Skalierung in der Abb. 25 dargestellt, sodass die Ergebnisse der Interpolationsvarianten 1, 2 und 4 direkt visuell vergleichbar sind.

Die Karten der Krige-Varianzen für die Verfahren 1, 2 und 4 sind in der Abb. 18 (Verfahren 1) bzw. in der Abb. 26 (Verfahren 2 & 4) dargestellt. Die Legendenskalierung der Abbildungen sind identisch.

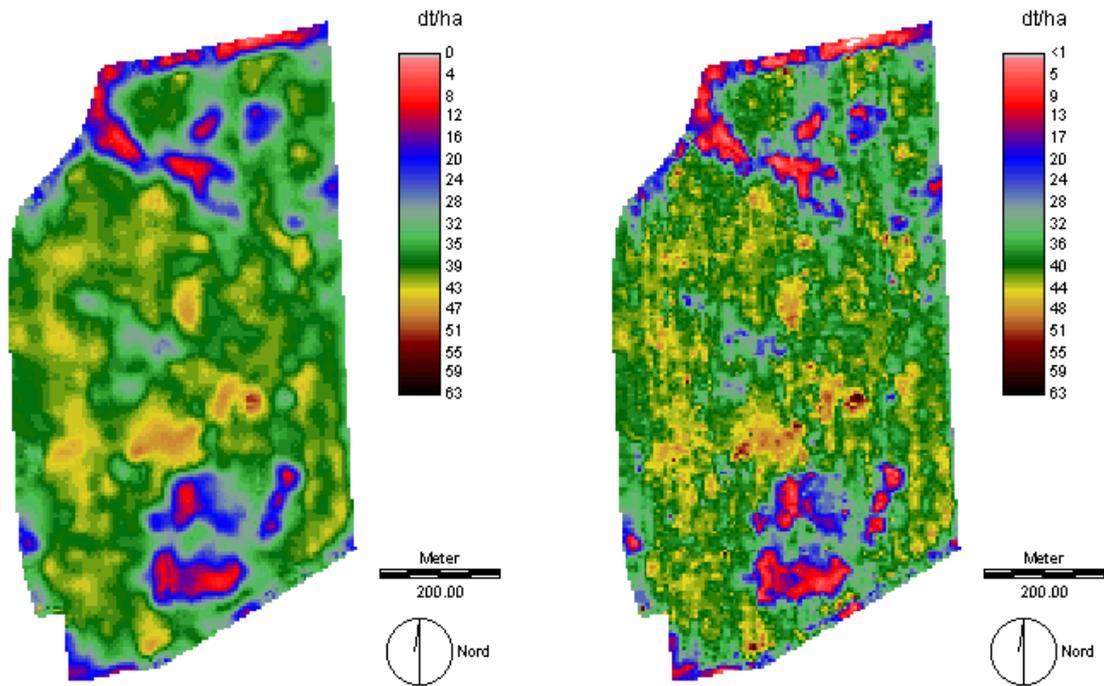
Die Mittelwerte und Mediane der interpolierten Daten unterscheiden sich in der Regel nicht untereinander, lediglich der Median des Punkt-Krigings ist leicht verringert. Im Vergleich zum Rohdatensatz vermindern sich die Mittelwerte und Mediane auf 95 bzw. 98%. Die Variationskoeffizienten nehmen im Allgemeinen zu, wobei dies beim 25m-Block-Kriging nicht sehr deutlich ist. Die Maximalwerte und 98%-Quantile werden mit allen Verfahren um 43-54% bzw. 5-8% reduziert.

**Tab. 14: Angaben zu den getesteten, unterschiedlichen Interpolationsverfahren für die Ertragskartenerstellung aus dem Rohdatensatz A\_B063\_TB\_1255 (siehe auch 3.2.3.9)**

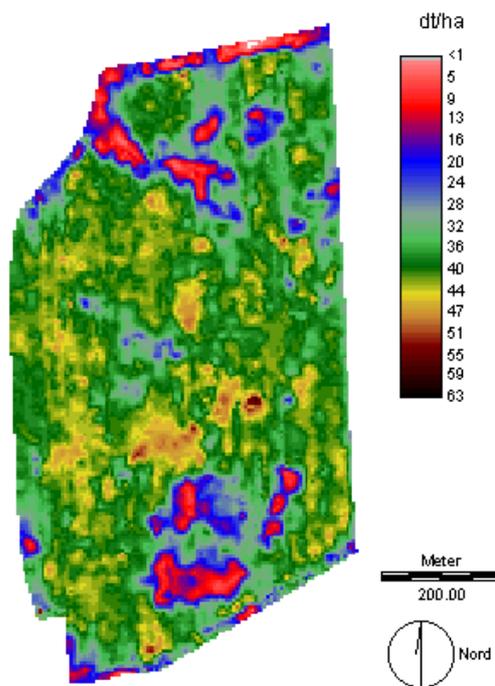
Verfahren	Blockgröße	Variogramm-Modell
Block-Kriging	10 x 10 Meter	sphärisch
Block-Kriging	25 x 25 Meter	sphärisch
Block-Kriging	10 x 10 Meter	exponentiell
Punkt-Kriging	-	sphärisch

Die Krige-Varianzen unterscheiden sich vor allem zwischen Block- und Punkt-Kriging-Varianten. Durch das Block-Kriging-Verfahren werden sie um mindestens 88% gesenkt (Vergleich mit Punkt-Kriging), eine Block-Vergrößerung von 10x10m auf 25x25m verringert die Mediane nochmals um knapp 80%.

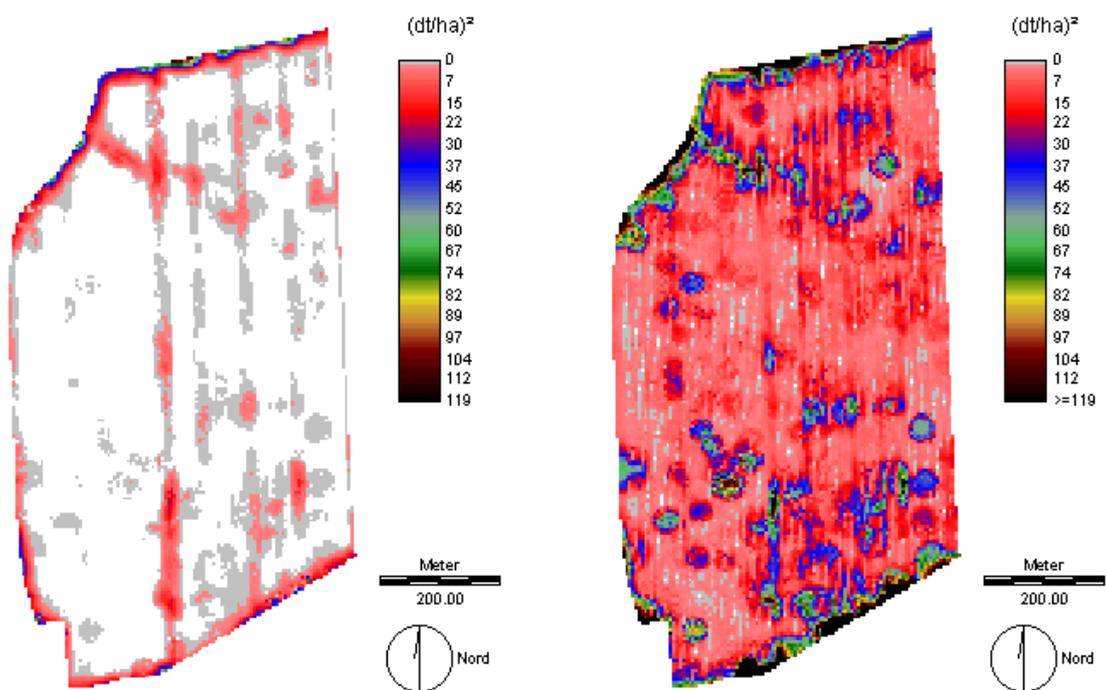
Die Unterschiede zwischen sphärischem und exponentiellem Variogramm-Modell sind im Hinblick auf die Mediane der Krige-Varianzen nur gering, verschiedene Quantil-Berechnungen deuten auf eine sehr geringfügig verminderte Streuung der Krige-Varianzen bei Verwendung des exponentiellen Modells hin. Alle Krige-Varianzen sind stark rechtsschief verteilt.



**Abb. 24: Interpolierte Ertragskarten für das Feld 2600 (46 ha) für die Varianten 2 (links) und 4 (rechts) (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 14)**



**Abb. 25: Interpolierte Ertragskarte für das Feld 2600 (46 ha) für die Variante 1 mit manueller Legendenskalierung (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 14)**



**Abb. 26: Karten der Krige-Varianzen für das Feld 2600 (46 ha) für die Varianten 2 (links) und 4 (rechts) (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 14)**

### 3.2.4 Diskussion

Da die Daten der Ertragskartierung für landwirtschaftliche Planungs- oder Kontrollzwecke eingesetzt werden, sind Abschätzungen über die zugrunde liegende Güte der Daten sowie effiziente Routinen zur Fehlerbeseitigung in den Rohdaten unerlässlich. Darüber hinaus ist für die Einbindung der gewonnenen Information in ein übergreifendes Konzept des Standort-spezifischen Ackerbaus von Bedeutung, dass flächenhaft interpolierte Ertragsdaten ein einleuchtendes Bild der Realität geben und eine Verlässlichkeitsangabe der erstellten Karte verfügbar ist. Aus diesen Anforderungen ergeben sich drei grundsätzliche Fragen für die Gliederung der nachfolgenden Diskussion der Ergebnisse:

- 1) Bildet die automatische Ertragsmessung von Druschfrüchten in ausreichendem Maße die Realität ab im Hinblick auf den Feldmittelwert des Ertrages, die Ortsgenauigkeit der Daten und die punktuellen Erträge?
- 2) Welche Fehlerquellen treten auf und wie können diese effizient kontrolliert werden?
- 3) Gibt es eine optimale Methode für die Erstellung von Ertragskarten?

#### Sensor-Kalibration und Datengenauigkeit auf Gesamtfeld-Basis

Der Einsatz des LH Agro Kartier-Systems mit Prallplattensensor ist bezüglich der Kalibration und des Dauerbetriebes (3 Ernteperioden mit je ca. 1400 ha Druschfläche) grundsätzlich zufriedenstellend. Der Drusch von drei Wintergetreidearten, Körnererbse, Öllein und Lupine verlief in allen Jahren störungsfrei. Die auch von ISENSEE & KRIPPAHL (2001) erwähnten Schwierigkeiten dieses Sensortyps beim Rapsdrusch aufgrund der Klebeneigung des Ernteguts, traten in zwei von drei Jahren auf. Lediglich 1999 bei sehr trockenen Erntebedingungen konnten keine Ablagerungen und Verkrustungen an den Sensoren beobachtet werden. Dieses Problem ist dem Hersteller bekannt. Auf der Landtechnikmesse 'AgriTechnika' in Hannover im November 2001 wurde bereits ein selbstreinigender Sensor mit veränderten Oberflächeneigenschaften präsentiert. Der Nachteil des LH-Sensors soll auch durch eine spezielle Konstruktionsweise auszuschließen sein (STRUBBE ET AL. (1996)). Da es sich bei dem von diesen Autoren vorgestellten Sensor zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung noch um einen Prototyp handelte, bleibt abzuwarten, wie sich diese neue technische Lösung für Masse-Impuls-Sensoren im großflächigen Praxiseinsatz bewährt. In der Erntesaison 2002 sollen in Deutschland erstmals mehrere dieser Sensoren eingesetzt werden.

Die erzielte Genauigkeit der Kalibrationsdaten ist im Vergleich mit anderen Veröffentlichungen als gut bis sehr gut einzustufen (AUERNHAMMER & DEMMEL (1993), ISENSEE & KRIPPAHL (2001), KRILL (1996)). Bedingt durch die großen Schlagabmessungen und die breiten Schneidwerke ist es zum Teil möglich, innerhalb einer Druschspur eine komplette Füllung des Korntanks als Kalibrationsladung zu erheben. Dadurch entfallen Vorgewendefahrten, mehrmaliges Ausheben und erneutes Anschneiden, was den Anteil der Daten, die durch Zeiten der Maschinenbefüllung fehlerhaft sind, erheblich reduzieren kann.

Aus der Tab. A-4 ist ersichtlich, dass die Mittelwerte der Ertragsrohdaten in der Regel die Daten der Betriebsbuchführung um einige Prozent übersteigen. Bei der Interpretation dieses Ergebnisses ist zu berücksichtigen, dass Feuchte-Unterschiede zwischen den beiden Aufzeichnungen auftreten können. Die Ernteware wird feldfeucht für die Buchführung

erfasst, die Daten der Ertragskartierung werden auf eine einheitliche Feuchte von 14% korrigiert. Zudem wird die Menge der eingelagerten Wintergerste aus logistischen Gründen nicht gewogen, sondern nur anhand der angelieferten Anhänger geschätzt. Des Weiteren kommen beim Drusch dieser Fruchtart mehrere nicht kartierende Mähdrescher zum Einsatz, so dass es möglich ist, dass Teilbereiche des Feldes nicht kartiert werden, auf denen über- oder unterdurchschnittliche Erträge erzielt werden. Dies ist z.B. auf den Feldern '2000' und '2600' im Erntejahr 2000 der Fall, wodurch ein Teil der Abweichung erklärt werden kann. Wenn im Druschverlauf Änderungen in den Aufpralleigenschaften des Gutstromes am Sensor auftreten, stimmt die Kalibrationskurve nicht mehr und die Erträge werden fehlerhaft kartiert (STRUBBE ET AL. (1996)). Dies trifft für ca. 15 ha auf Feld '3000' im Erntejahr 2001 zu. Dort verlor ein Sensor deutlich an Empfindlichkeit, was in den Rohdaten nicht berücksichtigt werden konnte und wodurch sich ein Teil der starken Ertragsunterschätzung im Vergleich zur Betriebsbuchführung erklären mag. Diese beiden Sonderfälle außer acht lassend, liegen die kartierten Erträge um maximal 15%, in den meisten Fällen aber um deutlich weniger als 10% über den von der Betriebsbuchführung erfassten Daten.

Eine alternative Berechnung über den 2-98%-Quantilbereich ergab keine Veränderung der Rohdaten-Mittelwerte, so dass von einer deutlich die Ergebnisse verzerrenden Wirkung von Ausreißer-Werten nicht ausgegangen werden kann. Vielmehr ist ein Einfluss in der nicht vollständig Flächen-repräsentativen Datenerhebung durch die Ertragskartierung zu vermuten. Die Daten werden alle zwei Sekunden gespeichert. Unter dem Gesichtspunkt der jeweils optimalen Auslastung der Druscheinrichtungen werden die Fahrgeschwindigkeiten der Mähdrescher den jeweiligen Bestandessituationen angepasst. Dadurch kommt es in Folge höherer Geschwindigkeiten in Bereichen mit nur geringen Erträgen zu verhältnismäßig weniger Rohdaten-Speicherungen als in Situationen mit geringerer Fahrgeschwindigkeit (Bereiche hoher Erträge). Dies bedingt eine systematische Verzerrung in Richtung höherer Mittelwerte des betreffenden Rohdatensatzes. Durch die flächenhafte Interpolation wird diese Verzerrung beseitigt. In der Tab. A-5 sind die Mittelwerte der interpolierten Daten ins Verhältnis zu den Buchführungsdaten gesetzt. Im Vergleich zu den Werten der Rohdatentabelle (Tab. A-4) lassen sich die Betriebsdaten im allgemeinen besser annähern, obwohl vereinzelt auch stärkere Abweichungen auftreten (Bsp. Feld '2600', Ernte 2000).

#### Ortsgenauigkeit der Ertrags-Rohdaten

Aufgrund der Genauigkeit und Betriebssicherheit der verwendeten DGPS-Empfänger sind geographisch falsch aufgezeichnete Ertragsdaten nicht beobachtet worden. Insgesamt wird diese Fehlerquelle in Zukunft wahrscheinlich weiter an Bedeutung verlieren, da eine stete Verbesserung der Systeme stattfindet (LECHNER & BAUMANN (2000)).

Eine noch nicht allgemein beseitigte Fehlerquelle hinsichtlich der Ortsinformation der Ertragsdaten ist durch die Passagezeit des Druschgutes und Vermischungsprozesse im Mähdrescher bei gleichzeitiger Vorfahrt gegeben. Diese Vermischung des Erntegutes mit vorher und nachher gedroschenem Material findet vom Zeitpunkt des Schnittes am Messerbalken bis zum Passieren des Ertragssensors statt. Sie wirkt sich störend auf die räumliche Auflösung von Ertragsvariabilität aus und erzeugt so vor allem bei sich abrupt und stark ändernden Erträgen durch den verzögert reagierenden Massenstrom einen allmählichen Übergang. Dies ist ein Artefact und wird als convolution-Effekt in der Literatur beschrieben

(BOYDELL ET AL. (1996)). Die Analyse der Autokorrelation von zwei Abschnitten einer Druschspur (Abb. 15) zeigt deutlich einen Zusammenhang der Daten über 15 Intervalle hinweg, was einer Aufzeichnungszeit von 30 Sekunden entspricht. Da besonders bei der zweiten Teilspur nicht von einer räumlichen Abhängigkeit der realen Ertragsdaten im geostatistischen Sinne ausgegangen werden kann, sind diese Korrelationen durch den convolution-Effekt bedingt. Ein grundsätzlich ähnliches, wenn auch im Detail etwas differenzierteres Bild bieten die Autokorrelations-Ergebnisse der ersten Teilspur: die drei ersten, höheren Korrelationen sind wahrscheinlich einer realen räumlichen Nahbereichs-Abhängigkeit zuzuordnen, während die auf geringerem Niveau sich bis zum 15. Intervall erstreckenden Autokorrelationen wiederum die Materialmischung widerspiegeln. Die in dieser Arbeit gefundenen 30 Sekunden für den convolution-Effekt passen in ihrer Größenordnung zu Angaben anderer Autoren (Zusammenstellung bei BLACKMORE & MOORE (1999)). BOYDELL ET AL. (1996) finden nur 10 Sekunden Verschleppungszeit beim Schwad-Drusch von Erdnuss mit einer Pick-up-Vorrichtung. Bei diesem Versuch treten keine zusätzlichen Verzögerungszeiten durch unterschiedlich lange Schneidwerktransportzeiten auf, die sich vor allem bei groß dimensionierten Schneidwerken mit einigen Sekunden bemerkbar machen dürften. Die Autoren können den gefundenen Verschleppungseffekt mit einer Fourier-Transformation korrigieren (deconvolution). Da die Größenordnung des Vermischungseffektes von der gesamten Maschinenbauweise und auch Fruchtart-spezifischen Parametern abhängig ist (LINSEISEN & STEINMAYR (2000)), müsste geklärt werden, inwieweit der von BOYDELL ET AL. (1996) beschrittene Weg der Effekt-Kompensation zu automatisieren ist.

Die partiellen Korrelationskoeffizienten, die nur für einen einfachen Intervallabstand auftreten, weisen nach, dass der Sensor in seiner Bauweise keine Eigentragheit besitzt, die über die Aufzeichnungsintervalle von zwei Sekunden hinausgeht.

#### Datengenauigkeit auf Einzelpunkt-Basis

Zur Beurteilung der Genauigkeit von einzelnen Ertragspunkten sind zwei unterschiedliche Wege beschritten worden. Einerseits wurden an ausgewählten Orten in dem einer Druschspur direkt benachbarten Bestand Handerntn durchgeföhrt und die Ertragsstruktur bestimmt. Andererseits erfolgte für einen relativ konstanten Ertragsbereich einer Druschspur eine den convolution-Effekt berücksichtigende Mittelwertbildung über fünf Werte und die Schätzung der 95%-Konfidenzintervalle dieser Mittelwerte.

Der Vergleich von Handernnte-Ergebnissen mit Ertrags-Rohdaten erbringt eine grundsätzliche Übereinstimmung. Aufgrund der hohen Variabilität innerhalb der Bereiche mit geringen Erträgen sind die dort auf der Grundlage von Punkternten ermittelten Erträge mit einer relativ großen Unsicherheit behaftet, was sich in einem Konfidenzintervall von etwa  $\pm 10 \text{ dt} \cdot \text{ha}^{-1}$  niederschlägt. Auch bei den in anderem Rahmen durchgeföhrt Punkt-Bearntungen im Untersuchungsgebiet weisen die Erträge Variationskoeffizienten von zum Teil über 20% auf (Daten hier nicht gezeigt).

Dass in Arealen mit hohen Erträgen die Ergebnisse der Punkternten um mehr als 10% über den Ertragskartierungsdaten liegen, kann zum Teil auf die verlustärmere Erfassung durch die Handbeerntung zurückzuföhren sein (GRIEPENTROG (1998)); des Weiteren kann die

Materialmischung im Drescher aus den umliegenden Bereichen mit geringen Erträgen noch einen verschleppenden, das Ertragsniveau mindernden Effekt bedingen. FUNK & MAIDL (1997) finden bei ihren Untersuchungen mit ähnlicher Methodik Ertragsunterschiede von bis zu 20%. Der obigen Argumentation entsprechend lassen sich die etwas höheren Werte der Ertragskartierung in den Zonen geringer Erträge im Vergleich mit den Ergebnissen der Handernten durch eine Ertragsniveau-Verschleppung aus Bereichen hoher Erträge erklären. An dem Beprobungsort P1 wird das Niveau der Handernte von  $17 \text{ dt} \cdot \text{ha}^{-1}$  durch die Daten der Ertragskartierung recht gut angenähert.

Der andere, die Materialvermischung ausschaltende Verfahrensweg einer gleitenden Mittelwert-Berechnung über weiter entfernte Bereiche, ergibt für den Anfangsbereich der Druschspur 'Drescher Süd', in dem die Erträge relativ konstant zwischen  $65$  und  $70 \text{ dt} \cdot \text{ha}^{-1}$  liegen, ein 95%-Konfidenzintervall von ca.  $\pm 2-5 \text{ dt} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Dies entspricht bei dem betrachteten Ertragsniveau einer prozentualen Ungenauigkeit von drei bis sieben Prozent und liegt damit etwas über den allgemein berichteten Größenordnungen für prozentuale Gesamtfehler bei Massen-Impuls-Sensorik (z.B. AUERNHAMMER & DEMMEL (1993), KRILL (1996)), ist jedoch geringer als der bei GRIEPENTROG (1998) zitierte Wert von 10%. Der durch dieses Verfahren ermittelte leicht erhöhte Wert ist sicherlich zum Teil auch durch die relativ geringe Anzahl an Freiheitsgraden bedingt ( $FG=4$ ), die jedoch aufgrund fehlender Korrelation der Daten voll wirksam sind (CRESSIE (1993)). Prinzipiell müsste dieser prozentuale Fehler in weiten Bereichen unabhängig vom Ertragsniveau sein, solange gewährleistet wird, dass sich die Aufpralleigenschaften des Getreides am Sensor (siehe auch STRUBBE ET AL. (1996)) nicht ändern. Besonders in Gering-Ertragsbereichen lässt sich die Fahrgeschwindigkeit der Mähdrescher nicht so weit steigern, dass die Druschtechnik an ihrer Auslastungsgrenze betrieben wird. Infolgedessen ist in solchen Bereichen mit leicht erhöhten Ungenauigkeiten der Ertrags-Rohdaten zu rechnen. ISENSEE & KRIPPAHL (2001) fordern eine maximale Abweichung der Daten von 5%, wobei die Herleitung dieser Grenze aber unklar bleibt. STAFFORD ET AL. (1996) finden in ihrer Untersuchung einen aus den Kalibrationsdaten abgeleiteten prozentualen Fehler von 5% bei geringer Drescher-Auslastung, der sich auf 1% bei hoher Auslastung verringert.

#### Auftretende Fehlerquellen und deren effiziente Beseitigung in den Ertrags-Rohdaten

Bei der Betrachtung der Fehlerquellen und der Suche nach Möglichkeiten zu deren Beseitigung müssen zwei Dinge im Auge behalten werden:

Zum einen ist die von GERTHSEN (1999) erwähnte immanente Ungenauigkeit der Messung einer kontinuierlichen Variablen zu bedenken. Es sollte daher gerade bei der Betrachtung von Daten aus Marktfrucht-Betrieben keine übermäßige Genauigkeitsanforderung an die Rohdaten-Erfassung gestellt werden. Die Ernte ist ein Arbeitsgang, in dem wenig Zeit verloren werden darf, um größere ökonomische Verluste zu vermeiden.

Zum anderen merkt TUKEY (1976) an: "One thing we regretfully learn about work with numbers is the need for checking. Late-caught errors make painful repetition of steps we thought finished. Checking is inevitable; yet, if it is too extensive, we spend all our time getting the errors out of the checks. Our need is for enough checks but not too many." (S. 10). Es ist daher die Suche der Hauptfehlerquellen, deren Quantifizierung sowie die Entwicklung

von robusten Methoden notwendig, um auf effiziente Weise aus Daten der Ertragskartierung praktisch relevante Informationen gewinnen zu können.

STAFFORD ET AL. (1996) weisen ausdrücklich auf Limitationen im Datenbereich hin, die man bei Verwendung von Daten aus der automatisierten Ertragskartierung in der Praxis vorerst akzeptieren muss.

Die m.E. bedeutendsten Fehlerquellen der Ertragskartierung in Marktfrucht-Betrieben sind:

- 1) eine unvollständige Schneidwerksauslastung während des Drusches,
- 2) Variabilität der Erntegut-Feuchte,
- 3) Ungenauigkeiten der Sensor-Kalibration (bzw. -unterschiede bei Betrieb mehrerer Drescher) und
- 4) unbekannte bzw. ungenau erhobene Maschinenbefüll- und Verzögerungszeiten.

Von vielen Autoren wird die Verfälschung der Ertragsdaten durch ein variierend ausgelastetes Schneidwerk genannt. Die in Tab. 10 präsentierten theoretischen Abweichungen bei einer um +/- 20 cm schwankenden Auslastung des Schneidwerkes machen deutlich, dass bereits als geringfügig einzustufende Variationen dieser Größe zu Abweichungen von ca. +/- 3% führen können. Unterstellt man die von ISENSEE & KRIPPAHL (2001) häufig beobachteten 30-40 cm Unterschied, so steigt der Fehler für ein 7,2 m breites Schneidwerk auf über 6%. Auch andere Autoren stufen diese Fehlerquelle als eine der wichtigsten ein (BLACKMORE & MARSHALL (1996), BLACKMORE & MOORE (1999), GRIEPENTROG (1998)), wobei die jeweils aufgeführten prozentualen Fehler von 1.2% (BLACKMORE & MOORE (1999)) bis zu 5% (ISENSEE & KRIPPAHL (2001)) schwanken, die in Tab. 10 aufgeführten Werte aber grundsätzlich und in ihrer Größenordnung bestätigen.

Da sich der prozentuale Fehler bei zunehmend verringerter Schneidwerksauslastung trotz Computer-Anpassung über eine Teilbreiten-Aktivierung überproportional erhöht, wird hier vorgeschlagen, solche Daten zu verwerfen, die wissentlich mit nicht vollständiger Schneidwerksbreite erhoben worden sind. Dies ist möglich, da im LH-Agro-System mit den Rohdaten die Information darüber gespeichert wird, wieviele Teilbreiten während des Drusches aktiviert gewesen sind. Von dieser Empfehlung sind, bezogen auf ein Feld, nur vergleichsweise wenige Datenpunkte betroffen (in dieser Untersuchung ca. 3-5%), da wohl in aller Regel davon ausgegangen werden kann, dass ein Mähdrescherfahrer versucht, möglichst häufig mit voller Schneidwerksauslastung zu arbeiten. Die konkrete Größenordnung hängt von der jeweiligen Feldform und der Routine des Drescherfahrers ab. Auf diese Weise wird einer der Hauptfehler effizient kontrolliert. Aktuell bleibt nach wie vor die Anmerkung von REITZ (1992), nach welcher der Fahrer mit seiner Fahrweise und Systembedienung die Datengüte erheblich beeinflussen kann, worauf ebenso BLACKMORE & MARSHALL (1996) hinweisen. Auch in der vorliegenden Untersuchung finden sich zum Teil Daten, die deutlich geringere Erträge als die Nachbarspuren aufweisen und wahrscheinlich durch eine nicht aktivierte Teilbreiten-Schaltung beim Drusch eines schmalen Reststreifens verursacht worden sind. Solche Daten geben einer interpolierten Ertragskarte ein etwas streifiges Aussehen (siehe z.B. Abb. 17 (links)). Da aber auch aufwendige Filterroutinen bei diesem Problem nicht

ausnahmslos 100% Sicherheit der Fehlererkennung oder -korrektur gewähren (BLACKMORE & MOORE (1999)) und nach einer automatisch durchgeführten Filterung zusätzlich überprüft werden müsste, welche Daten herausgefiltert worden sind, findet im Rahmen dieser Arbeit keine weitere Filterung statt, die über die Importspezifikationen im ALBYD-Programm und den generellen Ausschluss der mit Teilbreiten-Schaltung kartierten Daten hinausgeht.

Auch auf den Druschflächen des Untersuchungsgebietes treten die von verschiedenen Autoren beobachteten Schwankungen der Erntegutfeuchte auf (AUERNHAMMER & DEMMEL (1993), ISENSEE & KRIPPAHL (2001)). Die Schwankungsbreite für 80% der Werte eines exemplarischen Beispiel-Transectes betrug gut 3%-Punkte und führte zur Über- bzw. Unterschätzung der auf 14% Feuchte korrigierten Erträge von 1.2 bzw. 3.6%. Insgesamt ist unter Beachtung der gefundenen Ergebnisse den verschiedenen Autoren grundsätzlich darin zuzustimmen, dass die Erntedaten auf eine Standardfeuchte korrigiert werden sollten. Zu beachten ist jedoch bei der angestrebten Korrektur der Rohdaten, dass die am Feuchtesensor erhobenen Werte ebenfalls sowohl durch den Verzögerungseffekt als auch den Materialmischungseffekt in ihrer Güte beeinträchtigt werden. Während der Verzögerungseffekt als additive Zeitkonstante prinzipiell einfach zu korrigieren ist, muss berücksichtigt werden, dass durch unterschiedliche Montageorte der Sensorik eine zusätzliche Verschiebung der Wertepaare verursacht sein kann. Im vorliegenden Fall beträgt diese Verzögerung ca. acht Sekunden. Der Materialmischungseffekt dämpft - wie bereits bei der Güte der Ertragsdaten diskutiert - die räumliche Auflösung und Ausprägung von real existierender Variabilität. Geht man von den in dieser Arbeit in den drei Untersuchungsjahren gefundenen minimalen und maximalen Feuchten von 9 bzw. 18% aus, so entstehen durch Nichtbeachtung der unterschiedlichen Feuchten Unter- oder Überschätzungen von 5.5 bis 4.8%. Insofern ist GRIEPENTROG (1998) nur bedingt darin beizustimmen, dass die Ertragsermittlung ohne Feuchtekorrektur nicht ausreichend genau sei.

Für das Untersuchungsgebiet ist zu beobachten, dass Bereiche mit geringen Erträge aufgrund beschleunigter Abreife zum Erntetermin geringere Feuchten aufweisen als benachbarte Hoch-Ertragsbereiche. Daher weisen die Ertrags-Rohdaten der beiden Zonen ohne Feuchtekorrektur eine geringfügig größere Variabilität aus als die auf 14%-Feuchte korrigierten Erträge. Dies wäre ein zum Material-Mischungseffekt gegenläufiges Verhalten in der Beeinträchtigung der Datengüte und daher prinzipiell zu begrüßen, wenn die reale Variabilität kartiert werden soll. Das Ausmaß der Unterschiede in der dargestellten Variabilität ist nur von den jeweiligen Feuchten abhängig.

Möglicherweise sind die in der Literatur auftauchenden unterschiedlichen Auffassungen über die Bedeutung der Feuchtekorrektur als Fehlerquelle bei der Ertragskartierung (z.B. GRIEPENTROG (1998) gegenüber BLACKMORE & MARSHALL (1996); siehe auch Kapitel 3.2.1) zumindest teilweise darin begründet, dass implizit unterschiedliche Feldgrößen betrachtet werden. Geht man von mittleren Druschleistungen von 1.5 bis 2.5 ha\*h<sup>-1</sup> aus (KTBL (2001)), so fällt die absolute Feuchteänderung innerhalb der Ertrags-Rohdaten auf einem 6 ha großen Feld und einem 40 ha großen Feld unterschiedlich aus, was allein aufgrund der benötigten Druschzeit und der jeweiligen Witterungsbedingungen während der Ernte zu erklären wäre.

Aufgrund der einfach durchzuführenden Messung und Korrektur der Daten wird die intensivere Beschäftigung mit der Fehlerquelle 'Variation der Erntegut-Feuchten' jedoch als nicht vordringlich erachtet.

Interessant ist beim Einsatz von mehreren kartierenden Mähdreschern die Beseitigung von systematischen Differenzen zwischen den Ertrags-Rohdatensätzen, die aus unterschiedlichen Sensorsystemen, Kalibrationen der Ertrags- und Feuchtesensoren und/oder der Arbeitsqualität des Dreschers und des Drescherfahrers herrühren können (BLACKMORE & MARSHALL (1996), NOACK ET AL. (2001), REITZ (1992)). GRENZDÖRFER & GEBBERS (2001) nutzen das naheliegende Verfahren, aus Punktdaten benachbarter Fahrspuren Regressionsgleichungen abzuleiten und eine Anpassung anhand der ermittelten Funktion vorzunehmen. Über die erhaltene Regressionsgleichung machen die Autoren keine Angaben. Die in dieser Arbeit gefundenen Unterschiede von mittleren Ertragspunkt-Quotienten benachbarter Messwerte in Abhängigkeit von der betrachteten Fahrspur, lassen die Frage nach der Anzahl notwendiger Fahrspuren für eine verlässliche Regressionsschätzung aufkommen. Darüber hinaus ist zu fragen, ob die klassische Schätzung der Regressionsparameter grundsätzlich notwendig ist.

Die hier benutzten Median-Quotienten entsprechen prinzipiell den Koeffizienten der linearen Regression bei fehlender additiver Konstante in der Funktionsgleichung. Die gefundene Unabhängigkeit der Quotienten vom jeweiligen absoluten Ertragsniveau der Messpunkte lässt den Schluss zu, dass die Regressionsgerade in den hier untersuchten Daten tatsächlich durch den Ursprung verläuft. Die baugleichen Ertragssensoren haben daher identische relative Erträge aufgezeichnet. Die Ermittlung der linearen Regressionsgleichung würde sich also auf eine Koeffizientenschätzung reduzieren. In der Regressionsrechnung wird der Koeffizient über die Mittelwerte der jeweiligen Datensätze geschätzt. Da das arithmetische Mittel nicht vollkommen Ausreißer-unabhängig ist, empfiehlt es sich, den Median als stabileres Maß der zentralen Tendenz einer Verteilung zu benutzen. Anstelle der klassischen Routinen zur Schätzung einer Regressionsgeraden ohne additive Konstante kann eine Quotientenbildung über die Mediane der Ertragsdaten erfolgen, wenn die anzupassenden Datensätze dieselbe Grundgesamtheit repräsentieren. Diese zuletzt genannte Bedingung der identischen Grundgesamtheiten ist notwendig. Sie kann verletzt sein, wenn die Rohdaten aus verschiedenen Bereichen des Feldes stammen. Die Berechnung der Median-Quotienten muss stets anhand von Datenpunkten aus demselben Bereich des Feldes erfolgen. Es ist nicht notwendig, die jeweils direkt benachbarten Punkte miteinander zu kombinieren. Es können die Mediane der beiden Gesamtdatensätze benutzt werden. Bei Verwendung einer einzelnen Fahrspur können sich Unterschiede in der lokalen Dreschernutzung (hier wahrscheinlich variierende Auslastung der Schneidwerke) zu stark bemerkbar machen. Dies wird anhand der Quotienten-Schwankungen und der mittleren Abstände zwischen den Ertragspunkten deutlich (Tab. 11).

Die Interpolationsergebnisse bei Verwendung unterschiedlich angeglichener Rohdatensätze machen deutlich, dass die Beseitigung von sehr groben Fehlern wichtig für eine verlässliche Interpolation ist (Tab. A-9), während Unterschiede von wenigen Prozent zwischen den Datensätzen bei dem verwendeten Interpolationsverfahren nicht mehr zu wesentlich verbesserten Schätzungen führen (Tab. A-10).

Verzögerungszeiten, die sich aus der mittleren Transportzeit des Erntegutes vom Messerbalken des Schneidwerkes bis zum Ertrags- und Feuchtesensor ergeben, können durch Differenzrechnung beseitigt werden (BOYDELL ET AL. (1996)).

Die Vergleiche der Interpolationsdaten auf absoluter und prozentualer Basis unter Berücksichtigung unterschiedlicher Verzögerungszeiten machen deutlich, dass sich die

Verteilungen der interpolierten Ertragsdaten insgesamt nicht grundsätzlich unterscheiden (Abb. 20). Jedoch bestehen, auf einzelne Rasterzellen bezogen, erhebliche Unterschiede in den interpolierten Erträgen. Ohne Berücksichtigung der Verzögerungszeit entstehen im Vergleich zu dem als 'wahr' angesehenen Datensatz (A\_B063\_TB\_1255) auf ca. 80% der Fläche Ertragsdifferenzen, die zwischen  $-5$  und  $+5 \text{ dt*ha}^{-1}$  liegen. 20% der interpolierten Daten haben also größere Abweichungen zu verzeichnen. Aufgrund des Ertragsniveaus von  $30-40 \text{ dt*ha}^{-1}$  entspricht dies prozentualen Abweichungen von ca.  $-18$  bis  $+15\%$  vom jeweils 'wahren' Ertrag an dem entsprechenden Ort.

Diese gefundene Größenordnung steht in deutlichem Gegensatz zu den in der Literatur zu findenden Werten. BLACKMORE & MOORE (1999) berichten über  $-0.4\%$  Abweichung durch Verzögerungszeiten, aus ihrer Arbeit ist aber nicht ersichtlich, wie die Autoren zu dem Wert gelangen. Die Spannweite der hier gefundenen Fehler ist zwar durch die Erhöhung der Block-Abmessungen im Verlauf der Interpolation zu verringern. Da sich die Parametrisierung der Interpolation an sachlogischen Überlegungen der Merkmals-Variation orientieren sollte, kann dies kein empfehlenswerter Weg sein, zumal die Verzögerungszeiten eine relativ einfach zu korrigierende Störgröße in den Rohdaten sind.

Die Abb. 23 macht deutlich, welche Aussagekraft die Krige-Varianz als eine Verlässlichkeitsinformation des ortsbezogenen Ertragsschätzung besitzen kann. Nur im Bereich lokaler starker Änderungen im Ertragsniveau sind deutliche Unterschiede der Krige-Varianzen bei Verwendung unterschiedlicher Rohdatensätze bemerkbar. Der gleichbleibend hohe Wert (Rohdatensatz ohne Korrektur der Verzögerungszeit) im Geringertragsbereich im linken Teil der Abbildung lässt sich dadurch erklären, dass für die Interpolation Rohdaten aus der näheren Umgebung genutzt worden sind. Bei dem Datensatz ohne Korrektur der Verzögerungszeit wirken sich benachbarte Druschspuren störend aus, da diese zum Teil mit entgegengesetzter Fahrtrichtung gedroschen worden sind (Hin- und Rückfahrt). Die Ertragsdaten werden in solchen Bereichen nicht einfach im Raum verschoben (in diesem Fall nur um ca. 12 m), sondern durch die gegenläufige Verschiebung der Gegenspuren gelangen vielmehr sehr unterschiedliche Ertragswerte in direkte Nachbarschaft im Verlauf der Interpolation. Dies ist nur in Bereichen starker Wechsel von Bedeutung, während sich bei gleichbleibendem Ertragsniveau diese gegenläufige Verschiebung nicht durch eine Erhöhung der Krige-Varianzen bemerkbar macht. Wären im linken Bereich der Abbildung alle benachbarten Druschspuren in einer Richtung geerntet worden, hätte die Krige-Varianz keinen Unterschied zu derjenigen gezeigt, die mit Interpolation des optimal aufbereiteten Datensatzes erhalten worden ist. Je nach Häufigkeit von stark unterschiedlichen Erträgen innerhalb des interpolierten Bereiches machen sich solche Effekte störend bemerkbar. Die Tab. A-7, Tab. A-9 und Tab. A-10 verdeutlichen, dass im vorliegenden Fall die optimale Korrektur der Verzögerungszeiten in den Originaldaten eine Reduktion der Krige-Varianzen um  $15-20\%$  ermöglicht hat (Vergleich der Krige-Varianzen zwischen A\_B063\_TB\_1255 und A\_B063\_TB\_000).

Die Problematik der Materialmischung und des dadurch bedingten convolution-Effektes tritt auch in den in dieser Arbeit verwendeten Datensätzen auf. Sie ist bereits im Zusammenhang mit der Ortsgenauigkeit der Rohdaten diskutiert worden.

### Fehler-tolerante Interpolationsmethode für Daten der Ertragskartierung

Die Frage nach einer optimalen Interpolationsmethode für Ertragsdaten aus Erhebungen in der Praxis ist mehrstufig zu beantworten.

1.) Es ist zu klären, ob ein Maß für die Verlässlichkeit der interpolierten Ertragsdaten benötigt wird. Ist dies der Fall, kommt nur ein Kriging-Verfahren in Betracht, welches die zur Interpolation benutzten Einzelpunkte (oder Block-Mittelwerte) so gewichtet, dass der Vorhersagefehler minimiert wird (GOTWAY ET AL. (1996)). Wird ein Verlässlichkeitsmaß nicht benötigt, stehen zahlreiche alternative Interpolationsverfahren zur Auswahl. Meines Erachtens sollten Gütemaße für interpolierte Karten in einem Computer-dominierten, praktischen Pflanzenbau zum Standard werden. Dies ist auch deshalb geboten, um ein Bewusstsein für die unter Praxisbedingungen erzielbare Präzision von Ertragskarten zu entwickeln oder zu bewahren. Daher sind alternative Interpolationsverfahren hier nicht weiter untersucht worden. Auch das Argument der höheren Rechengeschwindigkeit von z.B. Inversen Distanzen-Verfahren sollte hinterfragt werden.

2.) Bei Verwendung des Kriging-Verfahrens sind die Voraussetzungen zu überprüfen, unter denen das Verfahren die beste unverzerrte Schätzung liefert. Diese Voraussetzungen werden unter dem Begriff Stationarität zusammengefasst. Bei Ertrags-Rohdaten kann allenfalls in lokalen Bereichen von einer Normalverteilung ausgegangen werden. Damit sind die Bedingungen der Stationarität auf der hier relevanten Raumskala des Gesamtfeldes verletzt (BOUCNEAU ET AL. (1998), WEBSTER (2000)). Daher ist eine lokale Variogrammschätzung für die korrekte Beschreibung der räumlichen Struktur der Variabilität und verlässlichen Schätzung der Krige-Varianz notwendig. Das verwendete Programm VESPER (MINASNY ET AL. (1999)) leistet dies.

3.) Das an den Verlauf der empirischen Semivarianzen anzupassende Variogramm-Modell bestimmt die Höhe der Krige-Varianz der Interpolation (JÜRSCHIK ET AL. (1998), WEBSTER & OLIVER (1990)). Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit liegt nach Wissen des Autors kein Software-Programm allgemein verfügbar vor, welches lokal Variogramme schätzt und darüber hinaus eine weitere Optimierung durch Auswahl alternativer Variogramm-Modelle je Interpolationspunkt unterstützt. Der Einsatz von zwei häufig in der Literatur genannten Variogramm-Modellen (sphärisch, exponentiell) bringt im Vergleich zu anderen, ebenfalls die Interpolation beeinflussenden Größen nur geringfügige Änderungen der Krige-Varianz (Tab. A-15). BOUCNEAU ET AL. (1998) merken an, dass ihnen zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung kein statistisches Verfahren bekannt gewesen sei, das den Vergleich von Variogramm-Anpassungen ermögliche.

4.) Relevanter für eine mit geringen Fehlern behaftete Schätzung ist die Wahl des jeweiligen Kriging-Verfahrens. Für die Ertragsdaten-Interpolation werden hier nur Ordinary-Kriging-Verfahren angewendet. Dies erscheint gerechtfertigt, da die Werte als kontinuierlich und lokal tendenziell normal verteilt angenommen werden. Die Kontinuität der Daten auch bei in der Natur als diskontinuierlich zu beobachtenden Ertragsänderungen entsteht durch den Material-Mischungseffekt. Sobald dieser aus den Daten entfernt werden kann, muss über alternative Verfahren des Kriging nachgedacht werden, um die lokale Variabilität korrekt abzubilden (siehe z.B. PAPRITZ in LINSEISEN & STEINMAYR (2000)).

Einen großen Einfluss auf die Güte der Ertragsschätzung hat in dieser Arbeit die Entscheidung zwischen Punkt- und Block-Kriging-Verfahren. Aufgrund der gegebenen Fehlerhaftigkeit der Ertrags-Rohdaten, sollte den einzelnen Daten-Punkten kein zu hohes Gewicht beigemessen, sondern vielmehr das tendenzielle Verhalten in der direkten Umgebung als Hinweis auf den Ertrag genommen werden. Punkt-Kriging berücksichtigt die Einzelwerte bei der Interpolation. Daher ist es verständlich, dass allein durch den Übergang zu der 10x10 m Block-Kriging-Parametrisierung die Krige-Varianzen um über 80% gesenkt worden sind. Die Anforderung, tendenzielle Änderungen und nicht zu sehr Einzelwert-Änderungen zu berücksichtigen, wird durch alle Verfahren der Glättung erfüllt (TUKEY (1976)). Einige Autoren berichten über eine Glättung der Rohdaten und anschließende Interpolation (GRIEPENTROG (1998)) während BLACKMORE & MARSHALL (1996) und BLACKMORE & MOORE (1999) die durch die Interpolation erhaltenen Werte glätten, um ein Übermaß an Variabilität zu beseitigen. Das Block-Kriging glättet die Daten direkt vor dem Prozess der Interpolation, ohne jedoch die Datei der Rohdaten selbst zu verändern. Dies ist im Hinblick auf die Erhaltung der Rohdaten sicherlich als vorteilhaft zu erachten. Das Glätten der interpolierten Karte sollte kritisch betrachtet werden. Vor allem die von den Autoren angeführte Begründung, dass lediglich ein 'verständliches Maß' an Maxima und Minima erhalten bleiben sollte, birgt die Gefahr der Beliebigkeit, was die Autoren auch ausdrücklich formulieren: "The amount of this smoothing is left to the discretion of the map producer" (BLACKMORE & MOORE (1999)). Die zu einem Zeitpunkt auf diese Weise erstellten Karten verlieren ihren Wert, wenn zu einem späteren Zeitpunkt ein kleinflächigeres Verständnis erworben oder eine kleinflächigere Bewirtschaftungs-Steuerung technisch möglich wird. Zudem wird der Erkenntnisprozess und das Lernen behindert, wenn prinzipiell neue Informationen an das Verständlichkeitsmaß des bisherigen Wissens angepasst werden. Sinnvoller sind m.E. Fehler-tolerante Aufbereitungs- und Darstellungsverfahren, die es vor allem zu Beginn der Ertragskartierung und bei Verwendung von fehlerbehafteten Praxisdaten ermöglichen, ein 'Gefühl für die Daten' zu bekommen (TUKEY (1976)). Aus diesem Grund sind 25x25m Blöcke im Block-Kriging nur für den Verfahrensvergleich angewendet worden. Wie die Vergleiche der Krige-Varianzen zeigen, lassen sich durch diese Wahl der Blockmaße ca. 60-80% des Schätzfehlers beseitigen, der bei Verwendung von 10x10m Blöcken auftritt. Gleichzeitig wird auch ein erhebliches Maß an Variabilität - und damit an kleinräumiger Information - beseitigt. Für das Untersuchungsgebiet, in dem in geringen Abständen sehr starke Veränderungen des Ertragsniveaus auftreten, ist die Glättung durch die Auswahl von 25x25 m Blöcken bereits mit einem Informationsverlust verbunden, der m.E. nicht durch die Fehlerhaftigkeit der Rohdaten gerechtfertigt werden kann.

#### Interpretation von Ertragskarten

Die im Kapitel "Stand des Wissens" erörterte Problematik der reinen Interpretation von Ertragskarten wird in dieser Arbeit nicht behandelt. Es sollte beachtet werden, dass für praktische landwirtschaftliche Anwendungen lokales Wissen verfügbar ist. Viele Beratungsgespräche über Ergebnisse der Ertragskartierung verlaufen mit spezifischen Bemerkungen zu Erntejahren, produktionstechnischen Verfahren, Witterungsbesonderheiten oder bereits bekannten 'Besonderheiten' eines Feldes. Das gleiche Phänomen beobachtet auch BLACKMORE (2000), zieht jedoch den Schluss, dass über mehrjährig integrierende Verfahren ein 'mittleres Verhalten' des Feldes herausgearbeitet werden sollte.

In dieser Arbeit wird nicht der Ansatz verfolgt, die Ertragskartierung und mathematische Verfahren zu kombinieren, um die Felder automatisch in verschiedene Zonen einzuteilen. Einerseits sind dafür Ertragskarten mehrere Jahre notwendig wie verschiedene Autoren anmerken (GRENZDÖRFER & GEBBERS (2001), JÜRSCHIK ET AL. (1998)). Andererseits würde gerade die Ortsspezifität der Ertragsbildung im Einzeljahr durch dieses Vorgehen 'herausgemittelt' und so die Standort-bezogene Gewinnung von Information aus Ertragsdaten von vornherein eingeschränkt. Die in der Tab. 7 aufgeführten Ertragskomponenten von Punkternten zeigen exemplarisch für vier Orte eines Feldes (im Ertragsjahr 1999), dass Ertragsbildung ein sehr komplexer Prozess ist. Die bodengebundenen Standortbedingungen wirken im Zeitablauf im Wechselspiel mit den Witterungsereignissen und den Produktionsmaßnahmen auf das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen. Diese Prozesse und Wechselwirkungen sind, zumeist halb-quantitativ, in der Ertragsphysiologie-Literatur beschrieben (BOGUSLAWSKI & LIMBERG (1960), GEISLER (1983)) und erfahrenen Landwirten in ihrer regional- und lokal-spezifischen Ausprägung zumindest qualitativ bekannt. Ertragskarten spiegeln dieses ortsspezifische und von unterschiedlichen Zeitpunkten abhängige Wechselspiel nicht ausreichend wider, da sie nur den Endzustand zum Zeitpunkt der Ernte quantifizieren können.

Daher wird die Aufbereitung der Ertragsdaten und die Erstellung von Ertragskarten im Rahmen dieser Arbeit als ein Hilfsmittel verstanden, **andere** Standortdaten und -kenntnisse hinsichtlich der Erträge zu quantifizieren oder eine gegebenenfalls vorliegende Zonierung zu verbessern.

### 3.2.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Mit der Durchflussmessung auf Prall-Platten-Basis ist ein Sensortyp verfügbar, der für die Ertragskartierung im Ackerbau ausreichend genaue Daten liefert. Dies gilt für alle hier untersuchten Körnerfrüchte, wobei die Ertragsmessung bei Raps bislang unsicher ist, Verbesserungen aber bereits verfügbar sind. Für Vergleiche mit Betriebsdaten sollten die Statistiken von interpolierten Karten genutzt werden. Die Überprüfung der Rohdaten mit Punktbeerntungen ist aufwendig und methodisch selbst mit nicht unerheblichen Schwankungen behaftet. Die Ertragsniveaus stimmten grundsätzlich überein und waren plausibel.

Verschiedene Rohdaten-Fehlerquellen werden untersucht und in ihrer Größenordnung abgeschätzt. Nebst einer sorgfältigen Kalibration der Sensorik ist die vollständige und möglichst gleichmäßige Schneidwerksfüllung als wichtigster isolierter Einflussfaktor zu beobachten. Ertrags-Rohdaten aus wissentlich mit einer nicht vollständigen Schneidwerksfüllung gedroschenen Feld-Bereichen sollten in der weiteren Analyse nicht verwendet werden.

Die in dieser Untersuchung gefundenen Schwankungen der Gutfeuchten verzerren die Ertragsverhältnisse tendenziell, haben aber einen gegenläufigen Effekt zu der die Variabilität nivellierenden Materialvermischung im Mähdrescher und werden daher selbst bei fehlender Korrektur nicht als eine gravierende Fehlerquelle eingestuft.

Rohdatensätze mehrerer, baugleicher Kartiersysteme können bei streng linearer Korrelation der Sensorwerte über eine Median-Quotienten-Bildung verlässlich angepasst werden. Damit erübrigt sich die aufwändige Fahrspur-Selektion und Schätzung der Regressionsparameter.

Für die Güte der Ertragskarten ist die genaue Korrektur der maschinentypischen Verzögerungszeiten wichtig. Dies betrifft sowohl die Ortsgenauigkeit der interpolierten Erträge als auch die erreichbare Verlässlichkeit des Ertragsniveaus einzelner Rasterzellen.

Als Interpolationsmethode wird das Block-Kriging-Verfahren mit lokaler Variogramm-Schätzung in verschiedenen Parametrisierungen getestet.

Die Wahl der Rasterweiten für die Interpolation und der Block-Größe sollte sich an den konkreten Standortbedingungen hinsichtlich kleinräumiger Ertragsvariabilität und der Schneidwerksbreite orientieren. Für das Untersuchungsgebiet wird als Basis eine 5x5m Rasterkarte und die Verwendung von 10x10m Blöcken als geeignet befunden.

### **3.3 Bodenkartierung und Reichsbodenschätzung**

Im Zusammenhang mit der Standort-spezifischen Landbewirtschaftung wird wiederholt die Forderung erhoben, eine möglichst umfassende und räumlich hoch auflösende Bodenkarte des betreffenden Feldes zu erstellen (YULE ET AL. (1996)). Diese solle dann mit Modellen des Pflanzenwachstums, mit Witterungsdaten und aktuellen Bestandesinformationen kombiniert werden, um die effiziente Standort-spezifische Landbewirtschaftung zu ermöglichen (TREUE (1999)). Dabei geben die hierzu veröffentlichten Arbeiten ein sehr diffuses Bild im Hinblick auf optimale Strategien, sowohl im Hinblick auf die zu kartierenden Parameter als auch auf die zu verwendende Rasterweite.

Aufgrund der hohen Kosten, die bei einer Neukartierung der Böden auf Feldebene durch die Kartierarbeit, die Analysekosten und die fachliche Interpretation entstehen würden, betrachten einige Autoren diesen Weg als nicht praktikabel (KARLEN ET AL. (1990), LARK & STAFFORD (1997)), obwohl er aus wissenschaftlicher Sicht und zur Förderung des allgemeinen Verständnisses wünschenswert erscheinen mag.

Sollen kartierte Bodendaten für den praktischen DGPS-Ackerbau genutzt werden, ist es vor Beginn einer Neukartierung sinnvoll, bereits vorhandene Karten hinsichtlich der Gültigkeit ihrer Grenzziehung und - so vorhanden - Bewertung für praktische Belange der Landwirtschaft zu überprüfen (KARLEN ET AL. (1990)).

Die Reichsbodenschätzung (RBS) wurde auf Grundlage eines Gesetzes aus dem Jahre 1934 für das gesamte Gebiet des damaligen Deutschen Reiches durchgeführt. Interessanterweise gibt es im deutschsprachigen Raum nur vereinzelt Arbeiten, die in jüngerer Vergangenheit die Reichsbodenschätzung im Zusammenhang mit aktuellen, räumlich hoch auflösenden Daten in landwirtschaftlichen Betrieben untersuchen.

Es erschien daher angebracht, die RBS-Daten im Rahmen dieser Arbeit zu verwenden und auf ihre Aktualität hin zu überprüfen. Häufig zu hörende Kritikpunkte sind, dass die Kartierung zeitlich zu weit zurück läge, räumlich nicht exakt genug sei und/oder sich seit dem Zeitpunkt der Aufnahme die Bewertung einzelner Bodeneigenschaften verändert habe. Dazu sollen in diesem Kapitel die Zielstellung, die Methodik, die bereits früh geäußerte Kritik an der Reichsbodenschätzung sowie Auffassungen dazu aus der diesbezüglichen Literatur überblickshaft zusammengestellt werden.

#### **3.3.1 Ziele der Reichsbodenschätzung**

Die mit Bodenschätzungen allgemein und der Reichsbodenschätzung im besonderen beschäftigten Autoren unterscheiden in der historischen Zusammenschau immer zwei übergreifende Zielkomplexe für Bodenkartierungen.

Zum einen dienen und dienen Bodenkartierungen allgemeinen Zielstellungen auf staatlicher Ebene. So wurde die Reichsbodenschätzung ursprünglich als Grundlage für eine gerechtere Besteuerung (ROTHKEGEL (1950)) bzw. planerische Maßnahmen des Reichsnährstandes durchgeführt (DALSKY (1935)). Der Einzelbetrieb oder sogar eine einzelne Betriebsfläche spielt unter diesem Gesichtspunkt der Aggregation keine Rolle, Fehler auf dieser Ebene seien tolerabel (DALSKY (1935)).

Zum anderen sollten aber auch Fragestellungen der konkreten, einzelbetrieblichen Wirtschaftsführung, also originär landwirtschaftlich-produktionstechnische Bereiche, durch

die erstellten RBS-Karten unterstützt werden (DALSKY (1935), ROTHKEGEL (1950)). VINK (1967) unterscheidet in diesem Anwendungsbereich noch feiner gemäß der Einteilung von Albrecht Thaer aus dem Jahre 1811 in eine 'Bodenbonitierung', die Klassifikation im agrotechnischen Sinne für eine bestmögliche Nutzung, und eine 'Bodentaxation', die ökonomische Einstufung zur optimalen Verteilung der Produktionskosten.

Die durch die aufwändige Kartierung erhobenen Daten sollten für möglichst lange Zeit Gültigkeit besitzen (DALSKY (1935), ROTHKEGEL (1950)).

### 3.3.2 Methodik der Reichsbodenschätzung

#### Räumliche Auflösung:

Die RBS-Kartierung wurde im Maßstab 1:1000 bis 1:3200 durchgeführt (DALSKY (1935), KLEEFISCH (1994)). Dieser Kartierung liegen Bohrstock-Profilansprachen in einem Punktabstand von ca. 50m zu Grunde (DALSKY (1935), die von drei gleichzeitig das Feld abschreitenden Kartierern (ein amtlicher Bodenschätzer und zwei Personen mit Ortskenntnis) durchgeführt wurden. Die Beprobungsrichtung war dabei Ermessenssache und richtete sich nach den jeweiligen Gegebenheiten (DALSKY (1935)). Areale mit einer Fläche von weniger als 0.03 ha sollten nicht gesondert ausgewiesen werden, obwohl unter sehr heterogenen Bedingungen auch kleinere Unterteilungen möglich waren (DALSKY (1935)). Insgesamt waren die Vorschriften zur Erfassung der räumlichen Muster darauf ausgelegt, möglichst zeiteffizient die für praktische landwirtschaftliche Belange relevanten Unterschiede zu kartieren. Innerhalb von fünf bis sechs Jahren waren ca. 28 Mio ha zu kartieren, wofür damals nur ca. 700 amtliche Schätzer zur Verfügung standen (ROTHKEGEL (1950)).

Zur Abgrenzung der Areale wurde die Bohrstockansprache auf eine gewisse Bodentiefe begrenzt. Gemäß ROTHKEGEL (1950) wurde eine Bodentiefe berücksichtigt, die von Bedeutung für das Wachstum von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen ist. Somit wurden in der Regel die obersten 100cm, nur gelegentlich auch tiefere Bereiche des Bodens zur Abgrenzung der Areale im Feld genutzt.

#### Inhaltliche Bewertung:

Die bewertende Beschreibung der Ackerböden setzt sich aus einer mittleren Bodenart (abschlammbare Teilchen  $<10\mu\text{m}$ , integriert über 100 cm Tiefe), der Entstehungsart und einer Zustandsstufe (orientiert an der Bodentypenlehre) zusammen (ROTH (1956)). Im Ackerschätzungsrahmen sind für die auftretenden Kombinationen die Bodenzahlen abzulesen (BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (1994)), welche die lokalen Reinertragsverhältnisse widerspiegeln sollen. Diese Werte der Bodenschätzung sind ausdrücklich Schätzungen der Ertragsverhältnisse, da ausreichende Buchführungsunterlagen für eine auf Zahlen begründete Ableitung nicht vorhanden waren. Jedoch war man sich dieser Tatsache bewusst. ROTHKEGEL (1952) führt dazu aus: "Die Wertzahlen der Schätzungsrahmen sowie Zahlen der Zu- und Abrechnungen beruhen zweifellos auf Fiktionen [...] Das eingeschlagene Verfahren stellt vielmehr einen völlig einwandfreien und zudem den einzig möglichen Weg dar, der die Bodenschätzung überhaupt zum Ziel führen konnte." und kommt zu dem Schluss, dass die Wertzahlen "[...] insbesondere auch den Wertvorstellungen der praktischen Landwirte [entsprechen]" (S.121).

### 3.3.3 Anwendung und Kritik der Reichsbodenschätzung

Seit ihrer Durchführung ist die Reichsbodenschätzung von verschiedener Seite kritisiert und nur vereinzelt mit realen Ertragsresultaten verglichen worden.

ROTH (1956) und HOFFMANN (1963) haben detaillierte Gegenüberstellungen von RBS-Daten und Ernteerträgen veröffentlicht. Beide Autoren finden deutliche Beziehungen zwischen den Erträgen verschiedener landwirtschaftlicher Pflanzenarten und den jeweiligen Bodenzahlen. An die dargestellten Punktwolken passen sie quadratische oder Cobb-Douglas-Funktionen an. HOFFMANN (1963) folgert aus seinen Untersuchungen, dass die Ackerzahl-Klassen nicht nur die ursprünglich angestrebte allgemeine Ertragsfähigkeit widerspiegeln, sondern deutlicher noch für die spezielle Ertragsfähigkeit einzelner Arten kennzeichnend seien. Unter Berücksichtigung spezieller Witterungsgänge kann der Autor Abweichungen plausibel erklären. Durch die von ROTH (1956) praktizierte Berücksichtigung der Betriebsverhältnisse und Klimate der geographischen Regionen, aus denen seine Untersuchungsdaten (auf Gemeindeebene) stammten, konnten Abweichungen von der allgemeinen, zum Teil recht engen Beziehung zwischen Ackerzahl und Ertrag einzelner Pflanzenarten erklärt werden.

Unter den kritisierenden Veröffentlichungen zeichnen sich besonders die Arbeiten von KASCH (1953) und PETERSEN (1956) durch ihre Differenziertheit aus. Letztgenannter Autor gliedert seine Kritik in Unterstellungen, Auslassungen und Fehler.

Im zentralen Blickpunkt der Kritik der verschiedenen Autoren stehen lediglich die Bewertungsfragen. Über eine etwaige Unzulänglichkeit der kleinräumigen Genauigkeit, welche die Verwendung der Karten im Standort-spezifischen Ackerbau beeinträchtigen würde, macht keiner der Autoren weitergehende Bemerkungen. KLEEFISCH (1994) weist jedoch auf mögliche 'Blattrandverwerfungen' hin, die durch das allgemein subjektive Kartieren und tendenziell ungenauere Arbeiten im Randbereich des Kartenblattes entstünden, zudem dann, wenn das Anschlussblatt von einem anderen Kartierer bearbeitet werde.

Kritik erregt besonders die Verwendung von Zustandsstufen in der Beschreibung der RBS-Klassenflächen. Einerseits weisen ROTHKEGEL (1950) und ROTH (1956) darauf hin, dass die Verwendung der Zustandsstufen das in den 1930er Jahren noch nicht voll entwickelte System der Bodentypenlehre zumindest in Ansätzen in die RBS integrieren sollte und dass sich die Verwendung der Stufen an den praktischen, landwirtschaftlichen Gegebenheiten zu orientieren habe. Es sei nach Meinung der Autoren ausdrücklich kein vollständig wissenschaftlicher Ansatz. Genau dieses kritisiert KASCH (1953). Er merkt an, dass es die Verwendung der Zustandsstufen (als grundlegendes Konzept) sowie die nur teilweise durchgeführte Definition der einzelnen Stufen ermögliche, subjektive Sichtweisen des Schätzers in die Bewertung einfließen zu lassen. PETERSEN (1956) fügt dieser Kritik noch die Einschätzung hinzu, dass die Nutzung der Kategorie 'Zustandstufe' sich im Zeitverlauf der Durchführung geändert habe. Anfangs seien damit vornehmlich Bodentypen-Abstufungen, im späteren Verlauf der Schätzungsarbeiten jedoch vermehrt die Ertrags-Abstufungen beschrieben worden.

Hinsichtlich der Bodenart ist PETERSEN (1956) der Ansicht, dass die Schlämmanalyse unsicher und mit wenig relevanter Information für die praktische Landwirtschaft behaftet sei. Zudem gingen durch die Angabe einer durchschnittlichen Bodenart für die obersten 100 cm wichtige Informationen über die Bodenschichtung verloren, worauf auch KASCH (1964)

hinweist. In diesem Zusammenhang führt PETERSEN (1956) auch die unzureichenden oder schlicht falschen Einschätzungen des Wasserhaushaltes am Standort an. Dies sei zum Teil auf die oben genannte Vernachlässigung der Bodenschichtung sowie eine unzureichende Berücksichtigung tieferer Bodenbereiche (> 100 cm) zurückzuführen, zum Teil jedoch auch auf den Zeitpunkt der Kartierung. Nicht immer sei der Schätzungstermin geeignet gewesen, um die standörtlichen Wasserverhältnisse richtig beurteilen zu können.

Insgesamt besäßen die Schätzungsklassen aufgrund der oben genannten Kritikpunkte eine gewisse 'Unreinheit' (PETERSEN (1956)), was wahrscheinlich auch HOFFMANN (1963) zu der Aussage veranlasst, dass die Ackerzahlen bei der Bewertung nicht feiner als in Klassen von 5-10 Punkten eingeteilt werden sollten. Der Autor begründet dies vornehmlich mit der Überdeckung feiner Unterschiede durch Bewirtschaftungsmaßnahmen.

PETERSEN (1956) und KASCH (1964) heben jedoch neben all der geäußerten Kritik ausdrücklich die Tatsache hervor, dass die Karten und Angaben der RBS unter Berücksichtigung der Fehler und Unzulänglichkeiten sehr wohl sinnvoll zu nutzen seien. Für die Verwendung der RBS in heutigen Systemen des Standort-spezifischen Ackerbaus ist zudem die Anmerkung von PETERSEN (1956) hilfreich, dass die RBS "weitgehend verwendbar" sei, da sich die Kartierarbeit an den örtlichen Ertragserfahrungen pragmatisch orientiert habe. Während er die Empfehlung ausspricht, Ertragsschätzungen gerade nicht an den Musterstücken vorzunehmen, da diese typische Extremprofile aber nicht typische Böden der Gegend kennzeichnen würden, vermutet er in den geringen RBS-Polygon-Abmessungen einen Hinderungsgrund für die verbesserte, lokale Ertragsermittlung.

### 3.3.4 Digitalisierung der Karten der Reichsbodenschätzung

Die Karten der Reichsbodenschätzung (RBS) für das Untersuchungsgebiet wurden mit einem Digitalisiertisch der Firma Calcomp und dem GIS ArcInfo von Mitarbeitern des Institutes für Landnutzung und Landschaftsökologie des ZALF e.V. Müncheberg digitalisiert. Der Digitalisierung diente eine Karte im Maßstab 1:10.000 als Vorlage, so dass von einem RMS-Fehler der Daten von ca. drei bis vier Metern auszugehen ist (HAGAN ET AL. (1998)).

Nach einer Plausibilitätskontrolle der Schätzungsattribute wurden die Daten über Gruppierungsfunktionen in ACCESS 7.0 systematisiert und mit den aus dem Ackerschätzungsrahmen abgeleiteten Bodenzahlen versehen. Der Vergleich dieser nachträglich abgeleiteten Bodenzahlen mit den Angaben der betrieblichen Flurkarten (Boden- und Ackerzahl) brachte selten und wenn, dann nur geringfügige Abweichungen der originalen Ackerzahl von den abgeleiteten Bodenzahlen um 1-2 Boniturstufen. Somit wurden die aus dem Ackerschätzungsrahmen abgeleiteten Bodenzahlen als alleiniges Bewertungskriterium beibehalten, da diese vollständig waren.

Anschließend wurden die Vektor-Polygone und Attributtabelle mit den Informationen der RBS in ArcView 3.1 exportiert (Shape-Format). Dieses RBS-Shape diente für weitere Auswertungen. In Idrisi32™ fand die Umsetzung in eine 5m-Rasterkarte der Polygon-Nummern statt. Mit der Rasterkarte der Polygon-Nummern konnten die jeweiligen Schätzungsinformationen und abgeleitete Größen aus einer Datenbank in weitere Rasterkarten überführt werden.

### 3.3.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Reichsbodenschätzung ist in einem für praktische landwirtschaftliche Belange ausreichend großen Maßstab erstellt worden.

Sie beinhaltet einerseits Informationen über die flächenhafte Ausprägung von Standorteigenschaften, die durch den Boden bedingt werden. Andererseits sind die einzelnen Areale unter landwirtschaftlichen Gesichtspunkten mit einer Relativzahl bewertet und diese in Einzelfaktoren aufzugliedern.

In Anbetracht der Tatsache, dass aus Kostengründen eine erneute Bodenkartierung durch fachkundiges Personal in dem erforderlichen Maßstab für Marktfruchtbetriebe ausscheiden dürfte, erscheint es sinnvoll, die in den RBS-Karten vorhandenen Informationen trotz aller Unzulänglichkeiten zumindest in einem ersten Schritt zu sichten. Dabei sollte vornehmlich versucht werden, den Verlauf der Grenzen zu nutzen und der eventuell unzutreffenden Bewertung der Teilflächen weniger Beachtung zu schenken.

Durch die vielfältigen, im Verlauf des Standort-spezifischen Ackerbaus neu auftretenden, georeferenzierten Daten kann sukzessive eine Neubewertung der Einzelareale der RBS durchgeführt und die eventuell unzureichende Grenzziehungen verbessert werden. Dieses wird exemplarisch im Kapitel 4.3.1 dargestellt.

### **3.4 Apparente elektrische Leitfähigkeit des Bodens (ECa)**

#### **3.4.1 Stand des Wissens**

Die Literatur über ECa-Messungen mit landwirtschaftlicher Fragestellung legt eine inhaltliche Unterteilung des folgenden Abschnittes in drei Bereiche nahe: Viele Arbeiten beschäftigen sich mit dem Messverfahren als solchem und der ihm zu Grunde liegenden Theorie. Des Weiteren sind Publikationen zu finden, welche die Methode für Kartierungsarbeiten im Gelände nutzen. Ein dritter Teil der Veröffentlichungen versucht, die Messwerte bodenkundlich oder ackerbaulich zu interpretieren. Diesen drei thematisch unterschiedlichen Schwerpunkten wird in der folgenden Literaturdurchsicht Rechnung getragen.

#### Grundlagen der ECa-Messung

Geoelektrische Verfahren werden in der Geologie seit den 1930er Jahren eingesetzt (MCNEIL (1980b)). Durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit (electrical conductivity / EC) wird versucht, die vertikale und/oder laterale Variabilität von Gesteinen in verschiedenen Tiefen zu erfassen und so Kartierarbeiten zu unterstützen (ZALASIEWICZ ET AL. (1985)). In den vergangenen Jahrzehnten kamen mit der Salinitätskartierung und dem Grundwasser-Monitoring Anwendungen aus der Landwirtschaft und dem Bereich des Umweltschutzes hinzu (NOBES (1996), RHOADES (1981), WILLIAMS & HOEY (1987)). Seitdem die landtechnische Entwicklung den Standort-spezifischen Ackerbau zunehmend ermöglicht hat, werden elektrische Widerstands- oder Leitfähigkeitsmessungen vermehrt auch zur Erfassung und Beschreibung der kleinräumigen Variabilität von Böden eingesetzt (LUND ET AL. (1998), SUDDUTH ET AL. (1995)). Eine Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz dieser geophysikalischen Methoden ist, dass sich die unter landwirtschaftlichem Gesichtspunkt als 'unterschiedlich' angesprochenen Böden auch hinsichtlich ihrer elektrischen Leitfähigkeit unterscheiden. Ist letztere nicht verschieden, werden Bodenunterschiede nicht aufgezeichnet, obwohl sie unter praktischen, landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen durchaus relevant sein können (DOOLITTLE & COLLINS (1998), ZALASIEWICZ ET AL. (1985)).

Zur Anwendung kommen Verfahren der Gleichstrom- und der Wechselstrom-Geoelektrik. Die Gleichstromverfahren (z.B. Verris) zeichnen sich dadurch aus, dass Elektroden in den Boden eingebracht und so wirkliche elektrische Widerstände gemessen werden (LÜCK ET AL. (2000)). Für die erfolgreiche Datengewinnung ist daher ein sicherer Boden-Elektroden-Kontakt wichtig. Auf steinigten Böden oder unter sehr trockenen Bedingungen wird diese Methode daher zunehmend unsicherer (HENDRICKX ET AL. (1992)). Zudem stellt die Messung einen mechanischen Eingriff in den Boden dar. Dies kann vor allem bei flächenhafter und automatisierter Erfassung in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen eine Beschränkung der Einsatzmöglichkeiten mit sich bringen. Die Tiefe des bei der Messung erfassten Bodenraumes kann über den Elektrodenabstand beeinflusst werden.

Zur Gleichstrom-Geoelektrik stellen die Wechselstrom-Verfahren (z.B. EM38 oder EM31) eine Alternative dar (BORK ET AL. (1998), LÜCK & EISENREICH (2001), ZALASIEWICZ ET AL. (1985)). Das Messprinzip basiert auf der elektromagnetischen Induktion. Über das Magnetfeld einer Sender-Spule wird ein Wechselstrom im Boden induziert. Das von diesem erzeugte Magnetfeld kann von einer Empfänger-Spule über den in ihr induzierten Strom gemessen werden. Aus der Entfernung der zwei Spulen zueinander und den Unterschieden in

den Magnetfeld-Stärken wird auf die elektrische Wechselstrom-Leitfähigkeit eines unterstellten Bodenvolumens geschlossen. Daher handelt es sich bei der erfassten Größe um die 'apparente Leitfähigkeit' (ECa) (MCNEIL (1980b)). Im Gegensatz zur Gleichstrom-Geoelektrik bedarf es bei diesem Verfahren keines leitenden Kontaktes zwischen Gerät und Boden. Daraus erklärt sich, dass diese Methode auch als 'zerstörungsfrei' und 'berührungslos' beschrieben wird (HENDRICKX ET AL. (1992), KACHANOSKI ET AL. (1988)).

Über den Abstand der zwei Spulen zueinander kann die Tiefe des in die Messung eingehenden Bodenvolumens variiert werden. Es existiert eine theoretische Funktion, die den relativen Beitrag einzelner Bodentiefen am Gesamtsignal beschreibt (MCNEIL (1980b)). Diese Funktion ist nicht-linear. Des Weiteren kann die Gesamt-Eindringtiefe des Magnetfeldes über die Ausrichtung der Spulenachsen (horizontal oder vertikal, H- bzw. V-Modus) variiert werden. SLAVICH (1990) bestätigt den generellen Verlauf der Tiefenfunktion, merkt aber an, dass die Eindringtiefe des Magnetfeldes zum Teil um ein Mehrfaches über den vom Hersteller angegebenen Werten liegen kann und von dem jeweiligen vertikalen Leitfähigkeitsprofil am konkreten Messpunkt abhängt. NEHMDAHL & GREVE (2001) berichten über erhöhte Eindringtiefen auf sandigen im Vergleich zu lehmig-tonigen Böden. Die Funktion des relativen Signalbeitrages weist für beide Betriebsmodi (H- und V-Modus) einen Tiefenbereich aus, der die gemessene Gesamt-Leitfähigkeit maximal beeinflusst. Aus dieser Tatsache und den nicht-leitenden Eigenschaften der Luft über dem Boden erklären sich die Arbeiten einiger Autoren, in denen versucht wird, durch unterschiedliche Abstände zwischen Messgerät und Bodenoberfläche die vertikale Variabilität der ECa in unterschiedlichen Tiefen an einem Messpunkt zu ermitteln (BORCHERS ET AL. (1997), SLAVICH (1990)).

HENDRICKX ET AL. (1992) wiederum betrachten es als Vorteil für praktische Fragestellungen, dass nicht in einzelnen Tiefenabschnitten gemessen, sondern die ECa eines Bodenvolumens integrativ erfasst wird. Dadurch werde das erhaltene Signal unempfindlicher gegenüber Störungen. LÜCK ET AL. (2000) überprüften den Einfluss des graduellen Überganges von vertikaler zu horizontaler Ausrichtung der Magnetspulen-Achsen und fanden bis ca. 40° Abweichung von 'vertikal' keine relevante Beeinflussung des Messwertes. Dieses Ergebnis ist für die automatisierte Datenerfassung auf landwirtschaftlichen Feldern aufgrund von Bodenunebenheiten oder steinigen Standorten von großer Bedeutung.

Die publizierten Nutzungen von ECa-Messungen können in zwei Bereiche unterteilt werden. Ein Teilbereich betrifft die Kartierung von Grenzen zwischen Bereichen unterschiedlicher Leitfähigkeit, ohne die Ausprägung der absoluten Werte durch einzelne Bodeneigenschaften erklären zu wollen (z.B. LUND ET AL. (1998)). Diese Grenzen sollten möglichst unabhängig vom jeweiligen Termin der Messung sein. Arbeiten des anderen Teilbereiches konzentrieren sich auf die kausale Erklärung des ECa-Wertes durch Bodeneigenschaften. Die absoluten ECa-Werte sind hierbei von großer Bedeutung, da sie in Regressionsgleichungen von gemessenen Bodeneigenschaften auf die ECa eingehen (z.B. GILBERTSSON (2001)) und letzten Endes für die Schätzung der Bodeneigenschaften an nicht beprobten Stellen des Feldes herangezogen werden sollen.

### Datenerfassung und Kartenerstellung

Der große Vorteil der elektromagnetischen Induktionsverfahren gegenüber einer herkömmlichen Bodenkartierung ist die Automatisierbarkeit der Datenerfassung. Damit einher geht eine hohe Geschwindigkeit in der Erfassung der Bodenvariabilität. In der Literatur sind Flächenleistungen über 100 Hektar je Tag bei entsprechend günstigen Schlaggrößen zu finden. Meist werden die für landwirtschaftliche Pflegearbeiten angelegten Spuren abgefahren und im Sekundentakt ECa-Werte mit gleichzeitig erhobenen DGPS-Koordinaten gespeichert (z.B. CANNON ET AL. (1994)), so dass Messpunkt-Dichten von 100-400 Messungen je Hektar möglich werden (GILBERTSSON (2001), LÜCK & EISENREICH (2001), NEUDECKER ET AL. (2001)).

Verschiedene Autoren weisen darauf hin, dass weniger die absoluten ECa-Werte als vielmehr der kleinräumige Wechsel der ECa-Werte für die Kartierung von Interesse seien (BRUS ET AL. (1992), LUND ET AL. (1998), MCNEIL (1980b), ZALASIEWICZ ET AL. (1985)). Somit werden aus den Messwerten zunächst keine inhaltlichen Schlussfolgerungen auf die sie repräsentierenden Boden- oder Gesteins-Einheiten gezogen. DOOLITTLE & COLLINS (1998), LUND ET AL. (1998) und ZALASIEWICZ ET AL. (1985) weisen ausdrücklich darauf hin, dass die ECa-Kartierungen **zusätzliche** Informationen darstellen und immer von einer klassischen geologischen oder bodenkundlichen Kartierung begleitet werden müssen. Darüber hinaus ist es wichtig, dass die Unterschiede der Leitfähigkeit (Kontraste) unabhängig von der jeweiligen Jahreszeit auftreten. Dadurch steht eine große Zeitspanne für die Datenerhebung zur Verfügung. Zudem ist nur so die Reproduzierbarkeit der Karten gewährleistet. Ein Grossteil der hierzu durchgeführten Untersuchungen kommt zu dem Ergebnis, dass Messwerte unterschiedlicher Termine an identischen Orten in hohem Maße korreliert sind (z.B. LUND ET AL. (1998), NEHMDAHL & GREVE (2001), NEUDECKER ET AL. (2001), SCHMIDHALTER ET AL. (2001)).

Systematische Arbeiten über die Erstellung von ECa-Karten aus Punkt-Messungen fehlen in der Literatur. Viele Publikationen gehen i.d.R. nicht näher auf die Erstellung der Karten ein sondern interpretieren diese sofort. GILBERTSSON (2001) und NEHMDAHL & GREVE (2001) benutzen geostatistische Verfahren, in anderen Arbeiten wird lediglich die Erstellung von Kontur-Karten ohne weitere Angaben erwähnt (CANNON ET AL. (1994), WILLIAMS & HOEY (1987)).

Auch darüber, was als 'Kontrast', 'starker Wechsel' oder 'Diskontinuität' anzusehen ist, werden keine näheren quantifizierenden Angaben gemacht. SLAVICH (1990) sowie WILLIAMS & HOEY (1987) geben die Genauigkeit des EM38-Gerätes im Feldeinsatz mit 3% bzw.  $5 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$  (entspricht ca. 2-8%) an. Dabei ist zumindest bei der zweiten Arbeit das absolut sehr hohe Niveau der ECa-Werte zu beachten. Laut Hersteller-Angaben liegt die Genauigkeit des EM38 bei  $0.1 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ , im stationären Betrieb fanden LÜCK ET AL. (2000) eine Genauigkeit von  $0.5 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Einige Autoren machen darüber hinaus Angaben bezüglich der Verteilungsform der Rohdaten. Diese reichen von 'nicht normalverteilt' (BOBERT ET AL. (2001), DOMSCH & GIEBEL (2001)) und 'lognormal-verteilt' (HENDRICKX ET AL. (1992)) über 'schief' und 'bimodal' (KING ET AL. (2001)) bis hin zu 'normalverteilt' (WILLIAMS & HOEY (1987)).

### Inhaltliche Interpretation von ECa-Werten

In vielen Arbeiten aus dem Bereich des Standort-spezifischen Ackerbaus wird als übergreifende Zielstellung genannt, mit Hilfe der EM38-Geräte die Variabilität der Böden zu erfassen (BOBERT ET AL. (2001), LUND ET AL. (1998)). Daraus soll auf deren landwirtschaftliche Produktivität geschlossen (SUDDUTH ET AL. (1995)) oder Bewirtschaftungsareale (LUND ET AL. (1998), NEUDECKER ET AL. (2001)) abgeleitet werden. In der Arbeit von GUTOW (2001) wird die ECa-Messung zur Kartierung der Lössmächtigkeit verwendet und darauf aufbauend von der Autorin ein relativ enger Zusammenhang zwischen der ECa einerseits und der Pflanzenentwicklung und der Nährstoffaufnahme andererseits festgestellt.

In der Literatur ist eine Vielzahl von Bodeneigenschaften genannt, welche die elektrische Leitfähigkeit beeinflussen (Überblicke z.B. bei DALGAARD ET AL. (2001) LUND ET AL. (1998)). Jedoch wird nur einigen wenigen Eigenschaften größere Bedeutung eingeräumt: hierzu zählen die Textur (hier vor allem der Tongehalt) (KITCHEN ET AL. (1996), RHOADES ET AL. (1989)), die Bodenfeuchte (RHOADES (1981), DURLESSER (1999)) und - unter ariden oder semi-ariden Bedingungen mit Bewässerungslandwirtschaft - den elektrolytischen Eigenschaften der Bodenlösung (HENDRICKX ET AL. (1992), KACHANOSKI ET AL. (1988)). RHOADES (1981) weist darauf hin, dass die Textur aufgrund der mit ihr jeweils typisch verbundenen Wasserspeicherefähigkeit nicht unabhängig von der Bodenfeuchte betrachtet werden kann. Der Autor führt als Beispiel den Schluff an, der wie Sand im Gegensatz zum Ton in trockenem Zustand eine vergleichsweise geringe elektrische Leitfähigkeit hat. Aufgrund seiner Körnung besitzt der Schluff aber eine sehr hohe Wasserspeicherefähigkeit, wodurch seine Leitfähigkeit im feuchten Zustand deutlich vom Sand verschieden ist.

Im Zusammenhang mit der Bodenfeuchte wird auch auf die Tortuosität und Konnektivität des Porenraumes im Boden und auf deren Bedeutung für die elektrische Leitfähigkeit allgemein hingewiesen (DALGAARD ET AL. (2001), RHOADES (1981)). MCNEIL (1980a) führt jedoch an, dass diese Eigenschaften für elektromagnetisch erzeugte Wechselströme keine Bedeutung besäßen und lediglich die absolute Bodenfeuchte relevant sei. Daraus erklärt sich wahrscheinlich auch die Feststellung von LÜCK ET AL. (2000), dass die Gleichstrom-Geoelektrik sensibler auf Unterschiede der Bodenstruktur (Fahrspuren, Verdichtungen) reagiere.

Über den Einfluss der im Boden in unterschiedlichen Tiefen vorkommenden organischen Substanz auf die ECa herrscht weitgehend Unklarheit (MCNEIL (1980a)). DALGAARD ET AL. (2001) diskutieren ihre Ergebnisse getrennt nach unterschiedlichen Humusgehalten in Unter- und Oberboden. NEHMDAHL & GREVE (2001) merken ebenso das abweichende Verhalten der ECa-Werte an, wenn höhere Gehalte an organischer Substanz vorliegen.

Während BORK ET AL. (1998), BRUS ET AL. (1992), KITCHEN ET AL. (1996) und SUDDUTH ET AL. (1995) versuchen, aus der ECa die unterschiedliche Mächtigkeit von Sandüberdeckungen oder der Bodendecke über stark tonigen Horizonten zu schätzen, berichten DOMSCH & GIEBEL (2001) über erste Untersuchungen, zur Korrelation der ECa-Werte mit Bodentypen.

Insgesamt ist zu den publizierten Ansätzen, die ECa-Werte von Feldmessungen mit Hilfe mathematischer Verfahren aus Bodeneigenschaften zu erklären, anzumerken, dass vornehmlich feld- oder standort-spezifische Ergebnisse erzielt werden (BRUS ET AL. (1992),

GILBERTSSON (2001), KITCHEN ET AL. (1996), LUND ET AL. (1998), NEUDECKER ET AL. (2001), SCHMIDHALTER ET AL. (2001), SUDDUTH ET AL. (1995), SUDDUTH ET AL. (1998)). Zudem variieren die Bestimmtheitsmaße der gefundenen Funktionen in einem weiten Rahmen auch innerhalb einzelner Untersuchungen zwischen einzelnen Feldern (GILBERTSSON (2001), SCHMIDHALTER ET AL. (2001)). Insofern ist zu hinterfragen, inwieweit die Studien ihr gesetztes Ziel erreichen, die ECa-Messung zur Unterteilung der Fläche zu nutzen und so zu einer effizienteren Beprobung und anschließenden flächenhaften Schätzung der Parameter für das gesamte Feld zu gelangen. Hintergrund dieser Ansätze sind Kostengesichtspunkte. Die gefundenen Bestimmtheitsmaße und variierenden Funktionsgleichungen machen ein solches Unterfangen zumindest unsicher. Ob mit multiplen Regressionen und umfangreicheren Datensätzen eine grundsätzliche Verbesserung erreicht werden kann, wie es z.B. GILBERTSSON (2001) postuliert, bleibt vorerst offen.

### 3.4.2 Material und Methoden

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zu insgesamt drei Terminen ECa-Daten mit dem Messgerät EM38 (Hersteller: Geonics Ltd.; www.geonics.com) durch die Firma SoilInvest erhoben. Bis auf die Punkte des Transects auf dem Feld '300' im Frühjahr 1999 erfolgte die Datenerfassung mit Hilfe einer Konstruktion aus Kunststoff in der Form eines Schlittens, auf dem das Messgerät montiert war. Der Schlitten wurde von einem Geländewagen in den Fahrgassen über die Bodenoberfläche gezogen (im folgenden als Schlitten-Messung bezeichnet). Der Abstand zwischen den Fahrgassen betrug 18 m, die Fahrgeschwindigkeit lag i.d.R. zwischen 15 und 20 km\*h<sup>-1</sup>. Die Daten wurden im Sekundentakt zusammen mit den jeweils aktuellen DGPS-Koordinaten gespeichert. An den 49 Transectpunkten auf dem Feld '300' wurde das EM38-Messgerät im April 1999 direkt auf die Bodenoberfläche gesetzt und die ECa im H- und V-Modus stationär gemessen (im folgenden als Punkt-Messung bezeichnet). Im Anschluss an alle Messungen erfolgte durch den Dienstleister für jeden Termin eine Korrektur der ECa-Werte auf eine Bodentemperatur von 25°C nach der Formel von DURLESSER (1999). Diese auf eine Standardtemperatur korrigierte ECa<sub>25</sub> bildet die Grundlage der nachfolgenden Ausführungen. Eine Aufstellung der Felder, Termine und Messmodi enthält Tab. 15.

**Tab. 15: Übersicht über Beprobungsorte, -termine und -arten der durchgeführten ECa-Messungen im Untersuchungsgebiet**

Feld-Nr.	Termin		
	8.4.1999	21.-23.3.2000	19./20.8.2000
101 (50 ha)		Schlitten	Schlitten
200 (99 ha)		Schlitten	
300 (Transect)	Punkt	Schlitten	Schlitten
501 (15 ha)		Schlitten	Schlitten
600 (38 ha)	Schlitten		
1000 (100 ha)	Schlitten	Schlitten	Schlitten
1100 (55 ha)	Schlitten		
2000 (47 ha)		Schlitten	Schlitten
2600 (46 ha)		Schlitten	
2700 (53 ha)		Schlitten	
3000 (60 ha)		Schlitten	Schlitten

[Erläuterung der Bezeichnungen 'Schlitten' und 'Punkt' siehe Text]

### 3.4.3 Ergebnisse

#### 3.4.3.1 Korrelationen zwischen ECa-Werten aus verschiedenen Messungen

In der Tab. 16 sind die linearen Regressionsgleichungen der ECa<sub>25</sub> von unterschiedlichen Messmodi und Terminen auf die im V-Modus als Punkt-Messung erhobenen ECa<sub>25</sub>-Daten des Frühjahres 1999 aufgeführt (Transect auf Feld '300'). Alle Beziehungen waren zum Niveau p=0.001 signifikant. Es finden sich Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionen von 0.831 bis 0.939.

**Tab. 16: Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für verschiedene Kombinationen von ECa<sub>25</sub>-Daten auf dem Feld '300' (Punkt-Messung, n=49)**

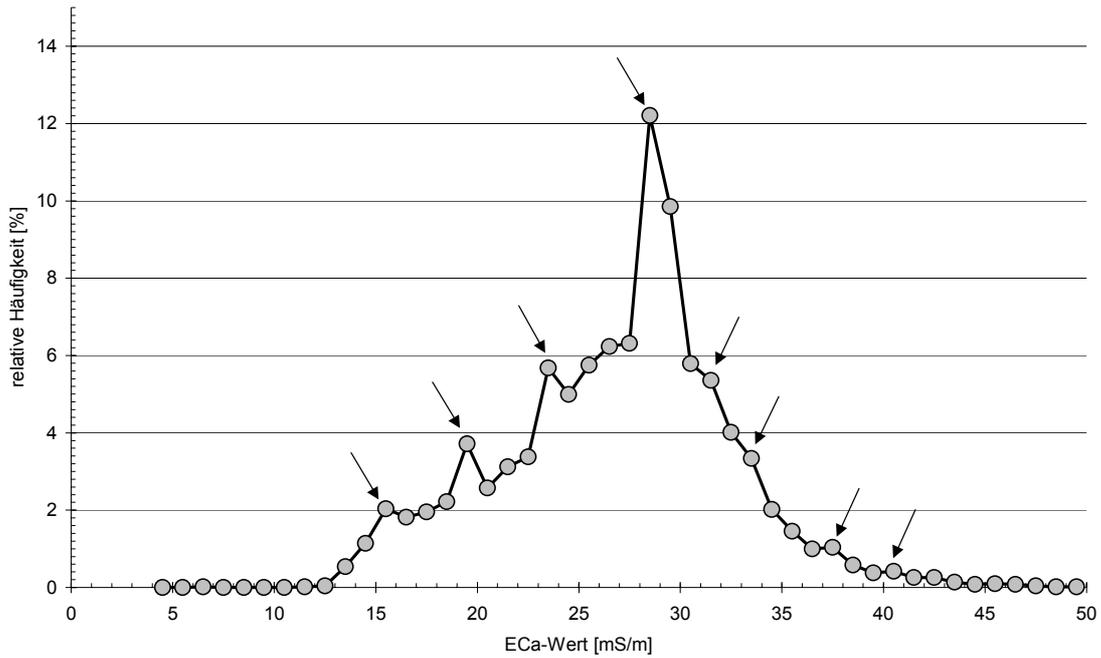
Abszisse	Ordinate	Funktionsgleichung	R <sup>2</sup>
ECa <sub>25,V, Apr99</sub>	ECa <sub>25,H, Apr99</sub>	$y = 0.66 * x + 4.46$	0.884
ECa <sub>25,V, Apr99</sub>	ECa <sub>25,V, Mrz00</sub>	$y = 1.02 * x + 12.1$	0,939
ECa <sub>25,V, Apr99</sub>	ECa <sub>25,V, Aug00</sub>	$y = 0.66 * x + 6.88$	0.831
ECa <sub>25,V, Mrz00</sub>	ECa <sub>25,V, Aug00</sub>	$y = 0.63 * x - 0.944$	0.907

**Erläuterung der Indizes:** V: vertikale Spulenausrichtung; H: horizontale Spulenausrichtung; Apr99 / Mrz00 / Aug00: Termin der Messung (siehe Tab. 15)

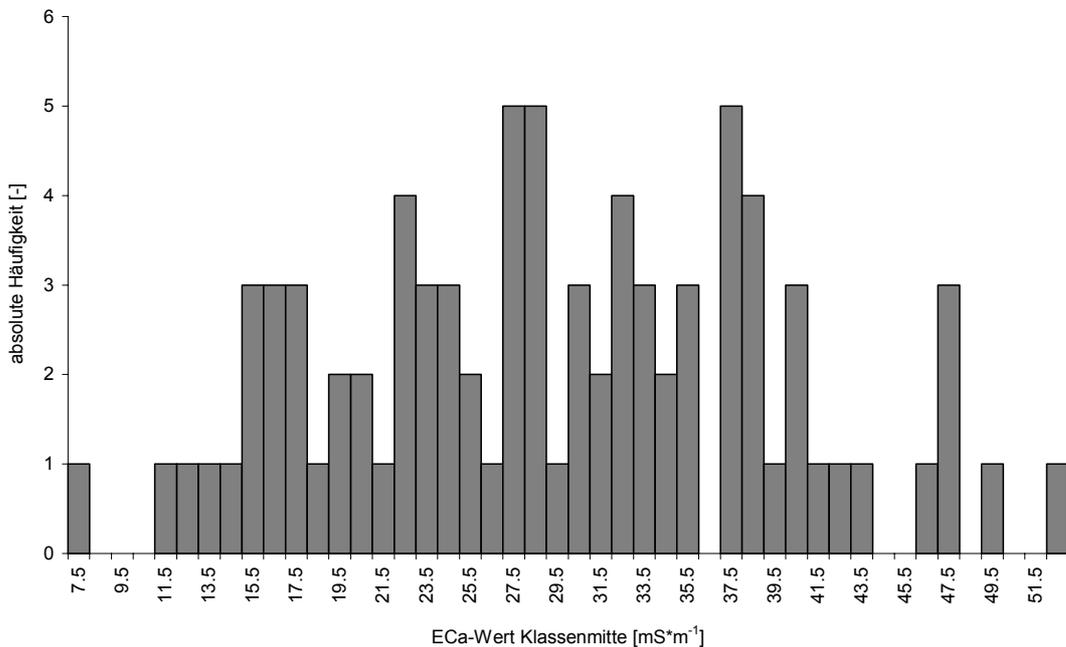
#### 3.4.3.2 Sichtung und Aufbereitung der Rohdaten

Die Darstellung der ECa<sub>25</sub>-Schlitten-Messungen in Form von Histogrammen auf 1mS-Basis ergab für das Feld 2600 die Abb. 27. Da die Genauigkeit des EM38 im stationären Betrieb im Bereich von 0.1 mS\*m<sup>-1</sup> (Angaben des Herstellers) und 0.5 mS\*m<sup>-1</sup> (LÜCK & EISENREICH (2001)) liegt, wird abweichend von dem bei BORTZ ET AL. (1990) (S. 71) vorgeschlagenen allgemeinen Verfahren die Klassenbreite der Histogramm-Berechnung auf 1 mS\*m<sup>-1</sup> gewählt. Es ist eine mehrmodale Verteilung der Rohdaten zu erkennen. Die lokalen Modalwerte liegen bei 16, 20, 22, 24, 29, 32, 34, 38 und 41 mS\*m<sup>-1</sup>. Die Histogramme der weiteren in Tab. 15 aufgeführten Messungen zu den Terminen im Frühjahr 1999 und 2000 sind im Anhang aufgeführt (Abb. A-5 bis Abb. A-14).

Aus den im Anhang dargestellten Abbildungen stammen die Daten für die Abb. 28. Diese zeigt die absoluten Häufigkeiten, mit denen lokale Modalwerte in Abhängigkeit von der ECa<sub>25</sub>-Klasse in den Histogrammen sämtlicher Felder auftreten. Zu sehen sind sieben ECa<sub>25</sub>-Bereiche, in denen sich lokale Modalwerte häufen. Diese liegen bei 15-18, 20, 22-25, 28, 30-36, 38 und 48 ECa<sub>25</sub>. Eine noch feinere Unterteilung vor allem des Bereiches 30-36 ECa<sub>25</sub> ist ebenfalls denkbar.



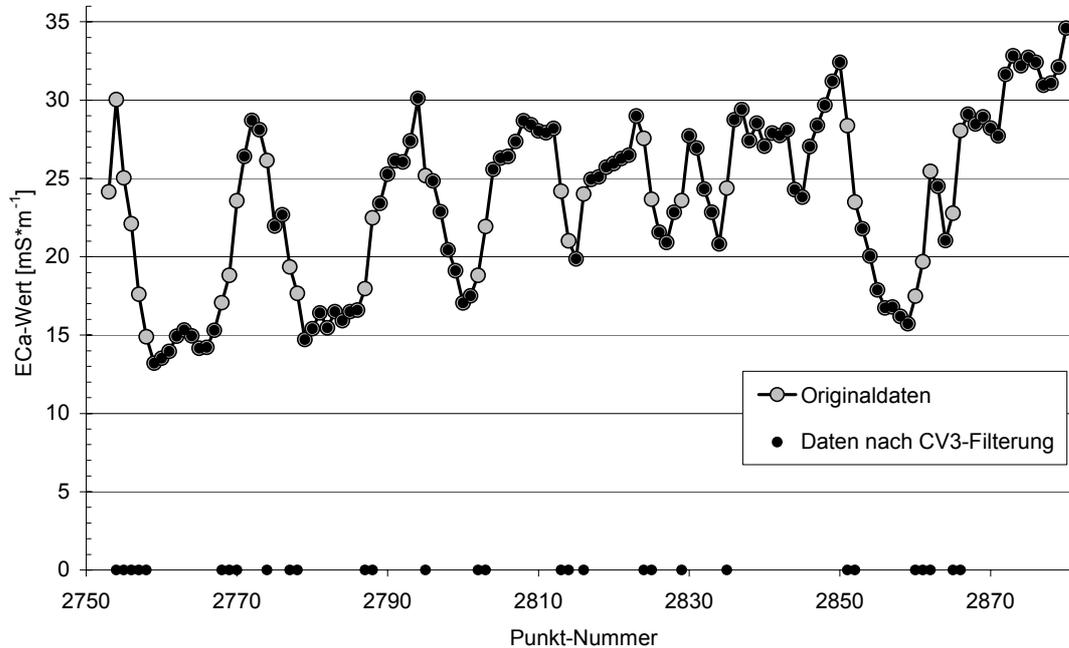
**Abb. 27: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 2600 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 5006)**



**Abb. 28: Absolute Häufigkeiten für das Auftreten von lokalen Modalwerten in den 1 mS\*m<sup>-1</sup> breiten ECa<sub>25</sub>-Klassen der Histogramme der Originaldaten einzelner Felder**

Die Entstehung dieses mehrmodalen Verhaltens der Häufigkeitsverteilung lässt sich aus der Abb. 29 ersehen (Kurve: 'Originaldaten'). Es ist ein Abschnitt einer Fahrspur der ECa-Messung auf dem Feld 2600 von ca. 500 m Länge wiedergegeben. Die Daten wurden mit

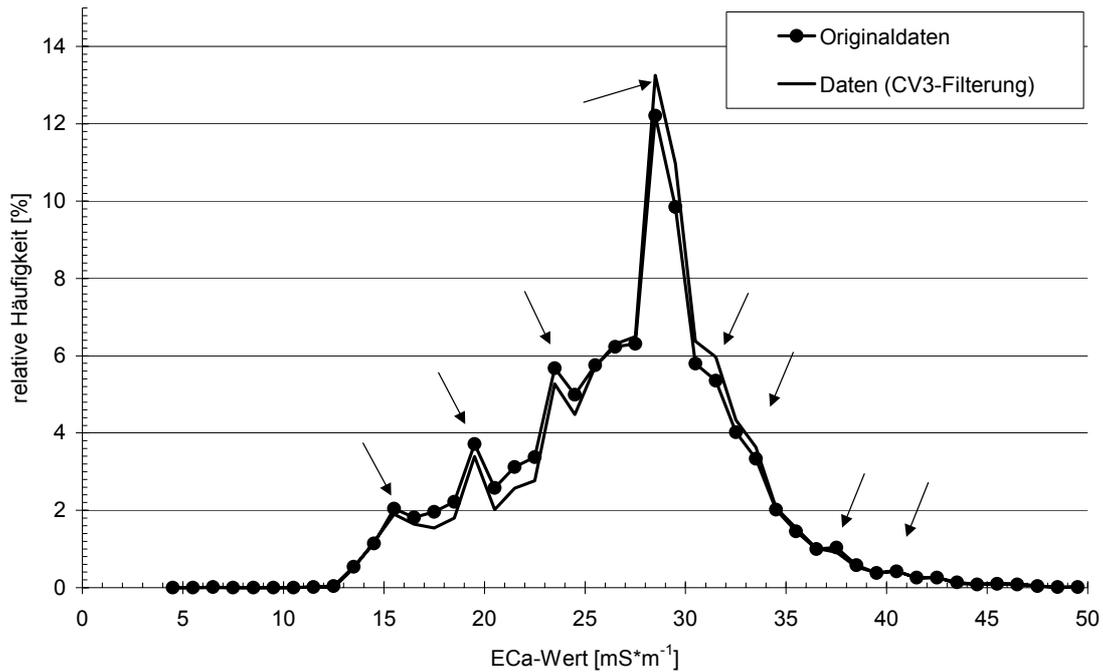
einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Die  $ECa_{25}$ -Werte variieren im Bereich von 13 bis 35  $mS \cdot m^{-1}$ . Es treten Abschnitte unterschiedlicher Länge auf, in denen die direkt benachbarten Werte auf annähernd gleichem Niveau verbleiben. Übergänge zwischen diesen relativ konstanten Bereichen finden mehr oder minder abrupt statt.



**Abb. 29:  $ECa_{25}$ -Werte aus dem Abschnitt einer Fahrspur auf dem Feld 2600 (Schlitten-Messung, März 2000, Punktabstand ca. 5 m)**

Um diese Übergangsbereiche aus dem Datensatz auszuschließen und somit den Datensatz auf die Bereiche relativ konstanter  $ECa_{25}$ -Werte zu beschränken, wurden gleitende Variationskoeffizienten über je drei benachbarte Werte berechnet. Die Koeffizienten wurden dem mittleren der drei Originalwerte zugeordnet. Für die homogenen  $ECa_{25}$ -Bereiche sind diese meist kleiner als 5%, für die Übergänge werden Werte von deutlich größer als 10% berechnet. Wenn ein  $ECa_{25}$ -Wert mit den zeitlich direkt vorher und nachher aufgezeichneten Daten einen Variationskoeffizient von 10% oder mehr ergab, erfolgte der Ausschluss dieses Einzelwertes aus dem Originaldatensatz. Dieses Verfahren wird im folgenden als 'CV3-Filterung' bezeichnet. In der Abb. 29 ist der verbleibende Datensatz durch die kleineren, schwarzen Punkte dargestellt (Kurve: 'Daten nach CV3-Filterung'). Die relativ konstanten Bereiche bleiben nach Anwendung dieser Filterung unverändert erhalten.

Zum Vergleich des Datensatzes eines Feldes vor und nach einer solchen Filterung mittels Histogramm, dient die Abb. 30. Die lokalen Modalwerte bleiben nach der Filterung erhalten und werden in ihrer relativen Bedeutung gegenüber benachbarten  $ECa$ -Klassen betont im Vergleich zur Ausgangsverteilung verstärkt (Pfeile).

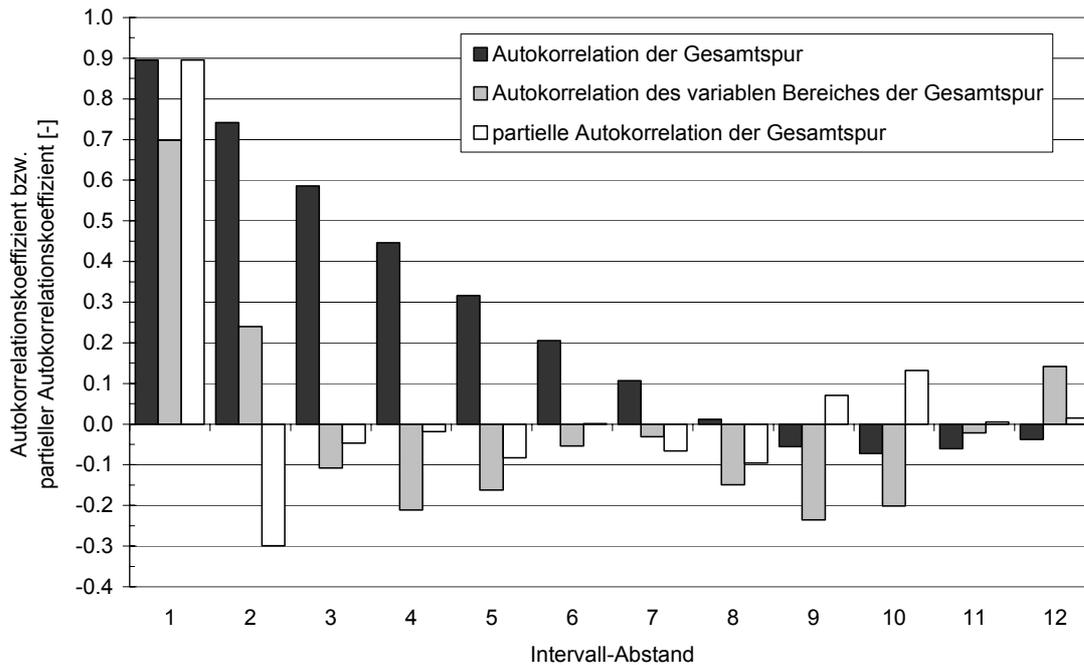


**Abb. 30: Häufigkeitsverteilung der  $ECa_{25}$ -Originaldaten und der Daten nach CV3-Filterung (Schlitten-Messung, Feld 2600, März 2000, Originaldaten  $n = 5006$ ; nach CV3-Filterung  $n = 4156$ )**

### 3.4.3.3 Exemplarische Analyse einer Fahrspur: Autokorrelationen

Für die Berechnung der einfachen und partiellen Autokorrelation der  $ECa$ -Daten wurde eine Fahrspur auf dem Feld 2600 ausgewählt, die sowohl Abschnitte mit nahezu konstanten als auch stark schwankenden  $ECa_{25}$ -Werten aufwies (Abb. 29). Aus dieser Spur wurde wiederum ein kleinerer Abschnitt ausgewählt, der einen hoch variablen Bereich repräsentierte (Punkt-ID 2804-2844 der Abb. 29). Mit diesen beiden Datensätzen wurde die Autokorrelationsanalyse durchgeführt. In der Abb. 31 sind die Ergebnisse dargestellt.

Punktpaare der Gesamtspur mit einem zeitlichen Abstand von bis zu sechs Sekunden, entsprechend einer Strecke von etwa 24-30m, weisen positive Autokorrelationskoeffizienten auf. Bedeutsame partielle Autokorrelationen liegen dagegen nur bei direkt benachbarten Werten vor. Im sehr variablen Teilbereich der Gesamtspur sind bereits die einfachen Autokorrelationskoeffizienten ab einem Intervallabstand von mehr als einer Sekunde nicht mehr signifikant positiv. Die Koeffizienten der partiellen Autokorrelation verhalten sich für den variablen Teilbereich wie für die Gesamtspur und sind nur für direkt benachbarte Werte signifikant positiv (Ergebnisse nicht dargestellt).



**Abb. 31: Koeffizient der Autokorrelation und der partiellen Autokorrelation für die EC<sub>25</sub>-Daten eines Abschnittes einer Fahrspur auf dem Feld 2600 sowie eines kleineren Abschnittes dieser Spur mit erhöhter Variabilität (Beprobung im März 2000)**

### 3.4.3.4 Kartenerstellung

Aufgrund der in den beiden vorigen Kapiteln dargestellten multimodalen Verteilungsform, den konkreten Verläufen der EC<sub>25</sub>-Daten in einer Fahrspur sowie den Ergebnissen der Autokorrelationsanalyse wird den einzelnen Datenpunkten ein hoher Informationswert beigemessen und der Anteil des Fehlers am Messwert als sehr gering eingeschätzt.

Für die Kartenerstellung wurden daher drei Verfahren gewählt, mit denen aus punktuellen Daten auf verschiedene Weise eine Karte der EC<sub>25</sub> erstellt werden kann: zwei Verfahren des Ordinary Kriging (Punkt- und Block-Kriging) mit lokaler Variogramm-Modellierung werden einer Nächst-Nachbar-Zuordnung (NN) ohne Interpolation gegenübergestellt. Bei letzterem Verfahren werden die Originaldaten der EM38-Messung mit einem 5m-Raster im GIS kombiniert. Den einzelnen Rasterzellen wird derjenige Messwert zugeordnet, der sich am dichtesten am jeweiligen Mittelpunkt der Rasterzelle befindet. Auf diese Weise erfolgt keinerlei Neuberechnung von EC<sub>25</sub>-Werten. Die drei Verfahren wurden sowohl auf die unveränderten Originaldatensätze der EC<sub>25</sub> als auch auf die mit Hilfe der Methode der gleitenden Variationskoeffizienten reduzierten Datensätze angewendet (CV3-Filterung; siehe Kapitel 3.4.3.2). Die durch Punkt-Kriging und NN-Zuordnung aus den CV3-gefilterten Daten erzeugten Karten sind in der Abb. 32 dargestellt. Während das Punkt-Kriging zu einer kontinuierlichen Änderung der Werte führt, macht die NN-Karte einen mosaikhaft-stufigen Eindruck. Die Karten des Block-Kriging gleichen denen des Punkt-Kriging sehr stark und werden im folgenden nicht gesondert dargestellt.

Die Abb. 33 gibt die Häufigkeitsverteilungen der ungefilterten Originaldaten und der daraus mit verschiedenen Methoden erzeugten Rasterkarten wieder.

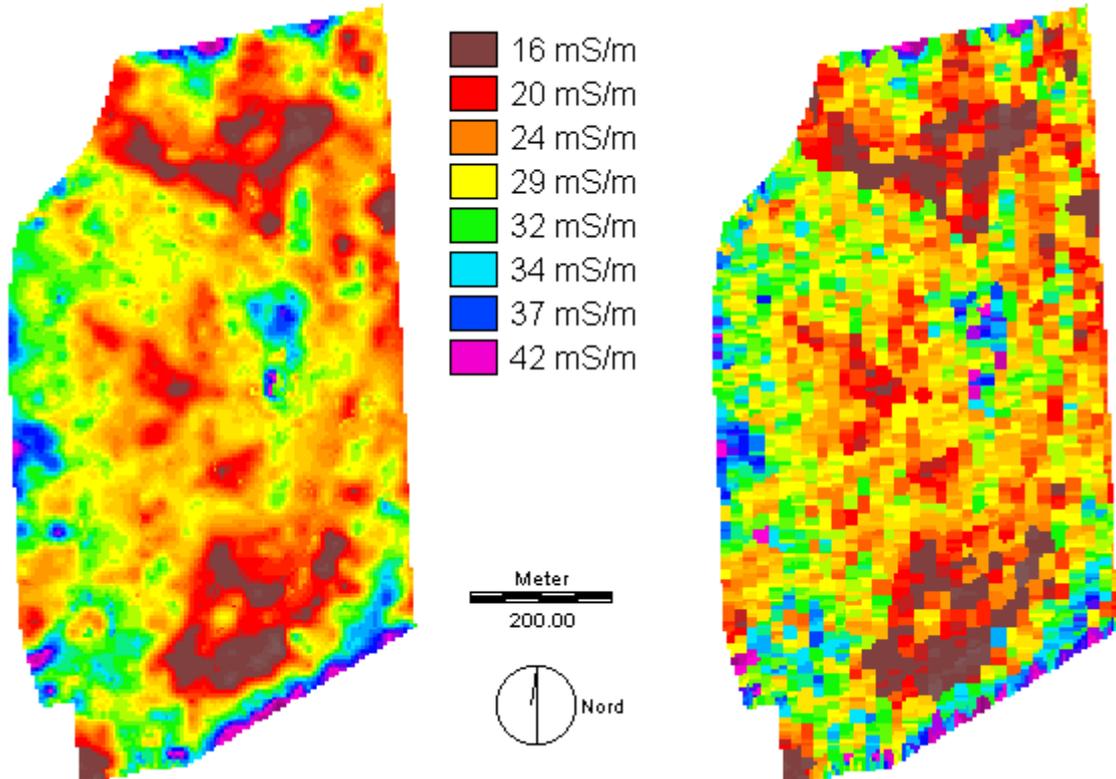


Abb. 32: Karten der ECa<sub>25</sub>-Werte für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts)

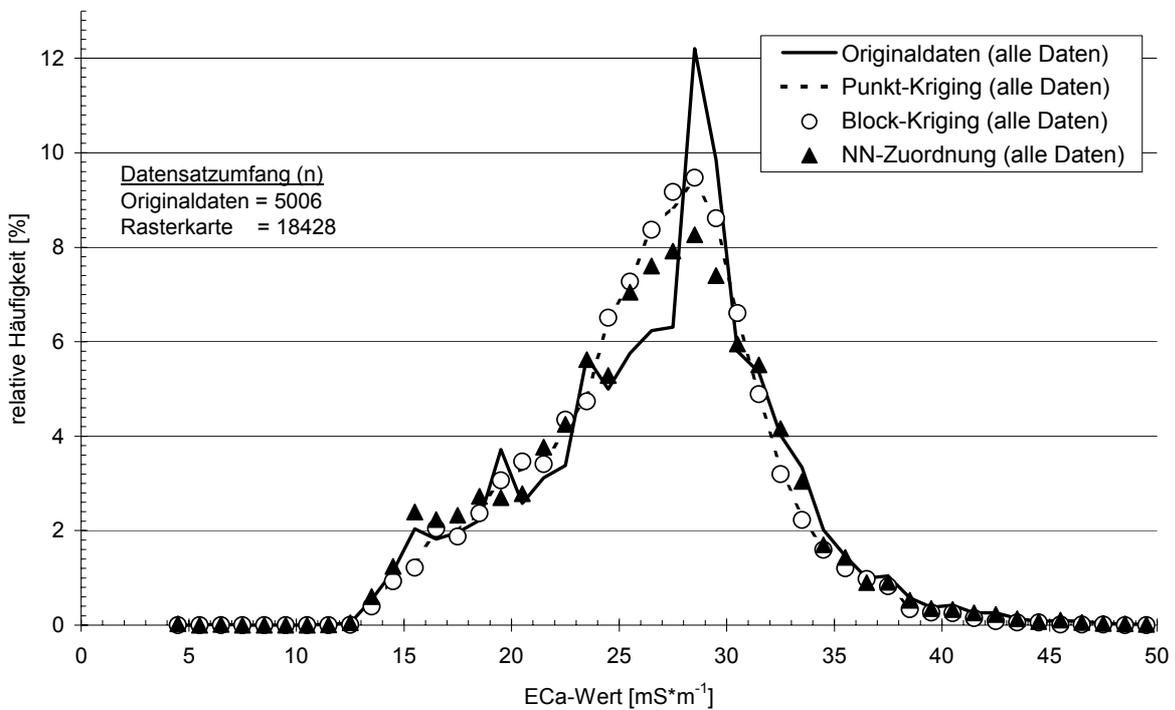
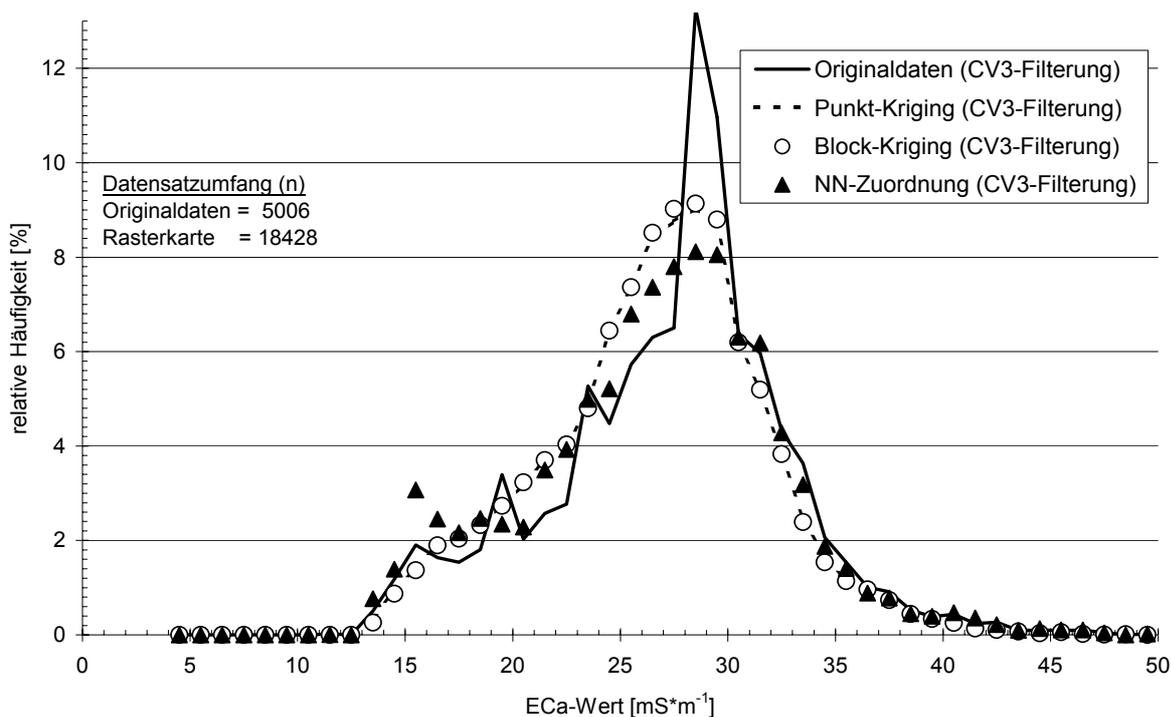


Abb. 33: Häufigkeitsverteilungen der ungefilterten ECa<sub>25</sub>-Originaldaten und der aus diesen Daten interpolierten bzw. über Nächst-Nachbar-Zuordnung erzeugten Rasterkarten (Feld 2600, Schlitten-Messung im März 2000)

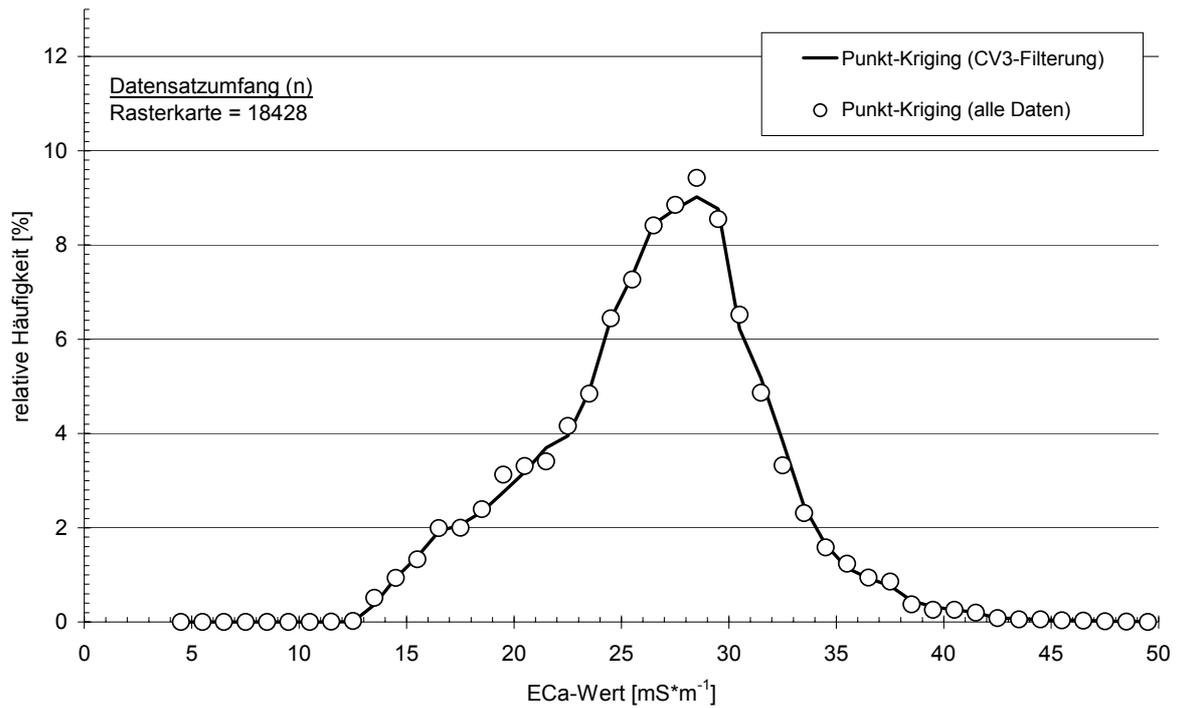
Die Ergebnisse des Punkt- und Block-Krigings gleichen sich weitgehend und geben die Multimodalität der Originaldaten nur noch in Ansätzen wieder. Im Vergleich mit den Originaldaten ist der lokale Gipfel bei 15-16 und 19-20  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$  um eine Klasse in Richtung höhere  $\text{ECa}_{25}$ -Werte versetzt. Zugleich erstreckt sich der Häufigkeitsgipfel bei 28-30  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$  der Originaldaten weiter in den Bereich mit geringeren Werten. Die Karte der NN-Zuordnung gleicht im Verlauf des Histogrammes deutlich besser dem Verlauf der Originaldaten. Jedoch verschwindet der Gipfel bei 19-20  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ , und auch der Modalwert bei 28-20  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$  wird deutlich in den Bereich geringerer  $\text{ECa}_{25}$ -Werte ausgedehnt.



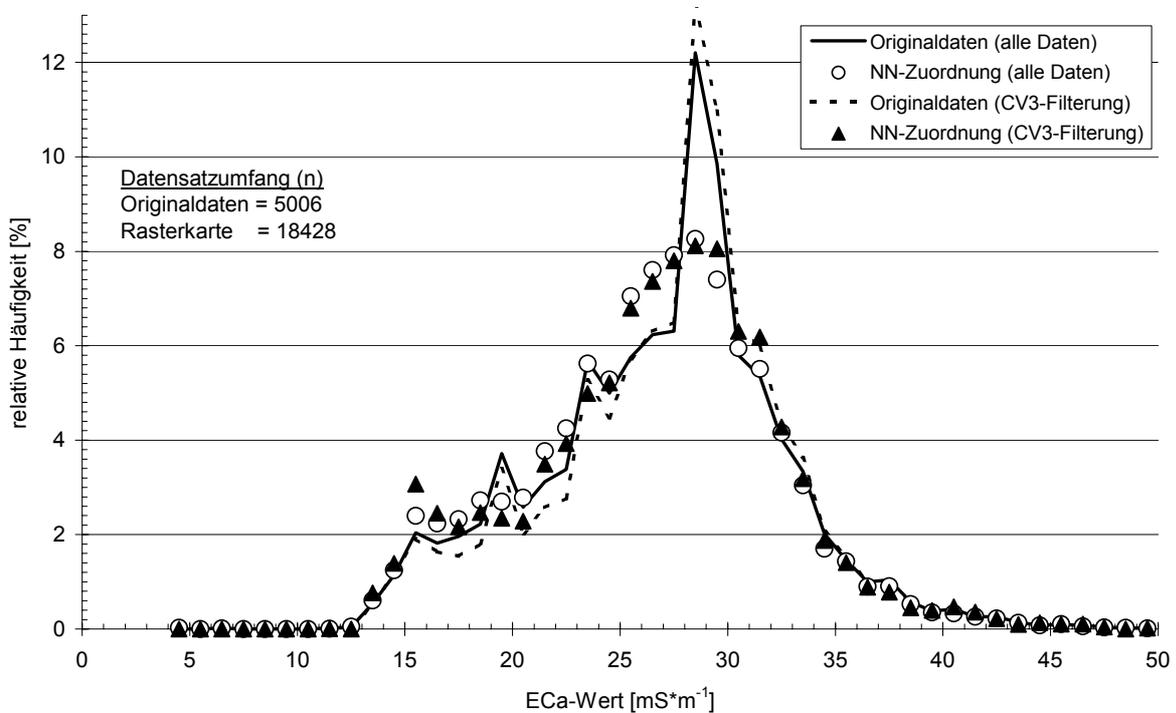
**Abb. 34: Häufigkeitsverteilungen der  $\text{ECa}_{25}$ -Originaldaten nach CV3-Filterung und der aus diesen Daten interpolierten bzw. über Nächst-Nachbar-Zuordnung erzeugten Rasterkarten (Feld 2600, Schlitten-Messung im März 2000)**

Die Abb. 34 verdeutlicht, dass dieselben Aussagen grundsätzlich auch bei der Verwendung des CV3-gefilterten Datensatzes Gültigkeit besitzen. Die Unterschiede zwischen den Interpolationsverfahren und der NN-Zuordnung sind jedoch etwas deutlicher sichtbar.

Während sich durch CV3-Filterung der Originaldaten und anschließende Kriging-Interpolation die Häufigkeitsverteilung der interpolierten Daten tendenziell weiter von der Multimodalität entfernt (Abb. 35), ist dies für die NN-Zuordnung nicht der Fall (Abb. 36). Abgesehen von dem Gipfel bei 19-20  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ , der bei beiden Rohdatensätzen durch die NN-Zuordnung geglättet wird, liegen die Kurven der NN-Zuordnung jeweils dichter bei denen der jeweiligen Ausgangsdaten. Durch CV3-Filterung und anschließende NN-Zuordnung wird jedoch der lokale Modalwert bei 15-16  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$  verstärkt und der bei 19-20  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$  etwas besser erhalten. Insgesamt sind die Unterschiede in der Anpassung an die Verteilungskurven der Ausgangsdaten nicht sehr groß.

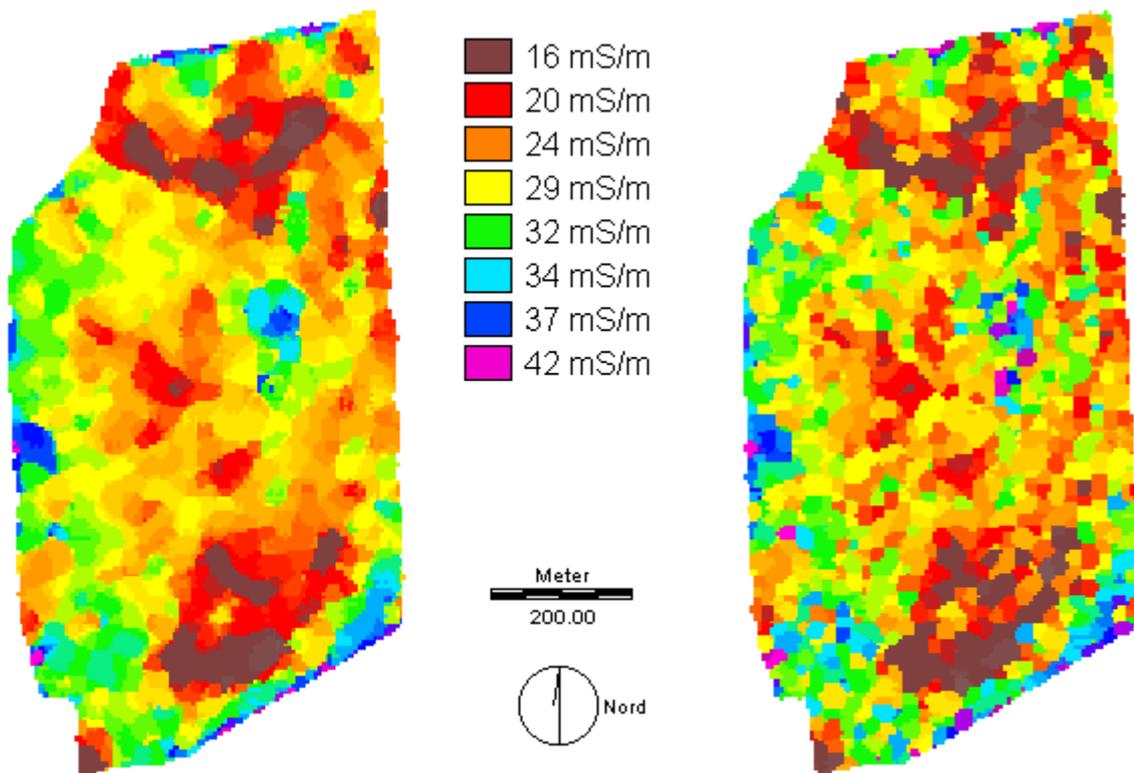


**Abb. 35: Häufigkeitsverteilungen der aus unterschiedlichen  $\text{ECa}_{25}$ -Originaldatensätzen mit Punkt-Kriging interpolierten Rasterkarten (Feld 2600, Schlitten-Messung im März 2000)**



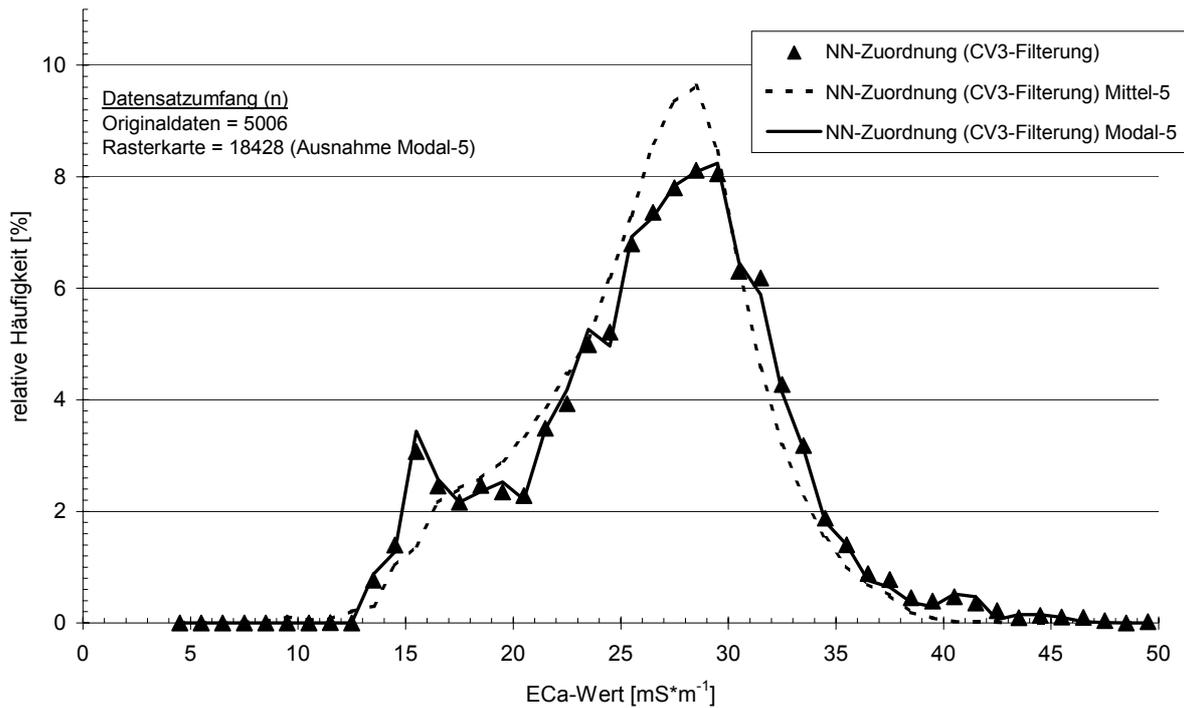
**Abb. 36: Häufigkeitsverteilungen der aus unterschiedlichen  $\text{ECa}_{25}$ -Originaldatensätzen mit NN-Zuordnung erzeugten Rasterkarten (Feld 2600, Schlitten-Messung im März 2000)**

Um das mosaikhaft-stufige Erscheinungsbild der NN-Karte (Abb. 32) nachträglich zu glätten, wurden die Werte der Rasterzellen auf ganze Zahlen gerundet und auf diese Karte im GIS eine Mittelwert- bzw. Modalwert-Filterung angewendet. Bei dieser GIS-Filterung wird für einen 5x5 Rasterzellen-Bereich der arithmetische Mittelwert bzw. der Modalwert ermittelt und dieser Wert dem mittleren der 25 Rasterzellen in einer neuen Karte zugeordnet. Anschließend wird der 5x5-Ausschnitt um eine Rasterzelle versetzt und die Prozedur wiederholt usw. Dieser GIS-Filter wurde auch auf die Punkt-Kriging-Karte angewendet. Das Ergebnis ist in der Abb. 37 wiedergegeben.

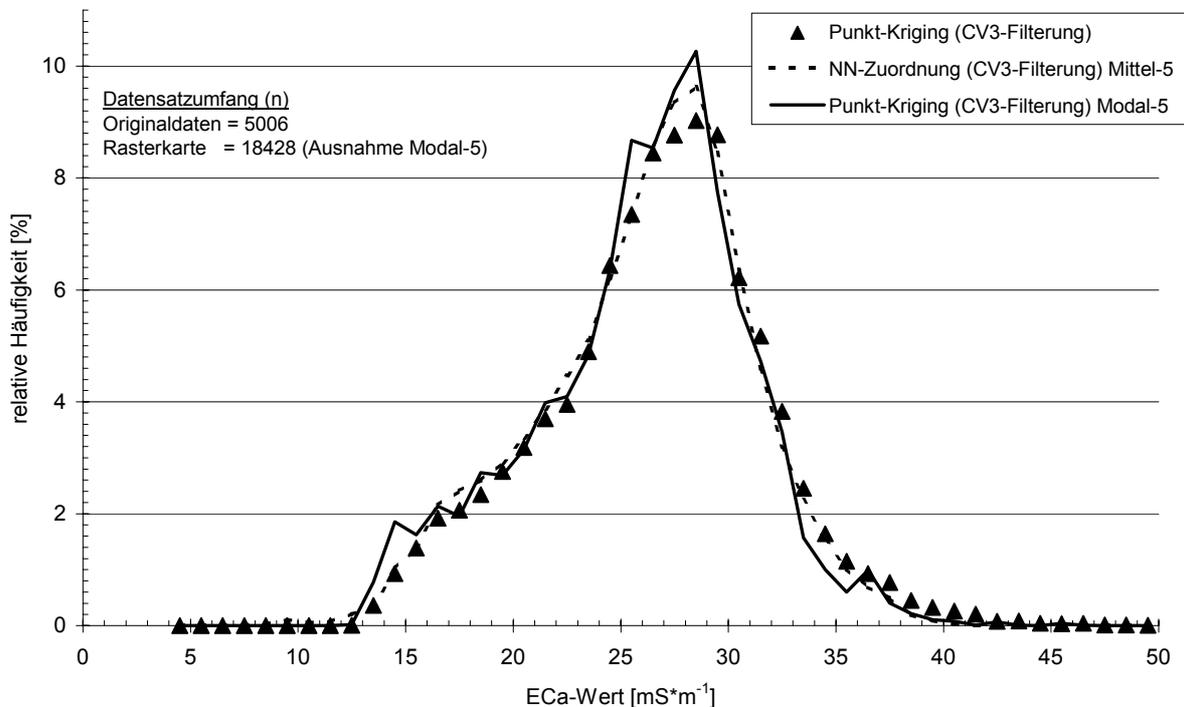


**Abb. 37: Karten der ECa<sub>25</sub>-Werte für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts) mit jeweils anschließender 5x5-Modalfilterung der Ganzzahl-Werte**

Die Abb. 38 zeigt die Häufigkeitsverteilungen dieser so modifizierten Karte für den Fall der NN-Zuordnung. In gleicher Weise sind die Ergebnisse der Filterung für die Karte des Punkt-Kriging-Ergebnisses in Abb. 39 wiedergegeben. Da auch außerhalb der Feldgrenzen liegende Bereiche, die den Wert 'Null' haben, in diese Filterung einbezogen werden, verringert sich für die Modalfilterung der Umfang der Grundgesamtheit geringfügig (siehe auch Tab. A-16).



**Abb. 38:** Häufigkeitsverteilungen der aus den CV3-gefilterten  $\text{ECa}_{25}$ -Originaldaten durch NN-Zuordnung erzeugten Rasterkarte sowie den im GIS mit verschiedenen Verfahren gefilterten Rasterkarten (Feld 2600, Schlitten-Messung im März 2000)



**Abb. 39:** Häufigkeitsverteilungen der aus den CV3-gefilterten  $\text{ECa}_{25}$ -Originaldaten durch Punkt-Kriging erzeugten Rasterkarte sowie den im GIS mit einer 5x5-Modalfilterung geglätteten Rasterkarten von Punkt-Kriging und NN-Zuordnung (Feld 2600, Schlitten-Messung im März 2000)

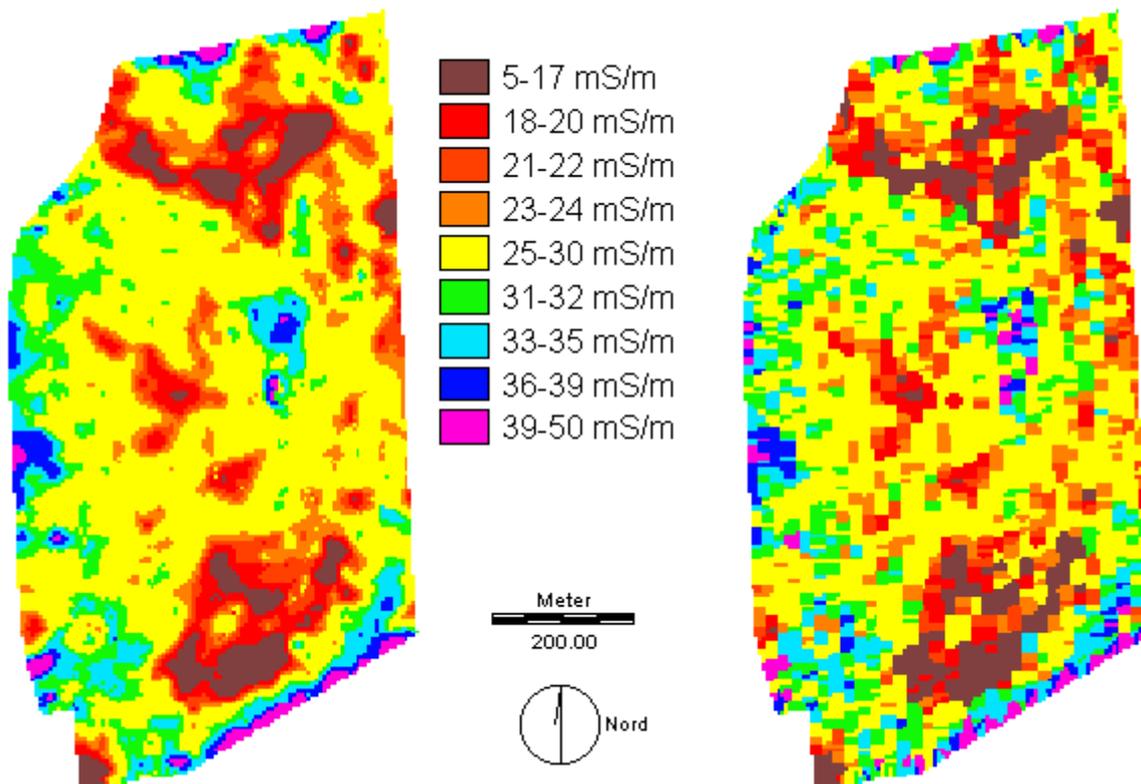
Aus der Abb. 38 wird deutlich, dass durch die 5x5-Modal-Filterung die diesem Arbeitsschritt zugrunde liegende Verteilungsform (NN-Zuordnung) fast vollständig erhalten bleibt. Im Bereich geringer  $ECa_{25}$ -Werte werden die lokalen Gipfel tendenziell verstärkt. Dies ist in den hohen  $ECa$ -Klassen nicht zu beobachten. Die 5x5-Mittelwert-Filterung nähert die Ausgangsverteilung (NN-Zuordnung) sehr stark der Verteilung der Punkt-Kriging-Daten an (Abb. 39). Von den lokalen Modalwerten bleibt keiner deutlich erhalten. Die Modalfilterung der Daten des Punkt-Kriging ergibt in der Häufigkeitsverteilung wieder leichte Ansätze einer Multimodalität.

In der Tab. A-16 sind einige statistische Kennzahlen der verschiedenen Datensätze (Originaldaten und Rasterdaten) zusammengestellt. In der Tab. A-17 sind diese statistischen Kenngrößen von ausgewählten Rasterkarten ins Verhältnis zu den jeweils verwendeten Ausgangsdaten gesetzt. Sowohl die Interpolation als auch die NN-Zuordnung reduzieren den Mittelwert und den Median um etwa zwei bzw. drei bis fünf Prozent. Während die Interpolationsverfahren die Streuung im Datensatz reduzieren, erhält bzw. erhöht die NN-Zuordnung diese Kenngröße der Verteilung. Die Minimalwerte und 2%-Quantile werden durch die Interpolationsverfahren zum Teil deutlich erhöht, die 98%-Quantile und Maximalwerte verringert. Dabei erhöht bzw. verringert das Block-Kriging- stärker als das Punkt-Kriging-Verfahren. Die Quantile unterscheiden sich nach der NN-Zuordnung um maximal 1.3%, die Extremwerte bleiben erhalten. Von den nachträglichen GIS-Filterungen der Rasterkarten mindern der Mittelwert-Filter (NN-Zuordnung) und der Modalfilter (Punkt-Kriging) die Streuung am stärksten. Die durch die Krige-Varianzen ausgedrückte Reststreuung der Schätzung ist für die Ergebnisse der Block-Kriging-Interpolation deutlich geringer als bei Verwendung des Punkt-Kriging (Tab. A-18). Durch die CV3-Filterung der Originaldaten und die anschließende Interpolation wird der mittlere und mediane Schätzfehler beim Punkt-Kriging weiter verringert, während sich für das Block-Kriging um etwa 10% erhöhte Krige-Varianzen ergeben (Tab. A-19). Über die oben beschriebene Kartenerstellung hinaus sind die Ganzzahl-Werte der erzeugten Karten (Abb. 32 & Abb. 37) nach der in der Tab. 17 angegebenen Klassifizierung zusammengefasst worden. Die Auswahl der neun Klassifizierungsbereiche orientiert sich an den lokalen Modalwerten in dem Histogramm der Originaldaten (Abb. 27). Das Ergebnis dieser Klassifizierung ist in der Abb. 40 und Abb. 41 dargestellt.

**Tab. 17: Zuordnungsbereiche der Ganzzahl  $ECa_{25}$ -Daten zu neuen  $ECa_{25}$ -Klassen**

$ECa_{25}$ -Ganzzahl-Bereich der Originaldaten [mS*m <sup>-1</sup> ]	neuer $ECa_{25}$ -Klassenwert [mS*m <sup>-1</sup> ]
5-17	16
18-20	20
21-22	22
23-24	24
25-30	29
31-32	32
33-35	34
36-39	38
39-50	41

Auf allen Karten ist deutlich zu erkennen, wie durch die Klassifizierung die kleinräumige Variabilität der  $ECa_{25}$  vermindert wird. Während auf der Punkt-Kriging-Karte größere zusammenhängende Bereiche entstehen, bleibt die kleinflächige Art der Variabilität bei der NN-Zuordnung deutlicher erhalten.



**Abb. 40: Karten der  $ECa_{25}$ -Werte für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts) mit jeweils anschließender Umklassifizierung (siehe Text & Tab. 17)**

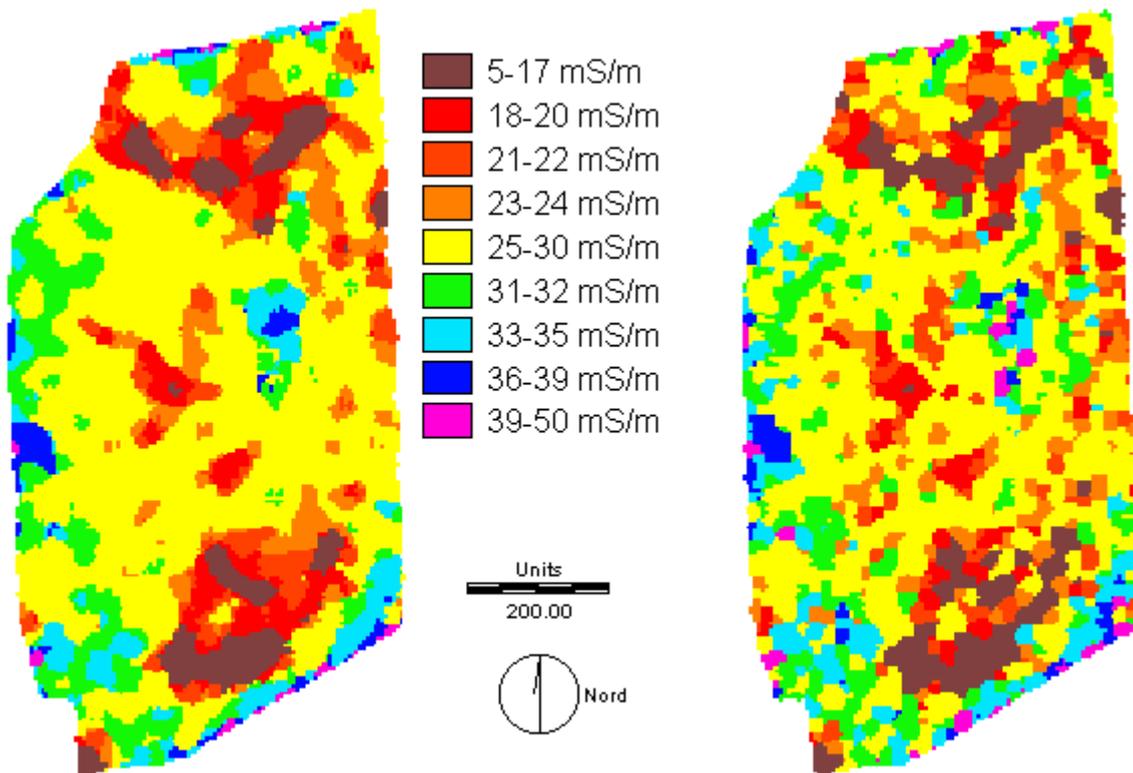
Um den visuellen Vergleich der Muster der erhaltenen Teilflächen zu erleichtern, wurden alle in den Abb. 32, Abb. 37, Abb. 40 und Abb. 41 dargestellten Rasterkarten vektorisiert. Dabei führte ein Unterschied von  $1 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$  zwischen zwei Rasterzellen zur Zuordnung zu getrennten Polygonen. Die Ergebnisse dieses Arbeitsschrittes sind im Anhang in den Abb. A-15 bis Abb. A-18 dargestellt. Zusätzlich ist zu jeder Karte die Anzahl der ausgewiesenen Teilflächen angegeben. Nimmt man die Anzahl der Teilflächen als Hinweis auf das Ausmaß der Generalisierung, so ist folgendes festzustellen:

Durch die Vektorisierung der Ganzzahl- $ECa_{25}$ -Daten der Punkt-Kriging-Karte werden relativ weniger Rasterzellen zu homogenen Einheiten zusammengefasst als bei der Karte der NN-Zuordnung. Aus den ursprünglich 18428 Rasterzellen werden 6076 Teilflächen (33%). Die NN-Zuordnung ergibt 2398 Polygone (13%). Die Strukturen unterscheiden sich deutlich (Abb. A-15).

Dieser Unterschied der Strukturen wird noch offensichtlicher, wenn vor der Vektorisierung eine Klassifizierung der Rasterdaten gemäß Tab. 17 durchgeführt wird (Abb. A-16). In diesem Fall wird für beide Verfahren der Kartenerstellung eine nahezu gleiche Anzahl an Teilflächen ausgewiesen (Punkt-Kriging: 918; NN-Zuordnung: 838).

Eine Modalfilterung der Ganzzahl-Karten mit anschließender Vektorisierung führt zu der Abb. A-17. Die Teilflächenanzahl ist für die NN-Zuordnung mit 1243 ungefähr um 20% geringer als für die Punkt-Kriging-Karte (1570). Das Muster der Variabilität ähnelt sich bei diesen Karten stärker und zeichnet sich durch tendenziell kompakte Kleinflächen aus.

Die Abb. A-18 zeigt die Grenzen der Teilflächen für den Fall, in dem die Ausgangskarten nach einer Modalfilterung der in der Tab. 17 angegebenen Klassifizierung unterzogen wurden. Während sich die Struktur der NN-Zuordnung weiterhin durch relativ kompakte Areale auszeichnet, ist für die Punkt-Kriging-Karte eine stärkere Zusammenfassung festzustellen. Nach diesem Schritt der Generalisierung weist die Karte des Punkt-Krigings weniger Teilflächen aus als die Karte der NN-Zuordnung.

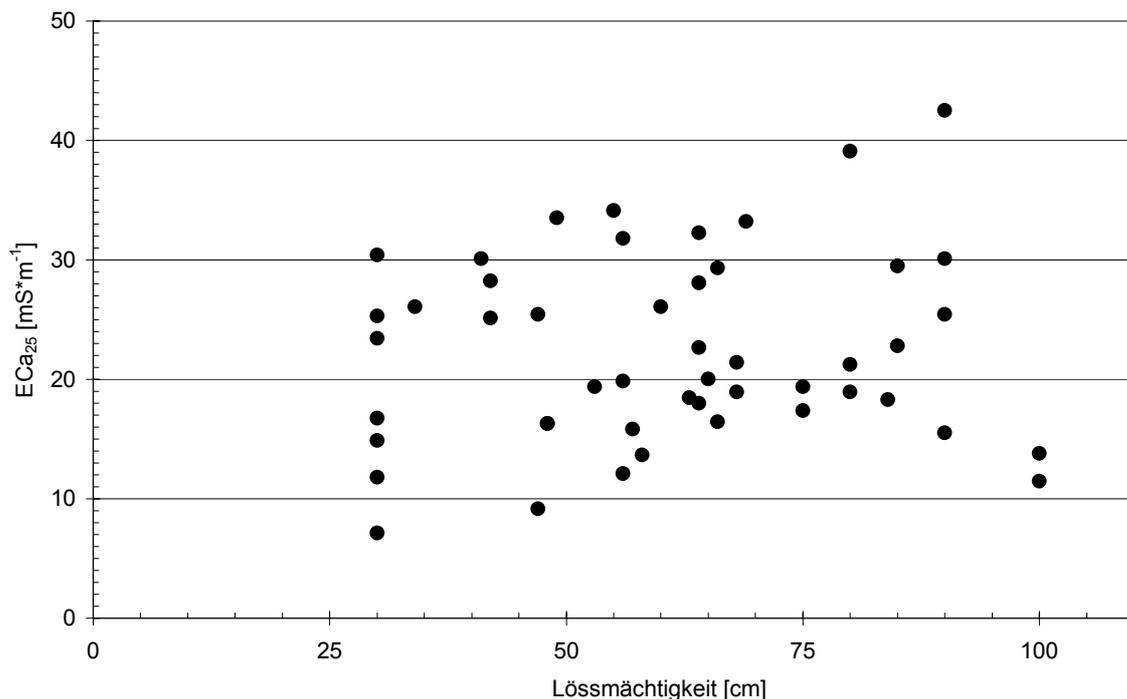


**Abb. 41: Karten der ECa<sub>25</sub>-Werte für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts) mit jeweils anschließender 5x5-Modalfilterung der Ganzzahl-Rasterkarten und Umklassifizierung (siehe Text & Tab. 17)**

### 3.4.3.5 Beziehungen zur Lössmächtigkeit und Horizontfolge

Um aus den  $ECa_{25}$ -Daten Rückschlüsse auf die zu Grunde liegenden Bodenmerkmale ziehen zu können, fand parallel zu den EM38-Messungen an ausgewählten Messpunkten mit dem Pürckhauer-Bohrstock die Bestimmung von Bodenprofilen statt.

Auf dem Feld '300' wurden an 49 Punkten die Horizontfolgen und Mächtigkeiten bis 1 m Bodentiefe ermittelt. Auf dem Feld 1000 nahm BODE (2001) im Rahmen einer Diplomarbeit in ähnlicher Weise eine Kartierung der Mächtigkeit des Lösses vor. Darüber hinaus wurde auf dem Feld 2600 nach Sichtung der  $ECa_{25}$ -Daten an verschiedenen Punkten mit dem Bohrstock bis 1 m Tiefe das Bodenprofil bestimmt. Wie die Abb. 42 zeigt, findet sich für das Feld '300' an 49 Transect-Punkten kein Zusammenhang zwischen der  $ECa_{25}$  und der Mächtigkeit der Lössdecke über Sand bzw. vereinzelt über Geschiebelehm.

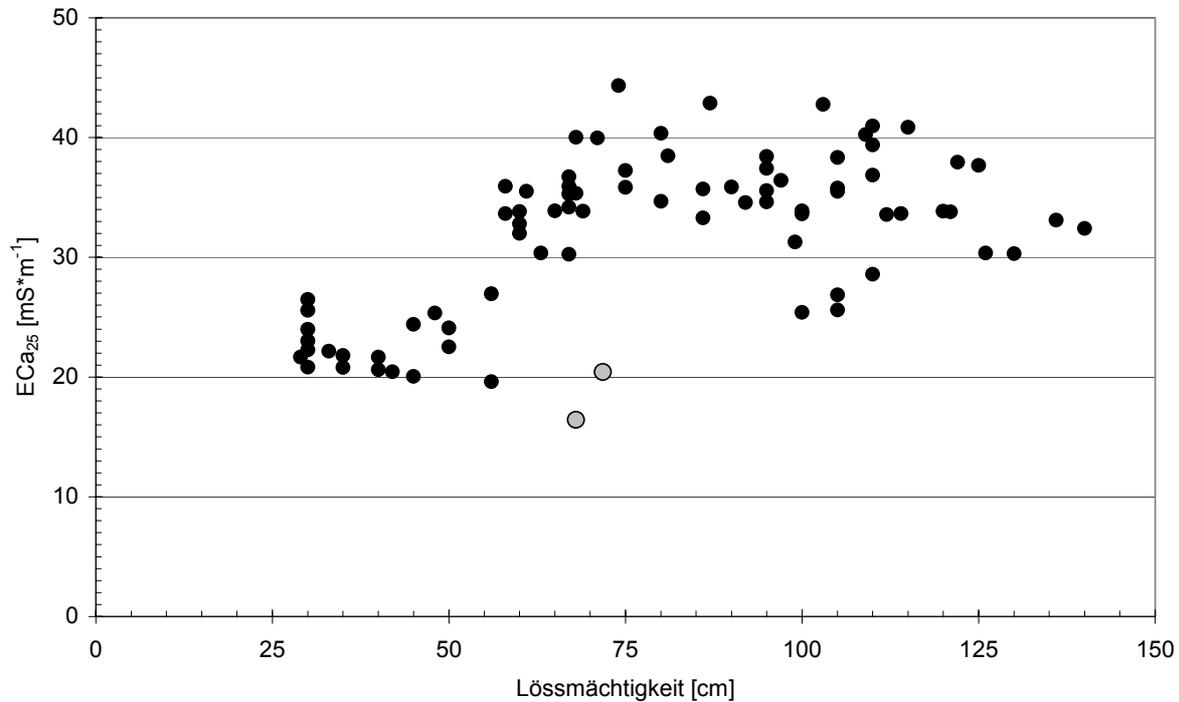


**Abb. 42: Zusammenhang zwischen der Lössmächtigkeit und dem  $ECa_{25}$ -Wert der Punkt-Messung mit dem EM38-Gerät im V-Modus des Jahres 1999 auf Feld '300' an 49 Transectpunkten**

Für die von BODE (2001) erhobenen Daten lässt sich dagegen eine schwache Abhängigkeit annehmen, die jedoch nur für eins der sechs von dem Autor kartierten Transecte gilt (Abb. 43). Für die anderen Transecte desselben Feldes finden sich zum Teil keine oder deutlich andere, aber insgesamt schwächer ausgeprägte Zusammenhänge zwischen den beiden untersuchten Merkmalen.

Unter Zuhilfenahme der Informationen über die Bodenprofile an einzelnen Messpunkten ist auf Feld '300' in einigen Fällen ein Zusammenhang zwischen der zunehmenden Mächtigkeit der Parabraunerden und steigenden  $ECa_{25}$ -Werten zu finden. Jedoch kommen ebenfalls hohe  $ECa_{25}$ -Werte vor, wenn dicht an der Geländeoberfläche Moränenlehm oder eine ausgeprägte Tonbänderung im Sandersand auftreten. Diese Böden haben aufgrund der geringeren Wasserspeicherfähigkeit eine deutlich geringere Ertragsfähigkeit im Vergleich zu Parabraunerden aus Löss und stellen grundsätzlich andere Böden dar.

An einzelnen Beprobungsorten finden sich  $ECa_{25}$ -Werte, die deutlich geringer sind, als es allein aufgrund der jeweiligen, meist überdurchschnittlichen Lössmächtigkeit zu vermuten gewesen wäre. Diese Standorte zeichnen sich dadurch aus, dass in den Böden unterhalb des heutigen  $A_p$ -Horizontes ein fossiler  $A_p$ - bzw.  $A_h$ -Horizont zu finden ist. Diese Böden liegen häufig in Senken.

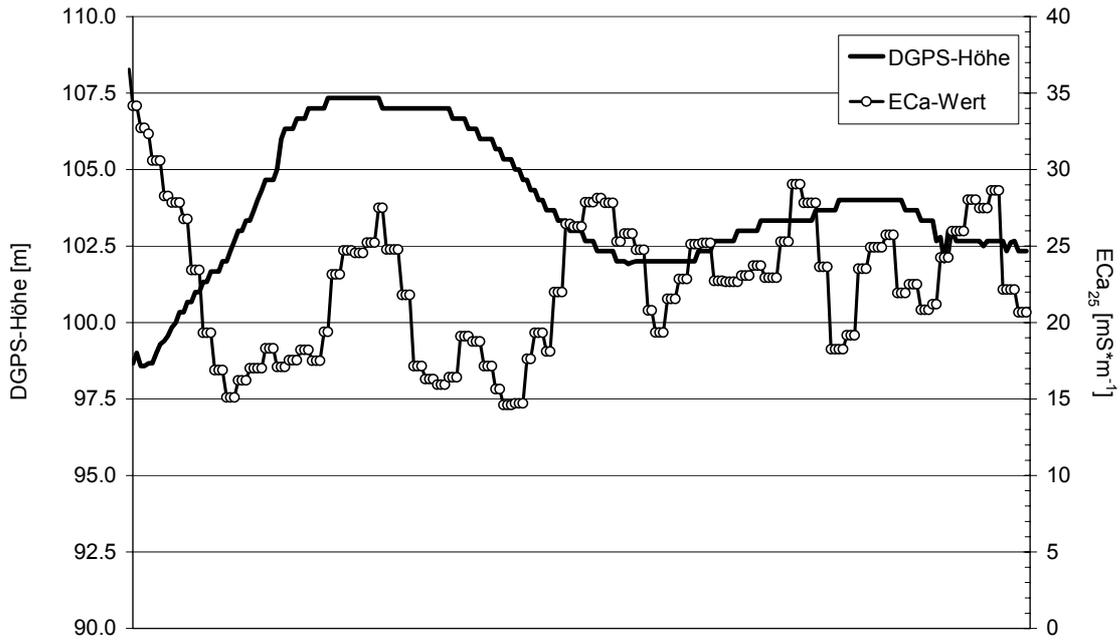


**Abb. 43: Zusammenhang zwischen der Lössmächtigkeit und dem  $ECa_{25}$ -Wert der Schlitten-Messung mit dem EM38-Gerät im V-Modus des Jahres 2000 auf Feld 1000 an 81 Transectpunkten (Daten nach BODE (2001))**

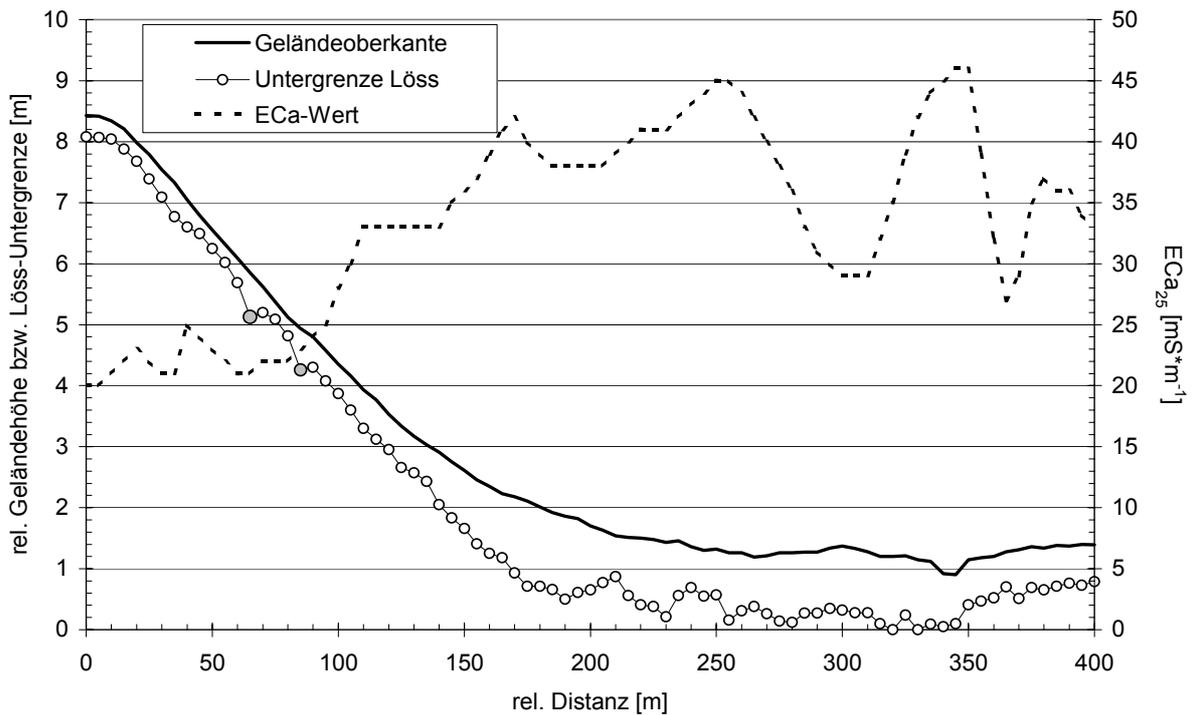
In der Abb. 44 sind der Verlauf der Geländeoberfläche (DGPS-Höhenmessung) und die  $ECa_{25}$ -Daten einer Fahrspur auf dem Feld 2600 wiedergegeben. In der Mitte der Abbildung ist deutlich die zunächst mit abnehmender Geländehöhe ansteigende  $ECa_{25}$  zu erkennen. Diese ist im Gelände von zunehmend mächtiger werdenden Parabraunerden begleitet.

Im Tiefpunkt der Senke fällt der Leitfähigkeitswert dann ab und erreicht ein Niveau, welches den nahezu Löss-freien oberen Hangschultern und Kuppenbereichen gleicht, obwohl in der Senke eine über 150 cm mächtige Lössdecke zu finden ist. Im Tiefpunkt der Senke tritt im Unterboden bei ca. 60 cm Tiefe ein fossiler  $A_h$ -Horizont mit einer Mächtigkeit von 15 cm auf. Auf der linken Kuppe in der Abb. 44 ist ein Bereich mit hohen  $ECa_{25}$ -Werten zu erkennen. Dort befinden sich 60-70 cm mächtige Lössdecken über Sand. Links und rechts von dieser lokalen Lössmulde tritt der Sand an die Oberfläche.

Ein ähnlicher Zusammenhang zwischen Geländehöhe und  $ECa_{25}$ -Wert lässt sich an den Transect-Daten von BODE (2001) erkennen (Abb. 45). Vor allem die beiden hangparallel verlaufenden Lössmulden (Punkte bei 65 und 85 m relativer Distanz; in der Abbildung leicht vergrößert und grau unterlegt) zeigen das oben beschriebene Senkenphänomen ebenfalls. Die  $ECa_{25}$ -Werte sind im Verhältnis zur vorgefundenen Lössmächtigkeit stark verringert, im Unterboden findet sich fossiles  $A_h$ -Material. Diese beiden Punkte sind in der Abb. 43 vergrößert und grau unterlegt dargestellt.



**Abb. 44: DGPS-Höhenangabe und ECa<sub>25</sub>-Werte einer ca. 450 m langen Spur auf dem Feld 2600 (Schlitten-Messung 2000, V-Modus)**

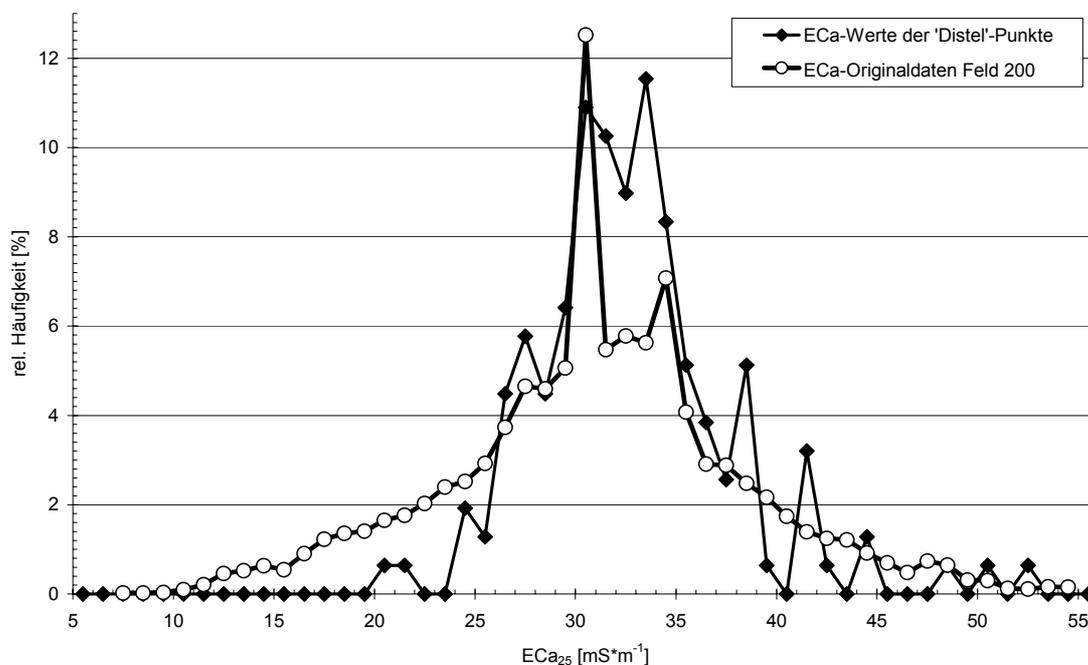


**Abb. 45: ECa<sub>25</sub>-Werte, die Geländehöhe und die Untergrenze der Lössauflage von 81 Transectpunkten auf dem Feld 1000 (EM38-Schlitten-Messung 2000, V-Modus) (leicht verändert nach BODE (2001))**

### 3.4.3.6 Vergleich der ECa-Daten mit einer Distelkartierung

Während der Weizenernte im Sommer 2000 wurde von den beiden Fahrern der Mähdröschler parallel zu den Erntearbeiten eine Kartierung der Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense* (L.) Scop.) durchgeführt. Die in den Drescherkabinen montierten DGPS-Empfänger bieten die Möglichkeit, vier Tasten mit beliebigen Bezeichnungen zu versehen. Drückt der Fahrer eine dieser Tasten, wird im DGPS-Empfänger die Bezeichnung und die aktuelle Position gespeichert. Eine dieser Tasten war mit der Bezeichnung 'Distel' versehen.

Auf diese Weise wurden die jeweiligen DGPS-Ortskoordinaten gespeichert, wenn eine Distel von der Haspel des Schneidwerkes erfasst wurde und der Fahrer nicht mit anderweitigen Kontroll- oder Steuerungsaufgaben befasst war. Diesen 'Distel'-Punkten werden im GIS die direkt benachbarten ECa<sub>25</sub>-Werte zugeordnet. In Abb. 46 sind die 154 ECa<sub>25</sub>-Werte der 'Distel'-Punkte als Häufigkeitsverteilung dem Histogramm des Gesamtfeldes (Rohdaten) gegenüber gestellt. Beide Verteilungskurven sind multimodal. Einzelne Gipfel sind in der 'Distel'-Kurve noch stärker hervorgehoben.



**Abb. 46: Häufigkeitsverteilungen der ECa<sub>25</sub>-Rohdaten und der ECa<sub>25</sub>-Werte an 154 während des Mähdrösches kartierten 'Distel'-Punkten (*Cirsium arvense* (L.) Scop.) auf dem Feld 200 (EM38-Schlitten-Messung im März 2000, V-Modus)**

Bei ECa<sub>25</sub>-Werten von weniger als 27 mS\*m<sup>-1</sup> wurden nur sehr wenige Disteln kartiert. Im Bereich von höheren ECa<sub>25</sub>-Werten finden sich die lokalen Modalwerte der 'Distel'-Kurve meist zwischen den lokalen Gipfeln der Verteilungskurve der ECa-Originaldaten. Die Modalwerte sind in dem Bereich nicht mehr deutlich ausgeprägt.

### 3.4.4 Diskussion

Die Diskussion der Untersuchungsergebnisse ist in drei Abschnitte gegliedert. Zunächst werden die Besonderheiten der Häufigkeitsverteilungen der  $EC_{a25}$ -Werte sowie die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Kartenerstellung diskutiert. Anschließend folgt der Versuch, generelle Zusammenhänge zwischen den  $EC_{a25}$ -Daten und den Informationen über die Boden- und/oder Standort aufzuzeigen. Einige Aspekte, die bei der Erhebung der Daten im Feld zu beachten sind, stehen am Ende dieses Abschnittes.

Damit sollen Antworten auf die drei folgenden Fragen gegeben werden, die sich bei der Nutzung des EM38-Gerätes zur landwirtschaftlichen Standorterkundung ergeben:

- 1) Was ist bei der Erstellung von Karten aus  $EC_{a25}$ -Punktdaten zu beachten?
- 2) Können die  $EC_{a25}$ -Werte in Bezug auf den Boden oder Standort interpretiert werden?
- 3) Was ist bei der Datenerhebung zu berücksichtigen?

#### Skalenniveau der Originaldaten und Definition von ECa-Kontrasten

Die Abb. 27 und Abb. 29 haben folgendes deutlich gemacht: Bei der  $EC_{a25}$  dieser Untersuchung handelt es sich grundsätzlich um eine kardinal skalierte Messgröße, d.h. es sind alle Werte zwischen dem Minimal- und dem Maximalwert möglich (zu den verschiedenen Skalenniveaus siehe auch BORTZ ET AL. (1990) S.61/62). Dies ist aufgrund des Messprinzips zu erwarten gewesen. Jedoch zeigen die Abbildungen auch, dass die Häufigkeit des Auftretens einzelner Werte sehr unterschiedlich ist. Dadurch entsteht die multimodale Form der Verteilung. Obwohl also alle Werte messtechnisch gesehen vorkommen, besitzen einige  $EC_{a25}$ -Werte eine höhere Wahrscheinlichkeit des Auftretens. Die  $EC_{a25}$ -Grundgesamtheit eines Feldes ist demnach aus unterschiedlich umfangreichen Sub-Populationen zusammengesetzt. Diese Sup-Populationen haben jeweils einen mehr oder minder typischen Mittelwert und weisen nur eine verhältnismäßig geringe Streuung auf, was aus den Fahrspurdaten ersichtlich ist (Abb. 29).

Mit dem vorgestellten CV3-Verfahren der Originaldaten-Filterung kann diese Multimodalität noch verstärkt werden (Abb. 30). Dabei berücksichtigt das Filterverfahren mit dem über drei Werte gleitenden Variationskoeffizient eine statistische Kenngröße, mit der Sub-Populationen getrennt werden können. Auf diese Weise kann vermieden werden, dass subjektive Einschätzungen darüber, was ein 'landwirtschaftlich relevanter'  $EC_{a25}$ -Unterschied ist, einen zu starken Einfluss gewinnen. Es werden  $EC_{a25}$ -Werte herausgefiltert, wenn sie im Vergleich zu den beiden direkt benachbarten Werten relative Streuungen ergeben, die deutlich oberhalb der Messgenauigkeit des EM38 liegen. Dadurch können flächenmäßig relativ unbedeutende Übergangswerte oder lokale Messfehler auf Einzelpunktebene gleichermaßen aus den Rohdaten eliminiert werden. Die Wahl des gleitenden Variationskoeffizienten von 10% als Grenzkriterium für den Ausschluss oder die Beibehaltung der jeweiligen Originaldaten wird folgendermaßen begründet: Die in der Abb. 29 dargestellten, relativ konstanten  $EC_{a25}$ -Bereiche haben gleitende Variationskoeffizienten von deutlich kleiner 5%, während sich in

den Bereichen starker Änderungen Werte größer 12% errechnen. Ein leicht Stufen-förmiger Verlauf der  $ECa_{25}$ -Werte, wie er z.B. an den Punkten 2775 & 2776 und 2863 & 2864 zu beobachten ist, oder sehr kleinräumig auftretende Extrema, wie z.B. im Punkt 2815 gegeben, werden als eine Grenzsituation betrachtet, die auch nach der Filterung erhalten bleiben soll. Durch Vorversuche mit verschiedenen großen Variationskoeffizienten als Ausschluss-Kriterium erwies sich der Wert 10% als geeignet, um diese kleinräumigen Besonderheiten zu erhalten. Erfolgt die Änderung der  $ECa_{25}$ -Werte nicht schlagartig (Abb. 29, Punkt-ID 2802 & 2803), sondern über einen längeren Zeitraum (Abb. 29, Punkt-ID 2853 bis 2856), so bleiben die Messwerte erhalten. Hierdurch wird auch die jeweilige flächenhafte Bedeutung dieser Daten berücksichtigt und so bleibt die Flächen-Repräsentativität des Datensatzes grundsätzlich erhalten. Zu berücksichtigen ist, dass das Korrekturverfahren zeitlich nacheinander aufgezeichnete Werte und keine räumlichen Distanzen verwendet.

Voraussetzung für die Anwendung dieser Filter-Routine ist, dass sich die Fahrgeschwindigkeit während der Datenaufzeichnung nicht stark ändert. Bei insgesamt geringerer Fahrgeschwindigkeit oder höherer Aufzeichnungsrate ist dieses Filterkriterium wahrscheinlich in der hier vorgestellten Form nicht mehr geeignet. Diese grundsätzliche Problematik diskutiert WEBSTER (2000) als Skalenproblem der Variabilität. In dieser Untersuchung wurden die Daten mit der Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet, was bei 15-20  $km \cdot h^{-1}$  Fahrgeschwindigkeit ungefähr 5 m Abstand zwischen den Messpunkten bedingt. In der Regel wurden durch die CV3-Filterung die  $ECa_{25}$ -Werte aus Übergangsbereichen eliminiert, die eine Ausdehnung von wenigstens 10-15 Metern hatten.

Durch die Konzentration auf die relativ stabilen  $ECa$ -Bereiche und Eliminierung der Übergangswerte bei kleinräumigem Wechsel, erlangen die Daten wahrscheinlich eher ein ordinal-skaliertes Niveau ('größer' oder 'kleiner'). Betrachtet man die in Kapitel 3.4.3.5 aufgeführten schwachen, widersprüchlichen oder gar nicht vorhandenen Beziehungen der (quantitativen)  $ECa$ -Daten zu den kartierten Lössmächtigkeiten, so liegt der Schluss nahe, selbst das ordinale Niveau zu verwerfen, und die  $ECa$ -Werte grundsätzlich als qualitative Daten (Nominalskala) aufzufassen. Obwohl verschiedene Autoren Angaben zu der Verteilungsform der jeweils gefundenen  $ECa$ -Werte machen, sind systematische Untersuchungen zur Entstehung dieser Verteilungen bzw. Überlegungen zum nutzbaren Skalenniveau nicht zu finden (BOBERT ET AL. (2001), DOMSCH & GIEBEL (2001), HENDRICKX ET AL. (1992), KING ET AL. (2001)). Auch finden sich keine vergleichbaren graphischen Darstellungen.

Die Beschränkung auf ein nominales Skalenniveau bedeutet, dass die  $ECa_{25}$ -Daten im vorliegenden Fall lediglich dazu genutzt werden, relativ homogene Areale der apparenten elektrischen Bodenleitfähigkeit innerhalb des Feldes abzugrenzen. Die absolute Größenordnung der  $ECa_{25}$ -Werte hat bei diesem Vorgehen keine weitere Bedeutung, was im deutlichen Gegensatz zu der Auffassung von GILBERTSSON (2001) steht, der absolute  $ECa$ -Werte und deren Interpretation als Standortfaktoren als das Ziel des EM38-Einsatzes in der Landwirtschaft sieht. Auch DOMSCH & GIEBEL (2001) haben den Anspruch, absolute  $ECa$ -Werte vom Boden her zu erklären. Dagegen findet sich das hier praktizierte Vorgehen in Übereinstimmung mit z.B. KING ET AL. (2001), LUND ET AL. (1998), LÜCK & EISENREICH (2001) oder WILLIAMS & HOEY (1987). Bei diesen Arbeiten wird betont, dass das Ziel des EM38-Einsatzes die Ausweisung homogener Areale sei. Auch ZALASIEWICZ ET AL. (1985)

betonen, dass die EM-Methode zur Grenzziehung genutzt werden sollte und sich die besten Ergebnisse dort erzielen lassen, wo starke Kontraste vorlägen. Über die Definition eines 'Kontrastes' machen die Autoren keine Angaben, führen aber an, dass 'mittlere Leitfähigkeiten' schwierig zu kartieren seien. Somit ist ein 'Kontrast' bei diesen Autoren wahrscheinlich als absoluter ECa-Unterschied zu verstehen. Auch BRUS ET AL. (1992) merken an, dass sich lokale Wechsel mit dem EM38-Gerät kartieren lassen.

Mit dem hier vorgestellten Verfahren der CV3-Filterung wird der Vorschlag gemacht, den Begriff 'Kontrast' auf verteilungstheoretischer Basis als relative Größe zu definieren.

### Optimale Kartenerstellung

Für die Erstellung einer ECa<sub>25</sub>-Karte aus punktuell erhobenen Originaldaten wurde untersucht, ob die Übergänge zwischen Arealen mit unterschiedlichen Werten kontinuierlich oder diskret sind. Die bereits diskutierte Multimodalität der Originaldaten und die Ergebnisse der Fahrspuranalyse machen deutlich, dass die ECa<sub>25</sub>-Daten im Untersuchungsgebiet sowohl mit abrupten als auch kontinuierlichen Übergängen auf den Feldern variieren. Damit liegt der von BOUCNEAU ET AL. (1998) beschriebene Fall vor, dass beide Typen des Überganges in der Realität gemeinsam auftreten können.

Daher ist es für die automatisierte Erstellung von ECa-Karten notwendig, die Art des Wechsels jeweils lokal zu erkennen. Kontinuierliche Übergänge werden durch Interpolation optimal abgebildet, diskrete Übergänge legen als optimales Verfahren der Kartenerstellung eine Klassifikation nahe (WEBSTER (2000)). Da aufgrund der wechselnden Art der Übergänge die Voraussetzung der Stationarität der Daten auf Feldebene nicht erfüllt ist, kann ein Kriging allenfalls auf lokaler Ebene erfolgen (WEBSTER (2000)). Grundsätzlich leistet das Programm VESPER die von BOUCNEAU ET AL. (1998) geforderte lokale Schätzung der Variogramm-Parameter. Jedoch sind die Bereiche der relativen Wertekonstanz zum Teil so klein, dass eine lokale Variogramm-Berechnung an der ungenügenden Messpunktzahl scheitert. Obwohl sich mit dem Ordinary-Kriging eine 'ansprechende' Karte erzeugen lässt, ist es fraglich, ob die Karte die Wirklichkeit der ECa<sub>25</sub>-Werte korrekt widerspiegelt. Wie aus den Darstellungen der Rasterkarten (Abb. 32, Abb. 37, Abb. 40, Abb. 41) und den vektorisierten Verläufen der Grenzlinien (Abb. A-15, Abb. A-16, Abb. A-17, Abb. A-18) erkennen lässt, unterscheiden sich die durch Interpolation oder NN-Zuordnung erstellten Karten deutlich. Die Ergebnisse des Block-Kriging ähneln denen des Punkt-Kriging sehr, wie aus den Verteilungskurven zu ersehen ist. Das Verfahren wirkt tendenziell noch stärker glättend, was bei Originaldaten wünschenswert ist, die bereits mit größeren Messfehlern behaftet sind. Aufgrund der hohen Genauigkeit des EM38 ist dies hier nicht der Fall. Daher ist von der Anwendung eines Block-Kriging bei der Erstellung von ECa-Karten, die mit entsprechenden Methoden erhoben werden, abzuraten.

Meines Erachtens scheidet ein Interpolationsverfahren für die Erstellung von optimalen ECa<sub>25</sub>-Karten aus, wenn die Verteilung der Originaldaten Multimodalität aufweist und in exemplarischen Fahrspuranalysen häufig abrupte Übergänge zwischen Bereichen mit relativer Wertekonstanz auftreten. Das vorgestellte CV3-Verfahren zur Filterung der Originaldaten mag bei der Beurteilung des dominanten Übergangstyps behilflich sein. Wird die Multimodalität des Originaldaten-Histogrammes durch die Filterung deutlich verstärkt, muss

die Datenerfassung entweder mit höherer räumlicher Auflösung wiederholt werden (Fahrspurabstand, Fahrgeschwindigkeit, Aufzeichnungsfrequenz) oder es sollte vom Kriging abgesehen werden. Bis zu einer genaueren Definition der 'deutlichen Verstärkung' durch nachfolgende Arbeiten, muss diese Entscheidung von der bearbeitenden Person getroffen werden.

Alternativ zu Interpolationsverfahren bietet sich als Verfahren der Kartenerstellung die Nächst-Nachbar-Zuordnung ohne Interpolation an. Um den durchaus wünschenswerten glättenden Effekt des Kriging oder anderer Interpolationsverfahren zu ersetzen, können die ECa-Karten der NN-Zuordnung einer Rundung auf Ganzzahlen oder einer nachträglichen Klassifizierung unterzogen werden. Die Klassifizierung sollte dabei die Information des Histogramms der Originaldaten berücksichtigen, wie dies exemplarisch in Tab. 17 demonstriert ist. Möglicherweise sind Klassifizierungen mit alternativen Methoden besser als das vorgestellte, sehr pragmatische Verfahren. Zu denken ist hier zum Beispiel an eine Anwendung der Fuzzy-Logik. Bislang sind mir keine alternativen Klassifizierungsmethoden im Zusammenhang mit der Erstellung von ECa-Karten aus der Literatur bekannt, die Informationen aus den Histogrammen der Originaldaten berücksichtigen.

Die hier praktizierte Vorgehensweise zur Erstellung von ECa-Karten (NN-Zuordnung, Modalfilterung, Histogramm-basierte Klassifizierung) berücksichtigt sowohl die geometrischen als auch die spektralen Informationen der Originaldaten auf einem hohen Niveau, was aus den ähnlichen Verläufen der Histogramme der verschiedenen Aufbereitungsschritte ersichtlich ist. Da der lokale Modalwert bei 19-20 mS\*m<sup>-1</sup> durch die Kartenerstellung nahezu verschwindet, kann geschlossen werden, dass diese Werte nur sehr kleinräumig vorkommen. Eine Überprüfung der räumlichen Verteilung dieser Originaldaten bestätigte diesen Schluss. Solche einzeln auftretenden Werte entsprechen dem Punkt Nr. 2815 in der Abb. 29.

Das Vorgehen der NN-Zuordnung unterliegt im Gegensatz zum Kriging keinen weiteren Annahmen über die Verteilung der Daten und wäre als verteilungsfreie, nicht-interpolierende Methode der Kartenerstellung zu bezeichnen.

Für zukünftige Anwendungen im Standort-spezifischen Ackerbau wäre es wünschenswert, zu den erstellten Standortkarten auch eine Angabe über die Verlässlichkeit der Kartendaten zu erhalten. Dadurch können Entscheidungsprozesse besser unterstützt werden. Für die nicht-klassifizierte Karte, die mit dem Verfahren der NN-Zuordnung erstellt wurde, wäre die Entfernung des ECa<sub>25</sub>-Originalpunktes zum jeweiligen Mittelpunkt der Rasterzelle als ein solches Maß denkbar. Jedoch ist aufgrund der hohen Empfindlichkeit des EM38 und der zum Teil extrem kleinräumigen Variabilität des Merkmals wahrscheinlich nur ein Bereich von wenigen Metern (ca. halber Messpunktabstand in Fahrtrichtung, d.h. hier ca. 2-3m) als vertrauenswürdig anzusehen. Eventuell lassen sich bessere Schätzer für die Verlässlichkeit unter Berücksichtigung der benachbarten Zellenwerte oder des gleitenden Variationskoeffizienten der Originaldaten entwickeln. Dies bleibt zukünftigen Arbeiten vorbehalten. Die lokale Verlässlichkeit der ECa-Karte sollte auch bei der nachträglichen Beprobung zur bodenkundlichen Überprüfung von ECa-Daten berücksichtigt werden.

Die gefundenen maximalen Autokorrelationslängen von 24-30m sind zu bedenken, wenn mit einer Datenerhebung gearbeitet werden soll, welche die im Bestand angelegten Pflegespuren

nutzt. In dieser Arbeit betrug der Abstand der Fahrgassen voneinander 18m. In der Abb. A-15 ist zu erkennen, dass ein Grossteil der Polygon-Grenzen bei dem Verfahren der NN-Zuordnung in West-Ost-Richtung, also quer zu den Fahrgassen, ermittelt wird. Dieses Muster läßt sich erst durch Schritte der Klassifizierung oder Filterung zumindest teilweise auflösen (Abb. A-16, Abb. A-17, Abb. A-18). Das deutet darauf hin, dass im vorliegenden Fall der Fahrgassenabstand von 18m die Ausdehnung der kleinräumigen ECa-Variabilität noch nicht übertraf. Er lag aber bereits in ähnlichen Größenordnungen. Die räumliche Erstreckung homogener ECa-Bereiche in der Messspur von sechs bis acht Punkten, was einer Länge von ca. 30-40 m entspricht (Abb. 29), lässt einen ähnlichen Schluss zu. Auch CANNON ET AL. (1994) sprechen dieses Problem an und raten zu einer den jeweiligen Bedingungen angepassten Beprobungsdichte.

### Das EM38 als Hilfsmittel der Bodenkartierung

Mit den obigen Ausführungen zur optimalen Erstellung einer ECa-Karte ist noch nicht das Problem berührt, was 'praktisch' relevante ECa-Unterschiede unter bodenbezogenen Gesichtspunkten sind. Wie BORTZ ET AL. (1990) treffend bemerken, ist durch statistische Signifikanz nicht immer auch praktische Relevanz bedingt (ebd. S. 42).

Verschiedene Autoren begründen den Einsatz des EM38 mit dem Argument, dass aufgrund der ECa-Werte ein Feld in homogene Areale unterteilt werden kann, ohne dabei den Termin der Messung beachten zu müssen. Im Anschluss daran könne eine gezielte Beprobung auf diese Teilflächen ausgerichtet werden. Aufwändige Laboranalysen würden auf relativ homogene Areale konzentriert (z.B. BORCHERS ET AL. (1997), LUND ET AL. (1998)). Dieses Vorgehen führe somit zur Effizienzsteigerung. Bei diesem Argument sind jedoch zwei verschiedene Aspekte grundsätzlich getrennt zu berücksichtigen: die Reproduzierbarkeit der ECa-Variabilitätsmuster auf dem Feld zu verschiedenen Terminen und die Eignung dieser Muster zur Festlegung von Teilflächen für eine repräsentative Bodenbeprobungen.

Auch in dieser Arbeit werden enge Korrelationen zwischen den ECa-Werten verschiedener Termine (zwischen zwei Jahren, innerhalb eines Jahres) gefunden. Diese Ergebnisse stützen den ersten Aspekt des Argumentes, der die Eignung des EM38-Gerätes zur relativ sicheren Auffindung von Variabilitätsmustern zu unterschiedlichen Zeitpunkten betrifft. Jedoch sind beim Einsatz des EM38 in den Sommermonaten zwei Dinge zusätzlich zu beachten. Zum einen nimmt die Amplitude der Messwerte bei trockenen Bodenzuständen generell ab. Solche Zustände sind für viele Ackerbauregionen nach der Ernte typisch. Geht man davon aus, dass das EM38 zu jedem Zeitpunkt dieselbe Genauigkeit von z.B.  $0.5 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$  (LÜCK ET AL. (2000)) aufweist, wird es prinzipiell unsicherer, geringfügige Unterschiede der ECa unter solchen Bedingungen zu kartieren. Daher könnten aus diesem Grund leichte Änderungen vor allem der kleinflächigen ECa-Muster zwischen unterschiedlichen Mess-Terminen auftreten. Zum anderen ist die Amplitude der Tagestemperatur im Spätsommer deutlich höher als im Frühjahr. Da die Temperatur des EM38-Gerätes auch einen gewissen Einfluß auf die Höhe der Messwerte hat (LÜCK ET AL. (2000)), tritt damit in der warmen Jahreszeit ein weiterer Störfaktor hinzu. Dieser wird durch die Erwärmung des EM38 im Verlauf der Messungen bedingt. Dies kann sich vor allem dann bemerkbar machen, wenn sich die Untersuchungen über einen ganzen oder mehrere Tage erstrecken und/oder das Gerät nicht ausreichend gegen die Wirkung der Sonneneinstrahlung oder die Umgebungstemperatur isoliert ist. DOMSCH

(2002) zeichnet parallel zu den ECa-Daten auch die Temperatur am Messgerät auf, um den Einfluss dieses Faktors zumindest quantifizieren zu können.

Der zweite Aspekt des Argumentes ist etwas ausführlicher zu erörtern. Die Nutzung der ECa-Areale zur Effizienzsteigerung der Bodenkartierung besteht meist darin, dass man nur einen Teil der ausgewiesenen ECa-Areale beprobt und an diesen Proben die Analysen durchführt. Aus den Ergebnissen wird anschließend auf die entsprechenden Werte in den anderen Feldteilen mit gleichen ECa-Werten geschlossen.

Um homogene Areale auszugrenzen, sind ECa-**Unterschiede** relevant. Diese Problematik wurde bereits unter 'Optimale Kartenerstellung' diskutiert. Für eine Gruppierung und Auswahl für eine effiziente Beprobung sind jedoch die absoluten ECa-Messwerte wichtig. Dieser gedankliche Schritt wird selten explizit vorgenommen. Wenn verschiedene ECa-Werte für die zu kartierenden Böden oder Standorte typisch sind, kann auf diese einfache Weise vorgegangen werden.

Nur vereinzelt finden sich in der Literatur Arbeiten, in denen die Autoren zu dem Schluss kommen, dass das EM38 ein hilfreiches Werkzeug ist, um die Variabilität der Böden- bzw. der Bodeneigenschaften zu schätzen (z.B. LÜCK & EISENREICH (2001)). Zum Teil sind die Schlussfolgerungen der Autoren aus den jeweils veröffentlichten Ergebnissen auch schwer nachvollziehbar. So finden NEUDECKER ET AL. (2001) unterschiedliche mathematische Beziehungen zwischen den ECa-Werten und Daten der Bodenschätzung, den Messungen der Pflanzenerträge bzw. Daten der Fernerkundung. Die ermittelten Regressionen werden feldspezifisch angegeben, was auf verschiedene weitere Einflussfaktoren schließen lässt. Die Bestimmtheitsmaße variieren zwischen 0.01 und 0.71. Trotzdem kommen die Autoren zu der Schlussfolgerung, dass die ECa-Karte für eine 'straightforward interpretation' nutzbar sei, wenn es um die genaue Ableitung von Zonen unterschiedlicher Bodentextur geht. Die ECa-Daten werden den Daten der Ertragskartierung oder der Fernerkundung gegenüber gestellt, bei denen das nicht möglich sei. Während der letzte Teil der Aussage wahrscheinlich insofern korrekt ist, dass man aus einem Luftbild oder einer Ertragskarte Werte der Bodentextur nicht kausal begründet schätzen kann, so ist der erste Teil sicherlich zu euphorisch. Feldspezifische Korrelationen mit schwankenden Bestimmtheitsmaßen und unterschiedlichen Funktionstypen sind ein Beleg dafür, dass es gerade keine verallgemeinerbaren Zusammenhänge zwischen ECa- und Bodendaten gibt, die sich auf einem Genauigkeitsniveau bewegen, das den praktischen Anforderungen der landwirtschaftlichen Bodennutzung genügt. Die Mehrzahl der Autoren kommt in ihren Arbeiten dagegen zu der auch hier vertretenen Schlussfolgerung, dass trotz der zum Teil guten Korrelation zwischen Boden- und ECa-Daten eher die relativen Unterschiede genutzt werden sollten (BRUS ET AL. (1992), BOETTINGER ET AL. (1997), DOOLITTLE & COLLINS (1998), LUND ET AL. (1998)). Diese Aussage wird mit dem Wechselspiel der unterschiedlichen Faktoren begründet, die am jeweiligen Messpunkt die ECa bedingen und von Feld zu Feld bzw. von Standort zu Standort variieren können. Obwohl einzelne Faktoren in ihrer Wirkung auf die ECa durchaus bekannt und quantifiziert sind, ist über die Wechselwirkungen wenig veröffentlichtes Wissen vorhanden.

Für das Untersuchungsgebiet lassen sich die gefundenen Zusammenhänge zwischen ECa-Wert und Bodenmerkmalen wie folgt zusammenfassen:

Die ECa<sub>25</sub>-Werte liegen größtenteils zwischen 12 und 45 mS\*m<sup>-1</sup>. Dabei scheint es eine relativ deutliche Trennung zwischen den Bereichen von ca 12-21 und 22-45 mS\* m<sup>-1</sup> zu

geben. Für Felder, auf denen die flächenhaften ECa-Strukturen Ähnlichkeiten mit Verteilungsmustern aus anderen Informationsquellen aufweisen, sind die ECa-Werte grundsätzlich als vage proportional zur Mächtigkeit der Lössdecke über Sandersanden anzusehen. Dies veranschaulicht die Abb. 43. Die Verteilung der Punkte macht deutlich, dass man an dem dort untersuchten Transect mit dem EM38 scheinbar eine kritische Lössmächtigkeit von etwa 65 cm ansprechen kann. Diese Kartierung von Grenzmächtigkeiten deckt sich mit Ergebnissen von BRUS ET AL. (1992). Jedoch treten selbst auf den Feldern, auf denen großflächige Strukturähnlichkeiten zu erkennen sind, deutliche Abweichungen von den unterstellten Zusammenhängen auf. Diese Abweichungen betreffen zwei Haupterscheinungen und schränken daher die ausschließliche Verwendung der ECa-Karte zur Bodenansprache ein. Zum einen treten vergleichsweise geringe ECa<sub>25</sub>-Werte in Senken auf, obwohl in diesen überdurchschnittliche Lössmächtigkeiten vorliegen. Typisch ist für diese Senkenböden, dass im Unterboden fossile A<sub>h</sub>-Horizonte auftreten. Zum Teil finden sich in diesen Horizonten Kohlereste. Die Tongehalte des akkumulierten Lösses sind etwas höher als die im originären Löss, wenn man die Löss-B<sub>t</sub>-Horizonte gesondert betrachtet. Diese Merkmale bewirken nach DEARING ET AL. (1995) oder LÜCK ET AL. (2000) eine grundsätzliche Erhöhung der Leitfähigkeit. Auch Suszeptibilitätsmessungen im Bodenprofil einer solchen Senke brachten keine weiteren Erklärungen für das Phänomen der verringerten ECa-Werte (LÜCK (2002)). Die von BODE (2001) und MEYER (2000) geäußerte Vermutung, dass die Porenstruktur und -kontinuität in dem aufgetragenen Material eine andere sei und dies den Leitfähigkeitsabfall bedinge, wird abgelehnt. Da es sich bei dem Messprinzip des EM38 um ein Verfahren der Wechselstrom-Geoelektrik handelt, hat die Konnektivität der Poren auf die Ausbreitungseigenschaften des induzierten Wechselstroms im Boden keine Auswirkung. Diese Ansicht wird auch von MCNEIL (1980a) vertreten.

Einen vielleicht weiter führenden Erklärungsansatz könnten die Hinweise von NEHMDAHL & GREVE (2001) und SLAVICH (1990) bieten. Die Autoren berichten, dass die Eindringtiefe des EM38-Magnetfeldes deutlich größer als der von MCNEIL (1980b) genannte Wert sei und zusätzlich von der jeweiligen Bodenart am Ort der Messung verändert werde. Nimmt man an, dass das EM38 im V-Modus nicht bei 30-40 cm seine höchste Sensitivität besitzt, sondern darunter und unterstellt man weiterhin, dass das Signal auch noch von Bereichen deutlich tiefer als 1.5 Meter beeinflusst wird, wäre folgender Erklärungsansatz denkbar: In den Senkenböden liegt der Schwerpunkt der Messung in einem sehr tonarmen und Grobschluffreichen Schluff. An anderen Lössprofilen ohne offensichtliche Beeinflussung durch Erosionsprozesse wird dagegen die Nähe des Sensitivitäts-Schwerpunktes zu einem mehr oder minder stark ausgeprägten B<sub>t</sub>-Horizont wirksam. Aufgrund der deutlichen Unterschiede zwischen den ECa-Werten von Ton einerseits und den Werten von Sand oder Schluff andererseits (KITCHEN ET AL. (1996), DURLESSER (1999)), wird daher eventuell nicht die Lössmächtigkeit über Sanden sondern der Abstand zu einem B<sub>t</sub>-Horizont durch das EM38 kartiert. Aufgrund der sehr geringen Tongehalte und dem zum Teil hohen Anteil an Mittel- und Feinsand im Niedergörsdorfer Löss könnten die von den Autoren genannten Leitfähigkeits-Unterschiede zwischen den reinen Substraten (Ton einerseits gegenüber Sand oder Schluff andererseits) möglicherweise noch deutlicher ausfallen. Inwieweit unterschiedliche Tongehalte in den B<sub>t</sub>-Horizonten bzw. variierende Mächtigkeiten dieser Horizonte einen Einfluss auf die Höhe der ECa<sub>25</sub> haben, konnte anhand der erhobenen Daten

nicht näher geklärt werden. Vollständig erklärt werden kann das Senkenphänomen durch diesen Ansatz auch nicht, da beispielsweise die beiden auffälligen Punkte an dem von BODE (2001) kartierten Transect (Abb. 43) nicht überdurchschnittlich mächtige Lössprofile darstellen, als dass die obige Argumentation in dieser Form hinreichend wäre. Da auch tiefere Bereiche des Bodens das Signal beeinflussen, im Rahmen dieser Arbeit die Bodenhorizonte aber selten tiefer als 100cm kartiert wurden, lässt sich über die Ausgestaltung des Untergrundes und dessen Einfluss auf die ECa-Werte keine Aussage machen.

Zusätzlich zum 'Senkenphänomen' tritt noch eine gegensätzliche Erscheinung auf. An einigen Beprobungsorten, an denen die Lössdecke bereits vollständig erodiert und Sand an der Oberfläche zu finden ist, finden sich überdurchschnittlich hohe ECa<sub>25</sub>-Werte (Abb. 42). Diese konnten zum Teil als Folge von in geringer Tiefe anstehendem, tonig-lehmigem Moränenmaterial, zum Teil auch durch starke Tonbänderungen im Unterboden gedeutet werden. Hier bewirkten die hohen Tongehalte des Unterbodens eine für Sandstandorte stark erhöhte Leitfähigkeit.

Die bisherige Darstellung der Zusammenhänge zwischen ackerbaulich relevanten Bodeninformationen und den ECa<sub>25</sub>-Werten am Standort Niedergörsdorf lassen sich wie folgt vereinfachend zusammenfassen:

- 1) relativ hohe ECa<sub>25</sub>-Werte (d.h. größer als 22 mS\*m<sup>-1</sup>) finden sich in Parabraunerden aus Löss und in Bänder-(Para)Braunerden aus Sand bzw. aus Geschiebelehm.
- 2) relativ geringe ECa<sub>25</sub>-Werte (d.h. kleiner als 22 mS\*m<sup>-1</sup>) finden sich in Braunerden aus Sand und in Parabraunerden aus kolluvialem Löss.

Damit treten sowohl bei hohen als auch geringen ECa<sub>25</sub>-Werten Böden auf, die unter ackerbaulichen Gesichtspunkten im Untersuchungsgebiet sowohl als ertragreich als auch ertragsschwach einzustufen sind.

Für das Untersuchungsgebiet gilt daher, dass sich aus der ECa-Karte ohne eine zusätzliche Informationsquelle keine ackerbaulich relevante Bodenkarte ableiten lässt. Diese Aussage wird aufgrund der über 500 ha beprobter Fläche getroffen. Das vielleicht auf den ersten Blick enttäuschende Ergebnis, ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass das Ziel der Standorterkundung mit dem EM38 eine Karte ist, die ackerbaulich relevante Boden- oder Standortunterschiede ausweist. Wenn erst zusätzliche Informationsquellen herangezogen werden müssen, um die ECa-Karte zur verlässlichen Gliederung und effizienten Beprobung eines Feldes nutzen zu können, stellt sich die Frage, ob diese zusätzlichen Informationen nicht auch allein zu der gewünschten Unterteilung des Feldes führen können.

#### Das EM38 als Hilfsmittel der Standortkartierung

Ein 'Standort' ist im Gegensatz zum 'Boden' komplexer definiert. Er wird durch das Wirkungsgefüge und die lateralen Wechselbezüge von Boden, Witterung bzw. Kleinklima und Reliefposition bedingt und beeinflusst auf komplexe aber typische Weise das Pflanzenwachstum.

Die durch die Mährescherfahrer erfolgte Distel-Kartierung wurde durch die Beobachtung veranlasst, dass diese Pflanzenart anscheinend immer am Übergang von höher gelegenen zu tiefer gelegenen Bereichen des Geländes und zudem nur lokal auftritt. Daher spiegelt das

Auftreten der Pflanzenart in spezifischer Weise die ihren Ansprüchen lokal genügenden Standortbedingungen wider.

Die Darstellung der Histogramme der gesamten ECa<sub>25</sub>-Originaldaten zusammen mit den ECa<sub>25</sub>-Werten an den Wuchsorten der Disteln auf dem Winterweizenfeld im Erntejahr 2000 (Abb. 46) verdeutlicht folgendes: die elektromagnetischen Eigenschaften der Böden können trotz ihrer unzureichenden kausalen Erklärbarkeit im Zusammenhang mit spezifischen Wuchsbedingungen einzelner Pflanzenarten stehen. Die Häufigkeitsverteilung der 154 ECa-Werte an den 'Distel'-Orten besitzt in weitaus deutlicherer Weise eine mehrmodale Form als das Histogramm der Originaldaten des Gesamtfeldes.

Eine Erklärung dieser Erscheinung kann auf folgende Weise versucht werden: Die Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense* (L.) Scop.) zählt zu den Wurzelunkräutern (BAEUMER (1992)). KUTSCHERA (1960) führt verschiedene eigene Beobachtungen und Literaturstellen zusammen, um das Wachstum der Pflanzen durch die jeweiligen Eigenschaften des Bodens und Untergrundes zu erklären. Die Pflanzenart stellt tendenziell hohe Ansprüche an die Wasserversorgung, was ihr Zurücktreten in trockeneren Klimaten oder auf Sand-Böden erklären mag. Diese These deckt sich mit der Beobachtung, dass Disteln auf den Sandkuppen im Untersuchungsgebiet fehlen. BAEUMER (1992) zitiert Ergebnisse von HÅKANSSON & WALLGREEN (1972), durch die gezeigt wird, dass die Anlage von vegetativen Reproduktionsanlagen eines anderen Wurzelunkrautes (Acker-Gänsedistel, *Sonchus arvensis*) durch Wintergerste bei hoher Bestandesdichte aufgrund der Lichtkonkurrenz eingeschränkt werden kann. Ähnliche Effekte sind bei der Acker-Kratzdistel auch zu vermuten. Dadurch ließe sich ihr relativ seltenes Auftreten bzw. Fehlen in den Senken erklären, in denen sehr dichte Getreidebestände und die höchsten Erträge auftreten. Vereinzelt Vorkommen in Senken sind jedoch möglicherweise auf die Fähigkeit der Distelwurzeln zurückzuführen, auch schwach durchlüftete Bereiche zu durchwachsen und damit sogar eine Lockerung dieser Schichten zu erzielen (KUTSCHERA (1960)). Somit wäre eine Distelpflanze in einer Senke ein Hinweis auf eine mögliche Verdichtung im Unterboden, die der Unkraut-Pflanze an diesem Standort einen Vorteil gegenüber der Kulturpflanze verschafft. Durch die Verdichtung und den zeitlich bestehenden Luftmangel werden die Kulturpflanzen darin behindert, das volle Ausmaß der Lichtkonkurrenz gegenüber der Distel zu entfalten. Im Bereich durchschnittlich mächtiger Lössböden, die räumlich zwischen einer sandigen Kuppe und dem Löss-Boden in der Senke auftreten, findet die Distelpflanze demnach einerseits ausreichend Wasser im Unterboden für ihr Wachstum und ihre Entwicklung und andererseits fehlt hier die Lichtkonkurrenz durch übermäßig hohe Bestandesdichten des Getreides.

Diese nur exemplarische Diskussion einer Distelkartierung in Verbindung mit den ECa-Daten soll deutlich machen, inwieweit eigene Beobachtungen (lokale Standortkenntnis, DGPS-Kartierungen), bereits vorhandenes Wissen (Literatur, Beratung) und ortsbezogene Bodeninformationen (ECa-Daten) für die landwirtschaftliche Standortansprache zusammengeführt werden können.

Es wäre daher in Zukunft weiter zu untersuchen, inwieweit die entsprechenden ECa<sub>25</sub>-Werte der einzelnen Gipfel in den Histogrammen der Originaldaten 'typische' Standorte in einem komplexen, ackerbaulichen Sinne repräsentieren.

### 3.4.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Auswertung der ECa<sub>25</sub>-Daten von über 500 ha Ackerfläche am Standort Niedergörsdorf im Fläming lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Vor einer Kartierung sollten zur optimalen Auswahl des Abstandes der Messspuren sowie der Aufzeichnungsfrequenz Voruntersuchungen über das Ausmaß der räumlichen Variabilität durchgeführt werden;
- Im Frühjahr findet sich auf den Löss- und Sand-Böden im Untersuchungsgebiet eine stärkere Ausprägung der Variabilität in den ECa-Werten als im Spätsommer. Dies ist bei der Auswahl des Beprobungstermines zu berücksichtigen; zudem ist eine gleichmäßige Durchfeuchtung nur im Frühjahr hinreichend sicher; im Spätsommer können eine unterschiedliche Verteilung der Bodenfeuchte oder unterschiedliche Bodenwassermengen zusätzlich die Variabilität der ECa-Werte auf dem Feld bewirken;
- Die ECa-Werte geben die Eigenschaften der Wechselstrom-Leitfähigkeit eines feuchten Bodenkörpers wieder und sind eine geophysikalische Messgröße; über Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflussfaktoren (Ton, Wasser, Humus u.a.) ist wenig bekannt;
- Am Standort Niedergörsdorf finden sich Feld- und Transect-spezifische Beziehungen zwischen ECa-Daten und der Lössmächtigkeit; diese sind meist schwach ausgeprägt und sprechen nicht für eine allgemeine Verwendbarkeit der ECa-Daten als Hilfsmittel für die ackerbauliche Bodenkartierung an diesem Standort;
- Für einzelne Felder zeichnen sich Ähnlichkeiten ab, wenn Karten verschiedener Informationsquellen (Bodenkarte, Ertragskarte, Luftbild) mit ECa-Karten verglichen werden; daneben gibt es auch Muster der ECa-Variabilität, die mit keiner anderen Kartierung in Übereinstimmung zu bringen sind;
- Ein exemplarischer Vergleich der ECa-Karte und der Standorte der Acker-Kratzdistel auf dem Feld 200 zeigt Möglichkeiten auf, ECa-Daten in einem Standort-spezifischen Kontext zu diskutieren, in den die Reliefposition und der Wasserhaushalt im Zeitverlauf eine Rolle spielen; weitere systematische Arbeiten zu diesem Fragenkomplex sind notwendig;
- Für eine optimierte Kartenerstellung aus ECa-Punktdaten sollten die Informationen aus der Verteilungsform der Originaldaten und gezielte Analysen von ECa-Fahrspuren genutzt werden;
- Durch die Berechnung der gleitenden Variationskoeffizienten lassen sich 'ECa-Unterschiede' auf einer relativen Basis definieren und eine Filterung der Originaldaten anhand dieser verteilungsstatistischen Kenngröße durchführen (CV3-Filterung);
- In Abhängigkeit von der Art der Übergänge zwischen den homogenen ECa-Arealen (kontinuierlich, diskontinuierlich) ist generell zwischen einem Interpolations- und einem Klassifizierungsverfahren zu wählen;
- Bei häufigem Auftreten von kontinuierlichen Übergängen wird aufgrund der hohen Messgenauigkeit des EM38-Gerätes die Anwendung eines Ordinary-Punkt-Kriging mit lokaler Variogramm-Modellierung empfohlen; von der Verwendung des Block-Kriging wird abgeraten;

- Bei häufigem Auftreten von diskontinuierlichen Übergängen wird die Anwendung der Nächst-Nachbar-Zuordnung (NN-Zuordnung) empfohlen; eine anschließende Rundung auf Ganzzahlen und/oder eine Histogramm-basierte Klassifizierung der erhaltenen Karte ermöglicht die lokale Glättung unter weitgehender Beibehaltung der charakteristischen Multimodalität des Originaldaten-Histogramms;
- Als Maß der Verlässlichkeit der erstellten ECa-Karte kann bei der Interpolation die Krige-Varianz, bei der NN-Zuordnung die Entfernung des Mittelpunktes der jeweiligen Rasterzelle zum Original-Messpunkt genutzt werden.

### **3.5 Fernerkundung - Luftbilder**

#### **3.5.1 Stand des Wissens**

Die Luftbild-Fernerkundung als wissenschaftliche Methode hat ihren Ursprung in der Geographie. Ihr Anfang liegt in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Wichtige Impulse für die Entwicklung gingen jeweils von wirtschaftlichen oder militärischen Fragestellungen aus (geologische Prospektierungen, Forstwirtschaft, Erkundung kolonialer Räume) (TROLL (1939)). Ein wichtiges Einsatzgebiet war von Beginn an die Gewinnung einer Übersicht über eine Landschaft und die visuelle Interpretation des Luftbildes. Ein weiterer, oft darauf aufbauender Anwendungsbereich von Luftbildern, ist die Vorbereitung einer terrestrischen Erkundung. Das Untersuchungsgebiet wird dabei anhand der Luftbilder in relativ 'homogene' Bereiche unterteilt, sodass anschließende Kartierungsarbeiten erheblich effizienter gestaltet werden können bzw. einige Arbeiten überhaupt erst möglich werden. Die Bedeutung von 'homogenen Bereichen' ist nur im Zusammenhang mit der jeweiligen Fragestellung zu verstehen und berührt das von WEBSTER (2000) behandelte Thema der Skalenabhängigkeit der Heterogenität.

Die Literatur über den Einsatz von Methoden der Luftbild-Ferkerkundung (LB-FE) zur Bearbeitung von landwirtschaftlichen Fragestellungen ist umfangreich und vielfältig. Die in ihr enthaltenen Informationen werden im folgenden nach fünf prinzipiellen Aspekten geordnet wiedergegeben.

Zunächst wird versucht, eine grobe Schematisierung der Einsatzgebiete zu erstellen. Anschließend wird kurz auf wichtige Aspekte der Datengewinnung und -analyse eingegangen. Eine exemplarische Zusammenstellung von bisher mit dieser Methode der landwirtschaftlichen Standorterkundung erzielten Ergebnisse und mitgeteilten Probleme bilden den Abschluss dieses Abschnittes.

#### Landwirtschaftliche Anwendungsgebiete der Luftbild-Fernerkundung

Landwirtschaftliche Fragestellungen hielten in die Fernerkundung Ende der 1920er Jahre Einzug (STADTBÄUMER (1988)). Diese waren zunächst vornehmlich agrargeographischer Art und betrafen z.B. die Kartierung der Landnutzung oder die Ausweisung von geeigneten Gebieten für die landwirtschaftliche Erschließung in Kolonien (STADTBÄUMER (1988), TROLL (1939)). Dabei fanden Schwarzweiß-Filme Verwendung, ab 1942 auch Farbfilme im Kleinformat (TROLL (1943)). Von erfahrenen und vielseitig ausgebildeten Bearbeitern wurde vor allem die Textur der Schwärzung und Unterschiede in der Schwärzung zur Grenzziehung verwendet. Die unterschiedliche Reflexion von Objekten in verschiedenen Spektral-Bereichen konnte erst mit der beginnenden Farbfotografie genutzt werden. Der räumliche Bezug der Areale und Muster zueinander und die Anordnung der Elemente in der Landschaft hatte für die Interpretation eine hohe Bedeutung. Die Terminwahl für die Aufnahme berücksichtigte vornehmlich die Wirkung der Jahreszeiten, ein günstiger Termin lag innerhalb dieser im Bereich von mehreren Tagen oder wenigen Wochen (STEINER (1961), TROLL (1939)). Die Ausmaße der im Luftbild ausgegrenzten Areale liegen in Größenordnungen von mehr als 20-50 Metern. Die geometrische Auflösung der Luftbilder war jedoch bereits damals nicht wesentlich verschieden von den heutzutage gemachten Aufnahmen. Auf diese Weise als 'homogen' ausgewiesene Areale repräsentieren prinzipiell Bodengroßlandschaften und mit

diesen vergesellschaftete Vegetationsformen. Beispiele hierzu finden sich bei SCHNEIDER (1974), TROLL (1939) bzw. TROLL (1943).

Ein Großteil der Literatur zur landwirtschaftlichen Fernerkundung der letzten 10-15 Jahre unterscheidet sich grundsätzlich von den vorgenannten Arbeiten. Durch technische Fortschritte sind Multi- oder Hyperspektral-Sensoren möglich geworden. Diese Sensoren zeichnen die Strahlungsenergie in eng begrenzten Wellenlängen-Bereichen auf (ALBERTZ (1991), BACH (1995)). Ebenso hat der Bereich der digitalen Bildverarbeitung durch die exponentielle Zunahme der Rechenleistung und Speicherkapazität heutiger Computersysteme eine Revolution erfahren (KÜHBAUCH & GERHARDS (2001)). Dadurch ist die Analyse der Reflexionseigenschaften in spezifischen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums in den Vordergrund der wissenschaftlichen Tätigkeit geraten. Die räumlichen Abgrenzungen der Untersuchungsobjekte liegen im Meter oder Sub-Meterbereich. Der genaue Zeitpunkt der Aufnahme ist wichtiger geworden. Unterschiede weniger Stunden oder Tage können für das Ergebnis entscheidend sein. Es werden zunehmend spezifische Zusammenhänge zwischen Pflanzen- oder Bodeneigenschaften und den jeweiligen spektralen Signaturen untersucht und quantifiziert. Der Raumbezug tritt für die Interpretation dabei zunächst in den Hintergrund.

Die landwirtschaftlich ausgerichtete Luftbild-Fernerkundung benutzt vor allem die Pflanze als Indikator für die Kartierung des interessierenden Merkmals und dessen Interpretation. Während ältere Arbeiten versuchen, auf der Ebene der Region (kleiner Maßstab) eher qualitative Aussagen zu machen, konzentrieren sich gegenwärtige Untersuchungen darauf, spezielle Eigenschaften von Böden oder Pflanzen auf kleinstem Raum zu quantifizieren (großer Maßstab).

Eine hinsichtlich der Maßstäbe mittlere Stellung nimmt die landwirtschaftliche Standorterkundung mit Methoden der Fernerkundung ein (DIEHMANN & GRUHN (1991)). Ein 'Standort' ist dabei nach BOURNE (1931) wie folgt definiert: "Die kleinste Landschaftseinheit nennt er (BOURNE, Anmerk. des Autors) 'site' und definiert sie als 'eine Fläche, welche für alle praktischen Zwecke in ihrer Ausdehnung ähnliche lokale Bedingungen bietet nach Klima, Physiographie, Geologie, Boden und überhaupt edaphischen Faktoren'." (zitiert nach TROLL (1939), S. 286). Mit der Verwendung des Ausdruckes 'praktischen Zwecke' berührt der Autor den Bereich der Verwendung der erstellten thematischen Standort-Karte. Diese Art der Auswertung von Luftbildern orientiert sich einerseits in ihrer Methodik an den geographisch und komplex arbeitenden agrarökologischen Untersuchungen früherer Jahrzehnte. Andererseits ist sie aber hinsichtlich der angestrebten räumlichen Auflösung deutlich feiner. Innerhalb einer Bodengroßlandschaft rücken die unterschiedlichen Böden in ihrer jeweils komplexen Wirkung auf das Wachstum landwirtschaftlicher Pflanzen in den Blickpunkt. Spektrale Signaturen im sichtbaren Bereich des Lichtes und relativ genau definierte Termine für die Erstellung der Luftbilder besitzen für die Analyse eine mittlere Wichtigkeit. Es werden tendenziell eher qualitative Ergebnisse erzielt. In der Literatur finden sich nur wenige Arbeiten zu diesem Bereich der Luftbildnutzung. Interessante Beispiele der Verknüpfung von Bodenuntersuchungen und Pflanzenwachstum sind z.B. in den Arbeiten von BURROUGH ET AL. (1985), EVANS & CATT (1987) und MILFRED & KIEFER (1976).

### Erstellung des Luftbildes

Die der Fernerkundung zugrunde liegenden allgemeinen physikalischen Prozesse sind in Übersichtsarbeiten detailliert verfügbar und sollen hier nicht weiter ausgeführt werden. Einzelheiten finden sich z.B. bei ALBERTZ (1991), BACH (1995), BAUMGARDNER ET AL. (1985) und SCHNEIDER (1974).

Es ist festzustellen, dass es eine optimale Methode der Erstellung von Luftbildern für landwirtschaftliche Anwendungen anscheinend nicht gibt. In den jeweiligen Arbeiten werden die unterschiedlichsten Kombinationen von Aufnahmewinkel, Maßstab, verwendeter Sensorik bzw. Spektralbereiche und Befliegungsterminen genutzt. Die Fragestellungen und Umweltbedingungen sind wahrscheinlich zu vielfältig, um eine Standardisierung zuzulassen. Daher ist die optimale Anpassung der vorgenannten Faktoren an die jeweilige Situation von großer Bedeutung.

#### *Winkel der Aufnahme:*

Senkrechte Aufnahmen erleichtern die Computer-gestützte Auswertung erheblich bzw. ermöglichen sie erst. Aber auch Geneigtaufnahmen können wichtige Informationen für die landwirtschaftliche Interpretation des Standortes haben (ALBERTZ (1991), SCHNEIDER (1974), SCHUMANN (1943), TROLL (1939)).

#### *Maßstab der Aufnahme / Flughöhe:*

Der Bildmaßstab wird von der Flughöhe und der Brennweite des Objektivs bestimmt. Zu beachten ist ein an die zu kartierenden Erscheinungen der Erdoberfläche angepasster Maßstab (CLEVERS (1986)). Bei zunehmender Flughöhe sinkt der Kontrast der Aufnahme (SCHNEIDER (1974)), was eine automatisierte Auswertung erschwert. Diese Kontrastminderung wird durch atmosphärischen Dunst, Streulicht und ungünstige Einstrahlungsbedingungen erzeugt. Bei Verwendung von Digitalkameras ist die technisch vorgegebene Auflösung zu beachten (BILL ET AL. (2002)).

#### *Aufnahmesystem / Sensorik:*

In der Luftbild-Fernerkundung werden Schwarzweiß-, handelsübliche Farb- und Infrarot-Farbfilm eingesetzt. Spezifische Filter erweitern die Möglichkeiten. Zudem kommen vermehrt Digitalkameras, Videosysteme, sowie Multi- und Hyperspektral-Sensoren zur Anwendung (ALBERTZ (1991), BACH (1995), DOHMEN ET AL. (2002), SCHMIDHALTER & SELIGE (2002)).

#### *Termin der Aufnahme:*

Obwohl in vielen Arbeiten dem Befliegungstermin für die Erstellung von aussagekräftigen Bildern eine große Bedeutung beigemessen wird, gibt es wenig systematische Arbeiten in diesem Bereich. Ausführlich geht STEINER (1961) auf diese Thematik ein und stellt den zeitlichen Verlauf der Reflexion bei unterschiedlichen Pflanzenarten sowie ihre Besonderheiten dar. BILL ET AL. (2002) machen die allgemeine Aussage, dass der günstigste Termin dann sei, wenn die Unterschiede in der Reflexion der Ziel-Pflanzenart im Untersuchungsraum maximal sind und geben ein Beispiel für den Raum Mecklenburg-Vorpommern. BENNEDSEN & GUIOT (2001) sowie BLACKMER & WHITE (1996) arbeiten in ihren Untersuchungen mit mindestens zwei Terminen, die eine unterschiedliche gute Eignung für die Beantwortung der jeweiligen Fragestellungen aufweisen.

### Analyse des Luftbildes

Bereits TROLL (1939) nennt zwei grundsätzlich Auswertungsrichtungen in der Luftbild-Fernerkundung: die visuelle Interpretation und die Photogrammetrie. Erstere versucht, die für die Anwendung spezifischen Inhalte des Luftbildes herauszuarbeiten. Die zweite beschäftigt sich mit der Gewinnung von Längen- oder Flächenmaßen. ALBERTZ (1991) führt in seiner Aufstellung die digitale Bildverarbeitung als eine weitere Methode an, bemerkt jedoch gleichzeitig, dass diese nur eine technische Lösung für die Datenverwaltung und -verarbeitung sei. Er räumt der ursprünglichen Methode der visuellen Interpretation nach wie vor die zentrale Rolle ein. Der Computer habe seine Stärke in der Bestimmung von **Unterschieden** zwischen den Graustufen der Bildpunkte und kann somit objektiver und zuverlässiger als der Mensch für die Bearbeitung großer Datenmengen eingesetzt werden. Dagegen sei die menschliche Fähigkeit, **Muster, Strukturen** und **kausale Zusammenhänge** im Luftbild zu erkennen bisher vom Computer unerreicht (ALBERTZ (1991), BAUMGARDNER ET AL. (1985)). Dieser Prozess geschieht zu großen Teilen intuitiv. In mehreren Arbeiten wird ausdrücklich betont, dass diese Fähigkeit der komplexen Interpretation eines Luftbildes von der Erfahrung und der vielseitigen Ausbildung des jeweiligen Bearbeiters abhängt (ALBERTZ (1991), SCHNEIDER (1974), STEINER (1961), TROLL (1943)).

Häufig wird das Luftbild visuell interpretiert, um dadurch die Geländearbeit vorzubereiten und effizienter zu gestalten (EVANS & CATT (1987), HOFFMANN & VOIGTLÄNDER (1976), MILFRED & KIEFER (1976)). Dabei werden durch die Bearbeiter vornehmlich die Muster und räumlichen Beziehungen zur Unterteilung genutzt. In anderen Arbeiten kommen rechnerische Verfahren zum Einsatz, welche die spektrale Information verwenden. Über Indexbildung, quantitative oder qualitative Algorithmen der Klassifikation wird eine Unterteilung des Luftbildausschnittes vorgenommen. Anschließend werden die Teilflächen inhaltlich interpretiert ((BACH (1995), BILL ET AL. (2002), CIALELLA ET AL. (1997), DOHMEN ET AL. (2002)). BACH (1995) und BLACKMER ET AL. (1996) leiten Regressionsfunktionen von Pflanzenparametern auf die Reflexionsintensität in einzelnen Bändern des Spektrums ab.

Obwohl nach BACH (1995) die geometrische Korrektur (Entzerrung) mittels Nearest-Neighbour-Resampling ein Standardverfahren der Luftbildauswertung sei, wird für diesen Arbeitsschritt bei manueller Ausführung viel Zeit benötigt. Einen bedeutenden Fortschritt stellen daher die von BILL ET AL. (2002) sowie SCHMIDHALTER & SELIGE (2002) vorgestellten Verfahren der automatisierten, passpunktlosen Aero-Triangulation dar. SCHNEIDER (1974) macht Angaben darüber, bis zu welchen Höhenunterschieden im Gelände und Maßstäben der Aufnahmen eine Entzerrung von Senkrechtaufnahmen unproblematisch sei.

Die spektrale Korrektur der Luftbilddaten umfasst die Beseitigung atmosphärischer Einflüsse (Atmosphärenkorrektur) (BACH (1995)), die Kompensation des Abfalls der Objekthelligkeit zum Bildrand (BLACKMER ET AL. (1996)) sowie die Milderung von Überstrahleffekten (BACH (1995), BILL ET AL. (2002)). Auch eine Kontrastverstärkung fällt in diesen Bereich.

### Ergebnisse der landwirtschaftlichen Luftbild-Fernerkundung

Die veröffentlichten Ergebnisse zur landwirtschaftlichen Fernerkundung sind aufgrund von unterschiedlichen Maßstäben, Fragestellungen, Erhebungs- und Auswertemethoden vielfältig.

Zusammenstellungen finden sich bei BRISCO ET AL. (1998), JÜRGENS (2000) sowie KÜHBAUCH (2002). STADTBÄUMER (1988) berichtet in seiner Literaturübersicht über verschiedene Möglichkeiten der Nutzung von Luftbildern im Ackerbau.

Trotz ihrer Vielfalt lassen sich die in der Literatur zu findenden Ergebnisse grob in drei Themenbereiche gliedern:

- 1) Ergebnisse der komplexen visuellen Interpretation
- 2) Ergebnisse der statistischen Auswertung
- 3) Ergebnisse zur Effizienzsteigerung durch Generalisierung

Die unter dem Aspekt 'komplexe visuelle Interpretation' zusammenfassenden Ergebnisse berücksichtigen die abgebildete Erdoberfläche als solche. Sie streben in der Regel nicht ausdrücklich eine Quantifizierung an. Die auftretenden Phänomene werden unter Nutzung des lokalen Wissens und der individuellen Erfahrung vornehmlich qualitativ ausgewertet. Auf diese Weise kommen die Autoren zu der angestrebten kausalen Gliederung des Untersuchungsgebietes (BLACKMER & WHITE (1996), BURROUGH ET AL. (1985), DEGLER (1993), EVANS & CATT (1987), MILFRED & KIEFER (1976)). Eine Standardisierung der Auswertung wird nicht angestrebt. Ausdrücklich und zum Teil vehement wenden sich ALBERTZ (1991), DIEHMANN & GRUHN (1991) sowie bereits TROLL (1943) gegen die Verwendung von starren Interpretationsschlüsseln.

Durch die 'statistische Auswertung' von Reflexionsmessungen im Zusammenhang mit Erhebungen an Pflanzen kann gezeigt werden, dass vor allem dem Rot-Kanal hohe Bedeutung bei der Abbildung von Unterschieden in der Vegetation zukommt (ANDERSON & YANG (1996), BLACKMER ET AL. (1996)). Sorten-spezifische Effekte der gefundenen quantitativen Beziehungen können über Normierung der Reflexionsdaten weitgehend ausgeschaltet werden. CLEVERS (1986) und CLEVERS (1999) untersucht, inwieweit spezifische Wellenlängen-Bereiche charakteristisch für die Eigenschaften von Pflanzenbeständen oder -bestandteilen sind. CIALELLA ET AL. (1997) berichten, dass die unterschiedlichen Methoden der Erstellung einer Stichprobe aus Luftbild- und terrestrischen Daten Einfluss auf die Arbeitsweise der statistischen Verfahren haben kann.

Zum Aspekt 'Effizienzsteigerung durch Generalisierung' wird in fast allen Arbeiten die Äußerung gemacht, dass die Effizienz gesteigert wird. Dies komme dadurch zustande, dass nur eine begrenzte Anzahl von als 'typisch' für den Luftbildausschnitt erkannten Orten aufgesucht und näher untersucht werden müsse. Dies führe zu finanziellen und zeitlichen Einsparungen. Eine zahlenmäßige Beschreibung dieser Steigerung findet man dagegen höchst selten, so z.B. bei HOFFMANN & VOIGTLÄNDER (1976) sowie TROLL (1939).

#### Probleme der landwirtschaftlichen Luftbild-Fernerkundung:

Verschiedene Autoren betonen, dass mit der allgemeinen Erfahrung, den jeweils spezifischen Vorkenntnissen und durch die Subjektivität des Bearbeiters das Ergebnis der visuellen Interpretation eines Luftbildes steigt (ALBERTZ (1991), DIEHMANN & GRUHN (1991), TROLL (1943)). Durch die modernen, vom Computer unterstützten Verfahren der Klassifizierung können lediglich Grenzen generiert werden. Eine Bewertung der gefundenen Areale kann meist nur der Mensch aufgrund von Erfahrungen bzw. zusätzlichen terrestrischen Daten

vornehmen. ANDERSON & YANG (1996) weisen darauf hin, dass die Anzahl der auszuweisenden Klassen nicht beliebig zu wählen sei. Sie solle sich vielmehr an der relevanten Variabilität und einer auf die Anwendung bezogenen minimalen Arealgröße orientieren. Diese Sachverhalte stehen einer vollständigen Standardisierung und Automatisierung der Auswertung entgegen.

Innerhalb eines 'relativ homogenen' Areals, das im Luftbild bestimmt und einer Analyse unterzogen wird, können Inhomogenitäten der Reflexionswerte auftreten. Diese sind als Störungen zu werten und können ihre Ursache in Bewirtschaftungsmaßnahmen oder -fehlern haben (Sorteneffekte, Düngungsmaßnahmen, Verletzungen an Pflanzen), auf Auswirkungen von Witterungsereignissen zurückzuführen sein (Erosion, Frost, Hagel) oder allgemein durch anthropogene Eingriffe anderer Art bedingt sein (Grabungen, Siedlungen). Diese lokalen Ungenauigkeiten in den Reflexionswerten stellen für die vollautomatisierte Analyse von Fernerkundungsdaten ein Problem dar. Durch Korrekturen oder Maskierungen muss auf diese Effekte reagiert werden, um zu sinnvollen Ergebnissen zu gelangen (BLACKMER ET AL. (1996), BLACKMER & WHITE (1996), CIALELLA ET AL. (1997)).

Im landwirtschaftlichen Kontext wird mit der Analyse von Luftbildern häufig angestrebt, quantitative Zusammenhänge zwischen Reflexionswerten und Inhaltsstoffen (z.B. N-Gehalt) zu finden. Aus diesen Beziehungen soll die Ableitung von landwirtschaftlichen Maßnahmen (z.B. Düngung) möglich werden. Um absolute Reflexionswerte verwenden zu können, ist zumindest eine Atmosphärenkorrektur unumgänglich. BACH (1995) nennt verschiedene Verfahren, mit denen diese durchführbar ist. Jedoch merken MORAN ET AL. (1997) an, dass Korrekturen der atmosphärischen Einflüsse häufig nur unbefriedigend gelingen.

Auch die Verwendung von Relativzahlen (Normierung, Index-Bildung) ist nicht prinzipiell unproblematisch. BILL ET AL. (2002) zeigen, dass Index-Werte zum Teil sehr sensibel auf eine Farbstichigkeit der Aufnahmen reagieren. CLEVERS (1986) und SCHMIDHALTER & SELIGE (2002) weisen darauf hin, dass der vielfach zur Schätzung des Blattflächen-Index (BFI) genutzte NDV-Index nur bis zum BFI-Wert von drei bis vier sensibel für diesen Parameter ist. Bei höheren BFI besteht kein Zusammenhang.

### 3.5.2 Datenmaterial und Verarbeitungsmethoden

#### Erstellung und Digitalisierung der Luftbilder

Für die Erstellung der Luftbilder wurde auf einem nahegelegenen Flugplatz ein Motorflugzeug des Typs Cessna 172 mitsamt Pilot gechartert. Da das Flugzeug keine Bodenluke besaß, wurden die Aufnahmen aus dem Fenster des Copiloten gemacht. Die Flughöhe betrug 2000-3000 Meter, bei Bewölkung waren jedoch zum Teil nicht mehr als 500 Meter möglich. Zum Einsatz kamen handelsübliche Kleinbild-Spiegelreflex-Kameras der Typen Minolta X-700 und Minolta XD-7 und ein Objektiv mit 50 mm Brennweite sowie zeitweise Zoom-Objektive (28-200 mm bzw. 35-105 mm Brennweite). Es wurden Fuji Chrome 100 ASA Farb-Diafilme benutzt.

Das Foto einer Farb-Infrarot-Befliegung (IR) (Senkrecht-Aufnahmen) aus dem Jahr 1992 stand für die Analyse zur Verfügung. Es wurde gescannt (Typ: PlusTek OpticPro 9636T) und als tif-Datei gespeichert. Im Bildverarbeitungsprogramm wurde es in ein Schwarzweiß-Bild konvertiert. Die gerahmten Dias wurden mit einem Durchlicht-Scanner (Typ s.o.) mit einer Auflösung von 600 dpi digitalisiert und als Datei im tif-Format gespeichert.

#### Geometrische Korrekturen

Im GIS Idrisi32 erfolgte die Geokodierung der einzelnen Farb-Kanäle über ein lineares Nearest-Neighbour-Resampling. Zur Referenzierung wurden die Feldgrenzen benutzt, die im Luftbild erkennbar waren und im GIS im Gauß-Krüger-Format vorlagen. Die Georeferenzierung war im allgemeinen mit einer Genauigkeit von einem bis eineinhalb Bildpunkten möglich. Dies entspricht bei der verwendeten Auflösung einer Lage- Ungenauigkeit des geokodierten Luftbildes von zwei bis dreieinhalb Metern. Es wurde das Idrisi32-Modul RESAMPLE genutzt.

#### Spektrale Korrekturen

In verschiedenen Luftbildern traten Helligkeitsgradienten auf. Die Korrektur dieser Trends erfolgte linear in den einzelnen Kanälen. Zur Korrektur wurde eine Koeffizientenkarte genutzt, die aus der berechneten Trendoberfläche des Feldbereiches erstellt wurde. Es wurde das Idrisi32-Modul TREND und der IMAGE CALCULATOR genutzt.

#### Klassifizierungsverfahren

Für die manuelle Vektorisierung der Luftbild-Strukturen wurde das Bild im Colour-Composit-Format in die Digitalisierungs-Software CartaLinx als Hintergrundbild eingebunden. Digitalisierte Grenzlinien wurden anschließend in Idrisi32 auf eine Rasterkarte umformatiert. Die Länge der quadratischen Rasterzellen betrug 5m. Anhand der tabellierten Häufigkeitsverteilung der Rot-Kanalreflexion werden die Quantile mit je 10% oder 20% Abstand bestimmt (Modul HISTO). Diese Grenzen dienen zur anschließenden Klassifizierung des Luftbildes (Modul RECLASS). Die Methode wird im folgenden als Q-10- bzw. Q-20-Methode bezeichnet. Bei dem Q-20 Verfahren wurden dabei beispielsweise die Bildpunkte, welche die 20% höchsten Reflexionswerte im Rotkanal aufweisen, in der ersten Klasse (1-20%) zusammengefasst. Die Bildpunkte, die anhand ihrer Reflexionswerte in den Bereich zwischen den 20%- und 40%-Quantilen liegen, werden in der zweiten Klasse zusammengefasst (21-40%) usw.

Mit dem Luftbild vom 18.7.2001 wurde zusätzlich eine überwachte Klassifikation nach dem Maximum-Likelihood-Verfahren durchgeführt (EASTMAN (1999)). Nach der manuellen Digitalisierung der Trainingsareale wurden die Idrisi32-Module MAKESIG und MAXLIKE genutzt.

### 3.5.3 Ergebnisse

#### 3.5.3.1 Allgemeine Beobachtungen

Für die Kartierung der Standort-Heterogenität auf landwirtschaftlich genutzten Feldern waren die in den drei Jahren angebauten Fruchtarten unterschiedlich gut geeignet. Eine grundsätzliche Trennung hinsichtlich ihrer Eignung war zwischen Kartoffel und Zuckerrübe einerseits und den Wintergetreidearten (Gerste, Roggen, Weizen), Winterraps und Körnererbse andererseits zu machen.

Die ersten beiden Pflanzenarten bilden die vorhandenen Standortunterschiede nur in speziellen Ausnahmesituationen deutlich ab. Dies war im Sommer 1999 auf Zuckerrüben-Feldern der Fall. Aufgrund eines längeren niederschlagsfreien Zeitabschnittes mit zugleich hohen Temperaturen wurde der Bodenwasservorrat stark beansprucht und dadurch die Rübenpflanzen vor allem auf den Sand-Böden in ihrem Wachstum beeinträchtigt. Nur in denjenigen Bereichen des Feldes, in denen mächtige Löss-Böden auftreten, war es den Pflanzen möglich, die Blätter funktionstüchtig zu erhalten. Diese unterschiedlich grünen Bereiche der Felder waren im August aus der Luft deutlich zu erkennen. Zum anderen trat auf Kartoffel-Feldern im Frühjahr 2000 nach starken Niederschlägen oberflächiger Wasserabfluss auf. Das Wasser sammelte sich in tiefer gelegenen Bereichen des Feldes. Diese Feuchteunterschiede der Bodenoberfläche und spätere Auflaufverzögerungen der Kartoffelpflanzen waren im Luftbild für einige Wochen als unterschiedliche Braun- bzw. Grüntöne erkennbar. Des Weiteren ist eine unterschiedliche Bestandesdichte bei den beiden Pflanzenarten auf Luftbildern zu erkennen. Diese treten im Untersuchungsgebiet vor allem auf sandigen Böden auf. Von diesen drei Situationen abgesehen erwiesen sich die Pflanzenarten Kartoffel und Zuckerrübe für die Standorterkundung mit der Luftbild-Fernerkundung als weitgehend ungeeignet. Ein wichtiger Grund für diese schlechte Eignung dürfte sicherlich in der Tatsache zu suchen sein, dass der Kartoffel- und Zuckerrüben-Anbau auf den Feldern des Untersuchungsgebietes i.d.R. mit Zusatz-Beregnung stattfindet. Dadurch sind Unterschiede des Bodenwasservorrates nivelliert worden.

Von den fünf anderen Pflanzenarten zeichnet sich die Wintergerste als diejenige Fruchtart aus, die am empfindlichsten auf die unterschiedlichsten Standortbedingungen reagiert. Bei diesen konnte es sich um das Bodenwasser, die Stickstoffversorgung, die Bodenstruktur, die Vorfruchtunterschiede oder die historischen Nutzungsgrenzen innerhalb der Felder handeln.

Im Untersuchungsgebiet wird der absolut speicherbare Bodenwasservorrat vor allem durch die unterschiedliche Lössmächtigkeit über Sand hervorgerufen (siehe auch Kapitel 2.2.2.4). Diese Standortunterschiede sind ertragsrelevant und ortsstabil. Wintergerste bildet die Grenzen der unterschiedlichen Lössmächtigkeiten spätestens nach dem Termin der Blüte deutlich ab. Auf Feldern mit Winterroggen wirken die Übergänge diffuser (Abb. 47). Winterweizen gleicht in seinem Abbildungsverhalten weitgehend der Gerste.

Bestände von Wintergerste bildeten häufig Muster ab, deren Ursache möglicherweise in den Auswirkungen einer unterschiedlichen Vorbewirtschaftung zu suchen ist. Durch den abrupten Wechsel von Farbtönen entlang von zum Teil linearen oder rechtwinkligen Strukturen wird diese Vermutung nahe gelegt. Im Luftbild der Abb. 48 ist im nordöstlichen Bereich des Feldes eine scharf abgegrenzte, eckige Struktur zu erkennen, in welcher der Pflanzenbestand deutlich grüner ist als in der direkt angrenzenden Fläche. Der stärker grün reflektierende

Bereich des Feldes wurde bis zum Beginn der 1990er Jahre gesondert bewirtschaftet. Mit Hilfe von georeferenzierten Luftbildplänen aus dem Jahr 1953 ließen sich die damaligen Nutzungs- und Eigentums Grenzen nachträglich digitalisieren. Rechts in der Abb. 48 sind die Verläufe der Feldgrenzen von 1953 dargestellt. Die Struktur, die im Luftbild in unterschiedlichen Grüntönen erscheint, ist auch am Verlauf der Feldgrenzen zu erkennen. Die Ursache dieser Reflexionsunterschiede wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht. Im Jahr 2000 (Wintergerste) und 2001 (Winterraps) trat diese Struktur nicht in Erscheinung.

Nicht immer lassen sich die im Luftbild auftretenden Muster anhand alter Unterlagen nachvollziehen. Aufgrund der hohen Dynamik in den Veränderungen der Feldgrenzen seit der Auflösung der LPG im Jahr 1990 gab es zum Teil Schwierigkeiten, die ehemaligen Feldgrenzen ausreichend genau zu rekonstruieren. Sehr wertvoll waren im allgemeinen Gespräche mit Ortsansässigen oder Mitarbeitern der Nuthequelle GmbH.



**Abb. 47: Luftbild von der Grenze zwischen den Feldern '2800' (links, Winterroggen) und '2700' (rechts, Wintergerste) (Luftbild vom 15.6.1999, Schrägaufnahme, Blick nach Süden)**



**Abb. 48: Luftbild des Wintergersten-Feldes '2000' (links, Blickrichtung nach Westen) und die aus Luftbild-Plänen rekonstruierten Feldgrenzen aus dem Jahr 1953 (rechts, Größe: 43 ha) (Luftbild vom 15.6.1999; Schrägaufnahme)**

Die im Luftbild erkennbaren Strukturen in Getreidebeständen erhalten sich meist bis zur Ernte, jedoch sinkt der Kontrastreichtum der Bilder von einem gewissen Zeitpunkt an mit zunehmender Annäherung an den Erntetermin wieder ab.

Körnererbse reagiert ähnlich sensibel wie die Getreidearten. Diese Pflanzenart bildet nach der Blüte die unterschiedliche Wasserspeicherkapazität des Bodens gut ab (Abb. 52).

Winterraps reagiert mit dem Beginn und noch deutlicher mit dem Ende der Blühphase auf unterschiedliche Wachstumsbedingungen. Diese Unterschiede erhalten sich ebenfalls zu großen Teilen bis zur Ernte (Abb. 49).

Für alle fünf Pflanzenarten ist es typisch, dass ca. drei bis vier Wochen vor der Mähdruschernte die Heterogenität und der Kontrastreichtum der Luftbilder maximal ist.

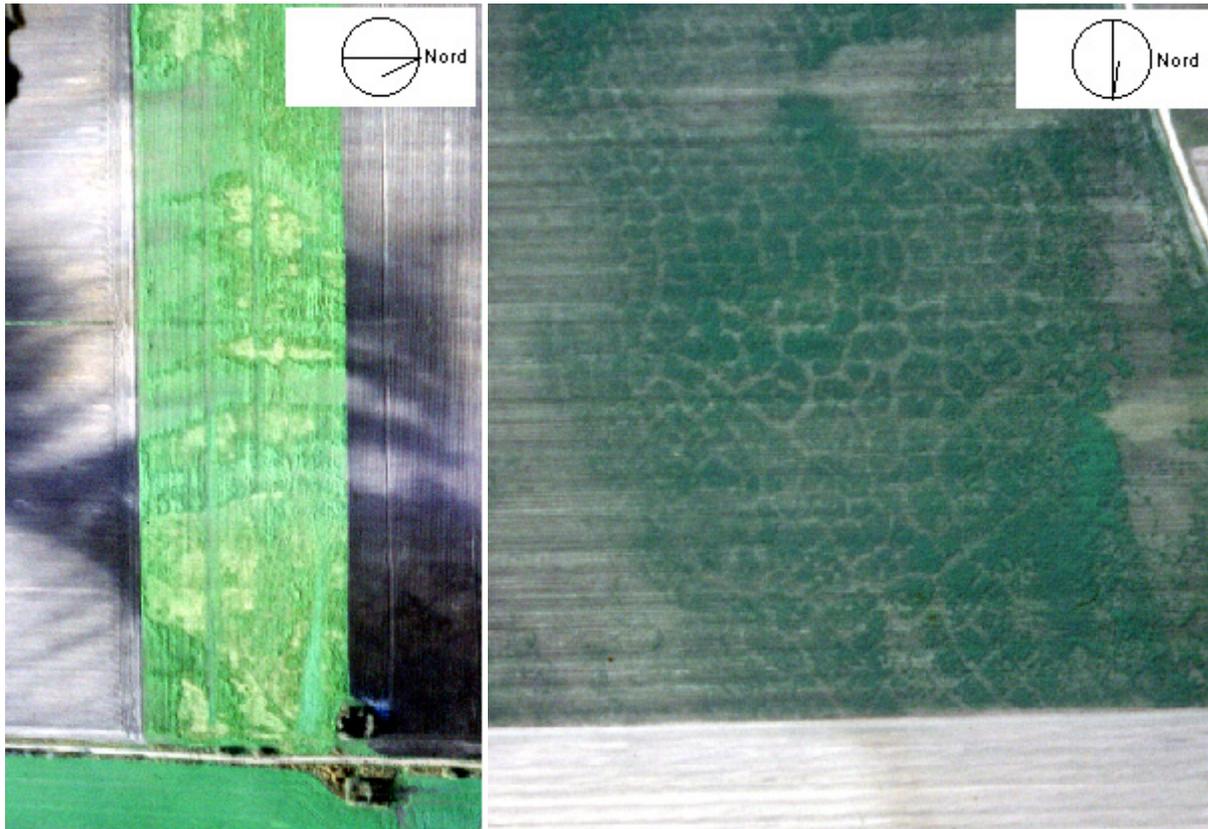
Luftbilder von Gelbsenf-Beständen im Herbst und Winter lassen erkennen, dass auch der als Zwischenfrucht angebaute Gelbsenf nach dem ersten Frost zur Kartierung von Standort-Unterschieden genutzt werden kann (Abb. 50, links). Die Gelbsenf-Bestände mit guter Stickstoff-Versorgung waren bei ausreichend spätem Saattermin im allgemeinen noch nicht deutlich in die Blühphase eingetreten und hatten keine verholzten Stängel. Auf Sand-Böden hingegen blühten die Pflanzen bereits und die Stängel waren teilweise verholzt. Der erste stärkere Frost schädigt das Gewebe der Pflanzen. Dadurch sinkt die Stabilität von nicht verholzten Stängeln und die Pflanzen knicken in unterschiedlicher Höhe ab. Die teilweise verholzten Stängel der Pflanzen auf den Sand-Böden behalten eine ausreichende Stabilität. Infolgedessen bleiben diese Pflanzen stehen und das Licht wird weiterhin an den obersten

grünen Blättern reflektiert. In lagernden Senf-Beständen sind im Luftbild die hell reflektierenden Stängelanteile gut sichtbar.



**Abb. 49: Luftbild der Felder '1800' (links, Winterroggen, 19 ha) und '1700' (rechts, Winterraps) (Luftbild vom 19.6.2000; Senkrechtaufnahme)**

Luzerne als eine tief wurzelnde mehrjährige Pflanzenart kann ebenfalls Standort-Unterschiede abbilden. Die Abb. 50 (rechts) zeigt einen Ausschnitt eines Luzernefeldes im Herbst 1999 nach dem letzten Schnitt der Luzerne. Polygon-Strukturen im Boden, die vermutlich unter Permafrostbedingungen entstanden sind, werden durch das unterschiedliche Wachstum der Luzerne sichtbar gemacht. Auf Luftbildern der beiden folgenden Jahre, als das Feld mit Wintergerste bzw. Winterroggen bestellt war, sind keine ähnlichen Strukturen erkennbar gewesen.



**Abb. 50: Luftbildaufnahme eines Gelbsenf-Bestandes nach dem ersten Frost (links; Luftbild vom 23.11.2001) und eines Luzerne-Feldes (rechts; Luftbild vom 12.10.1999)**

Auch das Luftbild vom nicht oder kaum mit Pflanzen bewachsenen Boden kann Standort-Informationen bereitstellen: die Abb. 51 zeigt eine Aufnahme vom 23. November 2001 nach einer Nacht mit leichtem Schneefall. Über die Feldgrenzen hinweg erstrecken sich Strukturen, die durch eine unterschiedlich starke Schneebedeckung hervorgerufen werden. Auf dem Feld am rechten Bildrand setzen sich diese Strukturen in leicht variierenden Grüntönen im aufgelaufenen Getreide fort.

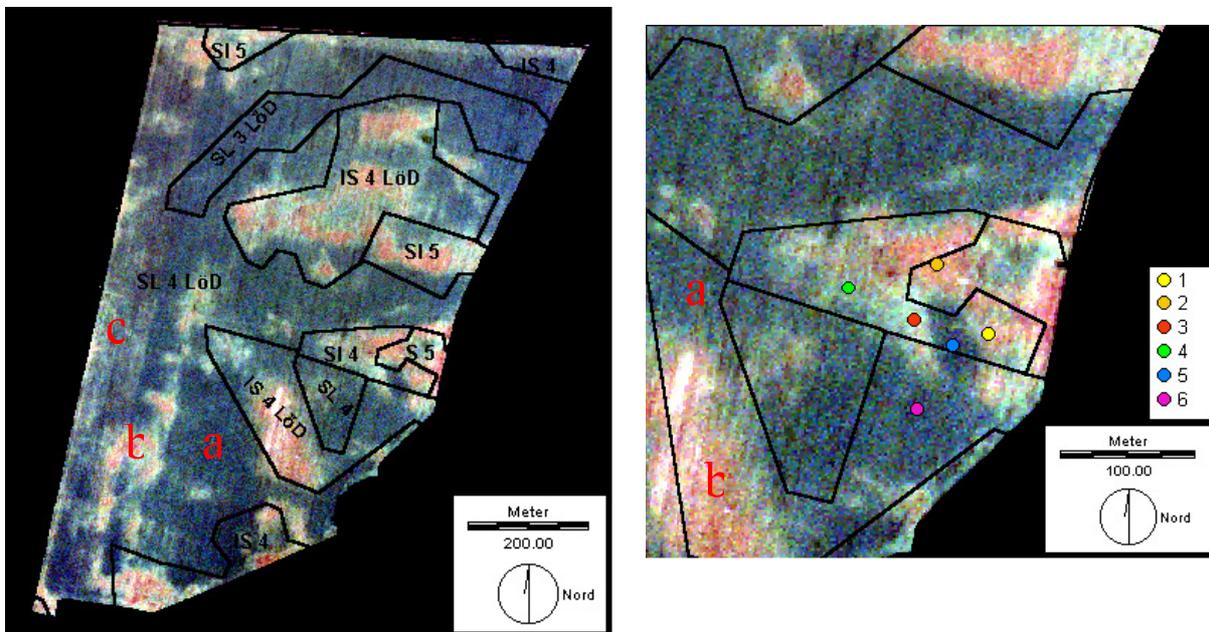


**Abb. 51: Unterschiedliche Schneebedeckung innerhalb einer Landschaft (Luftbild vom 23.11.2001)**

### 3.5.3.2 Vergleich von Klassifizierungsverfahren

Das Luftbild vom 18. Juli des Jahres 2001 dient für den Vergleich von verschiedenen Klassifikationsverfahren.

Aus etwa 2400 m Höhe wurde das in der Abb. 52 (links) dargestellte Foto gemacht. Es zeigt das 53 Hektar große Feld '3300', das mit Körnererbsen bestellt war. Deutlich zu erkennen sind Areale mit unterschiedlichen Grün- (a) bzw. Brauntönen (b). Diese Areale repräsentieren Bereiche des Feldes, in denen sich unterschiedlich weit abgereifte Erbsenbestände befinden. Vor allem in den weiter abgereiften Bereichen (braune Färbung) ist auch ein zum Teil erheblicher Flächenanteil des Bodens sichtbar und an der Reflexion beteiligt. Im westlichen Bereich des Feldes befindet sich ein Streifen von ca. 90-100m Breite, der etwas hellere Grüntöne aufweist als die weiter östliche angrenzenden Bereiche (c). Ebenfalls in die Abbildung eingezeichnet sind die Grenzlinien der Karten der Reichsbodenschätzung sowie die jeweiligen Klassenbezeichnungen.



**Abb. 52: Luftbild des Feldes '3300' vom 18.7.2001 (links; 53 ha) bzw. ein Ausschnitt aus dem östlichen Feldbereich mit sechs Beprobungsorten (rechts) (Fruchtart: Erbse; Aufnahmehöhe 2400 m, Kanäle trendkorrigiert, Buchstaben siehe Text)**

Rechts in der Abb. 52 ist ein Ausschnitt aus dem östlichen Bereich des Feldes dargestellt. Es sind sechs Orte eingezeichnet, die aufgrund der unterschiedlichen Färbung im Luftbild ausgewählt wurden. An diesen wurde mit dem Pürckhauer-Bohrstock bis 1 m Tiefe das Bodenprofil ermittelt. Die Ergebnisse sind in der Tab. 18 aufgeführt. An den im Luftbild braun reflektierenden Punkten 1 und 2 finden sich Braunerden auf Sand, im Unterboden sind keine deutlichen Tonbänderungen zu erkennen. Die Profile im hellgrünen Bereich des Luftbildes (Punkte 3 & 4) repräsentieren geringmächtige Parabraunerden auf Löss über Sand, die im Unterboden bei 71 bzw. 85 cm Tiefe Tonbänder im Sand aufweisen. Mächtige Lössauflagen über Sand wurden im grünen bzw. dunkelgrünen Bereich des Luftbildes kartiert (Punkte 5 & 6). Am Punkt 5 war die Reflexion im Grün und Rot-Bereich des Spektrums insgesamt am geringsten von allen untersuchten Punkten. Dort konnte die Grenze zwischen

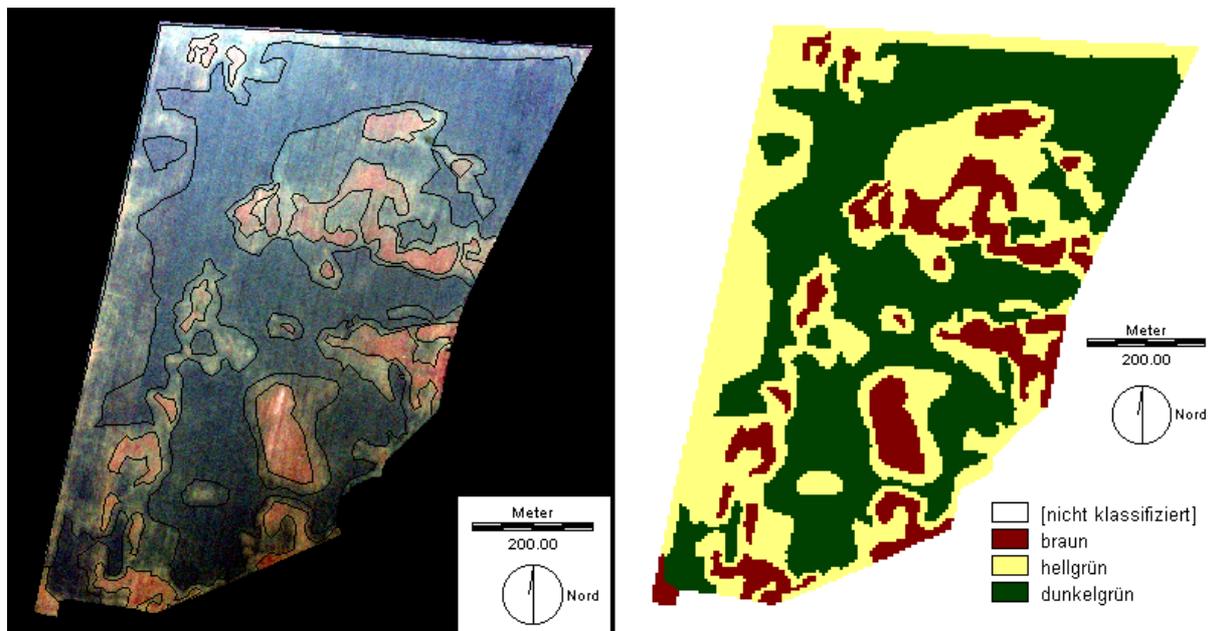
Löss und Sand nicht in den obersten 100 cm nachgewiesen werden. Am Punkt 6 befindet sich in ca. 55-75 cm Tiefe ein schwach ausgeprägter fossiler  $A_h$ -Horizont.

**Tab. 18: Horizontfolgen von sechs Bodenprofilen auf dem Feld 3300 (Auswahl anhand des Luftbildes vom 18.7.2001; siehe auch Abb. 52 bzw. Erläuterungen im Text)**

Punkt	Luftbild-Farbe	Bodenprofil bis 100 cm Tiefe
1	braun	0-27 cm $A_p$ / 27-50 cm $A_1$ / 50-100 cm $B_v$ (Sand)
2	braun	0-27 cm $A_p$ / 27-100 cm $B_v$ (Sand)
3	hellgrün	0-27 cm $A_p$ / 27-48 cm $A_1B_t$ / 48-100 cm II $B_{bt}$ (Löss über Sand)
4	hellgrün	0-27 cm $A_p$ / 27-40 cm $A_1B_t$ / 40-100 cm II $B_{bt}$ (Löss über Sand)
5	dunkelgrün	0-27 cm $A_p$ / 27-39 cm $A_h$ / 39-100 cm $AlB_t$ (Löss)
6	dunkelgrün	0-27 cm $A_p$ / 27-30 cm $A_h$ / 30-52 cm $A_1B_t$ / 52-79 $A_1B_tA_h$ 79-93 cm $A_1B_t$ / 93-100 cm II $B_{bt}$ (Löss über Sand)

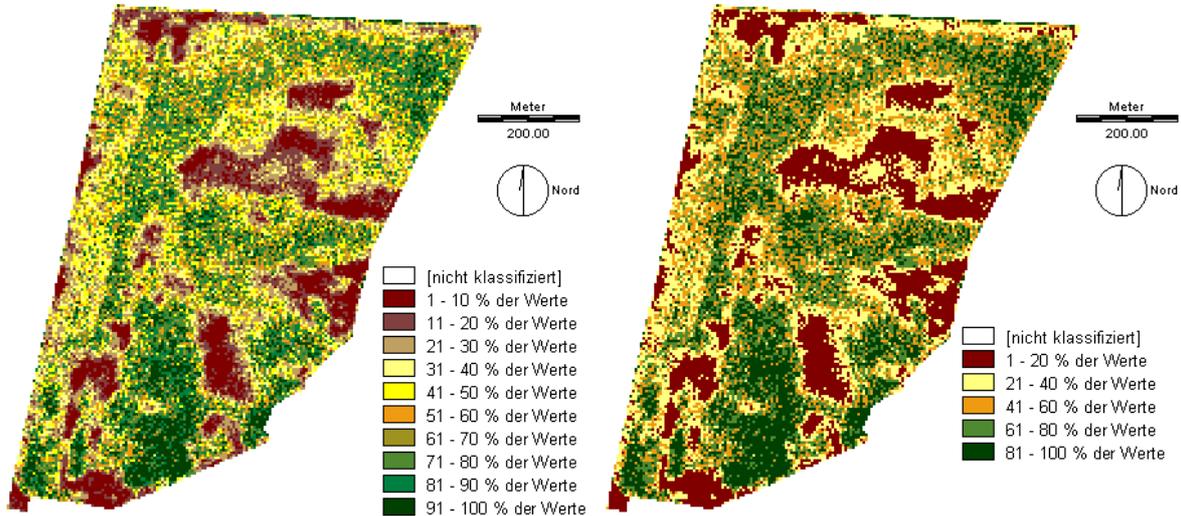
Die Grenzlinien der von Hand durchgeführten Digitalisierung am Bildschirm sind zusammen mit dem ursprünglichen Luftbild in der Abb. 53 dargestellt. Das Bild weist einen starken Helligkeitsanstieg in nordwestlicher Richtung auf. Dieser ist durch eine fehlerhaft arbeitende Kamera verursacht worden. Die Korrektur dieses Trends erfolgte linear in den einzelnen Farbkanälen und führte zu einem deutlich gleichmäßigeren Bild (Abb. 52, links).

Als Hintergrundbild für die manuelle Digitalisierung der Areale wurde das unkorrigierte Luftbild verwendet. Aus den Grenzlinien konnte im Anschluss die in der Abb. 53 rechts dargestellte Rasterkarte erzeugt werden. 13% der Fläche werden als 'braun', 40% als 'hellgrün' und 47% als 'dunkelgrün' klassifiziert.

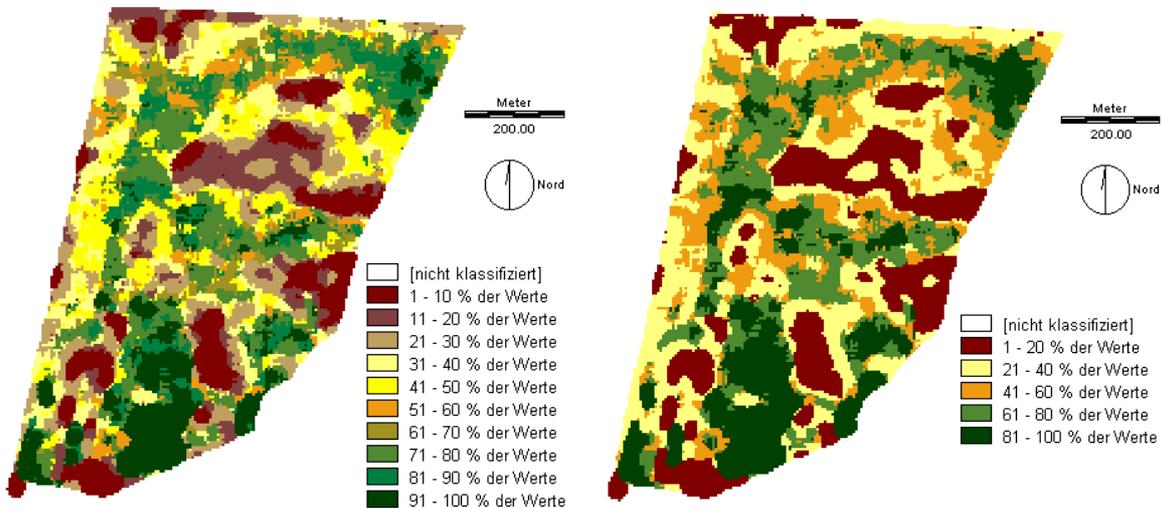


**Abb. 53: Luftbild des Feldes '3300' vom 18.7.2001 mit den manuell digitalisierten Grenzlinien (links; 53 ha; Kanäle nicht trendkorrigiert) sowie die aus diesen Grenzlinien erstellte Rasterkarte (rechts) (Fruchtart: Erbse; Aufnahmehöhe 2400 m)**

In der Abb. 54 ist das Ergebnis der Quantil-Klassifikation des Luftbild-Rotkanals zu sehen. Es erfolgte eine Abstufung in 10%- und 20%-Schritten. Die so gewonnenen Rasterkarten wurden anschließend einer Modal-Filterung unterzogen (5x5-Matrix). Die auf diese Weise gefilterten Karten sind in der Abb. 55 wiedergegeben.



**Abb. 54: Rasterkarten der Rotkanal-Klassifikation mit der Q-10- (links) und Q-20-Methode (rechts) für das Feld '3300' (Luftbild vom 18.7.2001; 53 ha; Fruchtart: Körnererbse; Aufnahmehöhe 2400 m; Länge der Rasterzellen: 5 m)**

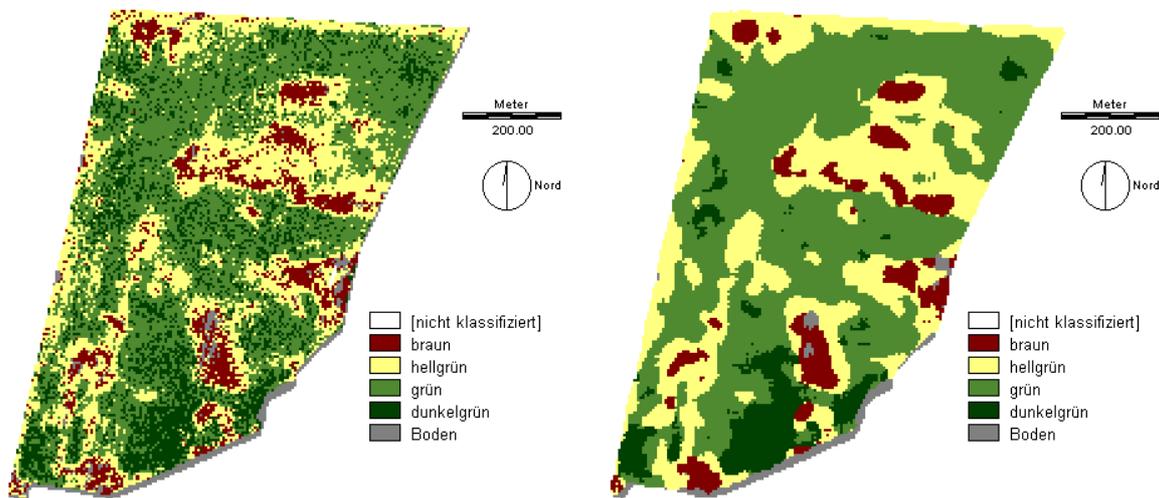


**Abb. 55: Rasterkarten der Rotkanal-Klassifikation mit der Q-10 (links) und Q-20-Methode (rechts) für das Feld '3300' mit anschließender 5x5-Modalfilterung (Luftbild vom 18.7.2001; 53 ha; Fruchtart: Körnererbse; Aufnahmehöhe 2400 m; Länge der Rasterzellen: 5 m)**

Die braunen Signaturen der erzeugten Rasterkarten entsprechen weitgehend den braunen Bereichen im Luftbild. Sie haben im Rotkanal die höchste Reflexion. Die dunkelgrün reflektierenden Areale des Luftbildes im Süden und Nordosten des Feldes weisen im Rotkanal die geringste Reflexion auf und werden durch die Modalfilterung deutlich herausgearbeitet. Hellgrüne Bildpunkte mit einer mittleren Reflexionsintensität im Rotkanal entsprechen nach

der Klassifizierung den Signaturen der 30%- bis 70%-Quantile. Diese Punkte finden sich sowohl zusammenhängend in verschiedenen Bereichen des Feldes als auch in Form sehr schmaler Streifen zwischen Arealen mit sehr hoher und sehr geringer Reflexion im Rotkanal. Der erste Areal-Typ tritt z.B. im Nordbereich des Feldes oder im westlich gelegenen Streifen auf, der zweite Typ z.B. im mittleren oder südlichen Teil des Feldes.

Die überwachte Klassifikation und die daran anschließende Modalfilterung führten zu den in der Abb. 56 dargestellten Rasterkarten. Die klare Trennung der 'braun' bis 'dunkelgrün' reflektierenden Bereiche wird deutlich. Die Klasse 'Boden' ist in drei kleinen, relativ zusammenhängenden Bereichen innerhalb des Feldes festgestellt worden, von denen bereits zwei als Trainingsgebiete zur Entwicklung der spektralen Signatur gedient haben. Außerdem ist die Klasse 'Boden' am südöstlichen Feldrand zu finden. Die Klasse 'braun' umfasst 9%, 'hellgrün' 43%, 'grün' 43%, 'dunkelgrün' 17% und 'Boden' 3% der Bildpunkte. Der hellere Streifen im Westen des Feldes findet sich nicht deutlich im Ergebnis der Klassifikation wieder.



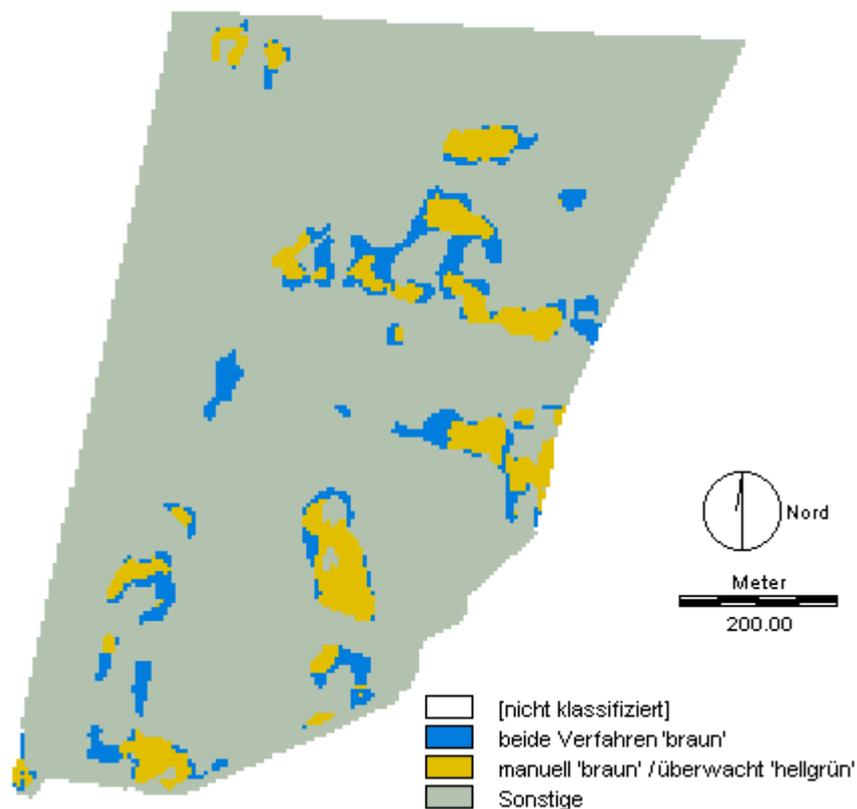
**Abb. 56: Rasterkarte der überwachten Klassifikation der drei Farb-Kanäle (links) sowie das Ergebnis der 5x5-Modalfilterung (rechts) für das Feld '3300' (Luftbild vom 18.7.2001; 53 ha; Fruchtart: Körnererbse; Aufnahmehöhe 2400 m; Länge der Rasterzellen: 5 m)**

In der Tab. A-20 im Anhang ist das numerische Ergebnis eines Vergleichs der modalgefilterten Karten wiedergegeben. Die Karte der überwachten Klassifikation dient als Referenzkarte.

Die manuelle Digitalisierung hat vor allem Schwierigkeiten, den Übergang zwischen 'braun' und 'grün' klar auszuweisen. Die Klasse 'braun' der manuellen Methode besteht je zur Hälfte aus Bildpunkten, die in der überwachten Klassifikation als 'braun' oder 'hellgrün' eingestuft werden. Die unterschiedlich eingestuften Bildpunkte grenzen fast ausschließlich an die Bereiche an, die mit der manuellen Methode als 'braun' eingestuft worden sind (Abb. 57). Eine etwas bessere Trennung erfolgt in der Klasse 'hellgrün': knapp zwei Dritteln der Bildpunkte, die mit beiden Methoden als 'hellgrün' klassifiziert wurden, steht ein Drittel der Punkte gegenüber, die mit der manuellen Methode als 'grün', mit der Referenzmethode jedoch als 'hellgrün' klassifiziert worden sind. Der manuell als 'dunkelgrün' ausgegrenzte Bereich

besteht zu über 80% aus Bildpunkten, die von der Referenzmethode als 'grün' eingestuft worden sind.

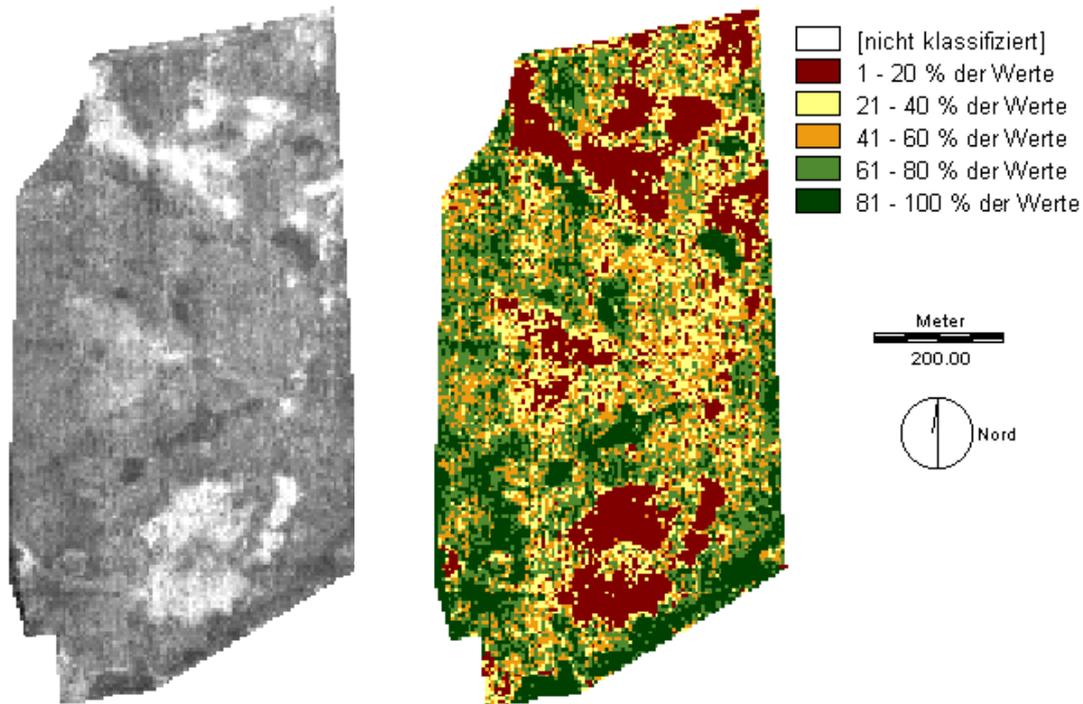
Die Q-20-Methode weist mit den Klassen '21-40%', '41-60%' und '61-80%' zum Teil sehr reine Bereiche aus. Die Klasse '1-20%' besteht zu knapp 40% aus 'braun'-Bildpunkten der überwachten Klassifikation und zu etwa 60% aus der 'hellgrün'-Klasse. Ein ähnliches Verhältnis findet sich in der Klasse '81-100%' für die Klassen 'dunkelgrün' bzw. 'grün'. Die Q-10-Methode trennt die 'braun'-Pixel deutlicher von den 'hellgrün'-Bildpunkten. Die Klasse '31-40%' und '91-100%' erstrecken sich etwa je zur Hälfte auf zwei Klassen der Referenzmethode, die übrigen Klassen sind mit Werten von mehr als 80% an Bildpunkten einer Referenzklasse sehr einheitlich.



**Abb. 57: Crosstabulation-Bild für die Klassen 'braun' und 'hellgrün' der überwachten Klassifikation in den Bereichen, die mit der manuellen Digitalisierung als 'braun' angesprochen wurden (Luftbild vom 18.7.2001; 53 ha; Fruchtart: Erbse; Aufnahmehöhe 2400 m; Länge der Rasterzellen: 5 m)**

### 3.5.3.3 Nutzung von Luftbild-Aufnahmen zurückliegender Termine

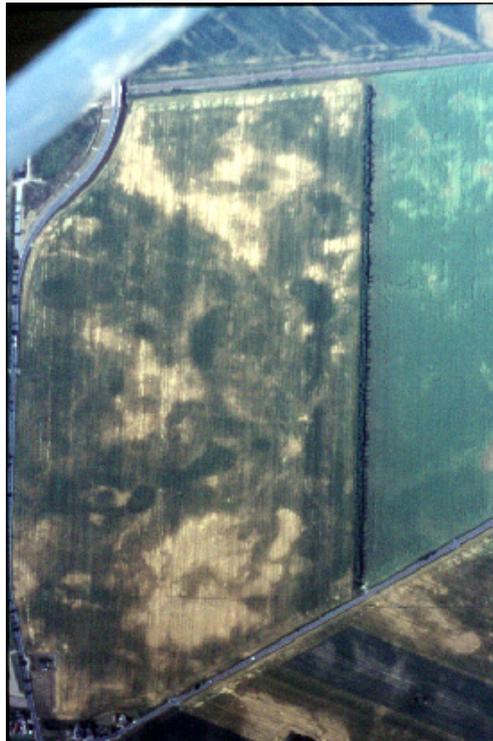
Das IR-Luftbild des Jahres 1992 (Abb. 58, links) wurde mit der Q-20-Methode klassifiziert (Abb. 58, rechts). Es ist eine deutliche Trennung der im Luftbild sehr hell und sehr dunkel reflektierenden Bereiche zu sehen, während der mittlere Bereich des Grauwerte-Spektrums nicht deutlich in zusammenhängende Areale gegliedert werden kann.



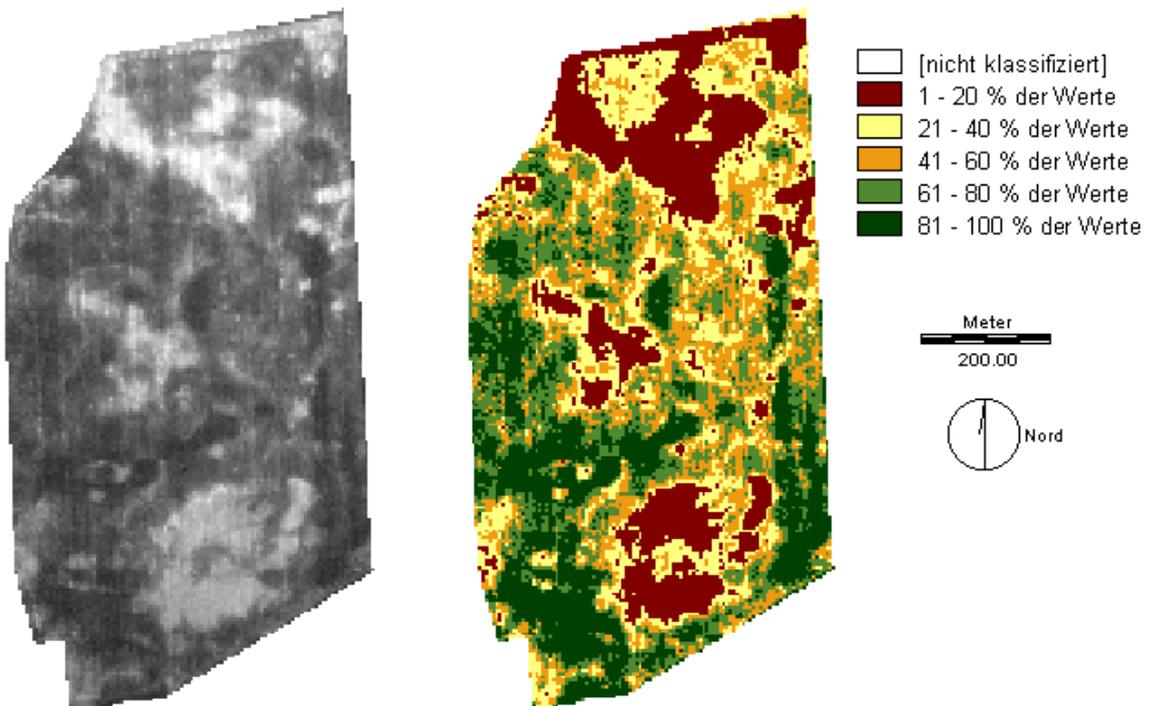
**Abb. 58: Grauwert-Bild der IR-Aufnahme (links) und Rasterkarte der Klassifikation des Rotkanals mit der Q-20-Methode (rechts) für das Feld '2600' (Termin der Aufnahme: 26.6.1992; Fruchtart: Sommergerste; Länge der Rasterzellen: 5 m)**

Eine Aufnahme vom selben Feld acht Jahre später am 8.6.2000 zeigt abreifende Wintergerste (Abb. 59). In SW-NE-Richtung ist ein leichter Anstieg der Helligkeit des Bildes zu erkennen. Die Abb. 60 zeigt links das unkorrigierte Grauwert-Bild des Rotkanals der Aufnahme. Rechts ist in derselben Abbildung die Q-20-Klassifikation dieser Grauwerte wiedergegeben.

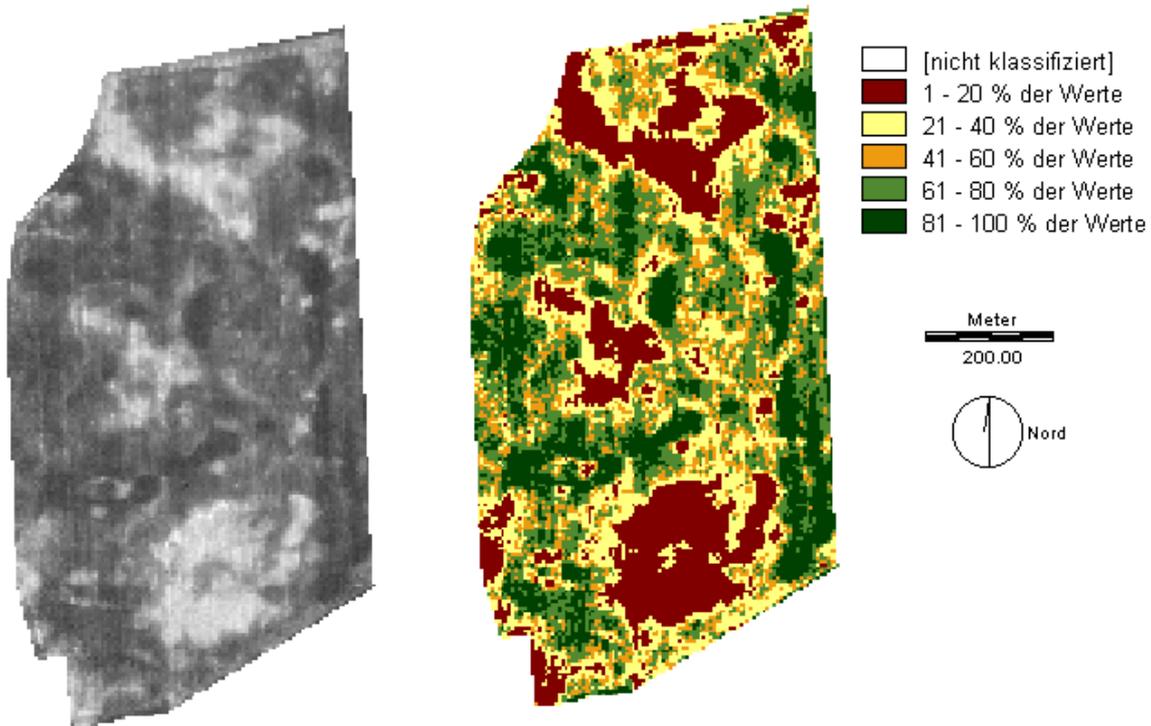
Abb. 61 zeigt das trendkorrigierte Grauwert-Bild des Rotkanals. Daneben ist die Q-20-Klassifikation dieser korrigierten Grauwerte wiedergegeben.



**Abb. 59: Farb-Luftbild des Feldes '2600' (Luftbild vom 8.6.2000; 46 ha; Fruchtart: Wintergerste)**



**Abb. 60: Grauwert-Bild des unkorrigierten Rotkanals (links) und Rasterkarte der Q-20-Klassifikation dieser Grauwerte (rechts) für das Feld '2600' (Luftbild vom 8.6.2000; 46 ha; Fruchtart: Wintergerste; Länge der Rasterzellen: 5 m)**

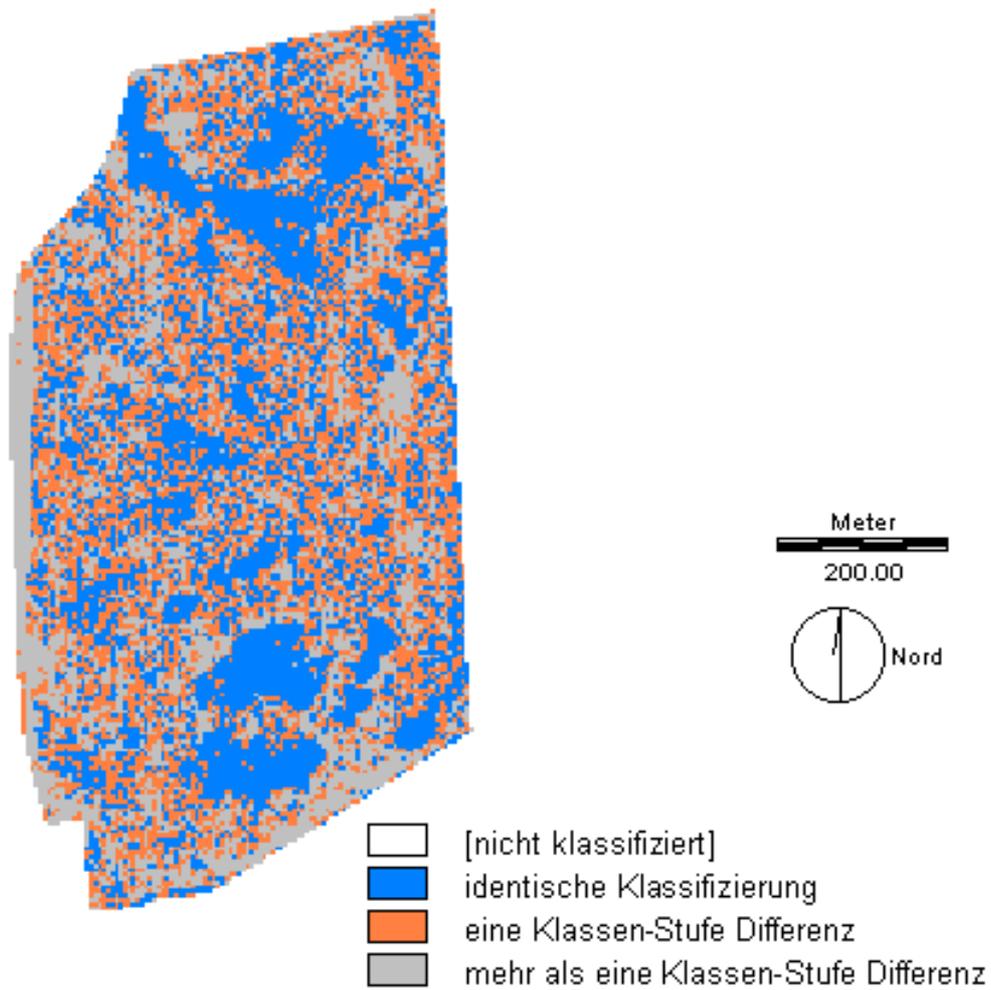


**Abb. 61: Grauwert-Bild des korrigierten Rotkanals (links) und Rasterkarte der Q-20-Klassifikation dieser Grauwerte (rechts) für das Feld '2600' (Luftbild vom 8.6.2000; 46 ha; Fruchtart: Wintergerste; Länge der Rasterzellen: 5 m)**

Durch die Korrektur des Helligkeitsgradienten verändert sich vor allem die Klasse '1-20%' im Süden und Norden des Feldes.

Die Strukturen der klassifizierten Rasterkarten des IR-Fotos und des trendkorrigierten Rotkanals der aktuellen Aufnahme ähneln sich in weiten Bereichen. Eine Quantifizierung dieser Ähnlichkeit erfolgte über den direkten Vergleich der einzelnen Rasterzellen beider Karten (Idrisi32-Modul CROSSTAB; Abb. 62).

37% der Bildpunkte innerhalb des Feldes werden bei beiden Bildern als identisch klassifiziert. Knapp 40% dieser identischen Zuordnungen treten in den am stärksten reflektierenden Bereichen auf, in denen die Gerste zu beiden Aufnahmetermen bereits am weitesten abgereift war. Bei 36% der Bildpunkte treten zwischen den beiden Rasterkarten Abweichungen auf, die eine Stufe betragen.



**Abb. 62: Ergebnis des Vergleichs von zwei Q-20-Rasterkarten der Luftbild-Information vom 26.6.1992 und vom 8.6.2000 des Feldes '2600' (46 ha; Länge der Rasterzellen: 5 m)**

### 3.5.4 Diskussion

Obwohl das Farb-Luftbild bereits seit vielen Jahrzehnten als wertvolles Hilfsmittel in den geographisch arbeitenden Wissenschaften genutzt wird (ALBERTZ (1991), TROLL (1939)), sind im Bereich des Standort-spezifischen Ackerbaus bisher nur wenige Anwendungsbeispiele vorhanden. Die Gründe für diesen Umstand sind nicht offensichtlich.

Die Diskussion der eigenen Ergebnisse folgt daher vier Hypothesen, die zur Erklärung des geringen Einsatzumfangs von Luftbildern aufgestellt werden. Die Hypothesen versuchen, jeweils unterschiedliche Bereiche der Luftbild-Fernerkundung zu betonen: die Erstellung, die Aufbereitung, die Klassifikation und die Interpretation von Luftbildern.

#### 1. Hypothese:

Die Erstellung von Luftbildern ist verfahrenstechnisch zu anspruchsvoll. Daher ist diese Methode der landwirtschaftlichen Standorterkundung für praktische Fragestellungen bislang nicht relevant.

#### 2. Hypothese:

Die Erstellung von Luftbildern ist unproblematisch, aber die Aufbereitung der Luftbild-Daten bereitet Schwierigkeiten. Daher ist diese Methode der landwirtschaftlichen Standorterkundung für praktische Fragestellungen bislang nicht relevant.

#### 3. Hypothese:

Die Erstellung und Aufbereitung von Luftbildern ist unproblematisch, aber die gewonnenen Daten können nicht klassifiziert werden. Daher ist diese Methode der landwirtschaftlichen Standorterkundung für praktische Fragestellungen bislang nicht relevant.

#### 4. Hypothese:

Die Erstellung, Aufbereitung und Klassifikation von Luftbildern ist unproblematisch, aber die gewonnenen Klassen können nicht interpretiert werden. Daher ist diese Methode der landwirtschaftlichen Standorterkundung für praktische Fragestellungen bislang nicht relevant.

#### 1. Hypothese - Die Erstellung von Luftbildern ist problematisch

Die Erstellung von aussagekräftigen Luftbildern ist von den aktuellen technischen Möglichkeiten abhängig. Die wichtigsten verfahrenstechnischen Aspekte der Erstellung von Luftbildern für landwirtschaftliche Fragestellungen sind m.E.:

- die erzielbare geometrische Auflösung von Details auf der Erdoberfläche,
- die flächendeckende Erfassung der Erdoberfläche,
- der Aufnahmewinkel und
- die Flexibilität des Befliegungstermins

#### *Geometrische Auflösung*

Die auf dem Film abgebildete Detailgenauigkeit hängt von der Güte der verwendeten Optik, der Körnung des Filmmaterials, der Flughöhe und der Brennweite des Objektivs ab. In einem zweiten Schritt kommt der Einfluss des Digitalisierungsverfahren hinzu.

In den eigenen Untersuchungen wurden handelsübliche Spiegelreflex-Kameras und Objektive der mittleren Preisklasse verwendet. Die Kleinbild-Diapositive (100 ASA-Filme) wurden anschließend direkt gescannt.

Der Bildmaßstab (1:M) errechnet sich nach SCHNEIDER (1974) über die Formel:

$$M = \text{Flughöhe [m]} \times \text{Brennweite}^{-1} \text{ [m]}.$$

Da die Kleinbild-Diapositive über einen Durchlicht-Scanner mit einer Auflösung von 600 dpi (dots per inch = Bildpunkte je 25.4 mm) digitalisiert wurden, entspricht ein Bildpunkt des digitalen Luftbildes bei z.B. 2400 m Flughöhe und der Verwendung eines 50mm Objektivs einem Areal von etwa 3.6 m<sup>2</sup> auf der Erdoberfläche. Über diesen Rechenweg sind die Wünsche des Nutzers mit den jeweils technischen Möglichkeiten abzustimmen. Nebst einer Verringerung der Flughöhe und/oder der Verwendung anderer Brennweiten wäre auch die Veränderung der Scanner-Auflösung (z.B. 1200 dpi) denkbar, um eine feinere Auflösung von Details der Erdoberfläche zu erzielen. BILL ET AL. (2002) verwenden eine Digitalkamera. In diesem Fall ist bereits die Bildauflösung der Kamera entscheidend. Inwieweit die Auflösung durch die gröbere Körnung von lichtempfindlicheren Filmen verringert wird, wurde nicht untersucht. Der 100 ASA-Film erwies sich zu allen Befliegungsterminen als vollkommen ausreichend lichtempfindlich.

#### *Flächendeckende Erfassung*

Um eine flächendeckende Erfassung des interessierenden Gebietes zu gewährleisten, kann entweder über die Flughöhe oder die Brennweite des Objektivs eine Anpassung erfolgen. In den eigenen Untersuchungen wurde vornehmlich ein 50mm-Objektiv eingesetzt und es wurde versucht, jeweils ein gesamtes Feld auf einem Kleinbild-Diapositiv zu erfassen, damit eine unproblematische Georeferenzierung über Punkte der DPGS-vermessenen Feldgrenzen erfolgen konnte. Von Weitwinkel-Objektiven sollte aufgrund der geometrischen Verzerrungen auf dem Bild abgesehen werden. Eine Anpassung an die jeweiligen Bedingungen erfolgte daher über die Flughöhe. Wegen der zum Teil über 70 ha großen Felder und deren nicht immer quadratischer Form waren Flughöhen von mehr als 2000m erforderlich. Die Georeferenzierung konnte im Anschluss über die Koordinaten der Feldgrenzen erfolgen und es war keine weitere Vermessung von zusätzlichen Passpunkten erforderlich. BILL ET AL. (2002) und SCHMIDHALTER & SELIGE (2002) haben mit der passpunktlosen, automatisierten Aero-Triangulation auf der Basis von Fluglagedaten ein Verfahren vorgestellt, mit dem ohne zusätzlichen Aufwand flächendeckende Luftbilder aus den Einzelaufnahmen erstellt werden können. Eine Anpassung über die Flughöhe, die Brennweite oder das Filmformat ist bei diesen Verfahren nicht notwendig.

#### *Aufnahmewinkel*

Schrägaufnahmen sind aus einem Kleinflugzeug ohne großen Aufwand anzufertigen. Sie können der allgemeinen Dokumentation dienen oder z.B. dem visuellen Vergleich mit einer Ertragskarte dienen. Schrägaufnahmen können Erscheinungen im Bild festhalten, die auf Senkrechtaufnahmen nicht zu erkennen sind. Zum Beispiel sind unterschiedliche Grüntöne

von frisch aufgelaufenen Getreidebeständen in der Schrägaufnahme deutlich zu erkennen, während in der Senkrechtaufnahme lediglich die Färbung des Bodens abgebildet wird.

Wenn das Luftbild Computer-gestützt weiterverarbeitet und z.B. zur Erstellung einer Karte genutzt werden soll, sind Senkrechtaufnahmen notwendig. Professionelle Befliegungsfirmen erfüllen diese Anforderung durch Spezialkonstruktionen mit beweglich im Flugzeugboden angebrachten Kamerasystemen, welche Neigungs- und Rollbewegungen während des Fluges ausgleichen können. In dieser Arbeit wurden weitgehend senkrechte Aufnahmen durch das geöffnete Fenster des Copiloten einer Cessna 172 gemacht. Dies war prinzipiell möglich und die Georeferenzierung der Bilder war mit nur geringen Lagefehlern in den entzerrten Bildern größtenteils problemlos.

### *Flexibilität des Befliegungstermins*

Kann nur sehr kurzfristig über einen Befliegungstermin entschieden werden, sind professionelle Anbieter von Luftbildbefliegungen organisatorisch tendenziell im Nachteil gegenüber dem selbst durchgeführten Charterflug von einem nahe gelegenen Flugplatz.

Diese erhöhte Terminflexibilität kann einerseits durch nur kurzfristig oder plötzlich auftretende Erscheinungen erforderlich sein. Z.B. ist es möglich, dass nach einem Regenereignis die Bodenfärbung aufgrund einer unterschiedlichen Geschwindigkeit der Abtrocknung von Interesse ist. Andererseits ändert sich die Situation der Bewölkung zum Teil so kurzfristig, dass Luftbilddaufnahmen ohne Wolkenschatten nicht möglich oder erforderliche Flughöhen im voraus nicht planbar sind. Im Untersuchungsgebiet waren vor allem die Monate Mai, Juni und Juli dadurch gekennzeichnet, dass optimale Sichtbedingungen häufig nur zwischen etwa 9 und 11:30 Uhr gegeben waren. Vorher wirkten der Morgendunst oder leichter Hochnebel stark kontrastmindernd, nach der angegebenen Zeitspanne setzte zum Teil innerhalb weniger Minuten die Bildung von Quellwolken über den angrenzenden Waldgebieten ein. Diese Wolken behinderten die Erstellung der Luftbilder aus großer Höhe. Zudem wirkten Wolkenschatten auf den Feldern störend. Wegen dieser regionalen Besonderheiten der Witterung war die Flexibilität, die sich aus der selbst durchgeführten Befliegung ergab, von Vorteil.

### *Zusammenfassung zur 1. Hypothese*

Es sind im allgemeinen keine grundlegenden Schwierigkeiten für die Erstellung von Luftbildern zu erwarten, wenn man einmal von logistischen Problemen absieht, die bei sehr kurzfristig angesetzten Befliegungsterminen durch ungünstige Witterungsbedingungen entstehen könnten.

Professionelle Systeme bieten eine höhere Sicherheit im Hinblick auf die flächendeckende Erfassung des Zielgebietes und die Erstellung senkrechter Aufnahmen.

Aufnahmen, die durch das Fenster des Copiloten mit handelsüblichen Spiegelreflex-Kameras gemacht werden, sind mit einer Genauigkeit georeferenzierbar, die für eine in dieser Arbeit angestrebten Auswertungen ausreichend ist. Die optische Auflösung von Details der Erdoberfläche kann durch die Objektivwahl und die Flughöhe den gewünschten Bedingungen angepasst werden.

Insofern wird die Hypothese zurückgewiesen, dass technische Begrenzungen die Erstellung von Luftbildern verhindern und die Ursache dafür sind, dass Luftbilder im Rahmen des Standort-spezifischen Ackerbaus bisher nur wenig eingesetzt werden.

## 2. Hypothese: Die Aufbereitung der Luftbilder ist problematisch

Grundsätzlich muss für die Aufbereitung von Luftbildern geeignete Hard- und Software sowie ein ausgebildeter Bearbeiter zur Verfügung stehen. Für den wissenschaftlichen Bereich und landwirtschaftliche Dienstleistungsunternehmen sollte diese Anforderung zumindest prinzipiell zu erfüllen sein. Dass einzelne Landwirte diese Bedingungen ebenso erfüllen können, wird eher bezweifelt. Einige Programme, die im Standort-spezifischen Ackerbau zur Erstellung von Applikationskarten eingesetzt werden, bieten zum Teil grundlegende Möglichkeiten, Luftbilder zu importieren und darzustellen. Von komplexen Möglichkeiten der Aufbereitung von Luftbildern kann aber bei diesen Programmen nicht gesprochen werden.

Die eigentliche Aufbereitung von Luftbildern umfasst geometrische und spektrale Korrekturen. Von diesen dürfte im Bereich der Farb-Luftbilder die geometrische Korrektur (Entzerrung, Georeferenzierung) grundsätzlich die größere Bedeutung besitzen.

Wie die Beispiele dieser Arbeit zeigen, ist eine Entzerrung von Luftbildern in schwach reliefiertem Gelände anhand der Koordinaten der Feldgrenzen möglich. Auch andere markante Geländepunkte können als Passpunkte dienen. Der damit verbundene Fehler in der Lagegenauigkeit liegt mit 2-3 Metern im Bereich der Abmessungen eines Bildpunktes. Es ist prinzipiell zu erwarten, dass Bilder, die mit einer höheren Auflösung digitalisiert werden, noch genauer referenziert werden können. Es sollte beachtet werden, dass mit höherer Auflösung auch die Dateigröße zunimmt. Diese hat Auswirkungen auf die benötigte Zeit zur Durchführung der Korrekturverfahren. Die von BILL ET AL. (2002) und SCHMIDHALTER & SELIGE (2002) vorgestellten Verfahren der passpunktlosen, automatisierten Aero-Triangulation verringern die Unsicherheiten dieses Aufbereitungsschrittes zusätzlich. Problematisch bleibt weiterhin die geometrische Korrektur von Schrägaufnahmen und die Entzerrung von Senkrechtaufnahmen in stärker reliefiertem Gelände. SCHNEIDER (1974) gibt eine Faustformel an, mit der 'relativ ebenes' von 'stärker reliefiertem' Gelände unterschieden werden kann. Nach den Ausführungen des Autors sollte die Maßstabszahl des Luftbildes dividiert durch 500 größer sein, als der im Bereich der Aufnahme auftretende Höhenunterschied.

Spektrale Korrekturen beinhalten z.B. Kontrastverstärkungen, die Korrektur von atmosphärischen Störungen oder den Ausgleich von Helligkeitsgradienten (BACH (1995), EASTMAN (1999), MORAN ET AL. (1997)). Die Atmosphärenkorrektur ist vor allem von Bedeutung, wenn die absoluten Reflexionswerte eines kalibrierten Sensorsystems genutzt werden sollen. Bei der Verwendung von handelsüblichen Farbfilmen dürfte sie keine Rolle spielen. Auf die Bedeutung der Flughöhe für den Kontrastreichtum der Aufnahme weist STEINER (1961) hin. Die Datenmanipulation zur Kontrasterhöhung oder Beseitigung eines Helligkeitsgradienten ist als eine Standard-Prozedur in Bildverarbeitungssystemen enthalten. Der Umfang des Einsatzes dieser Methoden dürfte vornehmlich durch das Wissen des Anwenders begrenzt sein.

### *Zusammenfassung zur 2. Hypothese*

Wenn die möglichst senkrechte Aufnahme bei der Erstellung des Luftbildes beachtet wird, ist die nachträgliche geometrische Korrektur der Bilder in ebenem Gelände unproblematisch. Aufwändige spektrale Korrekturen sind an Farb-Luftbildern i.d.R. nicht durchzuführen. Trend- und Kontrast-Korrekturen gelten als Standardverfahren.

Da leistungsfähige Bildverarbeitungssysteme ebenfalls zur Verfügung stehen, ist die zweite Hypothese als Erklärungsansatz für den geringen Einsatzumfang von Luftbildaufnahmen im Standort-spezifischen Ackerbau ebenfalls grundsätzlich abzulehnen. Unklar bleibt der Einfluss des möglicherweise unzureichenden Wissens bei den potenziellen Nutzern der Luftbilder.

### 3. Hypothese: Die Klassifizierung von Luftbildern ist problematisch

Durch die Luftbild-Auswertung sollen die in den Reflexionsdaten enthaltenen Informationen für den Standort-spezifischen Ackerbau nutzbar gemacht werden. Das Ziel der Auswertung ist eine Karte, die das im Luftbild dargestellte Feld in Bereiche unterteilt, zwischen denen ackerbaulich relevante Unterschiede bestehen. Die Unterteilung des Luftbildes geschieht durch eine Klassifizierung der Reflexionswerte anhand unterschiedlicher Kriterien.

Drei Methoden der Klassifizierung sind in der vorliegenden Arbeit vergleichend auf ein Luftbild angewendet worden. Sie unterscheiden sich vornehmlich in dem Ausmaß, in dem subjektive Einflüsse in den Klassifizierungsprozess eingehen können.

Das Verfahren der Quantil-Klassifikation ist an die Vorgehensweise der explorativen Datenanalyse in der deskriptiven Statistik (EDA) angelehnt. Die EDA ist eine Methodensammlung, um bei unbekanntem Datensatz ein 'Gefühl' für die Daten zu erlangen (TUKEY (1976)) und aus dem Datensatz auf diese Weise weitere Informationen zu gewinnen. Durch die rein schematische Vorgehensweise, die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte in fünf (Q-20) bzw. zehn (Q-10) gleich umfangreiche Abschnitte zu unterteilen, werden subjektive Einflüsse durch die bearbeitende Person ausgeschlossen. Das Verfahren ist rechnerisch sehr schnell und vollständig automatisierbar. Es ist der multivariaten Cluster-Analyse insofern ähnlich, als hier ebenfalls Informationen der Häufigkeitsverteilung für die Klassifizierung genutzt werden. Die Quantil-Methode verwendet jedoch nur eine Variable, die Reflexion im Rotkanal.

Die Intensität der Reflexion im roten Bereich des sichtbaren Spektrums von geschlossenen Pflanzenbeständen ist an die absorbierenden Eigenschaften des Chlorophylls in den Pflanzenblättern gebunden (CLEVERS (1986)). Daher eignet sich der Rot-Kanal besonders für die Erfassung von Vegetationsunterschieden mit dem Luftbild (BLACKMER ET AL. (1996)). Der Rot-, Grün- und Blau-Kanal sind in den untersuchten Luftbildern in hohem Maße korreliert, so dass durch die Beschränkung auf einen der drei verfügbaren Kanäle nur eine geringe Menge an Information ungenutzt bleibt. Eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung dieses Verfahrens der Klassifizierung ist jedoch, dass das Bild frei von Helligkeitsgradienten oder Wolkenschatten ist. Gegebenenfalls müssen diese im Vorfeld korrigiert werden. Ebenso können sich Sorten- oder Düngungsunterschiede störend auswirken. Die von BLACKMER ET AL. (1996) vorgeschlagene Normierung der Reflexionswerte könnte ein Weg sein, diese Effekte zu kompensieren.

Die manuelle Digitalisierung der Arealgrenzen auf dem Luftbild stellt das andere Extrem der Klassifizierung dar. Bei diesem Verfahren entscheidet der Bearbeiter in eigenem Ermessen über den Verlauf der Grenze zwischen zwei 'unterschiedlichen' Arealen. In die Entscheidung fließen sowohl die Reflexionsunterschiede als auch der Verlauf von im Luftbild erkennbaren Strukturen ein. Da im Gegensatz zur Quantil-Methode die Unterschiede in der Reflexion zwischen benachbarten Bildpunkten und nicht die absoluten Werte für die Klassifizierung von Bedeutung sind, ist dieses Verfahren weniger anfällig für Gradienten der Helligkeit, Unterschiede durch Sorten oder Düngung oder den störenden Einfluss von Wolkenschatten.

Im untersuchten Beispiel war die Zielstellung der manuellen Digitalisierung die Unterteilung eines qualitativ 'schlechten' Luftbildes in braune, hellgrüne und grüne Bereiche. Die bearbeitende Person kann Struktur- oder Helligkeitsunterschiede unberücksichtigt lassen, wenn diese offensichtlich nicht durch das interessierende Merkmal verursacht werden. Im Luftbild des Feldes '3300' wäre eine solche inhaltliche Unterscheidung innerhalb der 'hellgrün'-Bildpunkte am westlichen Bildrand möglich gewesen. Für diese subjektiv zu treffende Entscheidung ist sowohl bodenkundliches, pflanzenbauliches als auch produktionstechnisches Wissen notwendig. Auch die feinmotorischen Fähigkeiten und der jeweilige Ermüdungszustand bzw. die generelle Motivation gehen in das Ergebnis der Digitalisierung mit ein. Aufgrund dieser verschiedenen, vornehmlich subjektiven Komponenten, die das Klassifizierungsergebnis beeinflussen, ist wahrscheinlich auch ein und dieselbe Person nicht in der Lage, eine vollständige Reproduzierbarkeit der erzeugten Karte zu gewährleisten. Ebenso erscheint die Dokumentation der Entscheidungsprozesse während der Digitalisierung schwierig. Im vorliegenden Fall wurde bewusst eine Digitalisierung durchgeführt, die sich möglichst ausschließlich an Farbunterschieden orientiert. Daher wird der hellere Streifen am westlichen Bildrand in die 'hellgrün' Klassifizierung einbezogen. Diese Vorgehensweise simuliert die Situation einer landwirtschaftlich relativ ungeschulten oder mit den lokalen Bedingungen nicht vertrauten Person.

Eine mittlere Position zwischen den beiden Verfahren nimmt die überwachte Klassifikation ein. Die Auswahl und die Digitalisierung der Trainingsareale unterliegen den bereits für die manuelle Digitalisierung genannten subjektiven Einflüssen durch den Bearbeiter. Wenn die spektralen Signaturen entwickelt sind, arbeitet der Klassifizierungsprozess unabhängig von weiteren menschlichen Einflüssen und ist damit, der Quantil-Methode ähnlich, automatisierbar. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der überwachten Klassifikation ist daher ebenfalls das Fehlen von Helligkeitstrends oder Wolkenschatten.

Der von der überwachten Klassifikation als 'Boden' eingestufte Bereich des Feldes '3300' zeigt, dass der Erfolg dieser Methode in hohem Maße von der korrekten Entwicklung der spektralen Signaturen abhängig ist. Am südöstlichen Feldrand wird ein Teil des Luftbildes offensichtlich inhaltlich falsch der Klasse 'Boden' zugeordnet. Zum Teil finden sich diese Bildpunkte in durch Bäume beschatteten Bereichen des Feldes. Des Weiteren befinden sich innerhalb des Feldes Bildpunkte, die zu dem direkt angrenzenden Bereich des Feldrandes gehören. Auch diese Rasterzellen werden als 'Boden' klassifiziert. Das Maximum-Likelihood-Verfahren ordnet die Bildpunkte jeweils den Klassen zu, die in ihrer spektralen Signatur dem Bildpunkt am ähnlichsten sind. Die spektrale Signatur der Klasse 'Boden' wurde auf einer sehr kleinen Fläche entwickelt und so gingen stark unterschiedliche Reflexionswerte in diese Entwicklung ein. Daher ist die Definition der spektralen Signatur dieser Klasse mit einer

hohen Ungenauigkeit behaftet. Die anderen Signaturen können deutlich genauer definiert werden. Aus diesen Umständen erklärt sich die Erscheinung, dass die angesprochenen Bereiche des Feldes und die innerhalb der Feldgrenzen liegenden Feldrand-Pixel der 'Boden'-Klasse am ähnlichsten waren. Diese nur relative Ähnlichkeit führt zu der Fehlklassifikation. Da insgesamt ein nur geringer Flächenanteil davon betroffen ist, wird dieses Beeinträchtigung des Ergebnisses nicht als gravierender Nachteil der Methode angesehen. Fehlklassifikationen im Randbereich eines Feldes lassen sich mit einer Distanz-Maske im GIS pauschal ausschließen, indem allen Rasterzellen, die in einer definierten Distanz zum Feldrand liegen, die Klasse 'Randbereich' zugewiesen wird. In der nachfolgenden Nutzung der Karten kann dann diese Klasse gesondert behandelt werden.

Die Quantil-Methode und die Methode der überwachten Klassifikation vergleichen einzelne Bildpunkte mit den Zuordnungskriterien, ohne die direkt benachbarten Werte zu berücksichtigen. Dies unterscheidet die beiden Verfahren von der manuellen Digitalisierung der Grenzlinien. Diese aus dem räumlichen Zusammenhang gelöste Bearbeitung der Daten verursacht vor allem im Bereich der mittleren Reflexionsintensitäten einen 'verrauschten' Eindruck. Durch eine dem Klassifikationsprozess folgende Modalfilterung über eine 5x5-Pixel-Umgebung können deutlich homogenere Areale erzeugt werden.

Der Vergleich der unterschiedlichen Verfahren mit der als Referenzmethode ausgewählten überwachten Klassifizierung muss einen wichtigen Aspekt berücksichtigen: Auch die Referenzmethode basiert auf dem Luftbild und auf Kriterien der Klassifizierung, die anhand dieses Luftbildes im Büro getroffen werden. Daher kann auch das Ergebnis der überwachten Klassifikation Fehler enthalten. Diesen die Interpretation der Ergebnisse einschränkenden Einwand erwähnen auch CIALELLA ET AL. (1997). Trotzdem lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

Die von ALBERTZ (1991) angeführte Schwäche des menschlichen Auges, mit gleichbleibender Genauigkeit Helligkeitsunterschiede zu erkennen, hat im Fall der manuellen Digitalisierung zwei Konsequenzen. Erstens kann nur eine begrenzte Zahl von unterschiedlichen Klassen sicher angesprochen werden. Im vorliegenden Fall war es bereits schwierig, mehr als drei Klassen gleichbleibend genau zu unterscheiden. Zweitens führt die manuelle Grenzziehung zu einer relativ 'unreinen' Klassifizierung der 'braun'-Bildpunkte, d.h. die Grenze zwischen den jeweiligen Klassen ist unterschiedlich. Die Referenzmethode differenziert zwischen 'braun' und 'hellgrün', während die manuelle Digitalisierung sämtliche Punkte als 'braun' einstuft. Eine Kombination beider Klassifizierungsergebnisse zeigt, dass diese unterschiedlich eingestuften Bildpunkte direkt benachbart zu den 'braunen' Bereichen der manuellen Methode sind.

Demgegenüber werden durch die rein schematische Vorgehensweise der Quantil-Methoden die Bildpunkte mit mittleren Reflexionsintensitäten im Rot-Kanal in verschiedene Klassen eingeordnet. In der Referenzmethode werden diese Bildpunkte einheitlich als 'hellgrün' klassifiziert. Eine nachträgliche Zusammenfassung dieser verschiedenen Quantil-Klassen zu einer einzigen Klasse kann diese Erscheinung auf einfache Weise beseitigen. Andererseits wäre es denkbar, den Bereich 'hellgrün' der überwachten Klassifizierung in verschiedene 'hellgrün'-Unterklassen zu unterteilen. Ein prinzipieller Nachteil der Quantil-Methoden läßt sich an der Klassifizierung der höchsten Reflexionsintensität im Rot-Kanal zeigen. Diese Reflexionswerte repräsentieren braune Bereiche des Luftbildes. Die Bildpunkte werden in der

Q-10- bzw. Q-20-Methode den Klassen '1-10%' bzw. '1-20%' zugeordnet. Die Quantil-Methoden trennen rein schematisch, ohne inhaltliche Aspekte zu berücksichtigen. Da in dem untersuchten Luftbild lediglich etwa 9% der Fläche durch 'braune' Bildpunkte eingenommen wird, muss die Klasse '1-20%' der Q-20-Methode zwangsläufig zur Hälfte aus Bildpunkten bestehen, die geringere Reflexionsintensitäten besitzen, als es für 'braune' Bereiche charakteristisch ist. Auf diese Weise werden inhaltlich begründete Unterschiede durch die Klassifizierung maskiert.

Die Klassifizierung der aktuellen Luftbildaufnahme des Feldes '2600' mit und ohne Korrektur des Helligkeitsgradienten veranschaulicht, wie bedeutend eine gleichmäßige Bildhelligkeit für die ansonsten sehr einfach anzuwendenden Quantil-Methoden ist.

Im Verlauf der Diskussion der dritten Hypothese wird deutlich, dass die Trennung der Luftbild-Auswertung in 'Klassifizierung' (3. Hypothese) und 'Interpretation' (4. Hypothese) nur formalen Charakter haben kann. Diesen Hinweis macht auch ALBERTZ (1991). Die manuelle Digitalisierung von Grenzverläufen oder Trainingsarealen beinhaltet mit der Gewichtung der im Luftbild zu erkennenden Unterschiede in 'relevant' und 'nicht relevant' einen Interpretationsschritt. Lediglich die hier vorgestellte Quantil-Methode ermöglicht eine reine 'Klassifizierung'. Die Einschätzung der jeweiligen Relevanz der Klassen, und damit die Interpretation, findet im Anschluss statt.

#### *Zusammenfassung zur 3. Hypothese*

Für qualitativ unterschiedliche Luftbilder sind verschiedene Klassifikationsverfahren vorhanden. Für die Auswahl der jeweils am besten geeigneten Methode ist dabei auch die Ausbildung und die Erfahrung des Bearbeiters von Bedeutung. Dieser Umstand weist darauf hin, dass die Trennung der Aufbereitung in 'Klassifikation' und 'Interpretation' nur formal vorhanden ist.

Auch die dritte Hypothese ist daher abzulehnen, die den geringen Einsatzumfang der Luftbild-Fernerkundung als Grundlage eines Standort-spezifischen Ackerbaus mit dem generellen Fehlen von Klassifikationsverfahren zu erklären versucht.

#### 4. Hypothese: Die Interpretation von Luftbildern ist problematisch

Durch die Interpretation der im Luftbild erkennbaren Strukturen, Muster und Gegenstände wird das Bild überhaupt erst zu einer Informationsquelle. Verschiedene Autoren nehmen sich dieses Auswertungsschrittes in ihren Arbeiten an. Der Kernpunkt der jeweiligen Ausführungen ist nach meinem Verständnis die Unmöglichkeit, den Interpretationsprozeß zu standardisieren. Es folgen einige Zitate aus den Arbeiten verschiedener Autoren, die im Zusammenhang mit dem Interpretationsprozess stehen. Anschließend daran werden eigene Gedanken hinsichtlich einer erfolgreichen Luftbild-Interpretation im Rahmen des Standort-spezifischen Ackerbaus geäußert.

ALBERTZ (1991) zitiert LEVINE (1985) zu dem Aspekt, den Interpretationsprozess automatisieren zu wollen: "Und es ist überhaupt nicht daran zu denken, daß ein Rechner eine Bildszene in ähnlicher Weise 'verstehen' könnte, wie es für einen Menschen selbstverständlich ist.". Bereits TROLL (1939) betonte, dass "Luftbildforschung [...] zu einem sehr hohen Grade

Landschaftsökologie [ist]. Die Luftbildforschung wirkt außerdem in hervorragendem Maße wissenschaftsverbindend." (ebd. S. 297). SCHNEIDER (1974) macht bei der Besprechung der Luftbild-Interpretation folgende Bemerkung: "Zweifellos greift die Interpretation von Luftbildern über den eigentlichen Wahrnehmungsprozeß hinaus. So wird gerade in der geographischen Luftbildinterpretation angestrebt, die Objekte und Erscheinungen der Landschaft in ihrem Beziehungsgefüge zu erkennen. Da jede Interpretation auch die Erfahrung des Auswerters bereichert, wirkt sie sich wiederum auf den Wahrnehmungsprozeß aus, so daß das Interpretationsergebnis iterativ erreicht wird." (ebd. S. 170). Er führt im Rahmen der bodenkundlichen Luftbildinterpretation aus, dass die Abgrenzung der unterschiedlichen Bodeneinheiten über indirekte Wege geschehe: Informationen zum Klimaraum, zur Oberflächenform, zur Hangneigung, zum Gewässernetz, zu aufgetretenen Erosionserscheinungen, zur Vegetationsbedeckung, zur Landnutzung und zur Bodenfarbe würden dabei benutzt. Er schließt seine Aufzählung mit dem Satz: "Aber auch diese Indizien werden nur dann erfolgreich herangezogen werden können, wenn Ausbildung und Geländeerfahrung des interpretierenden Bodenkundlers sich mit der Kenntnis der Interpretationsmethoden und -techniken vereinen." (ebd. S. 315).

Diese kurze Sammlung von Zitaten aus der Literatur zur Fernerkundung möchte ich mit zwei weiteren Zitaten beenden, die sich auch auf den Verwendungszweck der Luftbilder, also die der Luftbild-Erstellung zugrunde liegende Motivation, beziehen.

ALBERTZ (1991) beginnt sein Buch im Vorwort mit den folgenden Sätzen: "So wie ich es sehe, ist das Luftbild ein einzigartiges Vehikel für Staunen, Zorn, Freude, Ärger - kühl läßt es nie. Für den Augenmenschen ist es Nachhilfeunterricht, eine ungewohnte Schule des Sehens; dem besorgten Zeitgenossen hält es einen Spiegel vor, in dem er sich selber als umweltbezogenem Wesen begegnet." (ebd. S. IX; zitiert aus: GERSTER (1975)).

SCHNEIDER (1974) stellt seinen Ausführungen über Luftbildinterpretation das Zitat aus dem Buch von CLOS-ARCEDEC (1965) voran: "Der Mensch erstickt in einer Flut von Behauptungen, die er einfach hinnehmen muß, ohne daß ihr Wahrheitsgehalt bewiesen wird. In einer solchen Zeit ist das eigene Nachdenken und Forschen mit zuverlässigem Quellenmaterial, wie es uns das Luftbild bietet, ein entscheidendes Gegengewicht gegen so viel unkontrolliertes Wissen." (ebd. S.1).

Die eigenen Erfahrungen in den drei Untersuchungsjahren im Rahmen der Luftbildinterpretation sind in zwei Bereiche zu unterteilen:

Einerseits war es notwendig, die regionalen Besonderheiten der Böden und das Wechselspiel der Standorteigenschaften mit dem Pflanzenwachstum kennen zu lernen. Diese Aussage unterstreicht die Äußerung, die von vielen Autoren gemacht wird: Das Luftbild erhält seinen Wert erst durch die begleitende terrestrische Erkundung der Phänomene, die auf der Aufnahme zu erkennen sind. Das inhaltliche Erkennen und Verstehen ist also immer mit dem rein optischen Erkennen von Strukturen gekoppelt. Dies berührt auch den von SCHNEIDER (1974) genannten Aspekt der 'iterativen Interpretation'. Dieses Vertrautwerden mit den Böden der Region und ihren Eigenschaften wurde in den durchgeführten Untersuchungen durch umfangreiche Bodenkartierungen zu verschiedenen Jahreszeiten ermöglicht. Die exemplarisch aufgeführten Ergebnisse einer an Luftbild-Daten ausgerichteten Bohrstock-



nutzt, vertraut sind und die er auf dem Luftbild lokalisieren kann. Der Bauer erkannte auf den Feldern Stellen, wo der Boden naß und schwer wird, wo die Pflugschar den Fels berührt, auch Stellen, an denen aus unbekanntem Gründen die Erträge des Feldes bessere oder schlechtere sind [...]. Einflüsse des lokalen Klimas, wie Regen- und Windexposition, Strahlungsexposition oder Frostlagen, gaben sich hauptsächlich in der Vegetation zu erkennen." (ebd.S. 285f).

Historische Informationen (Luftbilder, Satellitenbilder, Karten, Aufzeichnungen etc.) erwiesen sich in diesen Untersuchungen generell als sehr wertvoll zur Rekonstruktion ehemaliger Nutzungs-Strukturen. Dies ist exemplarisch in der Abb. 48 demonstriert. Viele der Erscheinungen können nicht auf einzelne Ursachen zurückgeführt werden. Jedoch ist der iterative Prozess der Luftbildinterpretation anscheinend ein besonderes Kennzeichen dieser Methode. Durch regelmäßige Befliegungen und die DGPS-Ertragskartierungen lassen sich die Erscheinungen über einen längeren Zeitraum verfolgen und z.T. in ihrer jahresspezifischen Ertragswirkung quantifizieren.

Ein wichtiger Aspekt für die Bewertung der vierten Hypothese zum geringen Einsatzumfang der Luftbild-Fernerkundung im Standort-spezifischen Ackerbau ist die Beobachtung, dass die auf den Feldern tätigen Menschen zwar ein hohes Maß an Standortkenntnis besitzen, die Benutzung von Senkrechtaufnahmen zur Zonierung eines Feldes von ihnen aber anscheinend selten in Betracht gezogen wird. Zum Teil bestätigte sich der von ALBERTZ (1991) zitierte Ausspruch über die Gefühlsregungen beim Betrachten einer ihnen vorgelegten Luftbildaufnahme in allen Facetten. Ähnliche Reaktionen waren auch zu beobachten, wenn diese Aufnahmen ortsfremden Agrarwissenschaftlern oder Bodenkundlern präsentiert wurden. Es wird anscheinend selten darüber nachgedacht, dass viele der durchaus vertrauten Erscheinungen in einem Pflanzenbestand, die man vom Erdboden aus erkennen kann, auch im Luftbild sichtbar sein können. Möglicherweise ist aber auch die verstärkte Spezialisierung in der Ausbildung von Wissenschaftlern mit dafür verantwortlich, dass die Beziehungsgefüge und Zusammenhänge im Luftbild nicht erkannt werden oder die Arbeitsmethoden von Nachbar-Disziplinen nicht oder nur in unzureichendem Maße bekannt sind. Dies würde mit der These von TROLL (1939) übereinstimmen, der die 'wissenschaftsverbindende' Wirkung der Luftbildinterpretation erwähnt.

#### *Zusammenfassung zur 4. Hypothese*

Die erfolgreiche Interpretation der im Luftbild sichtbaren Erscheinungen ist auf einen umfangreichen Erfahrungsschatz und vielseitiges Wissen angewiesen. Ohne Erkundung und Überprüfung am Boden bleiben viele Vermutungen über kausale Zusammenhänge vage. Die Kooperation und Kommunikation mit den Bewirtschaftern der landwirtschaftlichen Flächen erleichtert die Interpretation erheblich oder macht sie z.T. erst möglich.

Die Hypothese, dass die Luftbild-Fernerkundung eine nur geringe Anwendung im Standort-spezifischen Ackerbau hat, weil die Interpretation zu schwierig sei, trifft wahrscheinlich zu.

Die erfahrenen Schwierigkeiten bei der Interpretation von Luftbildern können allerdings nicht in der Methode als solcher begründet sein, da Landwirte z.T. sehr deutlich die unterschiedlichen Erscheinungen in Pflanzenbeständen aufgrund ihrer Standorterfahrungen interpretieren können. Für den wissenschaftlichen Bereich dürfte dagegen entscheidend sein,

dass einerseits dieses komplexe und langjährige Standortwissen für einzelne Regionen oder Felder nicht vorliegt. Andererseits ist möglicherweise auch eine zu starke fachliche Spezialisierung dafür verantwortlich, dass die Standort-spezifischen Informationen des Luftbildes nicht oder nur unvollständig genutzt werden können.

### 3.5.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zur Nutzung von Luftbildern im Rahmen der landwirtschaftlichen Standorterkundung lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Durch Luftbilder können im Untersuchungsgebiet verschiedene Standorteigenschaften kartiert werden: Lössmächtigkeit, Unterschiede der Bodenstruktur, ehemalige Grenzen der Nutzung u.a.; Die im Luftbild sichtbaren Erscheinungen sind in erster Linie abhängig vom Befliegungstermin und der Pflanzenart; Vorerst nur regional gültige günstige Termine für Befliegungen in Abhängigkeit von der Pflanzenart werden angegeben, eine Überprüfung in anderen Regionen wäre zu wünschen; Begleitende terrestrische Erkundungen sind zwingend notwendig für die erfolgreiche Interpretation der Luftbilder;
- Historisches Luftbild-Material sollte prinzipiell gesichtet und auf seine Verwendbarkeit für die jeweiligen Fragestellungen geprüft werden;
- Aktuelle Luftbilder lassen sich mit Farb-Diafilmen, handelsüblichen Spiegelreflex-Kleinbildkameras und einem Charterflugzeug des Typs Cessna 172 erstellen. Diese Aufnahmen können mit geographischen Informationssystemen (GIS) verarbeitet werden; Für zuverlässig senkrechte und flächendeckende Luftbild-Aufnahmen ist die Zusammenarbeit mit professionellen Befliegungsfirmen den selbst durchgeführten Befliegungen jedoch vorzuziehen.
- Die Georeferenzierung von Senkrecht-Aufnahmen ist im Rahmen dieser Arbeit mit einem RMS-Fehler von 2-3m möglich gewesen; diese Lage-Genauigkeit wird als ausreichend für die Zwecke des Standort-spezifischen Ackerbaus angesehen; Lineare Helligkeitsgradienten in den Aufnahmen können mit einfachen Standardverfahren beseitigt werden;
- Drei verschiedene Klassifizierungsverfahren werden untersucht. Die Verfahren unterschieden sich in dem Ausmaß der Beeinflussbarkeit durch den Bearbeiter. Mit einer zunehmenden Unabhängigkeit von der subjektiven Beeinflussung des Klassifikations-Prozesses durch den Bearbeiter steigen die Anforderungen an die Qualität der Daten; mit den drei untersuchten Verfahren stehen für eine Vielzahl von Anwendungen jeweils geeignete Methoden zur Verfügung, um ein Luftbild auf der Grundlage der spektralen Information in verschiedene Klassen zu unterteilen;
- Der Grad der Ausbildung und der Umfang an lokaler Standortkenntnis des Bearbeiters bestimmen maßgeblich den Interpretationserfolg und damit den Nutzwert des Luftbildes für den Standort-spezifischen Ackerbau.

### **3.6 Fernerkundung - Satellitenbilder**

#### **3.6.1 Einführung**

Der Nutzung von Satelliten-Fernerkundungsdaten im Rahmen des Standort-spezifischen Ackerbaus wird von verschiedenen Autoren eine zukünftig größere Bedeutung vorausgesagt (KÜHBAUCH (2002), JÜRSCHIK (1998)).

Der Vorteil von Satellitendaten als Fernerkundungsinformation liegt in der Erfassung sehr großer Flächen in einer einzelnen Aufnahme. Diese Eigenschaft prädestiniert die Datenquelle für die Verarbeitung und Vermarktung durch Dienstleistungsunternehmen. Erst wenn die Satellitensysteme der 'dritten Generation' (JÜRGENS (2000)) die momentanen Nachteile der geringen Überflughäufigkeit, der relativ geringen räumlichen Auflösung und der Empfindlichkeit gegenüber atmosphärischen Störungen (Wolken, Dunst) überwunden hätten, werde ihnen eine wichtigere Rolle bei der Bereitstellung von Informationen zukommen (KÜHBAUCH (2002)).

Als Kriterien für den erfolgreichen Einsatz von Satellitendaten im Standort-spezifischen Ackerbau werden vor allem eine deutlich häufigere Überfliegung und eine höhere räumliche Auflösung (JÜRSCHIK (1998)) genannt. Des weiteren müsse die Lieferung von 'fertigen Produkten' durch die Betreiber der Satellitensysteme möglichst schnell an die Landwirte erfolgen können (JÜRGENS (2000), KÜHBAUCH (2002)).

Ein wichtiger Anwendungsbereich ist nach Meinung einiger Autoren die möglichst kontinuierliche Erfassung der Pflanzenbestände durch die Sensoren der Satelliten, um bei eventuellen Störungen Teilflächen-spezifisch reagieren zu können bzw. zu Terminen, die für die verschiedensten pflanzenbaulichen Fragestellungen interessant sein könnten, Daten zur Verfügung zu haben (z.B. JÜRGENS (2000), KÜHBAUCH (2002)). KÜHBAUCH (2002) ist der Meinung, dass die momentane Situation der Sensorentwicklung im Hinblick auf die geometrische und spektrale Auflösung den hohen Anforderungen des 'Präzisionsackerbaus' gerecht werde.

Im Rahmen dieser Untersuchungen standen zwei Satellitenaufnahmen zur Verfügung. Anhand dieser Daten soll versucht werden, den möglichen Nutzen der gegenwärtigen Systeme im Bereich des Standort-spezifischen Ackerbaus abzuschätzen.

### 3.6.2 Datenmaterial und Verarbeitungsmethoden

Zwei Satellitenbildszenen des Untersuchungsgebietes wurden über eine Dienstleistungsfirma erworben. Es handelt sich um Aufnahmen des IRS-1C-Satelliten (Indian Remote Sensing Satellite) mit dem LISS-III-Sensorsystem.

**Tab. 19: Kanalspezifikationen des LISS-III-Sensors auf dem IRS-1C-Satelliten**

	Spektralbereich	Räumliche Auflösung
Kanal 2	520-590 nm (Grün)	23m
Kanal 3	620-680 nm (Rot)	23m
Kanal 4	770-860 nm (NIR)	23m
Kanal 5	1550-1700 nm (SWIR)	70m

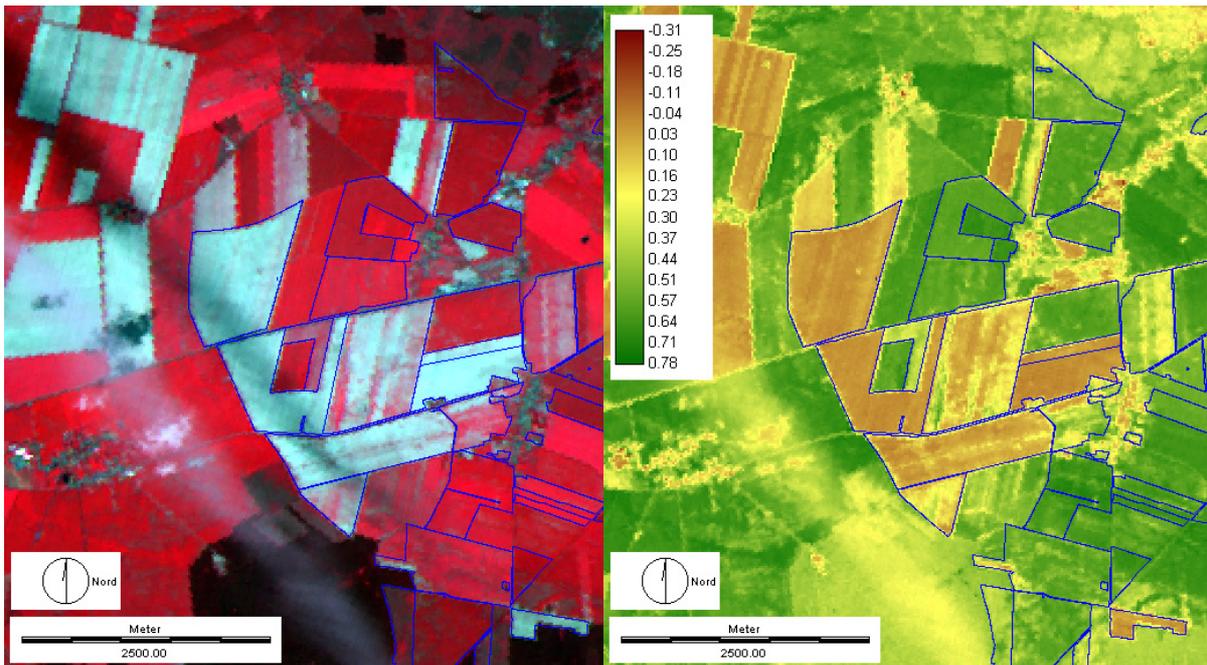
Der Satellit befindet sich seit Anfang des Jahres 1996 im kommerziellen Einsatz. Die Szenen stammen vom 2.6.1997 und 21.6.1998. Die Daten des Grün- (G), Rot- (R) und Infrarot-Kanals (IR) wurden in das GIS importiert, anhand von Verkehrswegen, Feldgrenzen und anderen wiedererkennbaren Geländebesonderheiten georeferenziert. Aus den Werten der R- und IR-Daten wurde mit dem Quotienten  $(IR-R)/(IR+R)$  der Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) errechnet. Aus dem G-, R- und IR-Kanal wurde ein Falschfarben-Composit-Bild erstellt. Hierbei diente für das blaue Band der G-Kanal, das grüne Band der R-Kanal und für das rote Band der IR-Kanal.

Die NDVI-Rasterkarten wurden in Punktvektor-Daten transformiert. Im GIS ArcView konnten die auf Feldebene vorliegenden Informationen zu den angebauten Pflanzenarten der beiden Jahre mit den NDVI-Werten kombiniert werden.

Mit dem SPSS Statistik-Programm wurden die mittleren NDVI-Werte je Feld und Jahr sowie die Korrelationskoeffizienten zwischen den NDVI-Werten beider Jahre für jedes Feld berechnet. Aus den NDVI-Punktdaten der Jahre 1997 und 1998 wurde für das Feld '2600' mit dem Programm VESPER (MINASNY ET AL. (1999)) eine Kriging-Interpolation auf ein 5m-Raster durchgeführt.

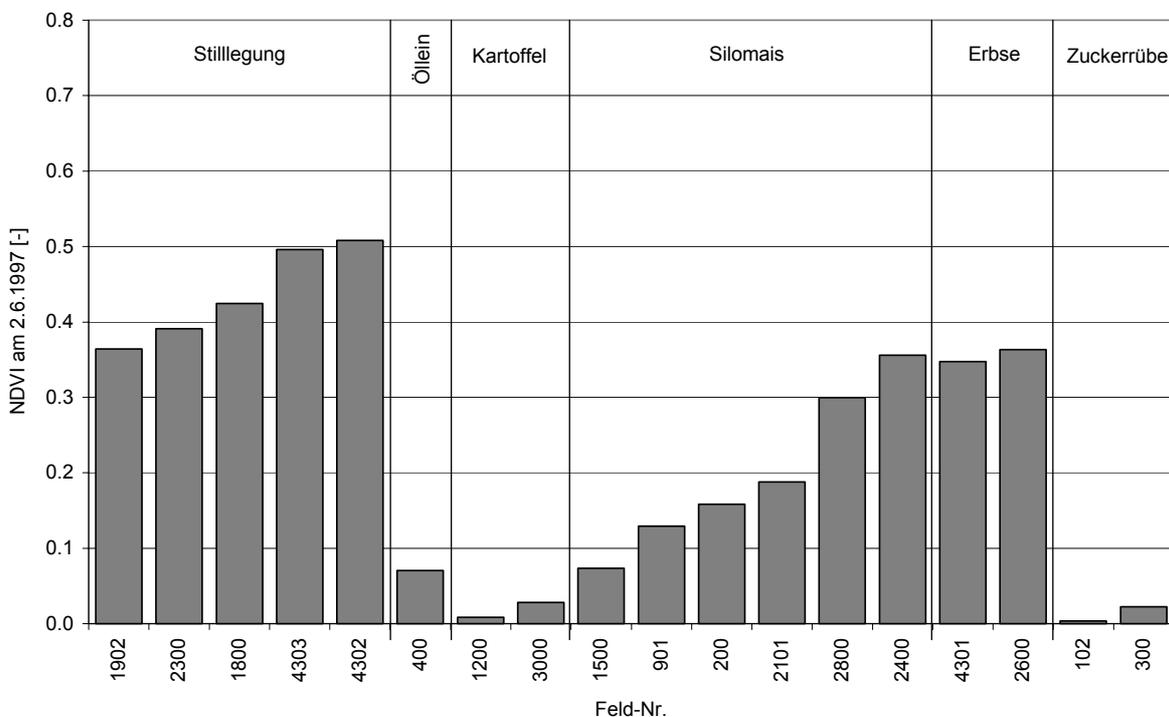
### 3.6.3 Ergebnisse

Die Abb. 64 zeigt links ein Falschfarben-Bild der Satellitenaufnahme vom 2.6.1997 für den westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes. Von NW nach SE verlaufend ist ein Wolkenschleier zu erkennen (helle Werte), der auf einigen Feldern einen Schattenwurf erzeugt (dunkle Werte). Die rechte Darstellung derselben Abbildung gibt die NDVI-Karte der Region wieder. Die Wolke ist anhand der hellen Farbtöne (geringere NDVI-Werte) noch zu erkennen, die Struktur des Schattens ist nicht mehr auf der NDVI-Karte wiederzufinden. Die Satellitenbild-Szene vom 21.6.1998 ist im Untersuchungsgebiet komplett wolkenfrei.



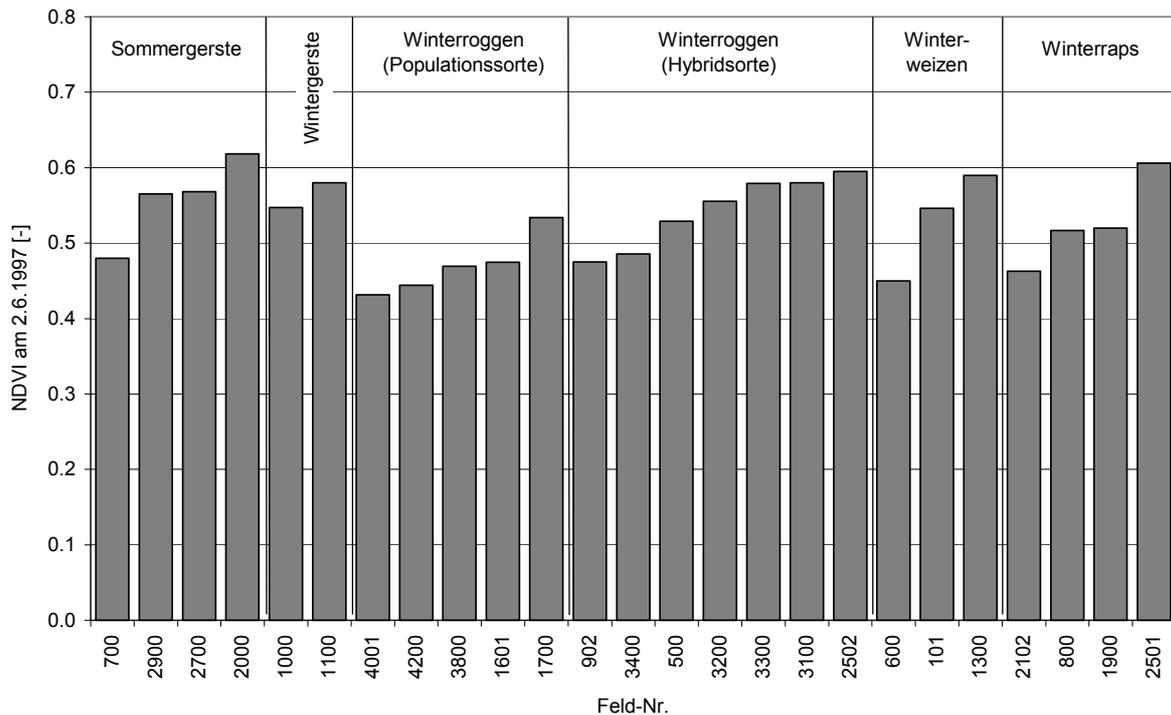
**Abb. 64: Falschfarbenbild (links) und Karte der NDVI-Werte (rechts) des westlichen Untersuchungsgebietes vom 2.6.1997 (Datenquelle: IRS-1C-Satellit)**

In der Abb. 65 bis Abb. 68 sind die NDVI-Mittelwerte der einzelnen Felder in aufsteigender Reihenfolge für die zwei Anbaujahre nach Pflanzenarten gruppiert dargestellt. Zwischen den beiden Jahren treten deutliche Unterschiede zwischen den mittleren NDVI-Werten je Pflanzenart auf.



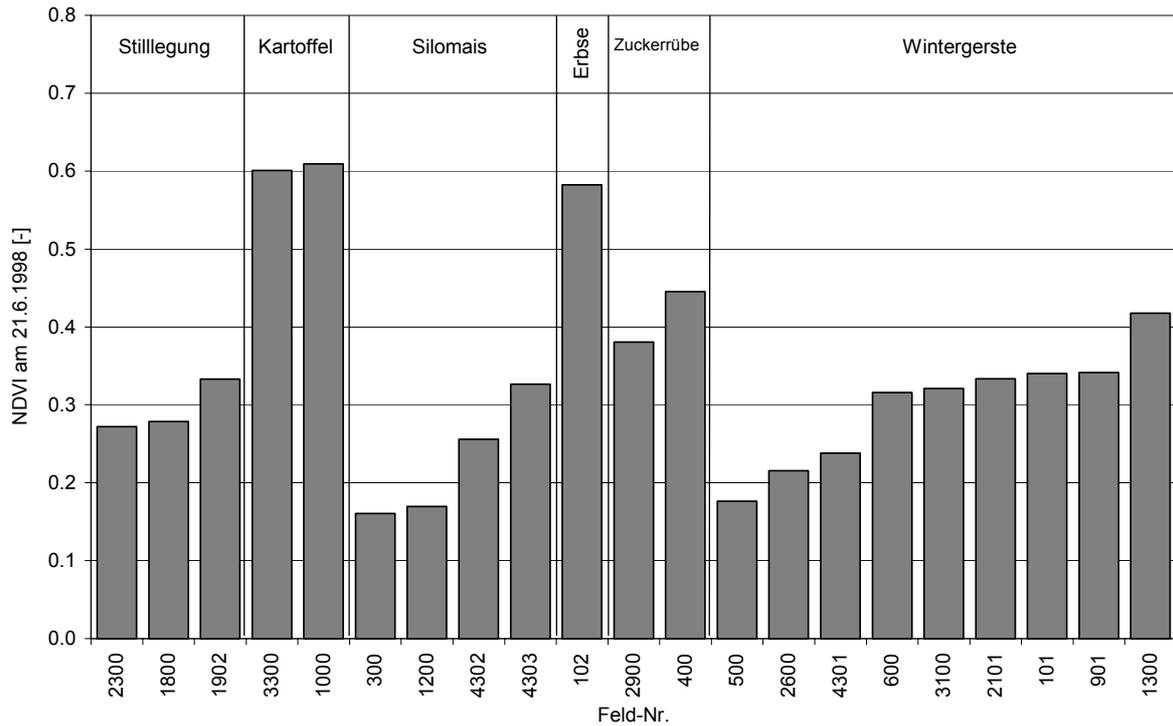
**Abb. 65: Feld-spezifische NDVI-Mittelwerte im Untersuchungsgebiet für die Pflanzenarten Öllein, Kartoffel, Mais, Erbse und Zuckerrübe sowie Stilllegungsflächen (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahme vom 2.6.1997)**

1997 sind die Werte für die im Frühjahr gesäten Fruchtarten Öllein, Kartoffel, Mais, Erbse und Zuckerrübe deutlich geringer als für die Sommer- und Wintergetreidearten sowie Winterraps. Die letztgenannten Artengruppen haben mittlere NDVI-Werte zwischen 0.5 und 0.6. Die NDVI-Mittelwerte für Öllein, Kartoffel und Zuckerrübe sind geringer als 0.1. Für Erbse errechnen sich Werte von ca. 0.35. Zwischen unterschiedlichen Feldern, die mit derselben Pflanzenart bestellt sind, gibt es zum Teil deutliche Unterschiede in den NDVI-Mittelwerten.

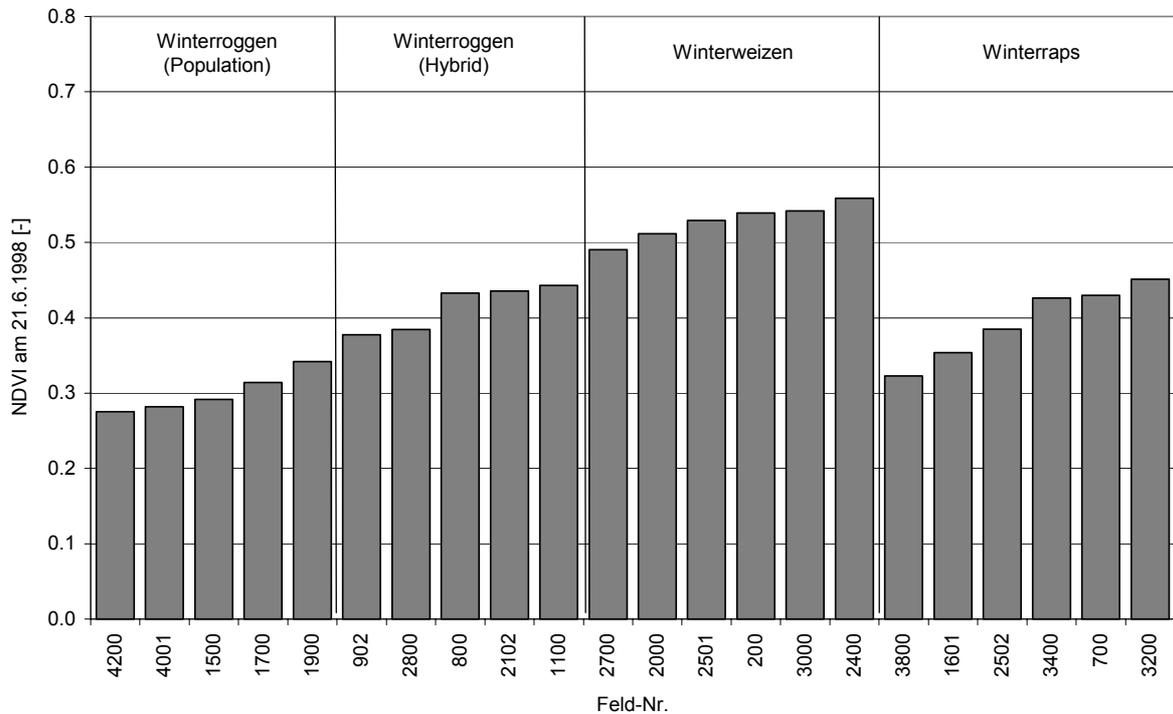


**Abb. 66: Feld-spezifische NDVI-Mittelwerte im Untersuchungsgebiet für die Pflanzenarten Sommergerste, Wintergerste, Winterroggen (Populations- und Hybrid-Sorten), Winterweizen und Winterraps (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahme vom 2.6.1997)**

Die Feld-Mittelwerte des Jahres 1998 schwanken innerhalb der Pflanzenarten-Gruppen nicht so stark. Vor allem für Kartoffel, Erbse und Zuckerrübe sind die mittleren NDVI-Werte deutlich höher als im Datensatz des Vorjahres und liegen bei 0.6, 0.6 bzw. 0.4. Die Werte für Wintergerste und Winterroggen (Populationsorten) liegen bei etwa 0.3, Winterraps und Hybridroggen-Sorten haben Mittelwerte von etwa 0.4 und die NDVI-Werte für Winterweizen liegen bei 0.5.



**Abb. 67: Feld-spezifische NDVI-Mittelwerte im Untersuchungsgebiet für die Pflanzenarten Kartoffel, Mais, Erbse, Zuckerrübe, Wintergerste sowie Stilllegungsflächen (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahme vom 21.6.1998)**



**Abb. 68: Feld-spezifische NDVI-Mittelwerte im Untersuchungsgebiet für die Pflanzenarten Winterroggen (Populations- und Hybrid-Sorten), Winterweizen und Winterraps (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahme vom 21.6.1998)**

Für die einzelnen Pflanzenarten und Felder wurde visuell eingeschätzt, in wieweit die abgebildete Variation der NDVI-Werte innerhalb des jeweiligen Feldes mit den eigenen Standorterfahrungen und den Informationen der Bodenschätzungskarte oder der Luftbild-Aufnahmen übereinstimmt. Bei der Bewertung wurde das Augenmerk darauf gerichtet, ob die NDVI-Werte extreme Standort-Unterschiede widerspiegeln. Zum Teil erfolgte während der Kartensichtung eine Kontrastverstärkung durch eine Veränderung der verwendeten Legende, um Strukturen deutlicher zu erkennen. Die Einschätzung, ob die tatsächlich vorhandene Standortvariabilität eines einzelnen Feldes durch die NDVI-Daten des jeweiligen Jahres wiedergegeben wird, geschah mit den zwei Kategorien 'geeignet' und 'ungeeignet'. Grenzfälle wurden tendenziell optimistisch mit 'geeignet' bewertet. Die Tab. 20 gibt die jeweiligen Flächen für diejenigen Pflanzenarten in den beiden Anbaujahren wieder, für die eine Einschätzung mit 'geeignet' bzw. 'ungeeignet' erfolgt war. Die NDVI-Daten vom 2.6.1997 spiegeln nur für ca. 20% der gesamten Anbaufläche des Untersuchungsgebietes das Ausmaß der Standortvariabilität wider, wie es aufgrund von eigenen Erfahrungen oder anderen Informationsquellen tatsächlich auf den Feldern vorliegt. Besonders geeignet war vor allem Winterroggen (Populationssorten) sowie zum Teil Mais. Für die NDVI-Daten vom 21.6.1998 liegt dieser Wert bei etwa 60%. Zu diesem Termin erwiesen sich Winterroggen (Populationssorten), Winterraps, Winterweizen und mit geringeren Anteilen Wintergerste und Zuckerrübe als geeignete Fruchtarten, um Standortunterschiede anhand von NDVI-Werten abzubilden.

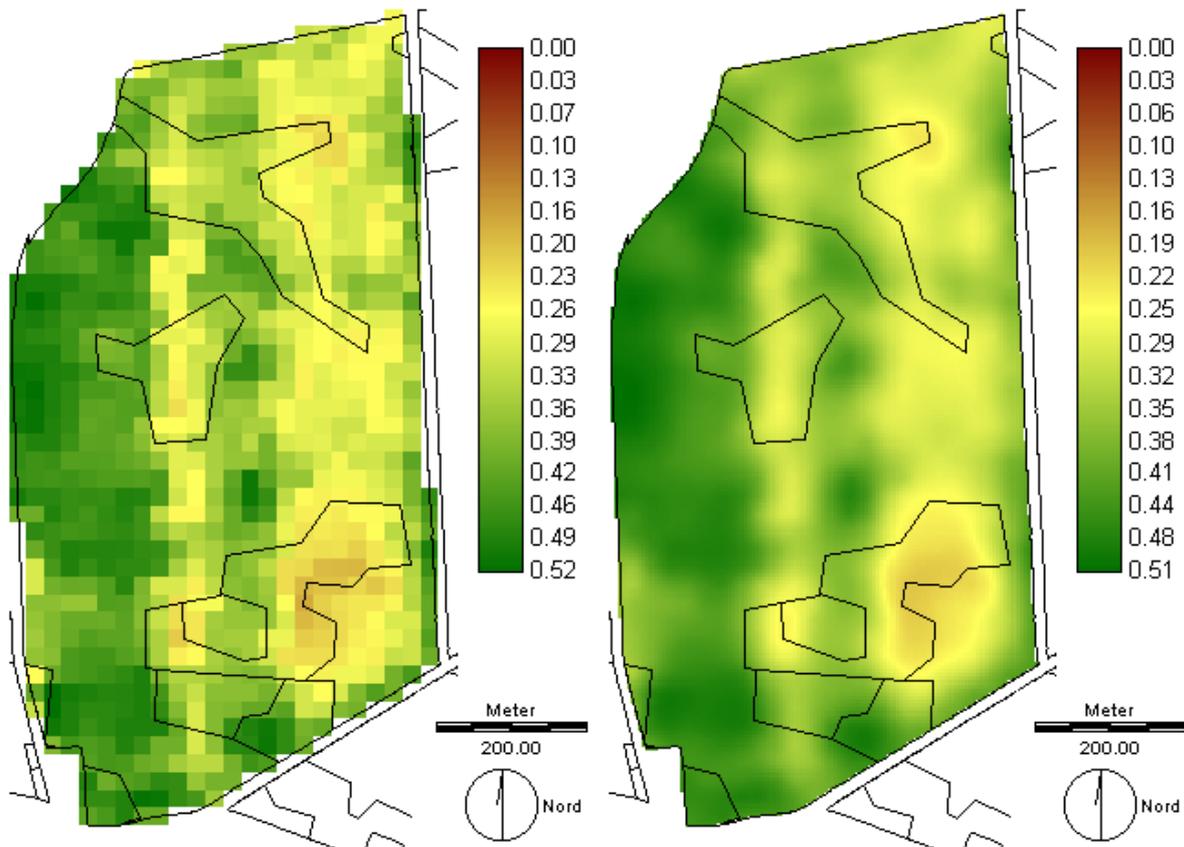
**Tab. 20: Flächenumfang verschiedener Pflanzenarten, für den die NDVI-Werte eines Satellitenbildes die tatsächliche Standortvariabilität widerspiegeln (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahmen vom 2.6.1997 bzw. 21.6.1998)**

	1997 geeignet	1997 ungeeignet	1998 geeignet	1998 ungeeignet
Pflanzenart	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]
Erbsen	0	126	0	39
Kartoffeln	0	173	38	114
Öllein	0	82	-	-
Silomais	149	37	42	125
Sommergerste	0	196	-	-
Wintergerste	0	151	165	165
Winterraps	0	173	157	39
Winterroggen (Hybrid-Sorte)	0	228	53	123
Winterroggen (Pop.-Sorte)	191	48	256	0
Winterweizen	0	94	256	85
Zuckerrübe	0	115	63	63
<b>Summe [ha]</b>	<b>340</b>	<b>1423</b>	<b>1029</b>	<b>753</b>
<b>in % der Gesamtfläche</b>	<b>19</b>	<b>81</b>	<b>58</b>	<b>42</b>

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind in der Tab. A-21 im Anhang wiedergegeben. Zwischen den NDVI-Werten in identischen Rasterzellen treten lineare Korrelationskoeffizienten zwischen 0.89 und -0.51 auf. Die höchsten

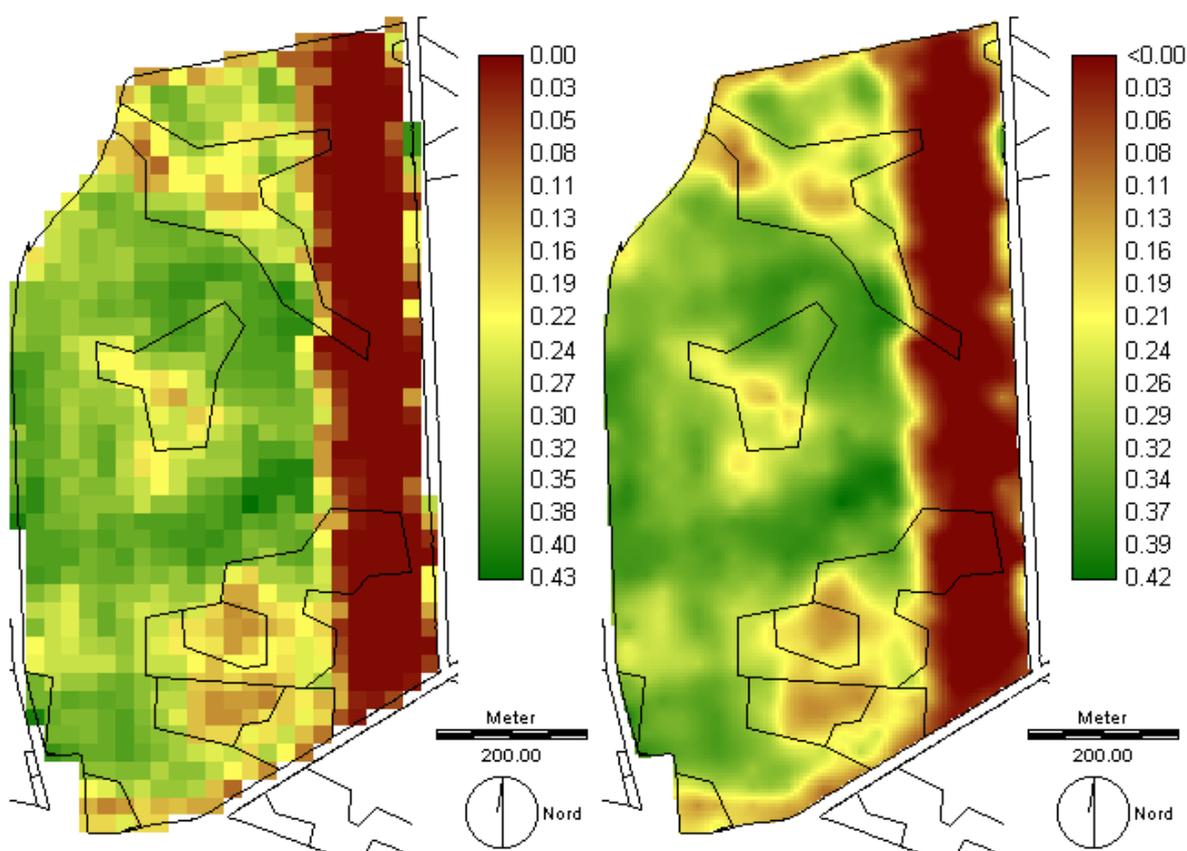
Korrelationskoeffizienten finden sich auf Feldern, auf denen zum Zeitpunkt der Satellitenaufnahme Winterroggen angebaut war. Populationsorten waren relativ häufiger mit hohen Koeffizienten vertreten. Geringe oder negative Korrelationskoeffizienten treten in der Regel auf, wenn in mindestens einem Jahr Mais, Zuckerrübe, Öllein, Kartoffel oder Erbse im Anbau war. Felder, die in beiden Jahren mit Wintergetreide oder Winterrapss bestellt waren und für welche die NDVI-Werte der beiden Jahre nur schwach oder gar nicht korreliert sind, befanden sich zum überwiegenden Anteil im zentralen Bereich des Lössgebietes.

In der Abb. 69 sind für den 2.6.1997 die NDVI-Rasterdaten des Feldes '2600' dargestellt, und zwar links in der ursprünglichen Auflösung von 23x23m, rechts finden sich die aus den NDVI-Daten auf ein 5x5m Raster interpolierten Werte. Die Abb. 70 enthält die entsprechenden Karten für die Satelliten-Daten vom 21.6.1998. Zusätzlich ist in den Karten der Verlauf der Grenzlinien der Reichsbodenschätzung (RBS) eingezeichnet. Die Karte der RBS-Bodenarten befindet sich im Anhang in der Abb. A-19.



**Abb. 69: Karten der NDVI-Werte für das Feld '2600' in der ursprünglichen Auflösung von 23x23m (links) und die auf ein 5x5m-Raster interpolierten Werte (rechts) (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahme vom 2.6.1997)**

Im NDVI-Bild des Jahres 1997 (Pflanzenart: Erbse) sind zwei in NS-Richtung verlaufende, unterschiedliche breite Streifen zu erkennen, in welchen geringe NDVI-Werten auftreten. Das Muster der Streifen dominiert den visuellen Eindruck der NDVI-Karte. Im Süden und Norden des breiteren, östlichen Streifens treten zwei Bereiche mit sehr geringen NDVI-Werten auf. Diese befinden sich in der Nähe von Arealen, die von der Reichsbodenschätzung wegen ihrer sandigen Böden mit geringen Bodenzahlen bewertet worden waren.



**Abb. 70: Karten der NDVI-Werte für das Feld '2600' in der ursprünglichen Auflösung von 23x23m (links) und die auf ein 5x5m-Raster interpolierten Werte (rechts) (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahme vom 21.6.1998)**

Die NDVI-Karte vom 21.6.1998 (Pflanzenart: Wintergerste) zeigt im östlichen Bereich des Feldes einen Streifen, der eine etwas geringere Breite hat als der des Jahres 1997 (siehe Abb. 69). An drei Stellen des Feldes treten in Verbindung mit sandigen Böden geringe NDVI-Werte auf. Die interpolierten Daten geben der NDVI-Karte wegen ihrer feineren Rasterung eine kontinuierlichere Erscheinung. Anhand der automatisch auf das Minimum und Maximum der Werte skalierten Legende der einzelnen Karten ist ersichtlich, dass die maximalen NDVI-Werte der 23m-Rasterkarte durch die Interpolation etwas verringert werden. Der Streifen im östlichen Feldbereich (Abb. 70) hat zum Teil negative NDVI-Werte, die aus Gründen der Darstellung pauschal auf den Wert 0.005 umklassiert wurden.

### 3.6.4 Diskussion

Die Diskussion der Ergebnisse folgt den drei vorgenannten Haupt-Kritikpunkten an Satellitendaten, die im Zusammenhang mit dem Standort-spezifischen Ackerbau geäußert werden.

#### Empfindlichkeit gegenüber atmosphärischen Störungen & geringe Überflughäufigkeit

Die Auswirkung von Wolken im Bildausschnitt der Satellitenaufnahme ist in der Abb. 64 deutlich zu erkennen. Die Verringerung der Reflexionswerte im Bereich von Wolkenschatten verhindert eine automatisierte Datenverarbeitung der einzelnen Kanäle. Für die Anwendung von verschiedenen Verfahren der Klassifizierung von Satellitendaten zur Unterteilung eines Feldes in relativ homogene Teilbereiche gilt prinzipiell dasselbe, wie bereits im Zusammenhang mit der Verarbeitung von Luftbildern ausgeführt. Es wäre theoretisch denkbar, eine manuelle Unterteilung vorzunehmen. Durch eine manuelle Vorgehensweise würde allerdings ein wichtiger Vorteil der Verarbeitung von Satellitendaten verloren gehen: Die automatisierte Aufbereitung von Daten für eine sehr große Fläche, die durch nur eine Satelliten-Aufnahme bereitgestellt werden.

Für die Erfassung von Vegetationsunterschieden durch Satellitenbilder eignen sich verschiedene Indizes. Von diesen dürfte der NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) die wahrscheinlich weiteste Verbreitung gefunden haben ((THIAM & EASTMAN (1999))). Der Vorteil von Verhältnis-Werten, zu denen der NDVI gezählt wird, ist aus der Abb. 64 (rechts) direkt erkennbar. Durch die Quotientenbildung verschwindet der Einfluss der unterschiedlichen Reflexionsintensität im Bereich des Wolkenschattens. Der Ausfall der Bildpunkte für die Analyse im Bereich, der durch die Wolke abgedeckt wird, läßt sich jedoch nicht beseitigen.

Für die beiden Jahre waren nur die beiden verwendeten Szenen für das Untersuchungsgebiet wolkenfrei. Daher konnten keine alternativen Szenen erworben werden. Wie ein Vergleich der Aufnahmetermine mit den als günstig erachteten Terminen in der Abb. 63 deutlich macht, war lediglich für die Szene des Jahres 1998 ein günstiger Aufnahmetermin gegeben. Die hierfür zugrunde liegende Beurteilung der Eignung von verschiedenen Zeitpunkten für die Erfassung der bodenbedingten Differenzierungen von Pflanzenbeständen war auf der Grundlage von eigenen Beobachtungen im Verlauf der drei Untersuchungsjahre erstellt und anhand von Luftbild-Befliegungen weiterentwickelt worden.

Diese unterschiedliche Gunst der Aufnahmetermine der beiden Satelliten-Aufnahmen führt dazu, dass im Jahr 1997 für lediglich knapp 20% der Fläche überhaupt solche relevanten Informationen aus den Satellitendaten zu gewinnen sind, die für die Erfassung von Standort-Heterogenität genutzt werden können. Im Jahr 1998 liegt dieser Wert bei knapp 60%. Eine große Auswirkung auf die jeweiligen Anteile der nutzbaren Satelliten-Informationen hat die jeweils praktizierte Fruchtfolge. Im Untersuchungsgebiet werden Mais, Zuckerrübe, Kartoffel, Erbse und Öllein angebaut. Diese Pflanzenarten bedecken die Bodenoberfläche erst recht spät im Frühsommer oder Sommer. Das schränkt in dieser Region die Verwendung des NDVI-Wertes als Mittel der Kartierung ein.

Z.T. sind Unterschiede innerhalb dieser Felder zu beobachten, die möglicherweise auf eine Verzögerung der Keimung durch geringe Bodentemperaturen in tendenziell feuchteren Bereichen zurückzuführen sein könnten. Das ist v.a. für den Anbau von Mais im Jahr 1997

der Fall. Allerdings sind auch NDVI-Strukturen erkennbar, die offensichtlich durch unterschiedliche Saattermine erzeugt worden sind.

Die Eignung des Roggens für die Ausweisung von Standortunterschieden mit Satellitendaten, und hier v.a. der Populationsorten, ist folgendermaßen zu erklären: Nicht die Pflanzenart ist für das günstige Ergebnis entscheidend, sondern der Standort, auf dem diese Pflanzenart angebaut wird. Populationsorten von Winterroggen werden im Untersuchungsgebiet auf Feldern angebaut, auf denen Sandböden überwiegen. Diese Felder liegen im Nord- und Südbereich des Gebietes am Rand der Löss-Zone. Im Grenzbereich der Felder zum Lössgebiet wechseln die Böden zwischen Sand- und Löss-Böden. Z.T. kommen auf den Feldern auch nasse Senken vor. Diese Unterschiede in der Wasserversorgung sind im Satellitenbild in beiden Jahren dann deutlich zu erkennen, wenn auf den Feldern Wintergetreide angebaut wurde. Da hierfür i.d.R. nur Populationsorten von Winterroggen zum Einsatz kommen, erklärt sich das gute Abschneiden dieser Pflanzenart bei der Abbildung von Standortheterogenität.

#### Geringe geometrische Auflösung

Die Auflösung in 23x23m-Pixel war zum Zeitpunkt des Erwerbs der Szenen (Herbst 1998) die höchste geometrische Auflösung, mit der Satellitendaten kommerziell erhältlich waren. Grundsätzlich muss das kein Nachteil sein, v.a. deshalb nicht, da die im Untersuchungsgebiet auftretenden Raumskalen der Heterogenität durchaus in einer Größenordnung liegen, in der eine Erfassung bei dieser geometrischen Auflösung noch möglich wäre. Kleinflächigere Areale mit Standortunterschieden könnten jedoch so nicht erfasst werden.

Durch eine Interpolation der 23x23m-Daten, lässt sich theoretisch jede beliebige neue Auflösung erzeugen. In der vorliegenden Untersuchung wird auf ein 5x5m-Raster interpoliert. Doch sind diese neuen Karten lediglich linear geglättete Abbilder der Ausgangskarten. Die geringere Auflösung kann von Vorteil sein, wenn die Satellitendaten beispielsweise mit einer in geringerer Auflösung vorliegenden Karte auf der Ebene von Rasterzellen verglichen werden sollen.

Die Detailkarten des Feldes '2600' machen aber zwei Eigenschaften von gegenwärtigen Satellitendaten deutlich, die bei der Nutzung in Ackerbaubetrieben von sehr großer Bedeutung sein können.

Erstens handelt es sich bei Satellitendaten um Informationen aus einer zurückliegenden Zeit. Je weiter der Termin der Aufnahme vom Datum der Bearbeitung zeitlich entfernt ist, desto schwieriger wird es, unverständliche Strukturen auf Feldern durch Erinnerungen oder Aufzeichnungen nachträglich zu erklären. Die Streifen auf dem Feld '2600' stellen eine solche Situation dar. Die deutlichen, streifenförmigen Unterschiede der NDVI-Daten im Jahr 1998 könnten auch wegen des relativ späten Termins der Aufnahme allein als Sortenunterschiede der angebauten Gerste gedeutet werden. Im östlichen Bereich des Feldes wäre dann der Bestand bereits deutlich abgereift, was den starken Rückgang der NDVI-Werte erklären würde.

Die Streifenstruktur im Jahr 1997 könnte generell dasselbe Phänomen bei der Pflanzenart Erbse widerspiegeln. Folgt man dieser Interpretationsmöglichkeit, müsste die NDVI-Karte für die einzelnen Sorten getrennt analysiert werden. Nur dann wäre gewährleistet, dass die im

Bereich der einzelnen Sortenstreifen auftretenden NDVI-Unterschiede als Hinweise auf eine Heterogenität der Standortbedingungen gedeutet werden können.

Ebenso denkbar wäre aber auch ein Bereich mit erhöhter Bodenverdichtung und Strukturschäden aufgrund einer weiter zurückliegenden unterschiedlichen Bewirtschaftung. Die Erbse wäre in diesem Fall eine Indikatorpflanze für die Verdichtung.

Aus den NDVI-Daten lassen sich solche hier unterstellten Unterschiede nicht ablesen. Zum einen ist dafür die grobe Auflösung verantwortlich. In einem Luftbild wären die einzelnen Arbeitsbreiten einer Drillmaschine (z.B. 6m) deutlich zu erkennen, sodass Sorteneffekte von Effekten der Vorbewirtschaftung mit größerer Sicherheit getrennt werden könnten. Zum anderen liegt es aber auch daran, dass der NDVI-Wert ein rechnerisch abgeleiteter Wert ist. Der Mensch sieht mit seinen Augen Farben und keine NDVI-Werte oder Infrarot-Reflexionen. NDVI-Daten gehören nicht zu seinem alltäglichen Erfahrungsbereich. Daher wird sicherlich immer ein gewisser Beratungsbedarf bleiben, um mit Landwirten NDVI-Karten zu interpretieren, auch wenn die Nachteile der groben Auflösung und der geringen Überflug-Häufigkeit eines Tages beseitigt sein sollten.

In diesen letzten beiden Punkten sehe ich die größten Schwierigkeiten für eine Ausweitung des Einsatzes von Satellitendaten, auch wenn diese von zukünftig verbesserten Sensorsystemen stammen sollten: Wenn ein größerer zeitlicher Abstand zwischen Aufnahme und Interpretation liegt, werden unklare Strukturen aufgrund der geometrischen Auflösung und der Verwendung von Wellenlängen oder abgeleiteten Indizes nur unsicher zu interpretieren sein.

Vielleicht sind die von KÜHBAUCH (2002) vorgeschlagenen 'fertigen Produkte' eine Lösung. Jede Standardisierung beschränkt jedoch die Zahl der Möglichkeiten bei der Datenauswertung.

### 3.6.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass nur ein sehr geringer Flächenanteil von den Satellitendaten von zwei Satellitenbildern überhaupt genutzt werden kann, um die auf den Feldern auftretende Variabilität der Standorteigenschaften abzubilden. Dies ist teilweise durch die praktizierte Fruchtfolge bedingt, teilweise auch durch die geringe Anzahl an wolkenfreien Szenen. Aus dieser Tatsache resultieren erhöhte Kosten für die Erstellung von Standortkarten aus Satellitendaten je Flächeneinheit. Zudem bleibt die generelle Unsicherheit im Vorfeld, ob aus der erworbenen Satellitenbild-Szene für die gewünschte Fläche überhaupt relevante Informationen zur Standortheterogenität gewonnen werden können.

Am Beispiel der Satellitendaten für ein Feld zu zwei Aufnahmetermen wird die Schwierigkeit der Interpretation erläutert. Sie liegt darin begründet, dass Satellitendaten z.T. Wellenlängenbereiche außerhalb des sichtbaren Lichts aufzeichnen, die von Menschen daher nicht intuitiv verstanden werden können und interpretiert werden müssen. Diese Tatsache erschwert v.a. die rückwirkende Auswertung solcher Daten.

## 4 Analyse von Standortkarten

Die aus den Daten der Standorterkundung erstellten Karten können direkt und indirekt für den Standort-spezifischen Ackerbau genutzt werden.

Die direkte Nutzung würde z.B. die Erstellung einer Applikationskarte für die Ausbringung von Nährstoffen auf der Basis von zuverlässigen Ertragskarten eines Feldes umfassen. Faustzahlen oder selbst erhobene Daten über die Nährstoffgehalte in der Ernteware können dabei als Berechnungsgrundlage für die Entzüge dienen.

Eine indirekte Möglichkeit der Nutzung ist die Erarbeitung von spezifischen Ertragsschätzungen für die einzelnen Standorte durch die Kombination von verschiedenen Datenquellen. Ein anderes Einsatzgebiet kann die Überprüfung, Verbesserung oder Erweiterung bereits vorliegender Standortkarten sein. Zudem lassen sich die Ertragsdaten in Verbindung mit anderen Standortkarten auch nutzen, um über die Bedingungen der Ertragsbildung von verschiedenen Pflanzenarten oder einer Pflanzenart in verschiedenen Jahren weitere Informationen zu gewinnen.

Einige Möglichkeiten der GIS-Analyse von Standortkarten werden in diesem Abschnitt anhand von Beispielen demonstriert. Sie sollen als Anregung dienen und haben eher exemplarischen Charakter. Sie sind ein Vorschlag, wie in Zukunft verstärkt pflanzenbauliche Fragestellungen des Standort-spezifischen Ackerbaus bearbeitet werden könnten.

Es werden im folgenden zwei mögliche Wege der Auswertung besprochen, denen ich eine hohe Bedeutung im Zusammenhang mit dem Standort-spezifischen Ackerbau beimesse:

1. die Bestimmung von mittleren Erträgen für die Areale der Reichsbodenschätzung und für Teilflächen, die aus aktuellen Luftbild-Daten gewonnenen wurden und
2. die Überprüfung und Aktualisierung von Bodenkarten.

#### **4.1 Methodik**

Rasterkarten stellen für ein Feld oder ein Areal innerhalb eines Feldes eine unterschiedlich große Anzahl von Werten für die statistische Analyse zur Verfügung. Die jeweilige Anzahl der Werte je Teilfläche ist von den Abmessungen des Rasters und der Größe der Teilfläche abhängig.

Bei der statistischen Auswertung ist zu bedenken, dass die Ausprägung eines Wertes in einer einzelnen Rasterzelle in der Regel nicht unabhängig von den Werten der jeweils benachbarten Zellen ist. Das ist einerseits durch die Ausprägung der ursprünglichen lokalen Heterogenität bedingt. Andererseits wird die räumliche Korrelation der Daten durch Verfahren der Interpolation, Klassifikation und Glättung noch zusätzlich verstärkt. Die Auswirkung dieser Werte-Korrelation innerhalb eines Datensatzes auf die nachfolgenden statistischen Verrechnungen wird in der Literatur unterschiedlich beurteilt. Es zeichnen sich zwei grundsätzliche Standpunkte ab:

Der erste Standpunkt wird z.B. von CRESSIE (1993) vertreten. Der Autor ist der Ansicht, dass sich aufgrund von Korrelationen innerhalb eines Datensatzes die Anzahl der tatsächlichen Freiheitsgrade reduziere. Wenn diese Reduktion bei der Schätzung von Konfidenzintervallen nicht berücksichtigt werde, komme es zu der falschen Schätzung der Konfidenzintervall-Grenzen. Auch die Bezeichnung 'apparent degrees of freedom' in der Ergebnis-Darstellung des Moduls REGRESS im GIS Idrisi32 deutet auf diesen Standpunkt hin. In der Arbeit von MILLER ET AL. (1988) wird unter Hinweis auf dieses Problem ausdrücklich auf die Angabe von Signifikanzen verzichtet. CRESSIE (1993) gibt eine Formel an, mit der sich die Anzahl der wirksamen Freiheitsgrade berechnen lässt, wenn ein bestimmtes Maß an räumlicher Korrelation vorliegt.

Den entgegengesetzten Standpunkt vertreten BRUS & GRUIJTER (1997). Sie sind der Ansicht, dass aus der natürlich auftretenden Korrelation von räumlich benachbarten Daten nicht der Schluss gezogen werden dürfe, dass die Werte einer Stichprobe deshalb abhängig seien. Nach Meinung der Autoren geht die Verwirrung, die mit räumlich korrelierten Daten und der Bestimmung der tatsächlichen Anzahl von Freiheitsgraden verbunden ist, darauf zurück, dass dieselben Vokabeln für unterschiedliche Bereiche der Mathematik verwendet werden. Nach ihrer Ansicht werde die Zufälligkeit der Werte innerhalb einer Stichprobe über die Strategie der Probenahme erzeugt. Daher sei bei einer vollständig randomisierten Auswahl der Beprobungsorte von einer Unabhängigkeit der Daten im statistischen Sinne auszugehen und die klassische Schätzung der Konfidenzintervalle mit der vollen Anzahl der Freiheitsgrade korrekt.

Die Veröffentlichung des Artikels von BRUS & GRUIJTER (1997) provozierte verschiedene Stellungnahmen anderer Autoren in derselben Zeitschrift. Daraus ist zu schließen, dass das Problem sehr unterschiedlich gesehen wird und es noch keine allseits akzeptierte Lösung dafür gibt. BREWER (1999) macht darauf aufmerksam, dass im Zeitverlauf der letzten Jahrzehnte jeweils unterschiedliche Beprobungsstrategien als 'optimal' galten und in der Gemeinschaft der Wissenschaftler 'akzeptiert' wurden.

Um trotz dieser Schwierigkeiten die erhaltenen Karten für eine weitergehende statistische Analyse zu verwenden, wurden die Empfehlungen von BORGMAN & QUIMBY (1988) aufgegriffen und im GIS umgesetzt. Ein wichtiger Nachteil der vollständig randomisierten

Beprobung liegt nach Meinung dieser Autoren darin, dass die Rauminformation der Daten nicht genutzt werde und der Datensatz somit nicht unbedingt repräsentativ für die Fläche sei. Sie diskutieren ausführlich die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Beprobungsmuster und empfehlen einen systematischen Ansatz mit lokaler Zufälligkeit der Beprobungsorte. Auch BREWER (1999) empfiehlt bei umfangreichen Stichproben die Verwendung eines unterteilt-randomisierten Beprobungsmusters (stratified random sampling).

Für die feldbezogene Analyse der Rasterkarten wird daher ein systematisches Netz von Beprobungspunkten für die statistische Analyse erzeugt. Die Punkte haben einen konstanten Abstand von 30m in NS- und WE-Richtung zueinander. Dadurch wird die vollständige Repräsentativität der Ergebnisse für die untersuchte Fläche gewährleistet und der Datensatz gleichzeitig auf einen Umfang von ca. 3% der ursprünglichen Zahl an Rasterzellen reduziert. Die Koordinaten der Punkte werden in eine ASCII-Datei exportiert. Im Programm MS EXCEL werden die Koordinaten auf die folgende Weise verändert: Zu den Hoch- und Rechtswerten der Gauß-Krüger-Koordinaten wird ein mit dem Zufallsgenerator erzeugter Wert addiert. Dieser Wert entstammt einer Normalverteilung, die den Mittelwert Null und die Standardabweichung 15 besitzt. Mit dem Vorgehen wird ein systematisches Beprobungsschema entworfen, das durch die Zufälligkeit des Ortes auf lokaler Ebene die Anregung von BORGMAN & QUIMBY (1988) aufgreift. Der so veränderte Datensatz wird als Vektorpunkt-Datei in das GIS importiert. Mit dem Idrisi32-Modul REFORMAT wird den Zellen einer 5m-Rasterkarte die eindeutige Nummer desjenigen Vektorpunktes zugeordnet, der in der entsprechenden Zelle liegt. Rasterzellen ohne Beprobungspunkt behalten den Wert Null. Die verschiedenen Standortinformationen können mit diesen feldspezifischen Rasterkarten an den Beprobungspunkten mit Hilfe des Idrisi32-Moduls EXTRACT ausgelesen und in einer Datenbank unter der jeweiligen Punktnummer des Beprobungsortes abgespeichert werden. Aufgrund der Modulbezeichnung im Programm Idrisi32 wird die Anordnung der Beprobungspunkte im GIS im weiteren Text als 'Extraktionsraster' bezeichnet. Zu betonen ist, dass die 'Beprobung' nicht real auf dem Feld stattfindet, sondern die im Computer gespeicherten Standortkarten an den einzelnen Orten 'beprobt' werden. Eine Beprobung im Feld könnte zusätzlich stattfinden, wurde aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Im Anschluss daran erfolgte die Analyse der Daten mit dem Statistik-Programm SPSS.

## 4.2 Standort-spezifische Ertragsermittlung

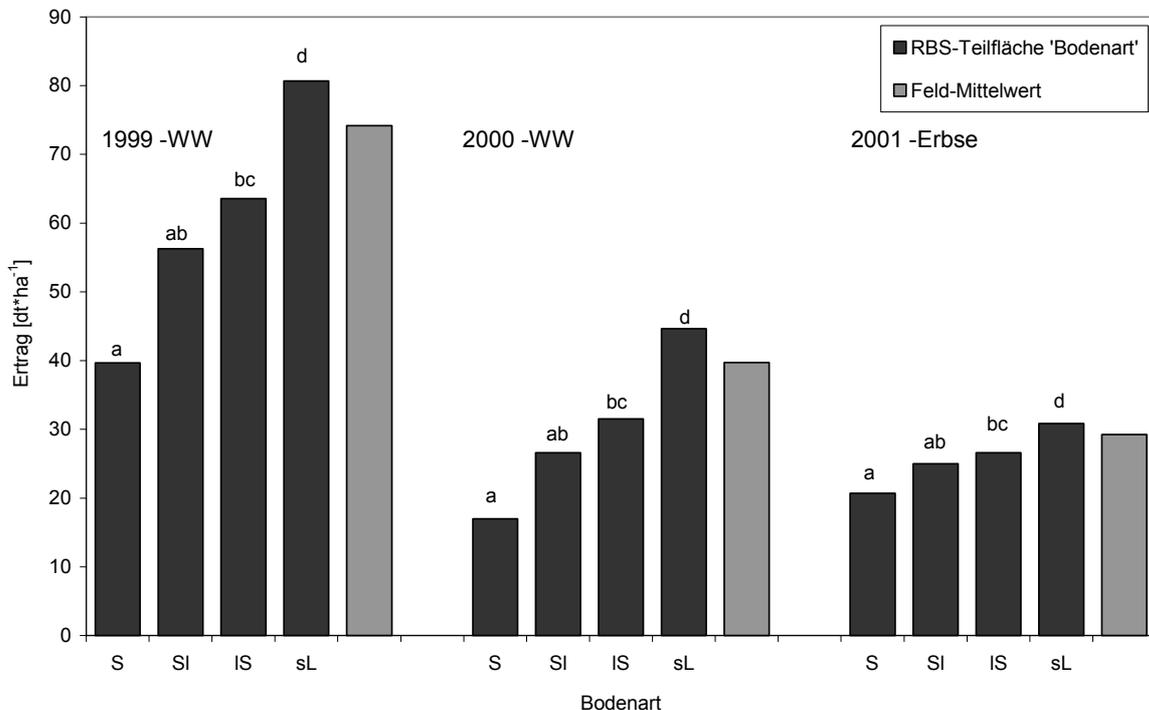
### 4.2.1 Ertragskarten und Daten der Reichsbodenschätzung

#### 4.2.1.1 Material und Methode

Die Ertragskarten des Feldes '3300' aus den Erntejahren 1999, 2000 und 2001 (Abb. A-20 bis Abb. A-22 einschließlich Krige-Varianzen) wurden mit den Daten der Reichsbodenschätzung über das Extraktionsraster im GIS kombiniert und die Daten der 603 Beprobungsorte in einer Datenbank gespeichert. Es erfolgte eine univariate Varianzanalyse der Erträge für die Faktoren 'Bodenart', 'Bodenzahl' und 'Teilflächen-Nr.'. Für die multiplen Vergleiche der Mittelwerte wurde der Scheffé-Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% verwendet.

#### 4.2.1.2 Ergebnisse

Die mittleren Erträge für die Faktoren 'RBS-Bodenart' und 'RBS-Bodenzahl' sind in der Abb. 71 bzw. Abb. 72 dargestellt. Die F-Werte der Varianzanalyse sind im Anhang in Tab. A-22 aufgeführt.



**Abb. 71: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'RBS-Bodenart' auf dem Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Werte im Scheffé-Test ( $p=0.05$ ))**

Die F-Quotienten der Varianzanalyse unterscheiden sich zwischen den Jahren deutlich. Der F-Wert ist bei allen Faktoren für die Erträge des Weizens im Jahr 1999 am größten. Nur geringfügig kleiner ist der Wert für die Weizenerträge des Jahres 2000. Deutlich geringer sind die F-Werte für die Erbsenerträge. Das Niveau der F-Quotienten für den Faktor 'RBS-Bodenart' ist größer als für den Faktor 'RBS-Bodenzahl'. Für den Faktor 'RBS-Teilflächen-Nr.' ist er am geringsten.

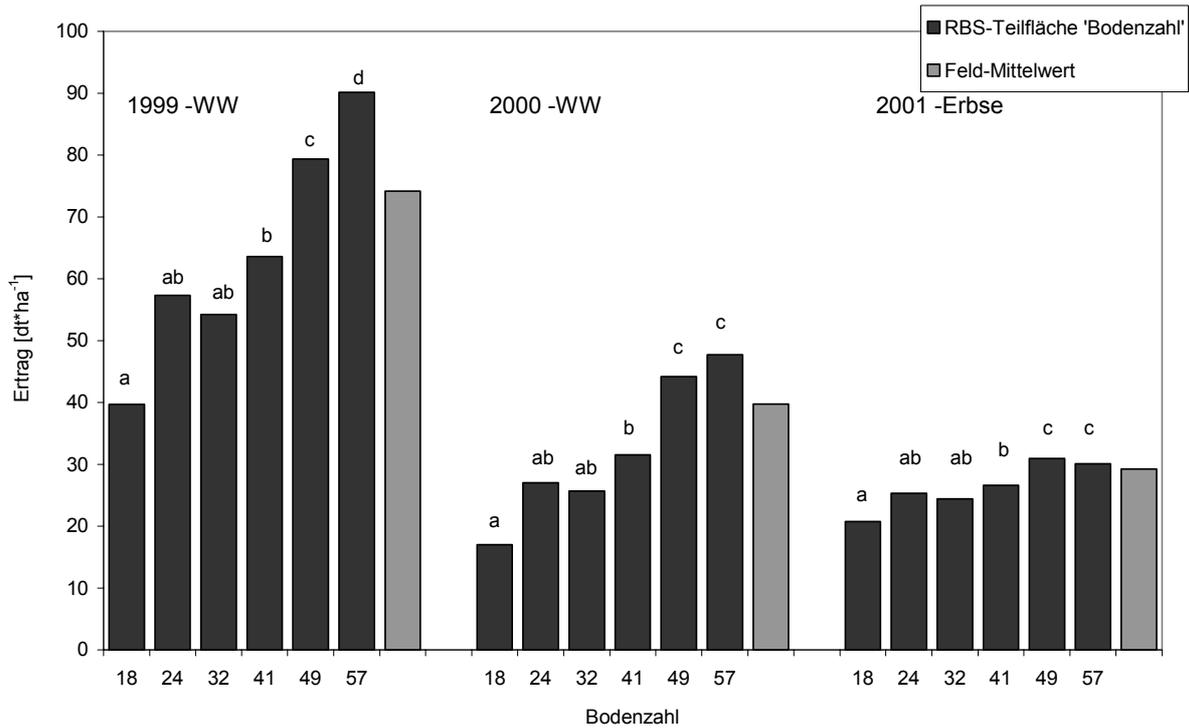


Abb. 72: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'RBS-Bodenzahl' auf dem Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Werte im Scheffé-Test ( $p=0.05$ ))

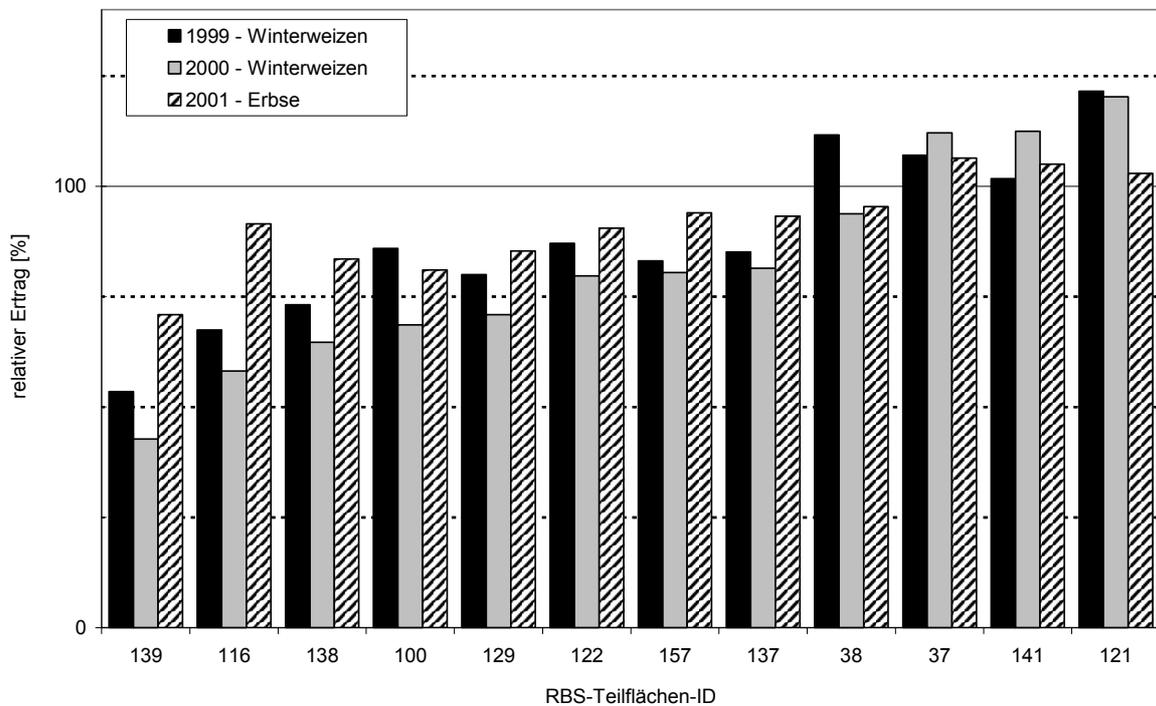


Abb. 73: Relativerträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'RBS-Teilflächen-Nr.' auf dem Feld '3300' (Werte aufsteigend geordnet für das Jahr 2000)

Für die vier Bodenarten der RBS-Karte des Feldes '3300' werden in allen drei Jahren unterschiedliche Erträge ermittelt, von den Unterschieden sind einige signifikant. Die Erträge steigen von der Bodenart 'Sand' über 'anlehmigen Sand', 'lehmigen Sand' bis zum 'stark lehmigen Sand'.

Mit Zunahme der Bodenzahl sind in der Regel steigende mittlere Erträge verbunden. Eine Ausnahme stellen die Bodenzahlen 24 und 32 dar. Die mittleren Erträge für die Areale mit der Bodenzahl 24 sind in allen drei untersuchten Jahren höher als die Erträge auf Teilflächen mit der Bodenzahl 32. Die mittleren Erträge der Teilflächen mit geringen Bodenzahlen sind nicht signifikant verschieden. Signifikante Unterschiede der Erträge treten jedoch zwischen Arealen mit geringen Bodenzahlen und mit hohen Bodenzahlen auf.

Die Relativerträge der verschiedenen Teilflächen in den drei Jahren variieren zwischen 42% und 122% (Abb. 73). Einzelne Teilflächen zeigen jeweils etwa gleich bleibende Größenordnungen der Relativerträge in den drei Jahren. Während die Beziehung zwischen den Relativerträgen der beiden Jahre mit Winterweizenanbau relativ eng ist, weichen die Relativerträge der Erbse in einzelnen Teilflächen stärker von den Werten der Jahre 1999 und 2000 ab. Für die Relativerträge der Teilflächen errechnet sich ein Variationskoeffizient von 22%, 29% und 11% für die Jahre 1999, 2000 und 2001.

#### **4.2.1.3 Diskussion**

Die gefundenen Zunahmen des Ertrages von der Bodenart 'Sand' bis zum 'stark lehmigen Sand' sind plausibel und entsprechen - zumindest qualitativ - den Beobachtungen der Bewirtschafter. Die Teilbereiche des Feldes mit der RBS-Bodenart 'Sand' sind in der Regel durch das Fehlen einer Lössdecke gekennzeichnet. Die Areale der anderen Bodenarten unterscheiden sich vornehmlich hinsichtlich der Mächtigkeit der Lössdecke. Die Mächtigkeit der Lössdecke beeinflusst die Ertragsbildung vor allem über die Menge an pflanzenverfügbar gespeichertem Bodenwasser.

Die Erträge von Winterweizen der beiden Jahre zeigen sehr ähnliche relative Ertragsabstufungen sowohl auf der Ebene des Faktors 'Bodenart' als auch auf dem kleinflächigeren Niveau des Faktors 'Teilflächen-Nr.'. Die Erbsenerträge reagieren insgesamt nicht so stark auf unterschiedliche Bodenarten oder Teilflächen im Verhältnis zum mittleren Ertrag des Feldes.

Aus den deutlich größeren F-Werten in den Jahren 1999 und 2000 gegenüber dem Jahr 2001 lassen sich zusätzliche Schlussfolgerungen ziehen. Die Erbse ist als Leguminosenart durch die Möglichkeit der Symbiose mit Wurzelknöllchen-Bakterien prinzipiell unabhängig von der Versorgung mit mineralischem Stickstoff aus dem Boden. Der signifikante Einfluss des Faktors 'Bodenart' und in geringerem Umfang des Faktors 'Bodenzahl' werden bei dieser Pflanzenart als der Einfluss der unterschiedlichen Speicherkapazität der Standorte für Bodenwasser interpretiert, da die übrige Bestandesführung der Erbse einheitlich durchgeführt worden war und auch keine anderen Areal-abhängigen Einflüsse wie z.B. eine Verunkrautung, extrem lagernde Bestände oder Schädlingsbefall beobachtet wurden. Die höheren F-Werte in der Varianzanalyse der Weizenerträge deuten auf zusätzliche, bodenbedingte Ursachen der Streuung hin. Aus Untersuchungen zum Verlauf der Bodenstickstoff-Gehalte an unterschiedlichen Terminen im Jahr war ersichtlich, dass es zwischen den unterschiedlichen Böden im Untersuchungsgebiet vor allem im zeitigen Frühjahr zum Teil erhebliche Unterschiede bei den Stickstoffmengen gibt, die im Boden

vorhanden sind. Die größten Unterschiede treten dabei im Unterboden auf. Diese sind von dem Vermögen des Bodens zur Wasserspeicherung abhängig. Die Auffüllung des Porenraums über die Herbst- und Wintermonate und die damit einhergehende vertikale Verlagerung von gelöstem Stickstoff im Bodenprofil, verlaufen auf Sand- und Lössböden unterschiedlich schnell. Da Lössboden-Horizonte im Vergleich zu Sandboden-Horizonten eine etwa doppelt so hohe nutzbare Feldkapazität besitzen, werden Nährstoffe der oberen Bodenschicht auf Lössböden weniger tief verlagert als auf Sandböden. In letzteren sind bis zu einer Bodentiefe von 100cm im Frühjahr in der Regel deshalb keine nennenswerten Stickstoffmengen mehr nachzuweisen. Die im Unterboden von Lössböden enthaltenen Stickstoffmengen stehen den Pflanzen während der Vegetationsperiode zusätzlich zu der einheitlich ausgebrachten Düngung zur Verfügung. Die verminderte Abhängigkeit der Erbsenerträge von den Bodenbedingten Wachstumsverhältnissen zeigt sich auch in der insgesamt geringeren Schwankung der Relativerträge zwischen den unterschiedlichen Teilflächen. Während Weizen einen Variationskoeffizient in den Areal-bezogenen Relativerträgen von über 20% aufweist, liegt der entsprechende Wert für Erbse deutlich unterhalb von 15%. Die überdurchschnittlich warme und trockene Witterung des Jahres 2000 hat nicht nur das mittlere Niveau der Weizenerträge des Feldes auf fast 50% des Wertes von 1999 reduziert, sondern auch die Streuung der Relativerträge deutlich vergrößert.

Die generelle Abnahme der F-Werte beginnend beim Faktor 'Bodenart' über 'Bodenzahl' bis hin zum Faktor 'Teilflächen-Nr.' kann dadurch erklärt werden, dass zunehmend kleinere Flächen als Streuungsursache betrachtet werden und dass daher die Streuung der Erträge innerhalb der Areale ein zunehmendes Gewicht erhält. Ursache sind hierfür sowohl die nicht die Bodenbedingungen widerspiegelnden Grenzverläufe der Teilflächen als auch die methodisch bedingte Variabilität der Daten in der Ertragskarte.

## 4.2.2 Ertragskarten und klassifizierte Luftbilder

Aus der rein qualitativen Interpretation von im Luftbild sichtbaren Strukturen in Pflanzenbeständen lassen sich konkrete Bewirtschaftungsmaßnahmen nur bedingt ableiten. Die im wissenschaftlichen Versuch angewendete Methode der Handbeerntung ist für Ackerbaubetriebe wegen des Arbeitsaufwandes nicht zu empfehlen. Um Ertragsinformationen zu spezifischen Erscheinungen im Luftbild zu erhalten, können Ertragskarten im GIS mit den Luftbildkarten oder abgeleiteten Informationen kombiniert und anschließend statistisch ausgewertet werden.

### 4.2.2.1 Material und Methode

Die Ertragskarten des Feldes '3300' aus den Erntejahren 1999, 2000 und 2001 wurden mit den verschiedenen Karten der Luftbild-Klassifizierung über das Extraktionsraster im GIS kombiniert. Die jeweiligen Daten an den Beprobungsorten wurden in einer Datenbank gespeichert. Es erfolgte eine univariate Varianzanalyse der Erträge mit den Bezeichnungen der Luftbild-Klassen als Faktoren. Die Klassifizierungsmethoden wurden getrennt verrechnet. Für die multiplen Vergleiche der Mittelwerte wurde der Scheffé-Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% verwendet.

Eine genauere Beschreibung der unterschiedlichen Luftbild-Klassifizierungsmethoden ist im Kapitel 3.5 zu finden.

### 4.2.2.2 Ergebnisse

Die mittleren Erträge der einzelnen Luftbild-Klassen sind für die verschiedenen Verfahren in den Abb. 74 bis Abb. 77 wiedergegeben. Für die Q-10-Klassifizierungsmethode sind in der Abb. 78 die Erträge als Relativwert des mittleren Ertrages des Feldes dargestellt. Die F-Werte der Varianzanalyse sind im Anhang in Tab. A-23 aufgeführt.

Die F-Werte der verschiedenen Klassifizierungsmethoden unterscheiden sich deutlich. Die manuelle Digitalisierung erzeugt drei Luftbild-Zonen, die im F-Test die stärkste Streuungserlegung erzielen. Die F-Werte der Verfahren der überwachten Klassifikation und der 20%-Quantil-Methode (Q-20) liegen in ähnlichen Größenordnungen. Deutlich geringer fallen die Quotienten für die 10%-Quantil-Methode (Q-10) aus.

Mit Ausnahme der Daten der manuellen Digitalisierung ist der F-Wert der Varianzanalyse im Jahr 2000 (Winterweizen) am höchsten. Der nächst kleinere Wert wird für das Jahr 1999 (Winterweizen) errechnet. Für die Erträge der Erbsen, die im Jahr 2001 geerntet wurden, wird der mit Abstand geringste Quotient ermittelt.

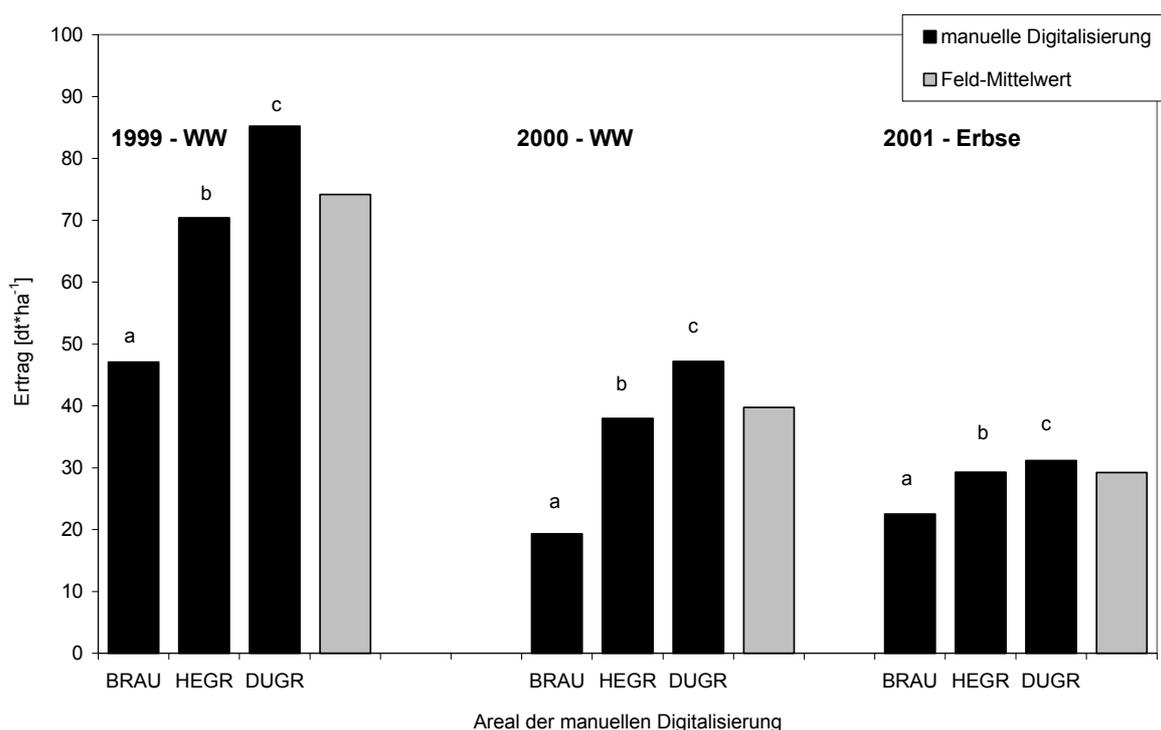
In den Klassen 'braun' (BRAU), 'hellgrün' (HEGR) und 'dunkelgrün' (DUGR) der manuellen Digitalisierung treten in den drei Jahren jeweils signifikant unterschiedliche Erträge auf. Der Ertragsunterschied zwischen der 'braun'- und 'hellgrün'-Klasse ist in allen drei Jahren am größten.

Das Verfahren der überwachten Klassifikation weist drei (1999) bzw. vier (2000 & 2001) signifikant unterschiedliche Ertragsmittelwerte aus. Die Mittelwert-Vergleiche wurden für die Ertragsdaten zwischen den Luftbild-Klassen der durch Modalfilterung generalisierten Karte vorgenommen. Die Klasse 'Boden' (BOD) hat dabei geringfügig höhere mittlere Erträge als die Klasse 'braun' (BRAU). Die Erträge der Klassen 'grün' und 'dunkelgrün' unterscheiden sich nur im Jahr 2000 und 2001 signifikant.

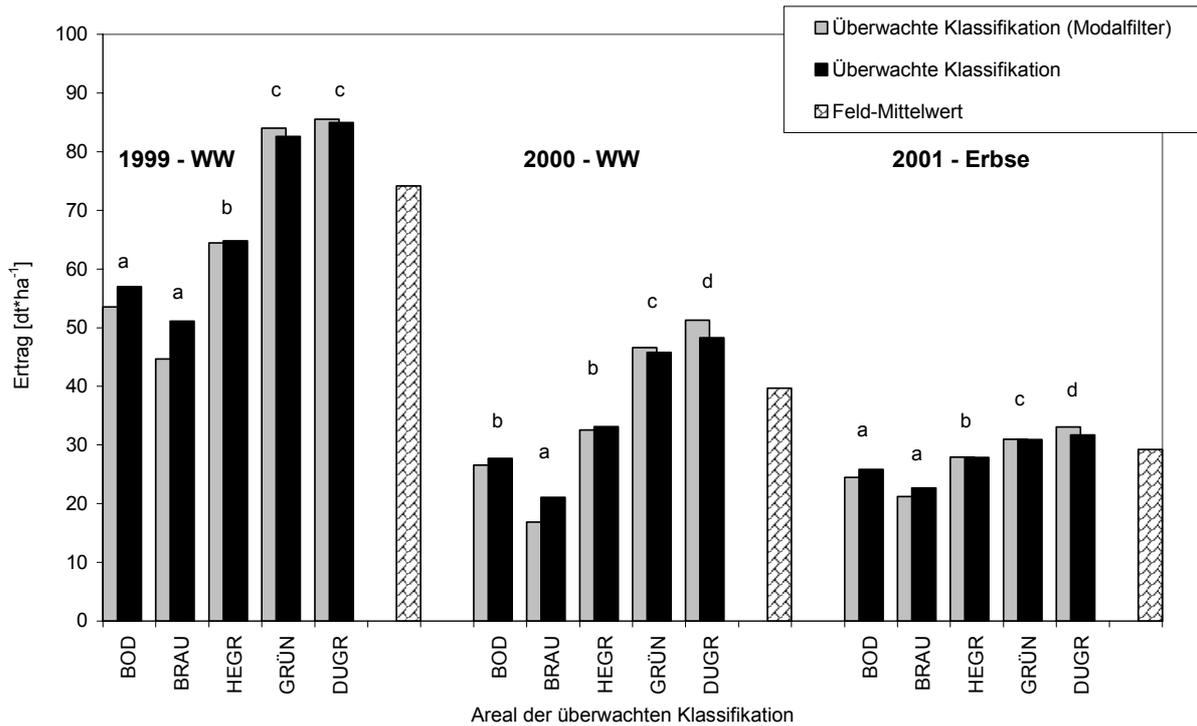
Das Q-20-Verfahren weist Klassen aus, in denen drei (1999 & 2001) bzw. vier (2000) signifikant unterschiedliche Durchschnitts-Erträge erzielt werden. Die Mittelwert-Vergleiche sind für die Ertragsdaten zwischen den Luftbild-Klassen der durch Modalfilterung generalisierten Karte vorgenommen. Während sich die Erträge der Klassen '41-60%' bis '81-100%' im Jahr 1999 und 2001 nicht signifikant unterscheiden, besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den Erträgen der Klassen '41-60%' und '81-100%' im Erntejahr 2000.

Die mittleren Erträge der ersten vier Q-10-Klassen unterscheiden sich signifikant in der Höhe ihrer Erträge in den Jahren 1999 und 2000. Im Jahr 2001 können signifikante Unterschiede nur zwischen den ersten drei Klassen festgestellt werden.

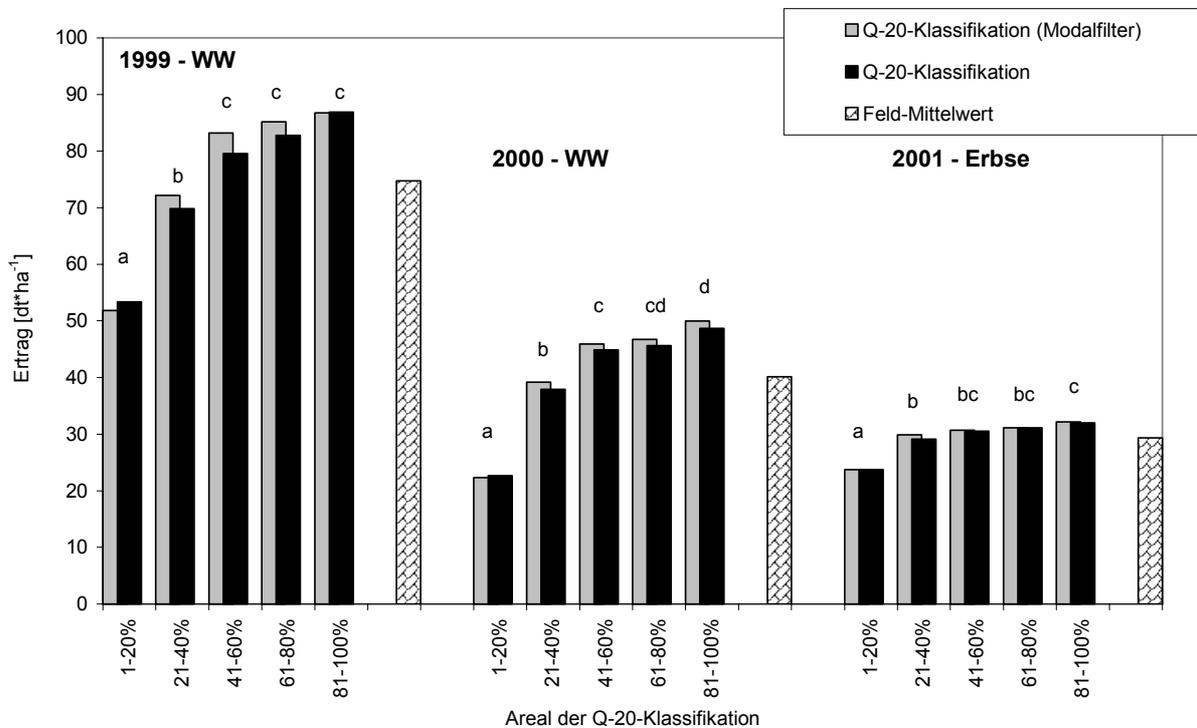
Die Relativerträge für die Bereiche der Q-10-Klassen sind in der Abb. 78 dargestellt. Die Werte für den Weizenertrag im Jahr 2000 sind v.a. in der Klasse '1-10%' deutlich geringer als für den Ertrag im Jahr 1999. Die Werte in den Klassen '81-90%' und '91-100%' sind im Jahr 2000 größer als für das Jahr 1999. Die Erbse zeigt im Jahr 2001 in den Klassen '1-10%', '11-20%' und '21-30%' deutlich höhere Werte als der Weizen 1999 oder 2000. In der Klasse '31-40%' ähneln sich die beiden Fruchtarten. In den anderen Klassen der Luftbild-Zonierung hat die Erbse geringere Relativerträge als der Weizen. Sie liegen zwischen 104% und 112% des Feldmittelwertes, während die Werte für die Relativerträge des Weizen in den Quantil-Klassen '41-50%' bis '91-100%' bei 108-118% (1999) bzw. 113-125% (2000) liegen.



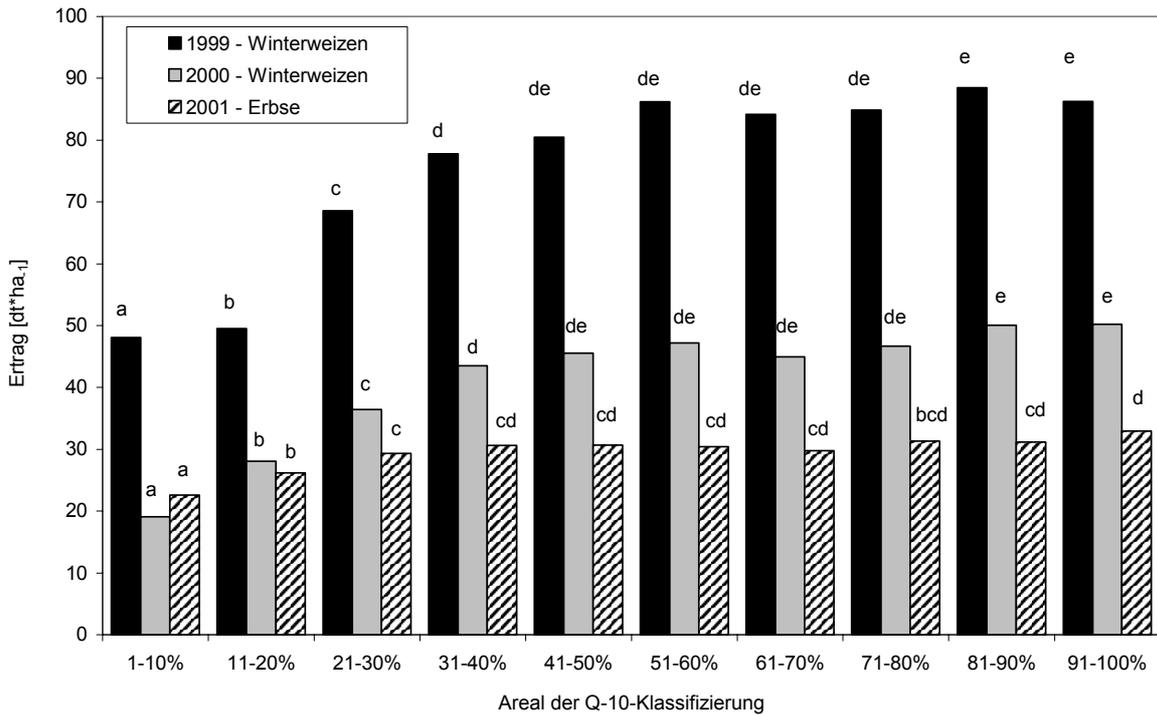
**Abb. 74: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'Luftbild-Klasse' der manuellen Digitalisierung von Luftbildstrukturen für das Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Werte im Scheffé-Test (p=0.05))**



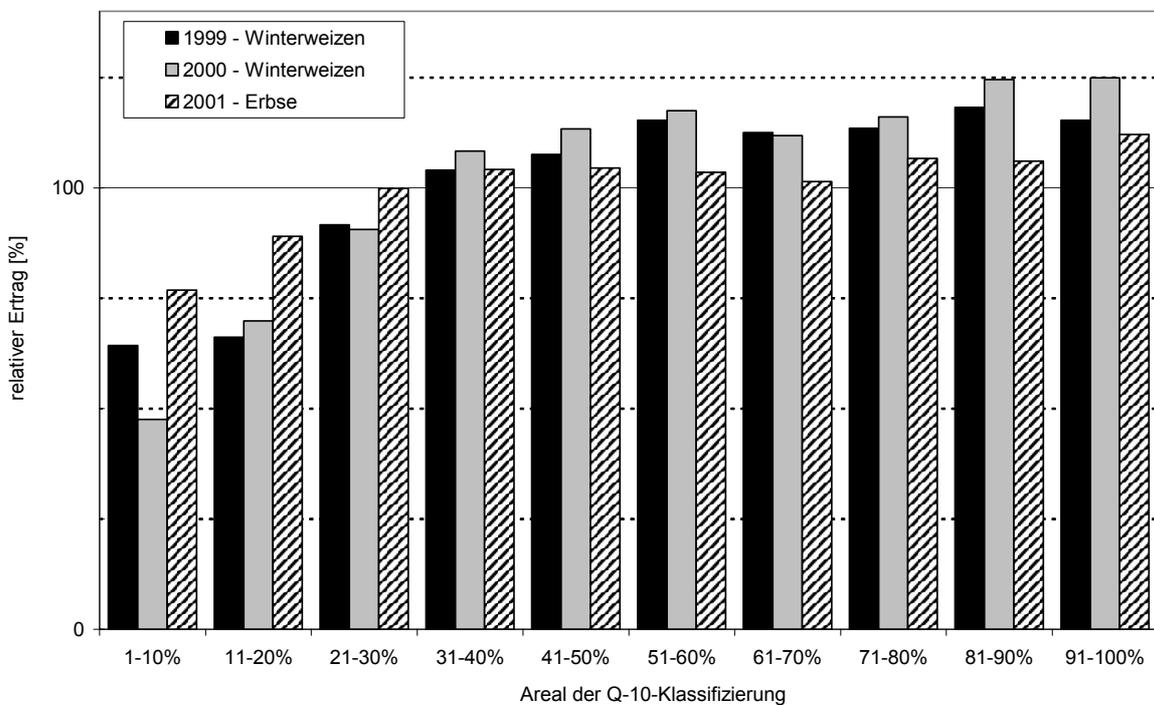
**Abb. 75: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'Luftbild-Klasse' der überwachten Klassifikation von Luftbildstrukturen für das Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Erträge im Scheffé-Test (p=0.05) bei Verwendung der gefilterten Klassifikation)**



**Abb. 76: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'Luftbild-Klasse' der Q-20-Klassifikation von Luftbildstrukturen für das Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Erträge im Scheffé-Test (p=0.05) bei Verwendung der gefilterten Klassifikation)**



**Abb. 77: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'Luftbild-Klasse' der Q-10-Klassifikation von Luftbildstrukturen mit anschließender Modalfilterung für das Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Erträge im Scheffé-Test (p=0.05))**



**Abb. 78: Relative Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'Luftbild-Klasse' der Q-10-Klassifikation von Luftbildstrukturen mit anschließender Modalfilterung für das Feld '3300'**

### 4.2.2.3 Diskussion

Für die generelle Diskussion von Unterschieden zwischen den F-Werten der Varianzanalysen wird auf das Kapitel 4.2.1.3 verwiesen. Bei der Varianzanalyse der Erträge unter Verwendung der Luftbildklassen als Faktorstufen treten in der Regel höhere F-Werte auf, als bei der im Kapitel 4.2.1 erläuterten Analyse, in die als Faktorstufen die Daten der Reichsbodenschätzung eingehen. Dies spricht dafür, dass die Unterteilung des Feldes anhand der Luftbild-Daten zu homogeneren Arealen gemessen am Ertrag geführt hat. Die drei detailliert untersuchten Verfahren unterscheiden sich in der Größenordnung der F-Werte deutlich: Von 'manuelle Digitalisierung' über 'überwachte Klassifikation' bis zur 'Q10-Methode' verringern sich die Werte. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass sich die Anzahl der unterschiedenen Faktorstufen zunehmend erhöht. Eine zusätzlich durchgeführte 'Q20-Klassifizierung' (zur allgemeinen Methodik siehe 3.5.2) ergab eine vergleichbare Anzahl an Faktorstufen wie die 'überwachte Klassifizierung'. Die F-Werte liegen in derselben Größenordnung, was darauf schließen lässt, dass die Güte der inhaltliche Trennung der Luftbildinformation in unterschiedliche Klassen bei beiden Verfahren vergleichbar ist. Dies wird auch daran liegen, dass für die Quantil-Methoden die Reflexionswerte im Rot-Kanal verwendet werden. Der Rotkanal erwies sich in diesen Untersuchungen bereits visuell immer dann als der kontrastreichste Kanal, wenn weitgehend geschlossene Pflanzenbestände in der Aufnahme zu sehen waren.

Wie aus der Tab. A-23 zu ersehen ist, erhöhen sich die F-Werte der Varianzanalyse weiter um 10-40%, wenn auf die ursprünglichen Klassifizierungsergebnisse eine gleitende Modalfilterung (5x5-Zellen) angewendet wird. Durch diese Filterung entstehen in sich homogenere Zonen auf dem Feld, da das in einer 5x5-Zellenmatrix am häufigsten vorkommende Klassifizierungsergebnis als neuer Wert für die zentrale Matrixzelle verwendet wird. Durch dieses Verfahren können sehr kleinräumig Reflexions- und damit häufig auch Klassifizierungsunterschiede herausgefiltert werden, ohne das Skalenniveau der Eingangsdaten (ordinal (Q10) bzw. nominal (Cluster)) zu verletzen, wie dies beispielsweise durch eine Mittelwert-Filterung geschehen würde.

Dem z.T. signifikant höheren Ertrag im überwacht als 'Boden' (BOD) klassifizierten Bereich (Abb. 75) ist aus zwei Gründen keine weitere Bedeutung beizumessen: Erstens kommt diese Klasse nur auf ca. 3% des Feldes vor. Zweitens ist bereits in der Diskussion der Verfahren der Klassifizierung erwähnt worden, dass es sich bei der Klasse 'Boden' im vorliegenden Fall um eine sehr unscharf definierte Klasse handelt. In ihr treten einerseits die von Pflanzen nahezu unbedeckten Feldbereiche auf, für die diese Klasse ursprünglich entwickelt wurde. Andererseits wird die Bezeichnung aber auch für die von Bäumen beschatteten Randbereiche oder die innerhalb der Feldgrenzen auftretenden Bildpunkte des Feldrains verwendet.

Deutliche Ertragsunterschiede sind jeweils zwischen den Klassen zu beobachten, die im Luftbild braun gefärbt sind (manuelle Digitalisierung bzw. überwachte Klassifikation) bzw. die höchste Reflexionsintensität im Rot-Kanal ausweisen (Q-10- und Q-20-Methode). Anhand der Abb. 76 und Abb. 77 sind die Flächenanteile direkt ablesbar, für welche die mittleren Erträge Gültigkeit besitzen. Die Quantil-Methoden unterteilen die Fläche in etwa gleich große Areale. Dies ist für die manuelle Digitalisierung und die überwachte Klassifikation nicht der Fall.

In der Regel treten vier signifikant unterschiedliche Durchschnittserträge auf. Besonders die Q-10-Methode hilft bei der Festlegung der Reflexionsbereiche, zwischen denen die stärksten Ertragsunterschiede bestehen.

Mit Hilfe der Klassifizierungsmethoden können Bereiche ausgewiesen werden, in denen im Vergleich zum Feldmittelwert deutlich geringere Erträge auftreten. Das wäre im untersuchten Beispiel des Feldes '3300' auf ungefähr 20-30% der Fläche der Fall. Die Abb. 78 macht das ebenfalls anhand der Relativerträge deutlich. Die Kombination der ermittelten Erträge je Luftbildklasse mit dem visuellen Eindruck der entsprechenden Bereiche im Feld, in denen diese Erträge auftreten, ermöglicht eine sofortige Überprüfung der Ergebnisse. Wenn die Luftbild-Klassifizierung unter sachlogischen Gesichtspunkten mit den ermittelten Erträgen übereinstimmt, bietet sich mit dem Luftbild eine räumlich deutlich höher auflösende Datenquelle, als es die Ertragskarte darstellt. Die im Methodenteil beschriebenen Fehlermöglichkeiten und Glättungseffekte der Ertragskartierung in Regionen mit stark schwankenden Erträgen können durch ein hochauflösendes Luftbild ausgeglichen werden. **Die Zonierung erfolgt im Luftbild, eine Einstufung hinsichtlich der mittleren Ertragsfähigkeit kann im Anschluss über die Kombination mit Ertragskarten erfolgen.**

Am Beispiel des Feldes '3300' werden durch zwei Methoden, die Luftbildauswertung nach Braun- und Grüntönen und die Ertragskartierung, mit großer Sicherheit 10-20% der Fläche des Feldes als Sandböden oder stark sandige Böden angesprochen. In diesen Bereichen ist am ehesten an eine Verringerung der Bewirtschaftungsintensität durch den Standort-spezifischen Ackerbau zu denken.

Die Kombination der Luftbilder mit Ertragsdaten lässt sich auch für eine verbesserte Bewirtschaftung der unterschiedlichen Standorte im Hinblick auf das Entdecken von Problembereichen innerhalb des Feldes nutzen. Diese Bereiche könnten auf eine optimierte Bewirtschaftung mit Ertragssteigerungen reagieren.

So vermittelt z.B. der Verlauf der absoluten und relativen Erträge (Abb. 77 & Abb. 78) den Eindruck, dass in den Klassen '61-70%' und '71-80%' ein leichter Ertragsrückgang auftritt. Diese Klassen repräsentieren grüne Bereiche des Feldes, so dass das Auftreten von Sandböden auszuschließen wäre. MILLER ET AL. (1988) finden in ihren Untersuchungen in einer kuppigen Lösslandschaft auf den z.T. vom Löss entblößten oberen Hangschultern und in den Senken mit Kolluvien geringere Erträge als im mittleren Hangbereich und am Hangfuß. Sie erklären ihre Beobachtungen mit den Wasserverhältnissen am Standort, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten die Pflanzen in ihrem Wachstum und ihrer Entwicklung beeinträchtigen können. Ebenso sprechen sie die mögliche Konkurrenz durch Unkräuter oder das unterschiedliche Auftreten von Schädlingen und Krankheiten an.

In einer weitergehenden Analyse im GIS könnten nun sämtliche Ertragsdaten der Ertragskarte in den interessierenden Luftbildklassen herangezogen und auf mögliche Regelmäßigkeiten untersucht werden. Da die beschriebene Erscheinung des leichten Ertragsrückganges in den Ertragsdatensätzen aus drei Jahren zu finden ist, wird ein zufälliger Effekt für unwahrscheinlich gehalten. Ob ein Signifikanzniveau von 5% Irrtumswahrscheinlichkeit für die Aufbereitung und Analyse von Daten aus Praxisbetrieben des Ackerbaus angemessen ist, wäre daher ebenfalls zu hinterfragen. Die Tatsache, dass die Klasse '71-80%' im Jahr 2001 nicht signifikant verschieden von dem mittleren Ertrag in der Klasse '11-20%' ist, deutet ebenfalls darauf hin, dass die Tendenz zu geringeren Erträge nicht zufällig ist.

### 4.3 Überprüfung von Bodenkarten

#### 4.3.1 Reichsbodenschätzung

Das Luftbild des Feldes '3300' vom 18.7.2001 wird im Kapitel 3.5 eingehend untersucht. Anhand exemplarischer Bohrstock-Kartierungen, deren Orte aufgrund der unterschiedlichen Reflexion des Luftbildes ausgesucht worden waren, wird die enge Verbindung zwischen Boden- und Luftbild-Informationen deutlich. In diesem Kapitel wird exemplarisch überprüft, inwieweit eine Verbesserung der Grenzziehung der Reichsbodenschätzung durch Luftbild-Daten erreicht werden kann.

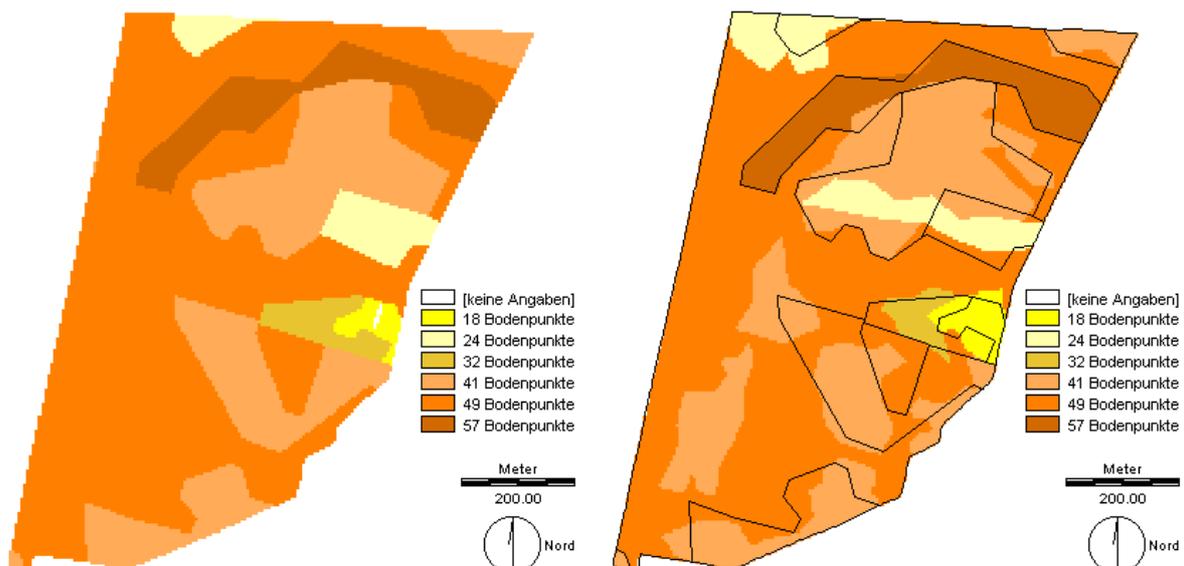
Die Bewertung des Ergebnisses erfolgt anhand der Ertragskarten aus drei Jahren. Dabei werden die Ergebnisse des Kapitels 4.2.1 als Referenz genutzt.

##### 4.3.1.1 Material und Methode

Ein georeferenziertes Luftbild des Feldes '3300' wird als Hintergrundbild mit den Linien-Vektordaten der Reichsbodenschätzung im GIS kombiniert (Abb. 52). Anhand der Klassenbezeichnungen der Teilflächen und den Farbtönen im Luftbild wurden die Grenzlinien manuell verändert. Die neue Karte erhält die Bezeichnung 'RBS<sub>LB</sub>'-Karte. Der Index 'LB' deutet an, dass ein Luftbild als Grundlage für die Veränderung der Grenzlinien genutzt wird. Mit der RBS<sub>LB</sub>-Karte wird die in dem Kapitel 4.2.1 beschriebene Analyse der Ertragsdaten wiederholt.

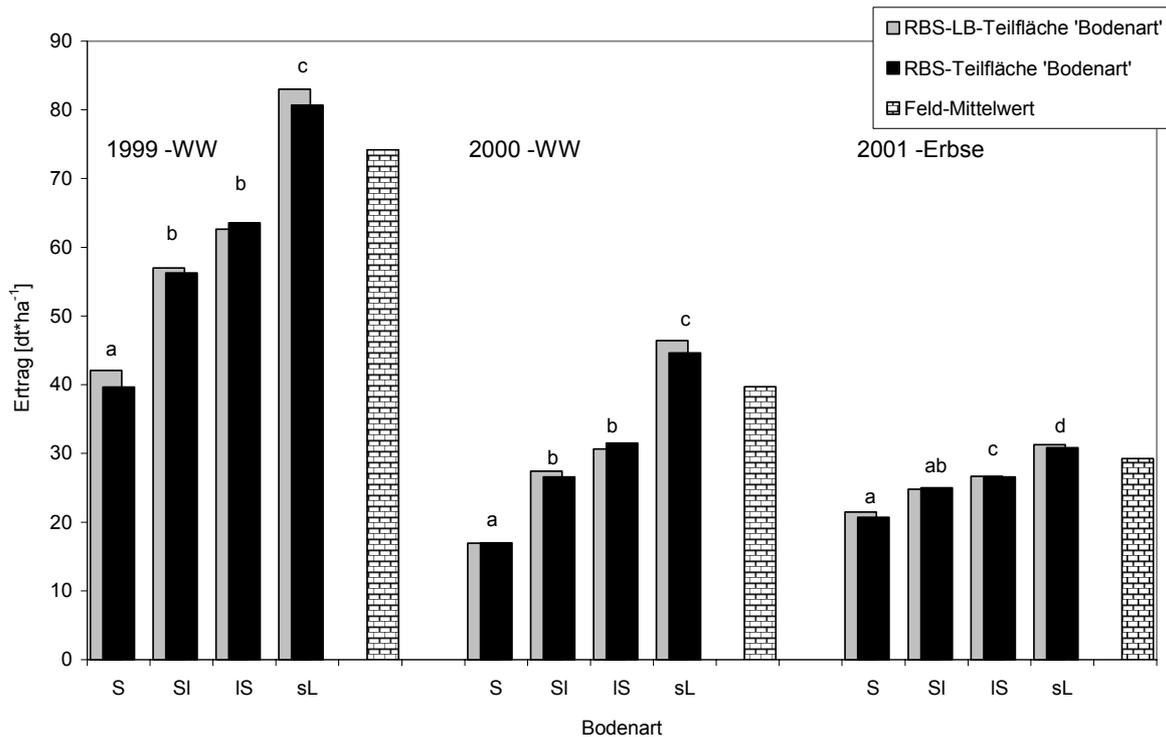
##### 4.3.1.2 Ergebnisse

In der Abb. 79 sind die Karten der RBS-Bodenzahlen (links) und die RBS<sub>LB</sub>-Bodenzahlen (rechts) dargestellt.



**Abb. 79: Karte der RBS-Bodenzahl (links) und RBS<sub>LB</sub>-Bodenzahl (rechts) für das Feld '3300' (auf der RBS<sub>LB</sub>-Karte sind die Grenzverläufe der RBS-Karte als Linien eingezeichnet)**

Die mittleren Erträge für die Faktoren 'Bodenart' und 'Bodenzahl' sind in der Abb. 80 bzw. Abb. 81 dargestellt. Die F-Werte der Varianzanalyse sind im Anhang in Tab. A-24 aufgeführt. Für die vier Bodenarten der RBS<sub>LB</sub>-Karte des Feldes '3300' werden in allen drei Jahren unterschiedliche Erträge ermittelt. Bis auf den Unterschied zwischen der Bodenart 'SI' und 'IS' sind alle Mittelwerte signifikant verschieden. Die Erträge steigen von der Bodenart 'Sand' über 'anlehmigen Sand', 'lehmigen Sand' bis zum 'stark lehmigen Sand'. Im Vergleich zu den Ergebnissen auf der Grundlage der RBS-Karte verändern sich die Mittelwerte der Erträge nur geringfügig.



**Abb. 80: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'RBS<sub>LB</sub>-Bodenart' und 'RBS-Bodenart' auf dem Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Werte im Scheffé-Test (p=0.05) für den Faktor 'RBS<sub>LB</sub>-Bodenart')**

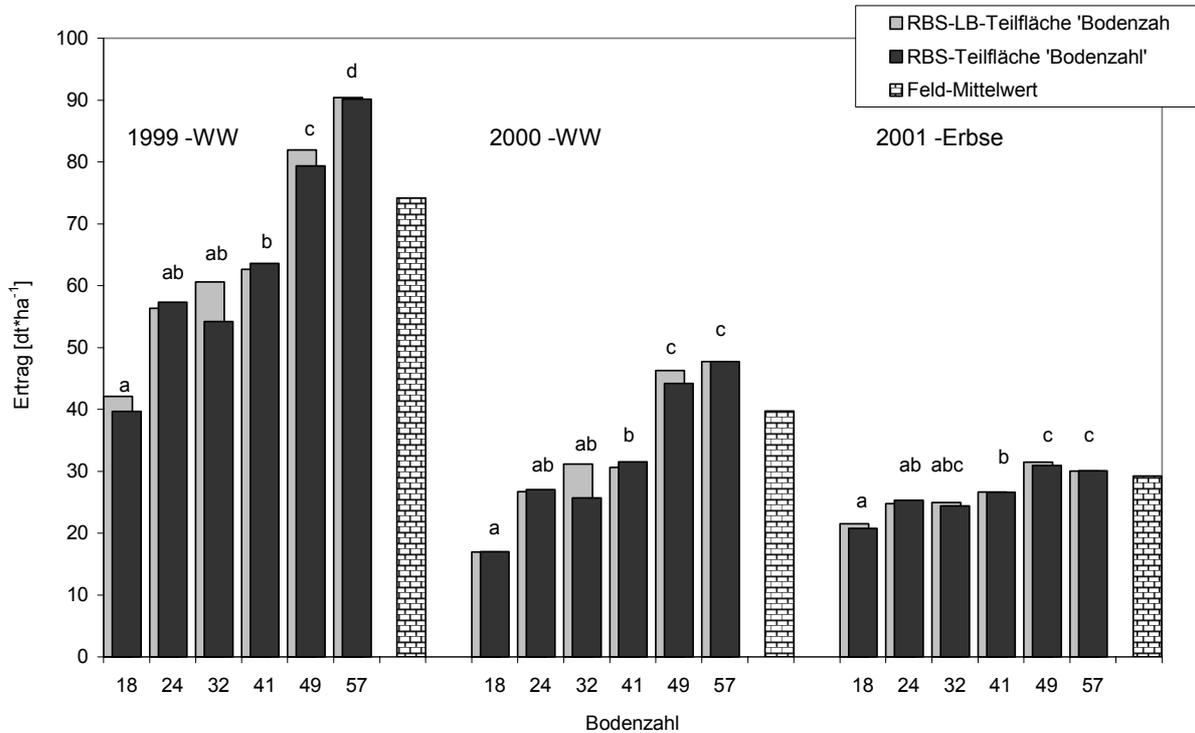
Mit Zunahme der Bodenzahl sind in der Regel steigende mittlere Erträge verbunden. Ertragsunterschiede zwischen den RBS<sub>LB</sub>-Arealen mit verschiedenen Bodenzahlen sind in gleicher Weise signifikant wie für den Fall der Verwendung der RBS-Karte. Lediglich der Unterschied zwischen den Arealen mit den Bodenzahlen 32 einerseits und 49 bzw. 57 ist im Jahr 2001 nicht mehr signifikant. Die Mittelwerte der Erträge ändern sich durch die Anpassung der RBS-Grenzen in der Regel nur geringfügig. Jedoch erhöht sich der mittlere Weizenertrag für die Bereiche der Bodenzahl 32 um 11% (1999) bzw. 24% (2000). Der mittlere Erbsenertrag ändert sich dagegen nur unbedeutend.

Die F-Quotienten der Varianzanalyse unterscheiden sich zwischen den Jahren deutlich. Im Vergleich zur RBS-Karte sind die Quotienten für die RBS<sub>LB</sub>-Karte beinahe doppelt so hoch. Der F-Wert ist bei den Faktoren 'RBS<sub>LB</sub>-Bodenart' und 'RBS<sub>LB</sub>-Bodenzahl' für die Erträge des Weizens im Jahr 1999 am größten. Nur geringfügig kleiner ist der F-Wert für die Weizenerträge des Jahres 2000, für den Faktor 'RBS<sub>LB</sub>-Teilflächen-Nr.' ist er am geringsten.

Wiederum deutlich geringer sind die F-Werte für die Erbsenerträge. Das Niveau sinkt vom Faktor 'RBS<sub>LB</sub>-RBS-Bodenart' über 'RBS<sub>LB</sub>-RBS-Bodenzahl' zum Faktor 'RBS<sub>LB</sub>-RBS-Teilflächen-Nr.'

Die mittlere Bodenzahl des Feldes '3300' sinkt von 45.8 auf 44.8 Bodenpunkte.

Für den Faktor 'RBS<sub>LB</sub>-Teilflächen-Nr.' sind für die verschiedenen Jahre deutlich mehr Ertragsunterschiede signifikant als für den Faktor 'RBS-Teilflächen-Nr.'. Insgesamt liegt der Anteil an signifikanten Vergleichen zwischen 10% und 20% der möglichen Vergleiche.



**Abb. 81: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'RBS<sub>LB</sub>-Bodenzahl' und 'RBS-Bodenzahl' auf dem Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Werte im Scheffé-Test (p=0.05) für den Faktor 'RBS<sub>LB</sub>-Bodenzahl')**

#### 4.3.1.3 Diskussion

Ergebnisse anderer Autoren zu dem hier beschrittenen Weg der Verbesserung einer RBS-Karte auf der Grundlage von Luftbild-Informationen sind in der Literatur nicht gefunden worden. Daher werden die Daten vergleichend mit den Ergebnissen des Kapitels 4.2.1 diskutiert.

Die F-Quotienten für die verschiedenen Faktoren erhöhen sich deutlich. Der F-Wert wird als das Verhältnis der Streuung zwischen den Gruppen zur Streuung innerhalb der Gruppen berechnet. Die starke Erhöhung der F-Werte enthält daher die Information, dass die Streuung der Ertragswerte innerhalb der einzelnen RBS<sub>LB</sub>-Teilflächen durch die Veränderung des Verlaufes der Grenzlinien auf der Grundlage eines georeferenzierten Luftbildes deutlich verringert werden kann. Somit weist die neue RBS<sub>LB</sub>-Karte hinsichtlich der Erträge homogenere Teilbereiche aus.

Die Streuungen der Erträge sinken für die meisten Klassen um bis zu 30%. Es treten jedoch auch vereinzelt Erhöhungen auf. Dadurch sind die leicht veränderten Signifikanzen zwischen den Ertragsmittelwerten zu erklären.

Die mittleren Erträge unterscheiden sich nicht deutlich. Eine Erhöhung oder Verringerung in Arealen mit hohen bzw. geringen Bodenzahlen ist nicht durchgängig zu beobachten, obwohl es theoretisch zu erwarten wäre. Wenn aus Bereichen hoher Erträge fälschlicher Weise darin enthaltene Flächen mit geringen Erträgen ausgeschlossen werden, müßte der mittlere Ertrag des jeweiligen Bereiches ansteigen. Die umgekehrte Argumentation wäre auf die Bereiche mit geringen Erträgen anzuwenden. Dass dieser Effekt nicht durchgängig beobachtet werden kann, ist möglicherweise durch die unterschiedlich hohen Stichprobenumfänge zu erklären.

Eine durch Luftbildaufnahmen unterstützte Änderung der Grenzziehung kann auch andere Effekte nach sich ziehen. Die im vorliegenden Fall beobachtete Verringerung der mittleren Bodenzahl um einen Punkt (ca. 2%) würde theoretisch bedeuten, dass die Pachtzahlungen ebenfalls geringfügig verändert werden könnten. Insofern wird das hier untersuchte Verfahren möglicherweise unterschiedlich gute Akzeptanz bei Pächtern und Verpächtern von Ackerflächen erlangen.

### 4.3.2 E<sub>Ca25</sub>-Karten

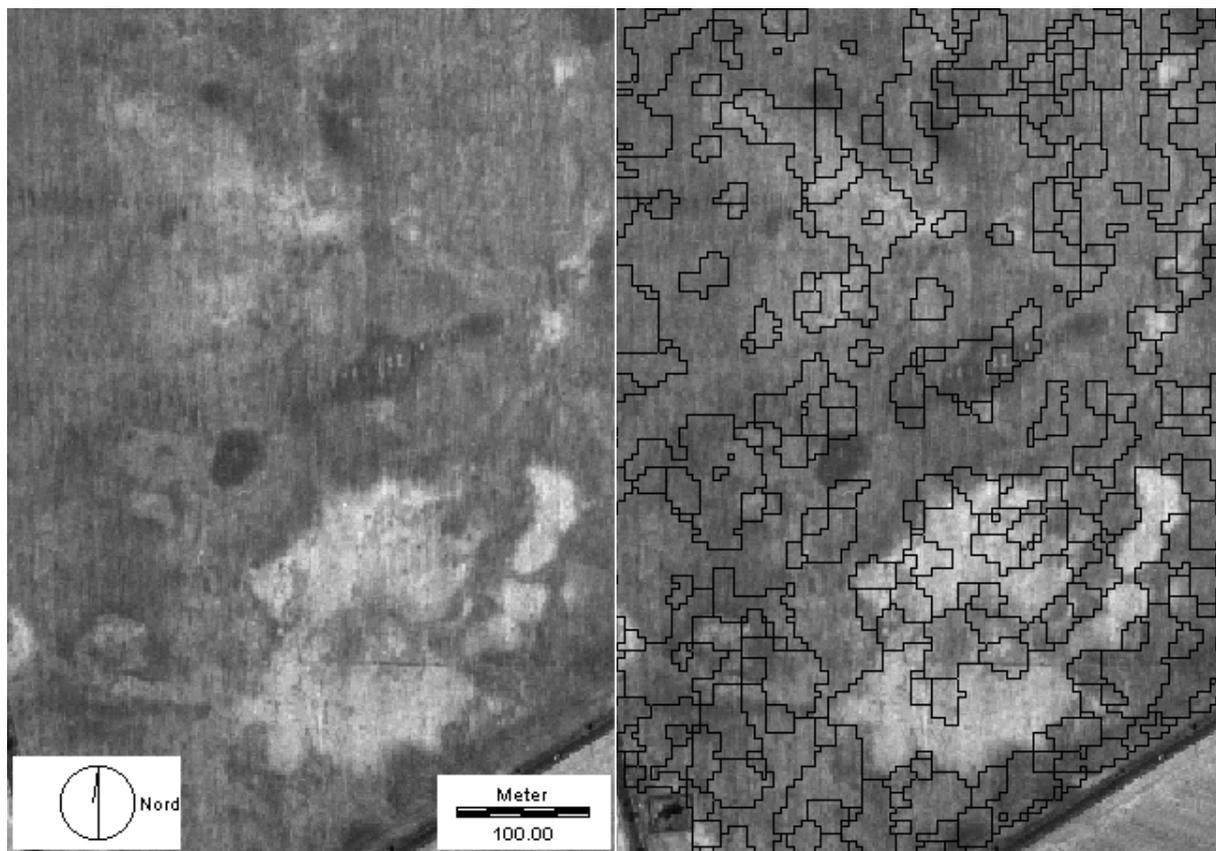
Im Kapitel 3.4 wird unter anderem untersucht, inwieweit der Einsatz des EM38-Gerätes als Hilfsmittel der Bodenkartierung genutzt werden kann. Die Untersuchungen ergeben, dass in Senkenböden aus Lösskolluvien sehr geringe E<sub>Ca25</sub>-Werte auftreten, die nicht vollständig mit dem bisherigen Wissen erklärt werden können. Unter alleiniger Verwendung von E<sub>Ca25</sub>-Werten lässt sich daher keine sichere Unterscheidung zwischen Senkenböden und Sandböden treffen, da auf beiden ähnlich geringe E<sub>Ca25</sub>-Werte gemessen werden.

#### 4.3.2.1 Material und Methode

Eine E<sub>Ca25</sub>-Karte des Feldes '2600' wurde aus den Rohdaten über NächstNachbar-Zuordnung und anschließende 5x5-Modalfilterung erstellt (siehe hierzu Kapitel 3.4). Die E<sub>Ca25</sub>-Werte wurden auf Ganzzahlen gerundet und unter Verwendung der Histogramm-Information umklassifiziert. Die Grenzen der einzelnen E<sub>Ca25</sub>-Areale wurden automatisch vektorisiert. Ein Luftbild aus einer am 26.6.1992 durchgeführten Infrarot-Befliegung wurde als Grauwert-Bild ins GIS importiert und georeferenziert.

#### 4.3.2.2 Ergebnisse

Einen Ausschnitt des Luftbildes mit den ebenfalls abgebildeten Grenzverläufen der E<sub>Ca25</sub>-Areale vom Feld '2600' zeigt die Abb. 82.



**Abb. 82:** Ausschnitt eines IR-Luftbildes für den südlichen Bereich des Feldes '2600' (links) und die Darstellung der vektorisierten E<sub>Ca25</sub>-Arealgrenzen (rechts)

Die im Luftbild hell und dunkel reflektierenden Bereiche stimmen z.T. sehr genau mit den  $ECa_{25}$ -Arealen überein, z.T. werden einheitlich reflektierende Bereiche jedoch durch feiner  $ECa$ -Grenzverläufe weiter unterteilt. Der dunkel reflektierende, von SW nach NE verlaufende Bereich in der Bildmitte repräsentiert einen Senkenboden, der in der  $ECa_{25}$ -Karte als ein Bereich mit geringen Leitfähigkeiten ausgegrenzt ist (vgl. auch  $ECa_{25}$ -Karten auf der Seiten 91).

#### **4.3.2.3 Diskussion und Ausblick**

Eine Überprüfung der  $ECa_{25}$ -Karte des Feldes '2600' kann sehr effizient durch Luftbilder unterstützt werden, wenn letztere zu aussagekräftigen Terminen erstellt wurden. Da die Reflexionsdaten von Sandböden und Senkenböden im verwendeten Luftbild die Minima bzw. Maxima des Grauwerte-Bereiches darstellen, können diese deutlich unterschiedlichen Böden problemlos erkannt werden. Die Überlagerung der Luftbild-Daten mit den unabhängig vom Luftbild erstellten  $ECa_{25}$ -Arealgrenzen bietet folgende Möglichkeiten:

- 1) Geringe  $ECa_{25}$ -Werte, die sowohl in Senkenböden als auch in Sandböden vorkommen, können anhand der Reflexionsintensitäten in zwei Gruppen getrennt werden. Geringe Reflexionsintensitäten im Luftbild und geringe  $ECa_{25}$ -Werte stellen Senkenböden dar. Hohe Reflexionsintensitäten im Luftbild und geringe  $ECa_{25}$ -Werte repräsentieren Sandböden auf Kuppen. Dies erhöht die Nutzbarkeit der  $ECa_{25}$ -Karte für landwirtschaftliche Anwendungen direkt, da ein schwerwiegender Fehler der  $ECa$ -Kartierung effizient beseitigt werden kann. Diese Zuordnung der mit den  $ECa$ -Arealen jeweils korrespondierenden Reflexionsintensitäten im Luftbild hängen allerdings entscheidend vom Aufnahmeterrain des Luftbildes ab.
- 2) In Bereichen des Luftbildes, in denen die Reflexion homogen ist, werden aufgrund der  $ECa_{25}$ -Arealgrenzen Leitfähigkeit-Kontraste im Unterboden ausgewiesen. Diese Unterteilung homogener Luftbild-Areale kann für die gezielte Überprüfung von  $ECa_{25}$ -Werten auf dem Feld genutzt werden. Durch Bodenuntersuchungen, Bohrstock-Kartierungen oder durch die Anlage von Profilgruben könnte das Grundverständnis der  $ECa_{25}$ -Messung auf natürlichen oder auch anthropogen gestörten Böden erweitert werden.

Da die  $ECa_{25}$ -Kartierung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen ein relativ neues Forschungs- und Anwendungsgebiet ist, sind deutliche Erkenntnis-Gewinne zu erwarten. Ob diese insgesamt hilfreich sind, um die  $ECa_{25}$ -Messungen für landwirtschaftliche Anwendungen in ihrer Aussagesicherheit zu erhöhen, ist allerdings offen. Das Luftbild bietet zumindest die grundsätzliche Möglichkeit, die weitere Untersuchung von spezifischen Fragestellungen zu  $ECa_{25}$ -Werten von Böden deutlich gezielter durchzuführen.

## 5 Zusammenfassung

Die Kenntnis der unterschiedlichen Standortbedingungen auf Feldern von Ackerbaubetrieben ist von entscheidender Bedeutung für die Gestaltung einer umweltschonenden und wirtschaftlich erfolgreichen Pflanzenproduktion. Für die Kartierung von Unterschieden der Standorteigenschaften werden effiziente Methoden benötigt. Dazu gehört auch das Prüfen und Entwickeln von Verfahren, die eine Erstellung von verlässlichen Karten aus den erhobenen Daten gewährleisten.

Auf den ackerbaulich genutzten Flächen der Nuthequelle GmbH Niedergörsdorf im Bereich des Lössgebietes im Mittleren Fläming südwestlich von Jüterbog wurden im Rahmen des brandenburgischen Landesprojektprojektes "Reduzierte Bodenbearbeitung" fünf verschiedene Verfahren der Standorterkundung getestet.

### Das Untersuchungsgebiet 'Mittlerer Fläming'

Die Lössmächtigkeit der Böden im Mittleren Fläming bestimmt durch die hohe Wasserspeicherfähigkeit des an Grobschluff reichen Materials wesentlich die Ertragsfähigkeit des Standortes. Aufgrund der geringen Stabilität der Bodenaggregate gegenüber der erosiven Wirkung des Wassers hat in den jüngeren Abschnitten des Holozäns bereits eine erhebliche laterale Umverteilung des Lössboden-Materials innerhalb der Landschaft stattgefunden. Kleinräumige Wechsel von Sand- und Lössböden prägen heute die landwirtschaftlichen Flächen.

### Verfahren der Standorterkundung

Die automatisierte **Mähdrusch-Ertragsaufzeichnung** mit einem Masse-Impuls-Sensor verlief in drei Erntejahren für die Getreidearten störungsfrei. Winterraps ließ sich bei feuchten Erntebedingungen aufgrund seiner Neigung zum Verkleben mit dem geprüften System nicht zuverlässig kartieren. Die sorgfältige Kalibration der Sensoren zum Ertebeginn und eine möglichst gleichbleibende Schneidwerksfüllung während des Drusches erwiesen sich als die wichtigsten isolierten Einflussgrößen für die Qualität der Ertrags-Rohdaten. Die Güte der Messung von Einzelpunkt-Erträgen liegt im Bereich von deutlich weniger als  $10 \text{ dt} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Mit der Block-Kriging-Interpolation bei lokaler Variogramm-Anpassung kann die Erstellung von Ertragskarten sicher durchgeführt werden.

Die Karten der **Reichsbodenschätzung** wurden mit aktuellen Informationen über die Ausprägung der Bodenvariabilität für ein 54 ha großes Feld verglichen. Sowohl die Grenzziehung als auch die Bewertung stehen in engem Zusammenhang mit den heutigen Bedingungen der Ertragsbildung. Auf der Basis von aktuellen Luftbild-Daten wird eine Verbesserung der Grenzziehung erreicht, welche die Variabilität der Erträge von Winterweizen und Körnererbse deutlich besser wiedergibt. Auf der Grundlage mehrjähriger Ertragskarten wird die Wirkung unterschiedlicher Witterungsbedingungen auf die Erträge in Abhängigkeit von einzelnen Bodenarealen untersucht.

Auf über 500 ha wurden Messungen der **apparenten elektrischen Bodenleitfähigkeit (ECa)** vorgenommen. Die Analyse der Histogramme läßt grundsätzlich eine multimodale Verteilungsform für die Rohdaten erkennen. Um dieser Verteilungsform im Verlauf der Erstellung von ECa-Karten gerecht zu werden, wurde ein spezielles Korrekturverfahren

entwickelt, um die lokalen Kontraste zu verstärken. In Abhängigkeit von der Art der Übergänge zwischen Bereichen mit unterschiedlichen ECa-Werten sollte ein Punkt-Kriging- oder ein Zuordnungsverfahren ohne Interpolation genutzt werden.

Der Vergleich von ECa-Daten mit Bodeninformationen ergibt, dass am Standort Niedergörsdorf die alleinige Verwendung der ECa-Kartierung als Ersatz der Bodenkartierung nicht zu empfehlen ist. Wegen der sehr ähnlichen Leitfähigkeitswerte von unterschiedlichen Böden ist die Nutzung einer zusätzlichen Informationsquelle notwendig, um Bodenunterschiede zuverlässig auszuweisen. Die Informationen aus historischen oder aktuellen Luftbildern kann die Unsicherheiten der alleinigen Verwendung von ECa-Daten zur Steuerung von Bodenuntersuchungen deutlich verringern.

Die Erstellung von **Luftbildern** zu unterschiedlichen Terminen erweist sich als die sicherste und umfassendste Methode der landwirtschaftlichen Standortkartierung. Für die Bearbeitung von unterschiedlichen Bildqualitäten und unter der Annahme von unterschiedlichen Ausbildungsgraden der Bearbeiter werden drei Verfahren der Klassifizierung verglichen. Für das Untersuchungsgebiet wird eine schematische Übersicht entwickelt, aus der ersichtlich ist, zu welchen Terminen mit sehr gut die Bodenunterschiede abbildenden Eigenschaften von Pflanzenbeständen gerechnet werden kann. Ein Befliegungstermin ca. 3-4 Wochen vor der Ernte von Mähdruschfrüchten erweist sich als besonders günstig. Über die Unterschiede in der Abreife der Pflanzen kann sicher auf bedeutsame Standortunterschiede geschlossen werden. Eine auf Luftbild-Daten basierende Flächenunterteilung eignet sich deutlich besser zur Erklärung der Ertragsvariabilität als die Karte der Reichsbodenschätzung.

Exemplarische Analysen von zwei **Satellitenbild**-Aufnahmen zeigen die Schwierigkeiten auf, die mit der Nutzung dieser Datenquelle im Rahmen der landwirtschaftlichen Standorterkundung verbunden sind. Es wird nicht empfohlen, sich auf diese Datenquelle als alleinige Grundlage der Standorterkundung zu verlassen.

### **Schlussfolgerungen**

Mit der Luftbild-Fernerkundung, der Mähdrusch-Ertragskartierung sowie alten und neuen Informationen über die flächenhafte Variabilität der Bodeneigenschaften sind für den Ackerbau momentan eine ausreichende Anzahl an leistungsfähigen Methoden der Standorterkundung verfügbar.

Erheblicher Forschungsbedarf ist noch notwendig, um Verfahren zu entwickeln und zu überprüfen, die den Landwirt bei der Verwaltung und Analyse der zahlreichen, auf den einzelnen Standort bezogenen spezifischen Informationen wirksam unterstützen und den Interpretationsprozess leiten.

## 6 Literaturverzeichnis

- Albertz, J. (1991):** Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern: Eine Einführung in die Fernerkundung. Darmstadt: Wiss. Buchges., 204. S
- Altermann, M. (1993):** Gliederung und Lithologie pleistozäner Lagen im Gebiet Sachsen-Anhalts. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 72: 819-824
- Anderson, G.L.; Yang, C. (1996):** Multispectral Videography and Geographic Information Systems for Site-Specific Farm Management. In: Robert, P.C.; Rust, R.H.; Larson, W.E. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Precision Agriculture*, 23.-26.6.1996, Minneapolis, Minnesota, ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI: 681-692
- Auernhammer, H.; Demmel, M. (1993):** Lokale Ertragsermittlung beim Mähdrusch. *Landtechnik* 48: 315-319
- Bach, H. (1995):** Bestimmung hydrologischer und landwirtschaftlicher Oberflächenparameter aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten. *Münchener Geogr. Abhandlungen, Reihe B, Band 21*
- Baeumer, K. (1992):** Allgemeiner Pflanzenbau. 3., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Ulmer
- Baumgardner, M.F.; Silva, L.F.; Biehl, L.L.; Stoner, E.R. (1985):** Reflectance Properties of Soils. *Advances in Agronomy* 38: 1-44
- Bennedsen, B.S.; Guiot, M. (2001):** Estimation of plant density from aerial red-near infrared images and interaction with weeds infestation and soil variability. In: Grenier, G.; Blackmore, S. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd Europ. Conf. on Precision Agriculture*, 18.-20.6.2001, Montpellier, 145-150
- Bill, R.; Grenzdörffer, G.; Foy, T.; Irrgang, A. (2002):** Luftbilder. In: Werner, A.; Jarfe, A. (Hrsg.): *Tagungsband der Precision Agriculture Tage*, 13.-15.3.2002, Bonn, KTBL-Sonderveröffentlichung 038: 97-107
- Birell, S.J.; Sudduth, K.A.; Borgelt, S.C. (1996):** Comparison of Sensors and techniques for crop yield mapping. *Computers and Electronics in Agriculture* 14: 215-233
- Blackmer, T.M.; Schepers, J.S.; Varvel, G.E.; Meyer, G.E. (1996):** Analysis of Aerial Photography for Nitrogen Stress within Corn Fields. *Agron. J.* 88: 729-733
- Blackmer, A.M.; White, S.E. (1996):** Remote Sensing to Identify Spatial Patterns in Optimal Rates of Nitrogen Fertilization. In: Robert, P.C.; Rust, R.H.; Larson, W.E. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Precision Agriculture*, 23.-26.6.1996, Minneapolis, Minnesota, ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI: 33-41
- Blackmore, S. (2000):** The interpretation of trends from multiple yield maps. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 37-51
- Blackmore, B.S.; Marshall, C.J. (1996):** Yield Mapping: Errors and Algorithms. In: Robert, P.C.; Rust, R.H.; Larson, W.E. (Hrsg.): *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Precision Agriculture*, 23.-26.6.1996, Minneapolis, MN, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, 403-416

- Blackmore, S.; Moore, M. (1999):** Remedial Correction of Yield Map Data. Precision Agriculture 1: 53-66
- Bobert, J.; Schmidt, F.; Gebbers, R.,; Selige, T.; Schmidhalter, U. (2001):** Estimating soil moisture distribution for crop management with capacitance probes, EM-38 and digital terrain analysis. In: Grenier, G.; Blackmore, S. (Hrsg.): Proc. of the 3<sup>rd</sup> Europ. Conf. on Prec. Agric., 18.-20.6.2001, Montpellier, France, agroMontpellier: Montpellier, S. 349-354
- Bode, R. (2001):** Untersuchungen zur Landschaftsgeschichte und Bodenerosion im Niederen Fläming (Brandenburg). Universität Göttingen, Inst. f. Geographie, Diplomarbeit
- Bodenkundliche Kartieranleitung (1994),** Arbeitsgruppe Boden, 4. verb. und erw. Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung: Stuttgart
- Boettinger, J.L.; Doolittle, J.A.; West, N.E.; Bork, E.W.; Schupp, E.W. (1997):** Nondestructive assessment of rangeland soil depth to petrocalcic horizon using eletromagnetic induction. Arid Soil Research and Rehabilitation 11: 375-390
- Boguslawski, E.v.; Limberg, P. (1960):** Phänologische und physiologische Daten zur Charakteristik der Produktivität unserer Kulturpflanzen. Z. f. Acker- und Pflanzenbau 111: 1-22
- Böhm, W. (1990):** Die Anfänge des Feldversuchswesens in Deutschland. Zeitschrift für Agrargeschichte und Agrarsoziologie 38: 155-175
- Borchers, B.; Uram, T.; Hendrickx, M.H. (1997):** Tikhonov Regularization of Electrical Conductivity Depth Profiles in Field Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 1004-1009
- Borgman, L.E.; Quimby, W.F. (1988):** Sampling for tests of hypothesis when data are correlated in space and time. In: Keith, L.H. (Hrsg.): Principles of Environmental Sampling. American Chemical Society, Professional Reference Book, S. 24-43
- Bork, E.W.; West, N.E.; Doolittle, J.A.; Boettinger, J.L. (1998):** Soil depth assessment of sagebrush grazing treatments using electromagnetic induction. Journal of Range Management 51: 469-474
- Bortz, J.; Lienert, G.A.; Boehnke, K. (1990):** Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona: Springer
- Boucneau, G.; Meirvenne, M. van; Thas, O.; Hofman, G. (1998):** Integrating properties of soil map delineations into ordinary kriging. European Journal of Soil Science 49: 213-229
- Bourne, R. (1931):** Regional Survey and its Relation to Stocktaking of the Agricultural and Forest Resources of the British Empire. Oxford Forestry Memoirs Nr. 13
- Boydell, B.; Vellidis, G.; Perry, C.; Thomas, D.L.; Hill, R.; Vervoort, R.W. (1996):** Dynamics of Peanut Flow through a Peanut Combine. In: Robert, P.C.; Rust, R.H.; Larson, W.E. (Hrsg.): Proc. of the 3rd Int. Conf. on Precision Agriculture, 23.-26.6.1996, Minneapolis, MN, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, 805-814

- Brewer, K.R.D (1999):** Design-based or Prediction-based Inference? Stratified Random vs. Stratified Balanced Sampling. *International Statistical Review* 67: 35-47
- Brisco, B.; Brown, R.J.; Hirose, T.; McNairn, H.; Staenz, K. (1998):** Precision Agriculture and the Role of Remote Sensing: A Review. *Canadian Journal of Remote Sensing* 24: 315-327
- Brus, D.J.; Gruijter, J.J.de (1997):** Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and modell-based sampling strategies for soil. (with Discussion) *Geoderma* 80: 1-44
- Brus, D.J.; Knotters, M.; Dooremolen, W.A.van, Kernebeek, P.van (1992):** The use of electromagnetic measurements of apparent soil electrical conductivity to predict the boulder clay depth. *Geoderma* 55: 79-93
- Burrough, P.A.; Bregt, A.K.; Hens, M.J. de; Kloosterman, E.G. (1985):** Complementary use of thermal imagery and spectral analysis of soil properties and wheat yields to reveal cyclic patterns in the Flevopolders. *J. Soil Sci.* 36: 141-152
- Cannon, M.E.; McKenzie, R.C.; Lachapelle, G. (1994):** Soil salinity mapping with electromagnetic induction and satellite-based navigation methods. *Can. J. Soil Sci.* 74: 335-343
- Cialella, A.T.; Dubayah, R.; Lawrence, W.; Levine, E. (1997):** Predicting Soil Drainage Class Using Remotely Sensed and Digital Elevation Data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 63: 171-178
- Clevers, J.G.P.W. (1986):** Application of remote sensing to agricultural field trials. *Agricultural University Papers* 86-4, 230 S.
- Clevers, J.G.P.W. (1999):** The use of imaging spectrometry for agricultural applications. *ISPRS J Photogramm. Remote Sens.* 54: 299-304
- Clos-Arceuduc, A. (1965):** Photographie Aérienne
- Cressie, N.A.C. (1993):** Statistics for spatial data. Wiley: New York, Chichester, Toronto, Brisbane, Singapore
- Dalgaard, M.; Have, H.; Nehmdahl, H. (2001):** Soil clay mapping by measurement of electromagnetic conductivity. In: Grenier, G.; Blackmore, S. (Hrsg.): Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, 18.-20.6.2001, Montpellier, S. 367-372
- Dalsky (1935):** Die technischen Grundlagen der Reichsbodenschätzung. Sonderdruck aus: *Recht des Reichsnährstandes*, Heft 15/16
- Dearing, J.A.; Lees, J.A.; White, C. (1995):** Mineral magnetic properties of acid gleyed soils under oak and Corsican Pine. *Geoderma* 68: 309-319

- Degler, H. (1993):** Quantifizierung des zeitlichen Verlaufs der Remission von Weizenbeständen im sichtbaren Spektralbereich und nahen Infrarot unter Berücksichtigung des Bodeneinflusses. Arch. Acker- u. Pflanzenbau Bodenkunde 37: 171-179
- Diehmann, R.; Gruhn, St. (1991):** Boden- und Standortkartierung auf der Basis von Luftaufnahmen. Wiss. Z. Univ. Halle XXXX 1991 M, 2: 21-26
- Dohmen, B.; Wagner, U.; Reh, A. (2002):** Bestandesinformationen. In: Werner, A.; Jarfe, A. (Hrsg.): Tagungsband der Precision Agriculture Tage, 13.-15.3.2002, Bonn, KTBL-Sonderveröffentlichung 038: 109-115
- Domsch, H. (2002),** mündliche Mitteilung
- Domsch, H.; Giebel, A. (2001):** Electrical conductivity of soils typical for the state of Brandenburg in Germany. In: Grenier, G.; Blackmore, S. (Hrsg.): Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, 18.-20.6.2001, Montpellier, S. 373-378
- Doolittle, J.A.; Collins, M.E. (1998):** A comparison of EM induction and GPR methods in areas of karst. Geoderma 85: 83-102
- Durlessner, H. (1999):** Bestimmung der Variation bodenphysikalischer Parameter in Raum und Zeit mit elektromagnetischen Induktionsverfahren. München, Techn. Univ., Diss.
- Dutter, R. (1985):** Geostatistik - Eine Einführung mit Anwendungen. Mathematische Methoden in der Technik. Bd. 2, Stuttgart: Teubner, 159 S.
- Eastman, J.R. (1999):** Idrisi32 - Guide to GIS and Image Processing. Vol. 1 & 2, Clark University: Worcester, USA
- Evans, R.; Catt, J.A. (1987):** Causes of crop patterns in eastern England. J. Soil Sci. 38: 309-324
- Englund, E.J. (1990):** A variance of geostatisticians. Mathematical Geology 22: 417-456
- Fiedler, H.-J.; Altermann, M. (1964):** Verbreitung, Entstehung und Eigenschaften von Sandlöß ("Flottsand") im Norddeutschen Flachland und angrenzenden Gebieten. Geologie 13: 1199-1228
- Freytag, H.E.; Jäger, R. (1995):** Vergleich des Sedimentationsverhaltens von Bodenpartikeln vor und nach der Zerstörung ihrer organischen Anteile (Messungen mit Hilfe des Kettenaräometers). Arch. Acker- Pfl. Bodenkde 39: 369-378
- Funk, R. Maidl, F.X. (1997):** Heterogenität der Ertragsbildung von Winterweizen auf Praxisschlägen des oberbayerischen Tertiärhügellandes im Hinblick auf eine teilflächenspezifische Bestandesführung. Pflanzenbauwissenschaften 1: 117-126
- Geisler, G. (1983):** Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas. Parey: Berlin, Hamburg, 205 S.

- Gerster, G. (1975):** Der Mensch auf seiner Erde. 6. Aufl. Atlantis, Zürich / Freiburg i.B.
- Gerthsen, C. (1999):** Gerthsen Physik. 20. Auflage, bearb. v. H. Vogel, Springer: Berlin, Heidelberg
- Gilbertsson, M. (2001):** On-the-go sensors measuring differences in soil parameters - a comparison between conductivity sensor and a draft force sensor. In: Grenier, G.; Blackmore, S. (Hrsg.): Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, 18.-20.6.2001, Montpellier, S. 383-388
- Gotway, C.A.; Ferguson, R.B.; Hergert, G.W.; Peterson, T.A. (1996):** Comparison of Kriging and Inverse-Distance Methods for Mapping Soil Parameters. Soil Science Society of America Journal 60: 1237-1247
- Grenzdörfer, 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. (Hrsg.): Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, 18.-20.6.2001, Montpellier
- Griepentrog, H.-W. (1998):** Fehlerquellen der Ermittlung beim Mähdrusch. Landtechnik 53: 288-289
- Gutow, B. (2001):** Entwicklung der oberirdischen Bestandesmengen an Trockensubstanz, K, Mg, Ca, P und N bei Roggen von der Phase der Hauptbestockung bis zur Ernte in Abhängigkeit der Löbmächtigkeit (ECa-Wert) im Fläming, Jahr 2000. Universität Göttingen, Inst. f. Bodenwissenschaften, Diplomarbeit
- Hagan, J.; Eastman, J.R.; Auble, J. (1998):** CartaLinx - Spatial Data Builder / User Guide (Version 1.0). CartaLinx Production, Clark University
- Håkansson, S.; Wallgreen, B. (1972):** Experiments with *Sonchus arvensis*, III: The development from reproductive roots cut into different lengths and planted at different depths with and without competition from barley. Swed. J. Agric. Res. 2: 15-26
- Hempel, F. (1956):** Gölsdorf. Ein Bauerndorf auf dem Fläming. Jessen: Biehl
- Hendrickx, J.M.H.; Baerends, B.; Raza, Z.I.; Sadig, M.; Chaudhry, M.A. (1992):** Soil Salinity Assessment by Electromagnetic Induction of Irrigated Land. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 1933-1941
- Henning, F.-W. (1994):** Deutsche Agrargeschichte des Mittelalters - 9. bis 15. Jahrhundert. Stuttgart: Ulmer
- Hoffmann, E. (1963):** Die Eignung der Bodenschätzung für die standortgerechte Planung. Albrecht-Thaer-Archiv, Bd. 7: 107-152
- Hoffmann, H.; Voigtländer, U. (1976):** Möglichkeiten der Nutzung von Luftbildern für die Meliorationsvorbereitung. Arch. Acker- u. Pflanzenbau Bodenkunde 20: 201-207
- Hoosbeek, M.R.; Stein, A.; Reuler, H.v.; Janssen, B.H. (1998):** Interpolation of agronomic data from plot to field scale: using a clustered versus a spatially randomized block design. Geoderma 81: 265-280

- Isensee, E.; Krippahl, S. (2001):** Online-Vergleich von Ertragsmesssystemen im Mähdrescher. *Landtechnik* 56: 274-275
- Jürgens, C. (2000):** Fernerkundungsanwendungen im Precision Farming. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 144: 60-69
- Jürschik, P. (1998):** Anwendung von Fernerkundungsmethoden für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung. In: Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (Hrsg.): Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung. *Bornimer Agrartechnische Berichte Heft 20:* 31-46
- Jürschik, P.; Flemming-Fischer, E.; Giebel, A. (1998):** Grundlagen für das Erfassen der Heterogenität der Ertragsfähigkeit mit Methoden der Fernerkundung. *Forschungsberichte des ATB 1998/1, Potsdam-Bornim*, 70 S.
- Kachanoski, R.G.; Gregorich, E.G.; Wesenbeeck, I.J.van (1988):** Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. *Can. J. Soil Sci.* 68: 715-722
- Karlen, D.L.; Sadler, E.J.; Busscher, W.J. (1990):** Crop Yield variation associated with coastal plain soil map units. *Soil Science Society of America Journal* 54: 859-865
- Kasch, W. (1953):** Bodenschätzung und Agrarplanung. *Die deutsche Landwirtschaft* 4: 534-538
- Kasch, W. (1964):** Zur landwirtschaftlichen Boden- und Standortkartierung in der Deutschen Demokratischen Republik. *Albrecht-Thaer-Archiv* 8: 477-485
- King, J.A.; Dampney, P.M.R.; Lark, M.; Mayr, T.R.; Bradley, R.I. (2001):** Sensing soil spatial variability by electro-magnetic induction (EMI): it's potential in precision farming. In: Grenier, G.; Blackmore, S. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture*, 18.-20.6.2001, Montpellier, S. 419-424
- Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.; Drummond, S.T. (1996):** Mapping of sand depositions from 1993 midwest floods with electromagnetic induction measurements. *J. Soil and Water Cons.* 51: 336-340
- Kleefisch, B. (1994):** Die Konstruktion und Auswertung digitaler Bodenkarten. *ZALF-Bericht Nr. 9, Müncheberg*, 197 S.
- Kowalkowski, A. (1967):** Eigenschaften und Entstehung der Böden auf Sandlöß in den Dalkauer Bergen im Katzengebirge. *Albrecht Thaer Archiv* 11: 483-501
- Krill, T.L. (1996):** Effectiveness of AgLEader Yield Monitor for Evaluation of Varietal Strip Data. In: Robert, P.C.; Rust, R.H.; Larson, W.E. (Hrsg.): *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Precision Agriculture*, 23.-26.6.1996, Minneapolis, MN, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, 819-826
- KTBL (2001):** Bewirtschaftung großer Schläge. 1. Auflage; *Landwirtschaftsverlag: Münster*

- Kutschera, L. (1960):** Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. Frankfurt
- Kühbauch, W. (2002):** Fernerkundung - eine Zukunftstechnologie im Präzisionspflanzenbau. In: Werner, A.; Jarfe, A. (Hrsg.): Tagungsband der Precision Agriculture Tage, 13.-15.3.2002, Bonn, KTBL-Sonderveröffentlichung 038: 79-87
- Kühbauch, W.; Gerhards, R. (2001):** Nah- und Fernbereichserkundung im Präzisionspflanzenbau. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 13: 1-5
- Lang, H.D. (1990):** Der Sandlöß in der Umgebung von Bergen Krs. Celle - Verbreitung, Zusammensetzung, Entstehung. Eiszeitalter und Gegenwart 40, 97-106
- Lark, R.M.; Stafford, J.V. (1997):** Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield. Annals of Applied Biology 130: 111-121
- Larscheid, G.; Blackmore, B.S. (1996):** Interactions between Farm Managers and Information Systems with Respect to Yield Mapping. In: Robert, P.C.; Rust, R.H.; Larson, W.E. (Hrsg.): Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, 23.-26. Juni 1996, Minneapolis, MN, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, 1153-1163
- Lechner, W.; Baumann, S. (2000):** Global navigation satellite systems. Computers and Electronics in Agriculture 25: 67-85
- Levine, M.D. (1985):** Vision in Man and Machine. McGraw-Hill, New York, 574 S.
- Liedtke, H. (1960/1961):** Geologischer Aufbau und geomorphologische Gestaltung im Fläming. Bericht zur Deutschen Landeskunde 26, Institut für Landeskunde der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung; S. 45-81
- Linseisen, H.; Steinmayr, T. (2000):** Ergebnisse des Workshops "Gewinnung und Verarbeitung ortsbezogener Ertragsdaten" in Freising-Weihenstephan am 26./27.9.2000. [Dez. 2001 im Internet: [http://ikb.weihenstephan.de/publications/tp\\_6/WorkErtrag.pdf](http://ikb.weihenstephan.de/publications/tp_6/WorkErtrag.pdf)]
- Linstow, O. von (1902):** Ueber jungglaziale Feinsande des Fläming. Jahrbuch der Königl. Preuss. Geologischen Landesanstalt und Bergakademie Bd. XXIII (2): 278-295
- Lück, E. (2002):** unveröffentlichte Daten
- Lück, E.; Eisenreich, M. (2001):** Electrical Conductivity Mapping for Precision Agriculture. In: Grenier, G.; Blackmore, S. (Hrsg.): Proc. of the 3<sup>rd</sup> Europ. Conf. on Prec. Agric., 18.-20.6.2001, Montpellier, France, agroMontpellier: Montpellier
- Lück, E.; Eisenreich, M.; Domsch, H.; Blumenstein, O. (2000):** Geophysik für Landwirtschaft und Bodenkunde. Stoffdynamik in Geosystemen, Band 4
- Lund, E.D.; Colin, D.; Christy, P.E. (1998):** Using electrical conductivity to provide answers for precision farming. In: Geospatial information in agriculture and forestry, Proceedings of the 1st Int. Conf., 1.-3.6.1998, Lake Buena Vista, Florida, USA. - Ann Arbor, Mich.: ERIM International, S. I-327-334

- Maudrei, F. (1968):** Geomorphologische, stratigraphische und paläogeographische Untersuchungen im Pleistozän des Niederen Fläming. HU Berlin: Dissertation
- McNeil, J.D. (1980a):** Electrical Conductivity of Soils and Rocks, Geonics Ltd Techn. Notes TN-5, Ontario
- McNeil, J.D. (1980b):** Electromagnetic terrain conductivity at low induction numbers, Geonics Ltd Techn. Notes TN-6, Ontario
- Mercer; Hall (1911):** The experimental error of field trials. Journal of Agricultural Science Cambridge 4: 107-132
- Meyer, B. (2000):** schriftliche Mitteilung
- Milfred, C.J.; Kiefer, R.W. (1976):** Analysis of soil variability with repetitive aerial photography. Soil Sci. Soc. Am. J. 40: 553-557
- Miller, M.P.; Singer, M.J.; Nielsen, D.R. (1988):** Spatial Variability of Wheat Yield and Soil Properties on Complex Hills. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 1133-1141
- Minasny, B.; McBratney, A.B.; Whelan, B.M. (1999):** VESPER version 1.0. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006. (<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>)
- Moran, M.S.; Inone, Y.; Barnes, E.M. (1997):** Opportunities and Limitations for Image-Based Remote Sensing in Precision Crop Management. Remote Sens. Environ. 61: 319-346
- Nehmdahl, H.; Greve, M.H. (2001):** Using soil electrical conductivity measurements for delineating management zones on highly variable soils in Denmark.. In: Grenier, G.; Blackmore, S. (Hrsg.): Proc. of the 3<sup>rd</sup> Europ. Conf. on Prec. Agric., 18.-20.6.2001, Montpellier, France, agroMontpellier: Montpellier, S. 461-466
- Neudecker, E.; Schmidhalter, U.; Sperl, C.; Sehlige, T. (2001):** Site-specific soil mapping by electromagnetic induction. In: Grenier, G.; Blackmore, S. (Hrsg.): Proc. of the 3<sup>rd</sup> Europ. Conf. on Prec. Agric., 18.-20.6.2001, Montpellier, France, agroMontpellier: Montpellier, S. 271-276
- Noack, P.O.; Muhr, T.; Demmel, M. (2001):** Langzeitstudie zur Bestimmung von Fehlern während der georeferenzierten Erfassung von Ertragsdaten auf Mähreschern. In: Tagungsband, Tagung Landtechnik 2001, VDI-MEG, VDI Verlag: Düsseldorf
- Nobes, D.C. (1996):** Troubled Waters: Environmental Applications of Electrical and Electromagnetic Methods. Survey in Geophysics 17: 393-454
- Petersen, A. (1956):** Bodenschätzung, Rohertragsbonitierung und Meliorationsbonitierung. Sitzungsberichte Bd. V, Heft 28, Dt. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, Berlin
- Reitz, P. (1992):** Ertragskartierung - Technische Einrichtungen für den Mährescher. Landtechnik 47: 273-276

- Rhoades, J.D. (1981):** Predicting Bulk Soil Electrical Conductivity versus Saturation Paste Extract Electrical Calibrations from Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 42-44
- Rhoades, J.D.; Waggoner, B.L.; Shonse, P.J.; Alves, W.J. (1989):** Determining soil salinity from soil and soil paste electrical conductivities: sensitivity analysis of models. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1368-1374
- Roth, H.A. (1956):** Untersuchungen über die Beziehungen zwischen den von der Bodenschätzung erfaßten natürlichen Ertragsbedingungen und den Ernteerträgen des Ackerlandes. *Dt. Akad. d. Landwirtschaftswiss. zu Berlin. Wissenschaftliche Abhandlungen* 19, Akademie-Verlag: Berlin, 78 S.
- Rothkegel, W. (1950):** Geschichtliche Entwicklung der Bodenbonitierungen und Wesen und Bedeutung der deutschen Reichsbodenschätzung. Ulmer: Stuttgart
- Rothkegel, W. (1952):** Landwirtschaftliche Schätzungslehre. 2. verb. Auflage, Ulmer: Stuttgart
- Schmidhalter, U.; Selige, T. (2002):** Multispektrale Fernerkundung von Bodeneigenschaften und Aufwuchszuständen. In: Werner, A.; Jarfe, A. (Hrsg.): Tagungsband der Precision Agriculture Tage, 13.-15.3.2002, Bonn, KTBL-Sonderveröffentlichung 038: 117-127
- Schmidhalter, U.; Zintel, A.; Neudecker, E. (2001):** Calibration of Electromagnetic Induction measurements to survey the spatial variability of soils. In: Grenier, G.; Blackmore, S. (Hrsg.): *Proc. of the 3<sup>rd</sup> Europ. Conf. on Prec. Agric.*, 18.-20.6.2001, Montpellier, France, agroMontpellier: Montpellier, S. 479-484
- Schneider, S. (1974):** Luftbild und Luftbildinterpretation. Lehrbuch der Allgemeinen Geographie Band 11, Berlin, New York: de Gruyter, 530 S.
- Schumann, H.J. von (1943):** Das Luftbild im Dienste der deutschen Landwirtschaftsgeographie. *Zeitschrift d. Ges. f. Erdk.* Berlin 7/10: 374-379
- Slavich, P.G. (1990):** Determining ECa-Depth Profiles from Electromagnetic Induction Measurements. *Aust. J. Soil Res.* 28: 443-452
- Stadtbäumer, B. (1988):** Möglichkeiten der Beurteilung wachsender Weizenbestände mit Methoden der luftbildunterstützten Fernerkundung und digitalen Bildverarbeitung mit dem Ziel einer schlagspezifischen Beratung. Dissertation Bonn
- Stafford, J.V.; Ambler, B.; Lark, R.M.; Catt, J. (1996):** Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 14: 101-119
- Stein, A. (1995):** Introduction to Geostatistics. Department of Soil Science and Geology, Wageningen Agricultural University
- Steiner, D. (1961):** Die Jahreszeit als Faktor bei der Landnutzungsinterpretation. Landeskundlichen Luftbildauswertung im mitteleuropäischen Raum, Heft 5, Bad Godesberg

- Strubbe, G.J.; Missoten, B.; DeBaardemaeker, J. (1996):** Mass flow measurement with a curved plate at the exit of an elevator. In: Robert, P.C.; Rust, R.H.; Larson, W.E. (Hrsg.): Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, 23.-26. Juni 1996, Minneapolis, MN, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, 703-712
- Sudduth, K.A.; Kitchen, N.R.; Hughes, D.F.; Drummond, S.T. (1995):** Electromagnetic Induction sensing as an indicator of productivity on claypan soils. In: Robert, P.C. et al. (Hrsg.): Proc. 2nd Int. Conf. on Site-Specific Management for Agricultural Systems, ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, S. 671-681
- Sudduth, K.A.; Kitchen, N.R.; Drummond, S.T. (1998):** Soil conductivity sensing on claypan soils: comparison of electromagnetic induction and direct methods. In: Robert, P.C. et al. (Hrsg.): Proc. 4th Int. Conf. on Precision Agriculture, ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, S. 979-990
- Thiam, A.; Eastman, R.J. (1999):** Vegetation Indices. In: Eastman, J.R. (Hrsg.): idrisi32 - Guide to GIS and Image Processing. Vol.2, Clark University: Worcester, USA, S.107-122
- Treue, P. (1999):** Potentiale und Grenzen bei der Interpretation georeferenzierter Ertragsdaten (Yield Mapping) und ihre Bedeutung innerhalb der "Teilflächen-spezifischen Pflanzenproduktion". Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 12: 51-52
- Troll, C. (1939):** Luftbildplan und ökologische Bodenforschung. Zeitschrift d. Ges. f. Erdk. Berlin 7/8: 241-298
- Troll, C. (1943):** Fortschritte in der wissenschaftlichen Luftbildforschung. Zeitschrift d. Ges. f. Erdk. Berlin 7/10: 277-311
- Tukey, J.W. (1976):** Exploratory Data Analysis. Addison Wesley: Reading
- Vierhuff, H. (1967):** Untersuchungen zur Stratigraphie und Genese der Sandlößvorkommen in Niedersachsen. Mittlgn. aus d. Geologischen Inst. d. Univ. Hannover, Heft 5, Hannover, 99 Seiten
- Vink, A.P.A. (1967):** Die Interpretation von Bodenkarten für landwirtschaftliche Zwecke. Albrecht-Thaer-Archiv 11: 1021-1030
- Weber, D.; Englund, E. (1992):** Evaluation and Comparison of Spatial Interpolators. Mathematical Geology 24: 381-391
- Weber, D.; Englund, E. (1994):** Evaluation and Comparison of Spatial Interpolators. Mathematical Geology 26: 589-603
- Webster, R. (2000):** Is Soil Variation random? Geoderma 97: 149-163
- Webster, R.; Oliver, M.A. (1990):** Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey. Oxford University Press: New York
- Weiß, R. (1995):** Physisch-geographische Altmoränen-Exkursion Altmark-Fläming. Berliner Geogr. Studien 40: 129-150

- Whelan, B.M.; McBratney, A.B. (1998):** Prediction uncertainty and implications for digital map resolution. In: Robert, P.C.; Rust, R.H.; Larson, W.E. (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, MN, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, 1185-1196
- Whelan, B.M.; McBratney, A.B.; Minasny, B. (2001):** VESPER - Spatial prediction software for precision agriculture. In: Grenier, G.; Blackmore, S. (Hrsg.): Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, 18.-20.6.2001, Montpellier, 139-144
- Whelan, B.M.; McBratney, A.B.; Viscara Rossel, R.A. (1996):** Spatial Prediction for Precision Agriculture. In: Robert, P.C.; Rust, R.H.; Larson, W.E. (Hrsg.): Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, 23.-26. Juni 1996, Minneapolis, MN, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, 331-342
- Wilhelmy, H. (1990):** Kartographie in Stichworten. 5., überarb. Aufl. von A. Hüttermann und P. Schröder, Unterägeri: Hirt, 391 S.
- Williams, B.G.; Hoey, D. (1987):** The Use of Electromagnetic Induction to Detect the Spatial Variability of the Salt and Clay Contents of Soils. Aust. J. Soil Res. 25: 21-27
- Yule, I.J.; Cain, P.J.; Evans, E.J.; Venus, C. (1996):** A spatial inventory approach to farm planning. Computers and Electronics in Agriculture 14: 151-161
- Zalasiewicz, J.A.; Mathers, S.J.; Cornwell, J.D. (1985):** The application of ground conductivity measurements to geological mapping. Quarterly Journal of Engineering Geology 18: 139-148

## 7 Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Karte der Bodenarten gemäß der Reichsbodenschätzung, Feldgrenzen der Nuthequelle GmbH und Siedlungsflächen für den Bereich des Untersuchungsgebietes ..... 2
- Abb. 2: Lage der Transecte mit den Beprobungsorten für die Bohrstock-Kartierung und der Profilgruben für die Entnahme von Bodenproben. .... 3
- Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der kartierten Lössmächtigkeit über Sand an den Orten des Transectes 'Tr99' ..... 6
- Abb. 4: Empirische Semivariogramme für die Daten der Lössmächtigkeit über Sand an den Orten von vier Transecten (Transect-Verlauf in NS-Richtung)..... 7
- Abb. 5: Nutzbare Feldkapazität (nFK) und nicht-pflanzenverfügbares Bodenwasser einzelner Bodenhorizonte von Löss- (Lö) und Sand-Böden (S) im Untersuchungsgebiet (Fehlermaß: Standardabweichung)..... 11
- Abb. 6: Luftbildausschnitt mit den Orten der Punktbeerntungen 1999 vom Feld '1000' (Winterweizen, Termin der Aufnahme 7.7.1999; Flughöhe 700m; Ost-West-Erstreckung der Szene ca. 1100m; Blickrichtung nach Westen)..... 36
- Abb. 7: Ertragsrohdaten von zwei Mähreschern (Abstand 7m) auf dem Feld '1000' (Ernte 1999, Winterweizen) in Abhängigkeit von der geographischen Position auf dem Feld sowie die Orte der vier Punktbeerntungen ..... 39
- Abb. 8: Ertragsrohdaten der Druschspur 'Süd' (Feld '1000', Ernte 1999, Winterweizen) sowie über fünf Werte gleitend berechneter Mittelwert und Varianz der Rohdaten ..... 41
- Abb. 9: Ertragsrohdaten der Druschspur 'Süd' (Feld '1000', Ernte 1999, Winterweizen) sowie über fünf Werte gleitend berechneter Mittelwert und Variationskoeffizient der Rohdaten ..... 41
- Abb. 10: Ertragsrohdaten der Druschspur 'Süd' (Feld 1000, Ernte 1999, Winterweizen) sowie über fünf jeweils 15 Messpunkte voneinander entfernte Werte gleitend berechneter Mittelwert und Standardfehler des Mittelwertes sowie aus diesem abgeleitetes 95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert (FG=4) ..... 42
- Abb. 11: Verlauf der gemessenen und Feuchte-korrigierten Rohertragsdaten und der Feuchte sowie die berechnete, prozentuale Abweichung der Feuchte-korrigierten Erträge einer Druschspur auf Feld 200 (Ernte 2000, Winterweizen) ..... 44
- Abb. 12: Empirische Semivarianzen der Rohertragsdaten der Druschspur 'Drescher Süd' vom Feld '1000' (Ernte 1999, Winterweizen) in Abhängigkeit von der Distanz der Punktpaare sowie die klassische Varianz des gesamten Datensatzes ..... 46
- Abb. 13: Aufteilung der Druschspur 'Drescher Süd' des Feldes '1000' (Ernte 1999, Winterweizen) in drei Spurenabschnitte ..... 47
- Abb. 14: Empirische Semivarianzen der Rohertragsdaten der Druschspur 'Drescher Süd' und der drei Spurenabschnitte des Feldes '1000' (Ernte 1999, Winterweizen) in Abhängigkeit von der Punktpaardistanz sowie die klassische Varianz des Datensatzes ..... 47

Abb. 15: Koeffizienten der Autokorrelation und partiellen Autokorrelation für die Ertragsdaten der Druschspur 'Drescher Süd' von Feld '1000' (Ernte 1999, Winterweizen).....	48
Abb. 16: Kriging-interpolierte Ertragskarten für das Feld 2600 (46 ha) aus den Datensätzen 1 (links) und 2 (rechts) (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 12) .....	51
Abb. 17: Kriging-interpolierte Ertragskarten für das Feld 2600 (46 ha) aus den Datensätzen 4 (links) und 5 (rechts) (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 12) .....	51
Abb. 18: Karten der Krige-Varianzen für das Feld 2600 (46 ha) aus den Datensätzen 1 (links) und 2 (rechts) (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 12) .....	52
Abb. 19: Karten der Krige-Varianzen für das Feld 2600 (46 ha) aus den Datensätzen 4 (links) und 5 (rechts) (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 12) .....	52
Abb. 20: Häufigkeitsverteilungen der Interpolationsdaten der Datensätze A_B063_TB_1255 und A_B063_TB_000 .....	54
Abb. 21: Häufigkeitsverteilung der absoluten Differenzen interpolierter Werte zwischen Ertrags-Rohdaten mit und ohne Ortskorrektur (Feld '2600', Ernte 1999, Winterraps).....	55
Abb. 22: Häufigkeitsverteilung der relativen Differenzen interpolierter Werte zwischen Ertrags-Rohdaten mit und ohne Ortskorrektur (Bezugsbasis: 'mit Ortskorrektur'; Feld '2600', Ernte 1999, Winterraps).....	55
Abb. 23: Verlauf der interpolierten Erträge und korrespondierenden Krige-Varianzen bei unterlassener Ortskorrektur der Rohertragsdaten (Feld '2600', Ernte 1999, Winterraps).....	56
Abb. 24: Interpolierte Ertragskarten für das Feld 2600 (46 ha) für die Varianten 2 (links) und 4 (rechts) (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 14) .....	58
Abb. 25: Interpolierte Ertragskarte für das Feld 2600 (46 ha) für die Variante 1 mit manueller Legendenskalierung (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 14). 58	
Abb. 26: Karten der Krige-Varianzen für das Feld 2600 (46 ha) für die Varianten 2 (links) und 4 (rechts) (Winterraps, Ernte 1999, siehe auch Tab. 14) .....	59
Abb. 27: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 2600 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 5006) .....	84
Abb. 28: Absolute Häufigkeiten für das Auftreten von lokalen Modalwerten in den 1 mS*m <sup>-1</sup> breiten ECa <sub>25</sub> -Klassen der Histogramme der Originaldaten einzelner Felder.....	84
Abb. 29: ECa <sub>25</sub> -Werte aus dem Abschnitt einer Fahrspur auf dem Feld 2600 (Schlitten-Messung, März 2000, Punktabstand ca. 5 m).....	85
Abb. 30: Häufigkeitsverteilung der ECa <sub>25</sub> -Originaldaten und der Daten nach CV3-Filterung (Schlitten-Messung, Feld 2600, März 2000, Originaldaten n = 5006; nach CV3-Filterung n = 4156).....	86
Abb. 31: Koeffizient der Autokorrelation und der partiellen Autokorrelation für die ECa <sub>25</sub> -Daten eines Abschnittes einer Fahrspur auf dem Feld 2600 sowie eines kleineren Abschnittes dieser Spur mit erhöhter Variabilität (Beprobung im März 2000) .....	87

<b>Abb. 32: Karten der ECa<sub>25</sub>-Werte für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts) .....</b>	<b>88</b>
<b>Abb. 33: Häufigkeitsverteilungen der ungefilterten ECa<sub>25</sub>-Originaldaten und der aus diesen Daten interpolierten bzw. über Nächst-Nachbar-Zuordnung erzeugten Rasterkarten (Feld 2600, Schlitten-Messung im März 2000) .....</b>	<b>88</b>
<b>Abb. 34: Häufigkeitsverteilungen der ECa<sub>25</sub>-Originaldaten nach CV3-Filterung und der aus diesen Daten interpolierten bzw. über Nächst-Nachbar-Zuordnung erzeugten Rasterkarten (Feld 2600, Schlitten-Messung im März 2000).....</b>	<b>89</b>
<b>Abb. 35: Häufigkeitsverteilungen der aus unterschiedlichen ECa<sub>25</sub>-Originaldatensätzen mit Punkt-Kriging interpolierten Rasterkarten (Feld 2600, Schlitten-Messung im März 2000).....</b>	<b>90</b>
<b>Abb. 36: Häufigkeitsverteilungen der aus unterschiedlichen ECa<sub>25</sub>-Originaldatensätzen mit NN-Zuordnung erzeugten Rasterkarten (Feld 2600, Schlitten-Messung im März 2000) .....</b>	<b>90</b>
<b>Abb. 37: Karten der ECa<sub>25</sub>-Werte für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts) mit jeweils anschließender 5x5-Modalfilterung der Ganzzahl-Werte.....</b>	<b>91</b>
<b>Abb. 38: Häufigkeitsverteilungen der aus den CV3-gefilterten ECa<sub>25</sub>-Originaldaten durch NN-Zuordnung erzeugten Rasterkarte sowie den im GIS mit verschiedenen Verfahren gefilterten Rasterkarten (Feld 2600, Schlitten-Messung im März 2000) .....</b>	<b>92</b>
<b>Abb. 39: Häufigkeitsverteilungen der aus den CV3-gefilterten ECa<sub>25</sub>-Originaldaten durch Punkt-Kriging erzeugten Rasterkarte sowie den im GIS mit einer 5x5-Modalfilterung geglätteten Rasterkarten von Punkt-Kriging und NN-Zuordnung (Feld 2600, Schlitten-Messung im März 2000).....</b>	<b>92</b>
<b>Abb. 40: Karten der ECa<sub>25</sub>-Werte für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts) mit jeweils anschließender Umklassifizierung (siehe Text &amp; Tab. 17).....</b>	<b>94</b>
<b>Abb. 41: Karten der ECa<sub>25</sub>-Werte für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts) mit jeweils anschließender 5x5-Modalfilterung der Ganzzahl-Rasterkarten und Umklassifizierung (siehe Text &amp; Tab. 17) .....</b>	<b>95</b>
<b>Abb. 42: Zusammenhang zwischen der Lössmächtigkeit und dem ECa<sub>25</sub>-Wert der Punkt-Messung mit dem EM38-Gerät im V-Modus des Jahres 1999 auf Feld '300' an 49 Transectpunkten.....</b>	<b>96</b>
<b>Abb. 43: Zusammenhang zwischen der Lössmächtigkeit und dem ECa<sub>25</sub>-Wert der Schlitten-Messung mit dem EM38-Gerät im V-Modus des Jahres 2000 auf Feld 1000 an 81 Transectpunkten (Daten nach BODE (2001)) .....</b>	<b>97</b>
<b>Abb. 44: DGPS-Höhenangabe und ECa<sub>25</sub>-Werte einer ca. 450 m langen Spur auf dem Feld 2600 (Schlitten-Messung 2000, V-Modus).....</b>	<b>98</b>
<b>Abb. 45: ECa<sub>25</sub>-Werte, die Geländehöhe und die Untergrenze der Lössauflage von 81 Transectpunkten auf dem Feld 1000 (EM38-Schlitten-Messung 2000, V-Modus) (leicht verändert nach BODE (2001)).....</b>	<b>98</b>

- Abb. 46:** Häufigkeitsverteilungen der  $ECa_{25}$ -Rohdaten und der  $ECa_{25}$ -Werte an 154 während des Mähdrusches kartierten 'Distel'-Punkten (*Cirsium arvense* (L.) Scop.) auf dem Feld 200 (EM38-Schlitten-Messung im März 2000, V-Modus). 99
- Abb. 47:** Luftbild von der Grenze zwischen den Feldern '2800' (links, Winterroggen) und '2700' (rechts, Wintergerste) (Luftbild vom 15.6.1999, Schrägaufnahme, Blick nach Süden)..... 120
- Abb. 48:** Luftbild des Wintergersten-Feldes '2000' (links, Blickrichtung nach Westen) und die aus Luftbild-Plänen rekonstruierten Feldgrenzen aus dem Jahr 1953 (rechts, Größe: 43 ha) (Luftbild vom 15.6.1999; Schrägaufnahme) ..... 121
- Abb. 49:** Luftbild der Felder '1800' (links, Winterroggen, 19 ha) und '1700' (rechts, Winterraps) (Luftbild vom 19.6.2000; Senkrechtaufnahme)..... 122
- Abb. 50:** Luftbildaufnahme eines Gelbsenf-Bestandes nach dem ersten Frost (links; Luftbild vom 23.11.2001) und eines Luzerne-Feldes (rechts; Luftbild vom 12.10.1999) ..... 123
- Abb. 51:** Unterschiedliche Schneebedeckung innerhalb einer Landschaft (Luftbild vom 23.11.2001) ..... 124
- Abb. 52:** Luftbild des Feldes '3300' vom 18.7.2001 (links; 53 ha) bzw. ein Ausschnitt aus dem östlichen Feldbereich mit sechs Beprobungsorten (rechts) (Fruchtart: Erbse; Aufnahmehöhe 2400 m, Kanäle trendkorrigiert, Buchstaben siehe Text) ..... 125
- Abb. 53:** Luftbild des Feldes '3300' vom 18.7.2001 mit den manuell digitalisierten Grenzlinien (links; 53 ha; Kanäle nicht trendkorrigiert) sowie die aus diesen Grenzlinien erstellte Rasterkarte (rechts) (Fruchtart: Erbse; Aufnahmehöhe 2400 m)..... 126
- Abb. 54:** Rasterkarten der Rotkanal-Klassifikation mit der Q-10- (links) und Q-20-Methode (rechts) für das Feld '3300' (Luftbild vom 18.7.2001; 53 ha; Fruchtart: Körnererbse; Aufnahmehöhe 2400 m; Länge der Rasterzellen: 5 m) ..... 127
- Abb. 55:** Rasterkarten der Rotkanal-Klassifikation mit der Q-10 (links) und Q-20-Methode (rechts) für das Feld '3300' mit anschließender 5x5-Modalfilterung (Luftbild vom 18.7.2001; 53 ha; Fruchtart: Körnererbse; Aufnahmehöhe 2400 m; Länge der Rasterzellen: 5 m) ..... 127
- Abb. 56:** Rasterkarte der überwachten Klassifikation der drei Farb-Kanäle (links) sowie das Ergebnis der 5x5-Modalfilterung (rechts) für das Feld '3300' (Luftbild vom 18.7.2001; 53 ha; Fruchtart: Körnererbse; Aufnahmehöhe 2400 m; Länge der Rasterzellen: 5 m)..... 128
- Abb. 57:** Crosstabulation-Bild für die Klassen 'braun' und 'hellgrün' der überwachten Klassifikation in den Bereichen, die mit der manuellen Digitalisierung als 'braun' angesprochen wurden (Luftbild vom 18.7.2001; 53 ha; Fruchtart: Erbse; Aufnahmehöhe 2400 m; Länge der Rasterzellen: 5 m)..... 129
- Abb. 58:** Grauwert-Bild der IR-Aufnahme (links) und Rasterkarte der Klassifikation des Rotkanals mit der Q-20-Methode (rechts) für das Feld '2600' (Termin der Aufnahme: 26.6.1992; Fruchtart: Sommergerste; Länge der Rasterzellen: 5 m) ..... 130
- Abb. 59:** Farb-Luftbild des Feldes '2600' (Luftbild vom 8.6.2000; 46 ha; Fruchtart: Wintergerste)..... 131

- Abb. 60: Grauwert-Bild des unkorrigierten Rotkanals (links) und Rasterkarte der Q-20-Klassifikation dieser Grauwerte (rechts) für das Feld '2600' (Luftbild vom 8.6.2000; 46 ha; Fruchtart: Wintergerste; Länge der Rasterzellen: 5 m) ..... 131
- Abb. 61: Grauwert-Bild des korrigierten Rotkanals (links) und Rasterkarte der Q-20-Klassifikation dieser Grauwerte (rechts) für das Feld '2600' (Luftbild vom 8.6.2000; 46 ha; Fruchtart: Wintergerste; Länge der Rasterzellen: 5 m) ..... 132
- Abb. 62: Ergebnis des Vergleichs von zwei Q-20-Rasterkarten der Luftbild-Information vom 26.6.1992 und vom 8.6.2000 des Feldes '2600' (46 ha; Länge der Rasterzellen: 5 m)..... 133
- Abb. 63: Schema der Zeitspannen mit erhöhten Eintrittswahrscheinlichkeiten für spezifische Entwicklungsstadien landwirtschaftlicher Pflanzenarten sowie die Einschätzung, mit welcher Sicherheit bodenbedingte Differenzierungen der Pflanzenbestände auftreten (Standort: Niedergörsdorf/Fläming) ..... 143
- Abb. 64: Falschfarbenbild (links) und Karte der NDVI-Werte (rechts) des westlichen Untersuchungsgebietes vom 2.6.1997 (Datenquelle: IRS-1C-Satellit) ..... 148
- Abb. 65: Feld-spezifische NDVI-Mittelwerte im Untersuchungsgebiet für die Pflanzenarten Öllein, Kartoffel, Mais, Erbse und Zuckerrübe sowie Stilllegungsflächen (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahme vom 2.6.1997) .. 148
- Abb. 66: Feld-spezifische NDVI-Mittelwerte im Untersuchungsgebiet für die Pflanzenarten Sommergerste, Wintergerste, Winterroggen (Populations- und Hybrid-Sorten), Winterweizen und Winterraps (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahme vom 2.6.1997) ..... 149
- Abb. 67: Feld-spezifische NDVI-Mittelwerte im Untersuchungsgebiet für die Pflanzenarten Kartoffel, Mais, Erbse, Zuckerrübe, Wintergerste sowie Stilllegungsflächen (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahme vom 21.6.1998) 150
- Abb. 68: Feld-spezifische NDVI-Mittelwerte im Untersuchungsgebiet für die Pflanzenarten Winterroggen (Populations- und Hybrid-Sorten), Winterweizen und Winterraps (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahme vom 21.6.1998).... 150
- Abb. 69: Karten der NDVI-Werte für das Feld '2600' in der ursprünglichen Auflösung von 23x23m (links) und die auf ein 5x5m-Raster interpolierten Werte (rechts) (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahme vom 2.6.1997) ..... 152
- Abb. 70: Karten der NDVI-Werte für das Feld '2600' in der ursprünglichen Auflösung von 23x23m (links) und die auf ein 5x5m-Raster interpolierten Werte (rechts) (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahme vom 21.6.1998) ..... 153
- Abb. 71: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'RBS-Bodenart' auf dem Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Werte im Scheffé-Test ( $p=0.05$ )) ..... 160
- Abb. 72: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'RBS-Bodenzahl' auf dem Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Werte im Scheffé-Test ( $p=0.05$ )) ..... 161
- Abb. 73: Relativerträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'RBS-Teilflächen-Nr.' auf dem Feld '3300' (Werte aufsteigend geordnet für das Jahr 2000) ..... 161
- Abb. 74: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'Luftbild-Klasse' der manuellen Digitalisierung von Luftbildstrukturen für das Feld

'3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Werte im Scheffé-Test ( $p=0.05$ )) .....	165
Abb. 75: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'Luftbild-Klasse' der überwachten Klassifikation von Luftbildstrukturen für das Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Erträge im Scheffé-Test ( $p=0.05$ ) bei Verwendung der gefilterten Klassifikation).....	166
Abb. 76: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'Luftbild-Klasse' der Q-20-Klassifikation von Luftbildstrukturen für das Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Erträge im Scheffé-Test ( $p=0.05$ ) bei Verwendung der gefilterten Klassifikation) .....	166
Abb. 77: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'Luftbild-Klasse' der Q-10-Klassifikation von Luftbildstrukturen mit anschließender Modalfilterung für das Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Erträge im Scheffé-Test ( $p=0.05$ )).....	167
Abb. 78: Relative Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'Luftbild-Klasse' der Q-10-Klassifikation von Luftbildstrukturen mit anschließender Modalfilterung für das Feld '3300' .....	167
Abb. 79: Karte der RBS-Bodenzahl (links) und $RBS_{LB}$ -Bodenzahl (rechts) für das Feld '3300' (auf der $RBS_{LB}$ -Karte sind die Grenzverläufe der RBS-Karte als Linien eingezeichnet) .....	170
Abb. 80: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'RBS <sub>LB</sub> -Bodenart' und 'RBS-Bodenart' auf dem Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Werte im Scheffé-Test ( $p=0.05$ ) für den Faktor 'RBS <sub>LB</sub> -Bodenart').....	171
Abb. 81: Mittlere Erträge der Jahre 1999, 2000 und 2001 für den Faktor 'RBS <sub>LB</sub> -Bodenzahl' und 'RBS-Bodenzahl' auf dem Feld '3300' (unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied der Werte im Scheffé-Test ( $p=0.05$ ) für den Faktor 'RBS <sub>LB</sub> -Bodenzahl').....	172
Abb. 82: Ausschnitt eines IR-Luftbildes für den südlichen Bereich des Feldes '2600' (links) und die Darstellung der vektorisierten $E_{Ca_{25}}$ -Arealgrenzen (rechts)...	174

<b>Abb. A-1: Witterungsdaten am Standort Seehausen (Fläming) des Jahres 1999 (Quelle: digitale Klimastation; Verrechnungszeitraum: Dekade).....</b>	<b>202</b>
<b>Abb. A-2: Witterungsdaten am Standort Niedergörsdorf (Fläming) des Jahres 2000 (Quelle: digitale Klimastation; Verrechnungszeitraum: Dekade).....</b>	<b>202</b>
<b>Abb. A-3: Witterungsdaten am Standort Niedergörsdorf (Fläming) des Jahres 2001 (Quelle: digitale Klimastation; Verrechnungszeitraum: Dekade).....</b>	<b>203</b>
<b>Abb. A-4: Witterungsdaten am Standort Niedergörsdorf (Fläming) des Jahres 2002 (Quelle: digitale Klimastation; Verrechnungszeitraum: Dekade).....</b>	<b>203</b>
<b>Abb. A-5: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 600 im April 1999 (Schlitten-Messung, n = 2474).....</b>	<b>212</b>
<b>Abb. A-6: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 1000 (südliche 50 ha) im April 1999 (Schlitten-Messung, n = 4278).....</b>	<b>212</b>
<b>Abb. A-7: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 1100 im April 1999 (Schlitten-Messung, n = 4094).....</b>	<b>213</b>
<b>Abb. A-8: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 101 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 5864) .....</b>	<b>213</b>
<b>Abb. A-9: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 200 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 11068) .....</b>	<b>214</b>
<b>Abb. A-10: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 501 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 2455) .....</b>	<b>214</b>
<b>Abb. A-11: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 1000 (nördliche 50 ha) im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 6782) .....</b>	<b>215</b>
<b>Abb. A-12: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 2000 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 2524) .....</b>	<b>215</b>
<b>Abb. A-13: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 2700 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 5223) .....</b>	<b>216</b>
<b>Abb. A-14: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 3000 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 6453) .....</b>	<b>216</b>
<b>Abb. A-15: Grenzlinien der ECa<sub>25</sub>-Teilflächen für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts) und anschließender Vektorisierung der Unterschiede von 1 mS*m<sup>-1</sup> (siehe auch Abb. 32) .....</b>	<b>220</b>
<b>Abb. A-16: Grenzlinien der ECa<sub>25</sub>-Teilflächen für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts), Klassifizierung der Rasterdaten (Tab. 17) und anschließender Vektorisierung der Unterschiede von 1 mS*m<sup>-1</sup> (siehe auch Abb. 40) .....</b>	<b>220</b>
<b>Abb. A-17: Grenzlinien der ECa<sub>25</sub>-Teilflächen für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts), 5x5 Modalfilterung der Rasterdaten und anschließender Vektorisierung der Unterschiede von 1 mS*m<sup>-1</sup> (siehe auch Abb. 37).....</b>	<b>221</b>
<b>Abb. A-18: Grenzlinien der ECa<sub>25</sub>-Teilflächen für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts), 5x5 Modalfilterung und Klassifizierung der Rasterdaten</b>	

(Tab. 17) und anschließender Vektorisierung der Unterschiede von $1 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ (siehe auch Abb. 41) .....	221
Abb. A-19: Karte der RBS-Bodenarten für das Feld 2600 (46 ha).....	224
Abb. A-20: Interpolierte Ertragskarte und Karte der Krige-Varianzen für das Feld 3300 (54 ha) für das Jahr 1999 (Winterweizen) .....	225
Abb. A-21: Interpolierte Ertragskarte und Karte der Krige-Varianzen für das Feld 3300 (54 ha) für das Jahr 2000 (Winterweizen) .....	225
Abb. A-22: Interpolierte Ertragskarte und Karte der Krige-Varianzen für das Feld 3300 (54 ha) für das Jahr 2001 (Körnererbse) .....	225

## 8 Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1: Ergebnisse der Kartierung der Lössmächtigkeit an Transect-Punkten .....	5
Tab. 2: Typische Böden im Untersuchungsgebiet .....	7
Tab. 3: Statistische Werte für die Mächtigkeiten typischer Horizonte der Parabraunerde aus Löss an den Orte des Transectes 'Tr29' .....	8
Tab. 4: Ergebnisse der Korngrößenanalyse für die untersuchten Bodenproben .....	9
Tab. 5: Aufstellung der in den drei Untersuchungsjahren Ertrags-kartierten Fruchtarten.....	33
Tab. 6: Aufstellung der zur Ertragsdaten-Prozessierung verwendeten Computerprogramme .....	34
Tab. 7: Statistiken des Ertrages und ausgewählter Kenngrößen der Ertragsstruktur der Viertelquadratmeter-Punkternten vom Feld '1000' im Erntejahr 1999 (Winterweizen) .....	35
Tab. 8: Mediane Abweichungen der LH 565 Ertragsmessungen im Erntejahr 1999 bei verschiedenen Fruchtarten und zwei Mähdreschern mit je vier Probeladungen ..	37
Tab. 9: Statistische Kenngrößen der Ursprungs-Ertragsdaten, der Distanz, die je 5 Werte umfasst, und berechneter Größen von über fünf Werte geglätteten Ertragsdaten der Druschspur 'Drescher Süd' (n=378) .....	40
Tab. 10: Prozentuale Abweichung der errechneten von den tatsächlichen Erträgen für eine schwankende Auslastung des Schneidwerks um +/- 20 Zentimeter bei Nutzung der vom LH 565 unterstützten Teilbreitenschaltung .....	43
Tab. 11: Mediane der feldfeuchten Erträge und Gutfeuchten von vier Druschspuren zweier Mähdrescher des Feldes '2600' (Ernte 1999, Winterraps).....	45
Tab. 12: Bezeichnung der Rohdaten-Varianten für die vergleichende Interpolation .....	49
Tab. 13: Statistiken der unterschiedlich aufbereiteten Ertrag-Rohdatensätze (zur Erläuterung der Codierung siehe Tab. 12 sowie den Text) .....	50
Tab. 14: Angaben zu den getesteten, unterschiedlichen Interpolationsverfahren für die Ertragskartenerstellung aus dem Rohdatensatz A_B063_TB_1255 (siehe auch 3.2.3.9) .....	57
Tab. 15: Übersicht über Beprobungsorte, -termine und -arten der durchgeführten ECa-Messungen im Untersuchungsgebiet.....	82
Tab. 16: Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für verschiedene Kombinationen von ECa <sub>25</sub> -Daten auf dem Feld '300' (Punkt-Messung, n=49) .....	83
Tab. 17: Zuordnungsbereiche der Ganzzahl ECa <sub>25</sub> -Daten zu neuen ECa <sub>25</sub> -Klassen .....	93
Tab. 18: Horizontfolgen von sechs Bodenprofilen auf dem Feld 3300 (Auswahl anhand des Luftbildes vom 18.7.2001; siehe auch Abb. 52 bzw. Erläuterungen im Text) .....	126
Tab. 19: Kanalspezifikationen des LISS-III-Sensors auf dem IRS-1C-Satelliten.....	147
Tab. 20: Flächenumfang verschiedener Pflanzenarten, für den die NDVI-Werte eines Satellitenbildes die tatsächliche Standortvariabilität widerspiegeln (Datenquelle: IRS-1C-Satellit; Aufnahmen vom 2.6.1997 bzw. 21.6.1998) .....	151

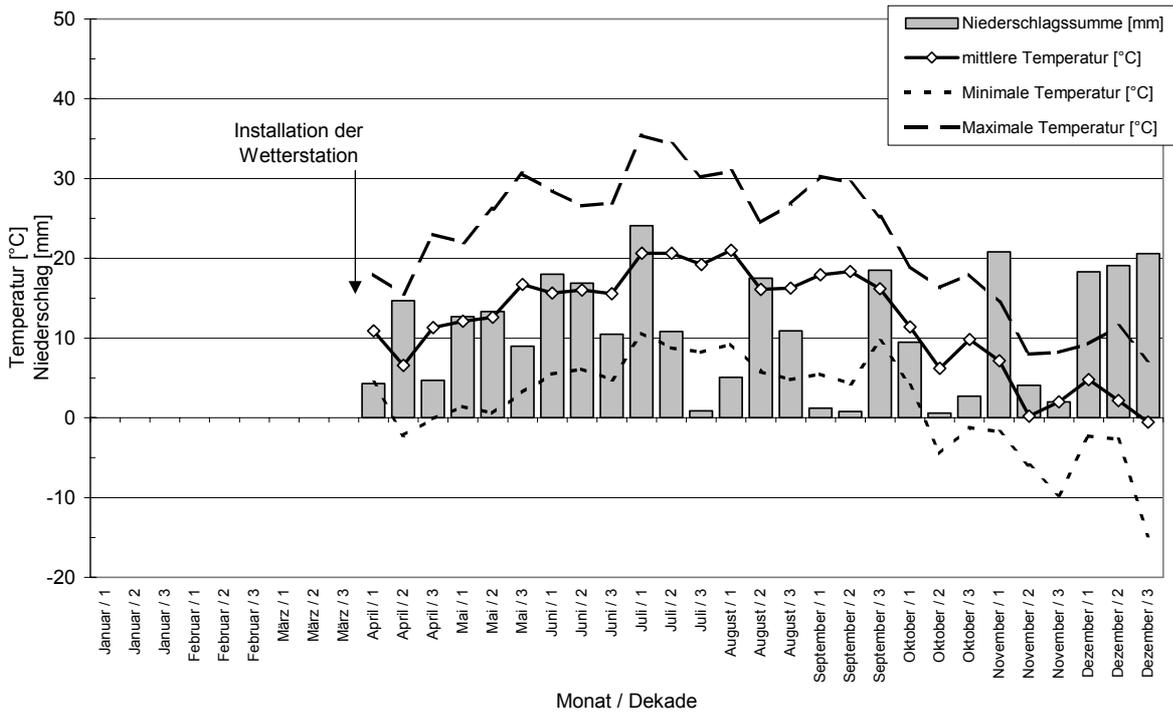
<b>Tab. A-1: Humus-Gehalte, Kiesanteile (bezogen auf trockene Gesamt-Einwaage) und Anteile der Bodenarten (bezogen auf Auswaage der Fraktionen &lt; 2000 µm) in verschiedenen Korngrößen-Klassen für die verschiedenen Horizonte der Beprobungsorte (alle Grenzen in µm).....</b>	<b>201</b>
<b>Tab. A-2: Arbeitsschritte im Prozess der Datenaufbereitung für die Erstellung von Ertragskarten aus den Rohdaten der LH 565-Ertragskartierungssysteme .</b>	<b>204</b>
<b>Tab. A-3: Durch den LH 565 geschätzte und auf der Brückenwaage gewogene Massen der Probeladungen im Erntejahr 1999 für verschiedene Fruchtarten und zwei Drescher (nach Durchführung der Kalibration).....</b>	<b>205</b>
<b>Tab. A-4: Statistiken der Ertragskartierungs-Rohdaten von verschiedenen Feldern aus drei Erntejahren sowie die Größe der Felder.....</b>	<b>206</b>
<b>Tab. A-5: Verhältnisse der Interpolationsdaten-Statistiken zur den Statistiken der jeweiligen Rohdatensätze.....</b>	<b>207</b>
<b>Tab. A-6: Allgemeine Statistiken der Ergebnisse der Ertragsdaten-Interpolation mittels Block-Kriging (siehe Kap. 3.2.3.9) bei unterschiedlicher Rohdaten-Manipulation: Ertragsschätzungen .....</b>	<b>208</b>
<b>Tab. A-7: Allgemeine Statistiken der Ergebnisse der Ertragsdaten-Interpolation mittels Block-Kriging (siehe Kap. 3.2.3.9) bei unterschiedlicher Rohdaten-Manipulation: Krige-Varianzen der Erträge .....</b>	<b>208</b>
<b>Tab. A-8: Verhältnis verschiedener statistischer Größen nach der Interpolation zu den jeweiligen Größen der verwendeten Ertrags-Rohdatensätze für die Daten des Verfahrensvergleiches 'Rohdaten-Korrektur' .....</b>	<b>209</b>
<b>Tab. A-9: Verhältnis der jeweiligen Krige-Varianz-Statistiken zu den Statistiken der Variante A_B_TB_1255 bei Verwendung verschiedener Rohdatensätze (Verfahrensvergleich 'Rohdaten-Korrektur'; siehe Kap. 3.2.3.9 &amp; Tab. A-7) .....</b>	<b>209</b>
<b>Tab. A-10 Verhältnis der jeweiligen Krige-Varianz-Statistiken zu den Statistiken der Variante A_B063_TB_000 bei Verwendung verschiedener Rohdatensätze (Verfahrensvergleich 'Rohdaten-Korrektur'; siehe Kap. 3.2.3.9 &amp; Tab. A-7) .....</b>	<b>209</b>
<b>Tab. A-11: Ergebnisse der Ertragsdaten-Interpolation aus dem Rohdatensatz A_B063_TB_1255 (siehe Kap. 3.2.3.9) bei unterschiedlicher Verfahrensgestaltung: Ertragsschätzungen .....</b>	<b>210</b>
<b>Tab. A-12: Ergebnisse der Ertragsdaten-Interpolation aus dem Rohdatensatz A_B063_TB_1255 (siehe Kap. 3.2.3.9) bei unterschiedlicher Verfahrensgestaltung: Krige-Varianzen.....</b>	<b>210</b>
<b>Tab. A-13: Verhältnisse der Interpolationsdaten-Statistiken zur den Statistiken des Rohdatensatzes A_B063_TB_1255 (siehe Kap. 3.2.3.9 &amp; Tab. A-11) .....</b>	<b>211</b>
<b>Tab. A-14: Verhältnisse der jeweiligen Krige-Varianz-Statistiken zu den Statistiken der Verfahrens-Variante 'Punkt-Kriging' bei Anwendung unterschiedlicher Interpolationsverfahren (siehe Kap. 3.2.3.9 &amp; Tab. A-12).....</b>	<b>211</b>
<b>Tab. A-15: Verhältnisse der jeweiligen Krige-Varianz-Statistiken zu den Statistiken der Verfahrens-Variante 'Block-Kriging / 10x10m / sphärisches Variogr.' bei</b>	

Anwendung unterschiedlicher Interpolationsverfahren (siehe Kap. 3.2.3.9 & Tab. A-12) .....	211
Tab. A-16: Allgemeine Statistiken der ECa <sub>25</sub> -Kartenerstellung mittels Punkt- und Block-Kriging und einer Nächst-Nachbar-Zuordnung (siehe Kap. 3.4.3.4) bei unterschiedlicher Originaldaten-Filterung: ECa <sub>25</sub> -Werte .....	217
Tab. A-17: Verhältnis von verschiedenen statistischen Kenngrößen der auf unterschiedliche Weise erstellten Rasterkarten zu den jeweils verwendeten ECa <sub>25</sub> -Originaldatensätzen.....	218
Tab. A-18: Allgemeine Statistiken der ECa <sub>25</sub> -Kartenerstellung mittels Punkt- und Block-Kriging (siehe Kap. 3.4.3.4) bei unterschiedlicher Originaldaten-Filterung: Krige-Varianzen.....	218
Tab. A-19: Verhältnis von verschiedenen statistischen Kenngrößen der Krige-Varianzen bei Verwendung des CV3-gefilterten Originaldatensatzes zu den Krige-Varianzen bei Verwendung des ungefilterten Originaldatensatzes zur ECa <sub>25</sub> -Karten-Interpolation mit zwei Kriging-Verfahren.....	219
Tab. A-20: Prozentualer Anteil der Bildpunkte der überwachten Luftbild-Klassifikation (Spalten) in den jeweiligen Klassen alternativer Verfahren der Klassifikation (Zeilen) für eine Luftbildaufnahme des Feldes '3300' vom 18.7.2001 (siehe auch Abb. 52 bis Abb. 56; alle Klassifikationskarten wurden mit einer 5x5-Modalfilterung generalisiert) .....	222
Tab. A-21: Feld-spezifische lineare Korrelationskoeffizienten (r) zwischen den NDVI-Rasterwerten der Jahre 1997 und 1998, sowie Umfang der Stichprobe und Bestimmtheitsmaß (P - Populationssorte; H - Hybridsorte) .....	223
Tab. A-22: F-Quotienten der einfaktoriellen Varianzanalyse von Ertragsdaten aus drei Jahren von dem Feld '3300' mit den Informationen der RBS als Faktoren.	226
Tab. A-23: F-Quotienten der einfaktoriellen Varianzanalyse von Ertragsdaten aus drei Jahren von dem Feld '3300' mit den Bezeichnungen der verschiedenen Methoden der Luftbild-Klassifikation als Faktoren.....	226
Tab. A-24: F-Quotienten der einfaktoriellen Varianzanalyse von Ertragsdaten aus drei Jahren von dem Feld '3300' mit den Informationen der RBS <sub>LB</sub> als Faktoren (Grenzlinien der Teilflächen auf der Grundlage von Luftbild-Informationen nachträglich geändert).....	226

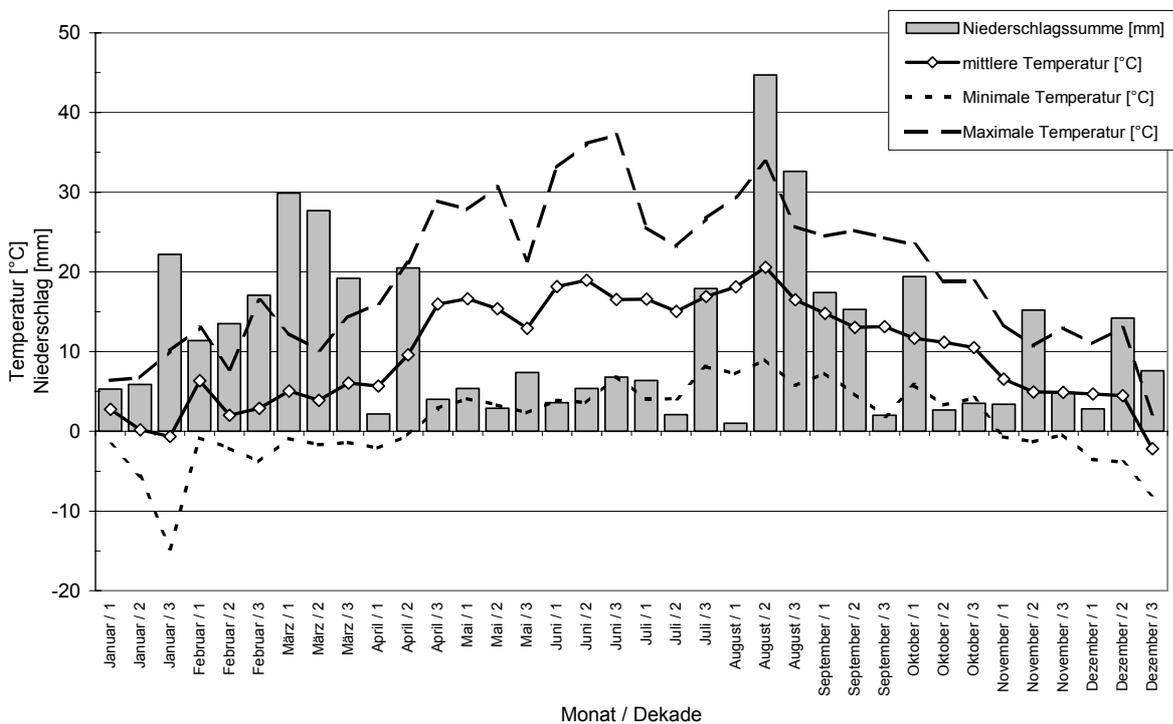
## **9 Anhang**

**Tab. A-1: Humus-Gehalte, Kiesanteile (bezogen auf trockene Gesamt-Einwaage) und Anteile der Bodenarten (bezogen auf Auswaage der Fraktionen < 2000 µm) in verschiedenen Korngrößen-Klassen für die verschiedenen Horizonte der Beprobungsorte (alle Grenzen in µm)**

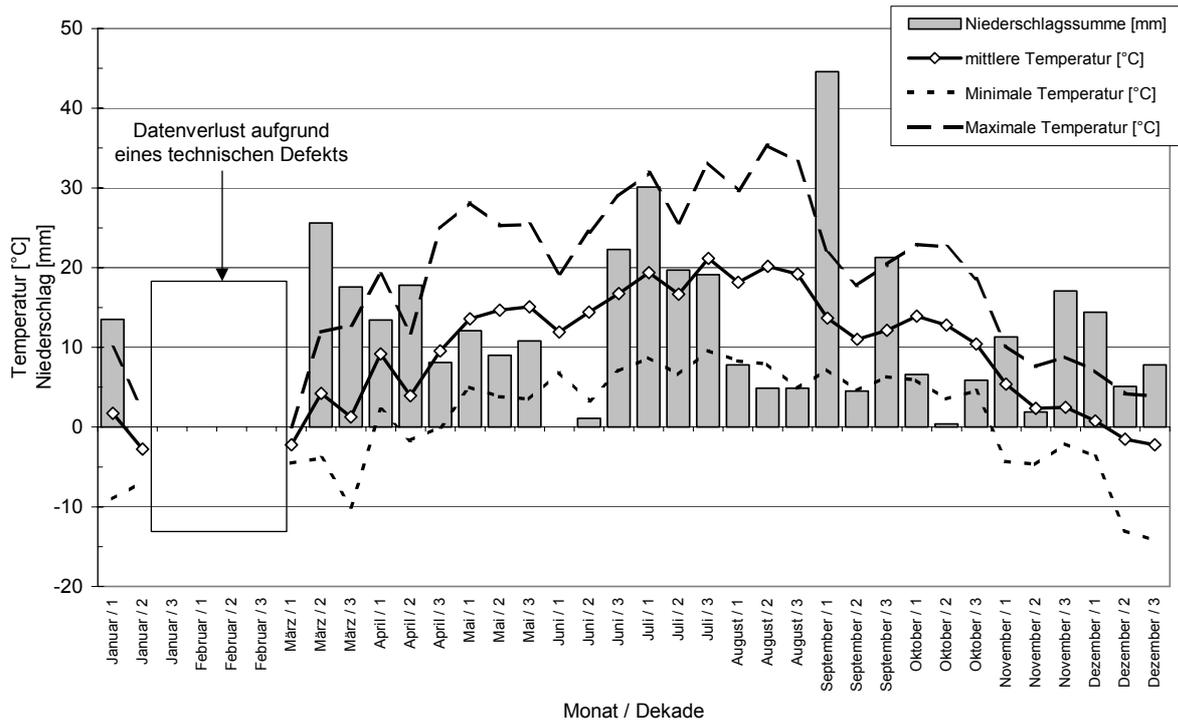
Name der Probe	Horizont	Tiefe [cm]	Humus [%]	Kies [m %]	Sand [m %]	2000-630 [m %]	630-200 [m %]	200-63 [m %]	Schluff [m %]	63-20 [m %]	63-36 [m %]	36-20 [m %]	20-6 [m %]	6-2 [m %]	Ton [m %]
Pr99_01	MAp	0-33	1.7	0.0	14.6	1.5	5.9	7.2	74.8	43.7	18.1	25.6	26.0	5.0	10.6
	MAI	33-43	0.8	1.6	11.3	0.8	4.6	5.9	75.9	43.4	17.2	26.2	26.8	5.8	12.8
	fAh	43-55	9.0	0.0	16.0	1.3	6.3	8.4	79.1	52.2	26.0	26.2	21.4	5.5	4.9
	AI	55-83	0.3	1.5	14.8	1.0	5.4	8.3	79.6	52.6	21.7	30.9	23.6	3.4	5.6
	Bt 1	133	0.2	0.0	11.8	1.0	4.1	6.7	72.5	52.2	25.5	26.7	16.8	3.5	15.7
	Bt 2	141	0.3	0.0	11.3	0.6	4.0	6.7	65.1	47.2	23.1	24.1	15.4	2.5	23.5
II Bbt	145	0.1	0.4	80.3	6.6	35.7	38.0	14.5	11.6	8.3	3.3	2.9	0.0	5.2	
Pr00_01	Ap 1	18-22	1.3	0.0	16.4	1.2	6.2	9.0	75.1	47.0	22.1	24.9	24.4	3.7	8.4
	Ap 2	30-34	1.0	0.0	15.8	1.1	6.0	8.7	75.9	49.2	26.2	23.0	23.3	3.4	8.3
	AI Bt	50-54	0.2	0.0	12.1	0.7	4.1	7.3	83.3	56.4	31.5	24.9	23.9	3.0	4.5
	Bt	74-86	1.0	0.0	9.3	0.5	2.4	6.4	51.2	33.5	23.4	10.1	15.1	2.7	39.5
Pr00_02	Ap 1	0-28	1.5	0.0	26.2	3.7	11.0	11.5	67.6	49.1	31.8	17.3	16.2	2.3	6.2
	Ap 2	28-33	0.9	0.0	23.8	2.5	11.0	10.3	70.1	51.9	35.4	16.5	15.4	2.8	6.1
	AI	33-40	0.3	0.0	11.7	0.7	3.9	7.1	77.6	56.5	39.6	16.9	17.9	3.2	10.7
	AI Bt 1	40-50	0.2	0.0	13.8	1.2	3.5	9.1	73.4	52.6	30.8	21.8	17.8	3.0	12.8
	AI Bt 2	50-60	0.2	0.0	12.3	0.4	3.1	8.8	71.9	50.2	30.0	20.2	19.0	2.7	15.8
	II Bbt	78	0.2	0.0	66.9	4.9	29.8	32.2	26.0	18.7	9.9	8.8	7.1	0.2	7.1
Dahme	Ap	20-30	1.7	0.0	32.1	4.9	19.8	7.4	63.9	41.4	22.6	18.9	19.3	3.2	4.0
F-102	AI	70	0.2	0.0	25.4	1.9	7.8	15.7	69.6	52.4	30.3	22.1	14.6	2.6	5.0
F-400	Ap	0-10	1.3	0.0	11.8	1.0	2.1	8.7	83.2	59.5	16.1	43.4	20.9	2.8	4.9



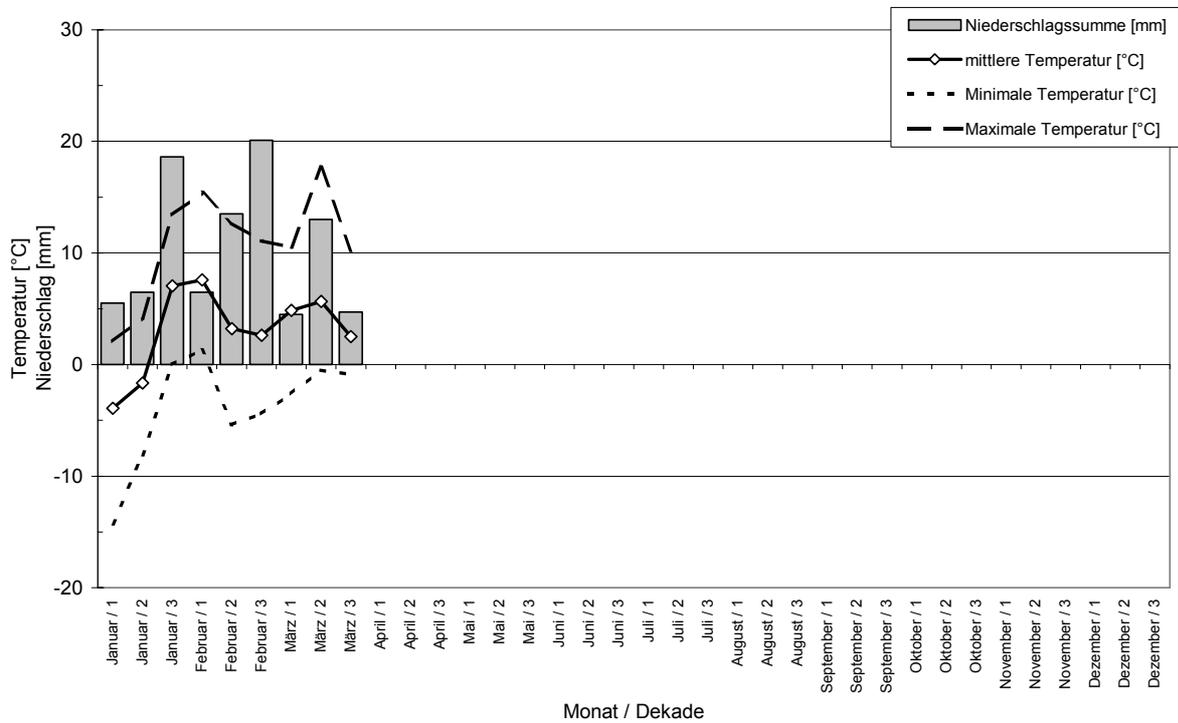
**Abb. A-1: Witterungsdaten am Standort Seehausen (Fläming) des Jahres 1999 (Quelle: digitale Klimastation; Verrechnungszeitraum: Dekade)**



**Abb. A-2: Witterungsdaten am Standort Niedergörsdorf (Fläming) des Jahres 2000 (Quelle: digitale Klimastation; Verrechnungszeitraum: Dekade)**



**Abb. A-3: Witterungsdaten am Standort Niedergörsdorf (Fläming) des Jahres 2001 (Quelle: digitale Klimastation; Verrechnungszeitraum: Dekade)**



**Abb. A-4: Witterungsdaten am Standort Niedergörsdorf (Fläming) des Jahres 2002 (Quelle: digitale Klimastation; Verrechnungszeitraum: Dekade)**

**Tab. A-2: Arbeitsschritte im Prozess der Datenaufbereitung für die Erstellung von Ertragskarten aus den Rohdaten der LH 565-Ertragskartierungssysteme**

Programm	Arbeitsschritte
ALBYD (Beta-Version)	Binärdaten-Import mit 12-5-5 Sekunden Zeitverschiebung, Min/Max-Filterung, Speicherung als TXT-Datei
MS EXCEL 97	Dezimalzahlformatierung: WGS84-Koordinaten 6-stellig; Ertrag, Feuchte, Distanzen, Azimuth 3-stellig Speicherung als DBF-Datei
ArcView (3.1)	Import der DBF-Datei; AddEventTheme-Aktion mit WGS-Koordinaten; Überprüfung der Teilbreiten-Information Verschneiden mit Feldgrenzen (SelectByTheme) Speicherung als SHP-Datei im WGS84-Format
Idrisi32 (1.11) & MS ACCESS 97	Import der SHP-Datei; lineares Resampling der WGS- auf metrische Gauß-Krüger-Koordinaten; Kontrolle der Ertrags- und Feuchte-Mittelwerte über ACCESS-Gruppierungsfunktionen; ggfs. Durchführung von Datenmanipulationen unter IDRISI32; Selektion der Daten mit allen Teilbreiten (Wert: 276) und Export in Values-File; ASSIGN an GK-Vektordaten; Export der Ertragsdaten als DAT-Datei (Surfer-Format), Erstellung einer 5m-Zielmaske für die Interpolation
WORDPAD (1.0)	Zusammenfügen verschiedener Druschdateien und Abspeicherung als Basisdatei für die Interpolation
VESPER (1.0c)	Datenimport; Ordinary-Block-Kriging mit 10x10m Blöcken, lokale Variogramm-Schätzung über 20 Schritte mit min/max 90/100 Punkten, sphärisches Variogramm-Modell, Gewichtung nach Paar-Zahl, berechneter Suchradius; 5x5m-Interpolationsraster
MS EXCEL 97	Import der Kriging txt-Datei, Erzeugung einer PRN-Datei für Krige-Schätzer und -Varianzen
IDRISI32 (1.11)	Import der Schätzer- und Varianzen-Datei; Erstellung einer 5m-Raster-Datei (INITIAL), Konvertierung der Schätz-/Varianz-Vektoren auf die Raster-Datei

**Tab. A-3: Durch den LH 565 geschätzte und auf der Brückenwaage gewogene Massen der Probeladungen im Erntejahr 1999 für verschiedene Fruchtarten und zwei Drescher (nach Durchführung der Kalibration)**

Fruchtart	Fahrer	Datum	Fläche	LH 565	Waage	Abweichung
			[ha]	[t]	[t]	[%]
Wintergerste	D	5. Juli 1999	1.20	10.8	10.2	5.88
			1.14	10.4	10.1	3.13
			1.07	9.7	8.1	19.24
Wintergerste	U	5. Juli 1999	1.23	8.9	8.9	-0.14
			1.45	8.8	8.8	-0.67
			1.09	7.7	7.6	0.27
			0.88	7.4	7.4	-0.07
Pop.-Roggen 1	D	27. Juli 1999	0.69	2.7	2.7	0.07
			0.80	3.3	3.3	-1.17
			0.85	3.4	3.4	0.93
			0.44	1.8	1.8	1.96
Pop.-Roggen 1	U	27. Juli 1999	0.62	2.4	2.6	-6.08
			0.25	1.0	1.0	2.98
			1.08	4.6	4.3	4.86
			0.54	2.3	2.2	4.38
Pop.-Roggen 2	D	2. August 1999	0.34	1.6	1.6	0.64
			0.56	2.7	2.7	0.25
			0.61	2.0	2.0	-0.30
			0.74	3.1	3.1	-0.68
Pop.-Roggen 2	U	2. August 1999	0.34	1.5	1.5	-0.56
			1.15	5.0	5.0	-0.19
			0.51	2.2	2.2	1.15
			0.79	3.6	3.6	-0.78
Hyb.-Roggen	D	26. Juli 1999	0.44	3.1	3.1	-0.08
			0.46	3.3	3.3	-0.36
			0.45	3.3	3.3	0.10
			0.17	1.2	1.2	-0.44
Hyb.-Roggen	U	26. Juli 1999	0.18	1.6	1.6	0.59
			0.24	1.9	1.9	-1.13
			0.66	5.4	5.4	0.04
			0.25	1.9	1.9	0.23
Winterweizen	D	4. August 1999	0.44	3.1	3.1	-0.88
			0.23	1.5	1.4	4.87
			0.70	4.5	4.6	-2.57
			0.30	1.8	1.8	3.67
Winterweizen	U	4. August 1999	0.32	2.2	2.1	2.69
			0.28	2.2	2.1	3.21
			0.82	6.2	6.1	1.33
			0.17	1.3	1.2	3.28
Winterraps	D	17. Juli 1999	0.60	3.8	3.7	0.73
			0.51	3.2	3.3	-1.11
			0.67	4.1	4.1	0.67
			0.88	5.5	5.5	-0.67
Winterraps	U	17. Juli 1999	0.77	2.8	2.8	-1.41
			0.90	3.3	3.4	-0.95
			1.06	3.8	3.8	-1.66
			1.49	4.1	4.2	-1.79
Körnererbse	D	28. Juli 1999	0.32	1.4	1.3	4.13
			0.56	2.1	2.1	-0.06
			0.51	2.2	2.2	2.57
			0.55	2.4	2.5	-1.56
Körnererbse	U	28. Juli 1999	0.50	1.9	1.9	0.96
			1.08	4.1	4.0	2.10
			0.72	2.6	2.5	1.75
			0.63	2.6	2.5	0.89

**Tab. A-4: Statistiken der Ertragskartierungs-Rohdaten von verschiedenen Feldern aus drei Erntejahren sowie die Größe der Felder**

Feld	Jahr	Fruchtart	Wertezahl	Mittelwert [dt/ha]	Median [dt/ha]	Var.koeff. [%]	2%-Quantil [dt/ha]	98%-Quantil [dt/ha]	Maximum [dt/ha]	Schiefte [-]	% d. Buchführung [%]	Größe [ha]
101	2000	WW	17347	37,10	38,61	29,39	7,42	55,74	137,72	-0,68	104,1	50
200	2000	WW	36398	43,59	44,83	27,93	11,54	65,87	158,07	-0,47	99,5	99
501	1999	WRa	9362	37,24	38,48	22,78	14,46	52,51	112,83	-0,59	-	15
501	2000	WG/SG	7528	43,50	46,24	39,30	9,82	75,38	112,82	-0,12	-	15
501	2001	WG	4495	73,11	78,83	28,07	18,31	102,21	133,02	-1,16	-	15
600	1999	WR	29282	73,38	75,12	19,13	37,55	97,44	143,52	-0,87	-	39
600	2000	WR	29016	58,88	60,69	28,91	20,39	89,99	153,53	-0,30	-	39
700	1999	WR	51520	70,07	71,84	21,70	33,94	96,95	157,21	-0,68	-	62
700	2000	WR	45588	47,93	48,88	31,34	16,13	75,93	157,00	-0,16	-	62
1000	1999	WW	36145	70,81	73,47	24,00	22,91	96,67	126,42	-1,06	105,0	99
1001	2000	WW	17871	28,69	30,48	38,12	4,50	47,60	93,04	-0,39	107,7	48
1002	2000	WR	32928	50,70	53,75	31,61	13,39	75,81	156,56	-0,52	115,9	51
1100	1999	WW	23211	65,33	66,98	19,58	27,27	86,68	131,10	-1,30	107,6	54
1100	2001	WW	5083	79,07	81,68	19,28	35,71	102,49	125,24	-1,60	108,6	54
2000	1999	WG	14847	61,41	62,56	27,79	13,84	92,45	126,95	-0,69	109,6	47
2000	2000	WG	8536	51,98	52,66	26,07	16,59	77,97	152,90	-0,08	116,6	47
2600	1999	WRa	27039	36,78	38,40	22,43	11,49	48,93	110,59	-1,15	106,0	46
2600	2000	WG	11571	58,52	61,20	23,35	19,69	80,41	120,88	-1,05	93,0	46
2700	1999	WG	24231	55,19	56,81	21,40	24,75	74,78	132,87	-0,68	94,1	53
2700	2001	WG	13030	86,33	91,19	23,08	23,21	113,56	129,91	-1,54	107,8	53
3000	1999	WG	31488	48,72	48,69	22,96	25,27	70,59	130,46	-0,14	98,8	104
3000	2001	WW	20798	55,31	54,60	23,75	28,04	78,85	124,25	-0,28	79,8	104
3300	1999	WW	22219	74,81	77,58	26,30	25,10	107,80	130,21	-0,71	98,9	54
3300	2000	WW	17826	41,17	44,35	34,60	5,88	63,10	140,81	-0,68	94,3	54
3300	2001	Erbse	10151	29,15	30,39	25,69	9,07	41,48	132,93	0,19	96,3	54

**Tab. A-5: Verhältnisse der Interpolationsdaten-Statistiken zur den Statistiken der jeweiligen Rohdatensätze**

Field	Jahr	Fruchtart	Wertzahl	Mittelwert	Median	Var.koeff.	2%-Quantil	98%-Quantil	Maximum	Schiefte	% d. Buchführung	Größe
			[-]	[dt/ha]	[dt/ha]	[%]	[dt/ha]	[dt/ha]	[dt/ha]	[-]	[%]	[ha]
101	2000	WW	20083	36,06	37,92	28,11	9,16	52,09	70,45	-0,83	101,2	50
200	2000	WW	39547	42,57	43,95	25,50	15,18	61,94	87,76	-0,67	97,2	99
501	1999	WRa	5967	35,19	36,86	21,80	16,25	47,23	55,34	-0,76	-	15
501	2000	WG/SG	5967	36,53	36,29	39,96	14,31	62,98	77,09	0,16	-	15
501	2001	WG	5967	73,49	76,45	18,30	39,16	94,33	110,71	-0,76	-	15
600	1999	WR	15452	72,55	75,00	15,71	42,93	89,29	103,30	-0,95	-	39
600	2000	WR	15452	58,40	60,16	24,64	26,05	85,19	104,21	-0,38	-	39
700	1999	WR	24780	69,16	71,65	17,59	38,44	88,07	100,14	-0,84	-	62
700	2000	WR	24780	47,02	48,45	27,58	18,36	70,62	85,44	-0,34	-	62
1000	1999	WW	39550	67,98	70,63	22,58	27,94	91,70	115,00	-0,91	100,8	99
1001	2000	WW	19347	26,97	28,81	38,13	4,60	43,32	60,22	-0,51	101,3	48
1002	2000	WR	20204	50,58	53,02	25,72	20,30	70,98	85,49	-0,66	115,6	51
1100	1999	WW	21790	63,88	65,70	17,05	34,35	81,68	97,46	-1,32	105,2	54
1100	2001	WW	21790	75,74	79,67	20,03	28,25	96,84	108,45	-1,70	104,0	54
2000	1999	WG	18923	57,43	58,44	24,63	27,39	85,13	101,25	-0,15	102,5	47
2000	2000	WG	18923	45,19	43,09	21,85	29,49	67,63	112,29	0,63	101,3	47
2600	1999	WRa	18428	35,09	37,77	24,61	9,49	45,88	58,95	-1,50	101,1	46
2600	2000	WG	18428	55,01	56,44	20,62	24,88	73,69	87,15	-0,80	87,4	46
2700	1999	WG	21141	54,25	55,40	16,84	31,29	70,23	80,24	-0,77	92,5	53
2700	2001	WG	21141	86,46	88,73	15,57	49,15	105,15	121,86	-1,42	107,9	53
3000	1999	WG	41738	48,46	48,10	18,84	31,33	67,30	84,21	0,14	98,3	104
3000	2001	WW	41738	55,23	54,87	19,12	35,13	74,11	86,84	-0,12	79,7	104
3300	1999	WW	21609	74,34	77,09	23,45	32,27	103,44	114,20	-0,64	98,3	54
3300	2000	WW	21609	40,10	43,13	32,41	8,57	59,49	68,10	-0,76	91,9	54
3300	2001	Erbse	21609	29,28	30,05	15,81	17,39	37,18	44,74	-0,72	96,8	54

**Tab. A-6: Allgemeine Statistiken der Ergebnisse der Ertragsdaten-Interpolation mittels Block-Kriging (siehe Kap. 3.2.3.9) bei unterschiedlicher Rohdaten-Manipulation: Ertragsschätzungen**

Rohdatensatz	Anzahl [-]	Mittel [dt*ha <sup>-1</sup> ]	Median [dt*ha <sup>-1</sup> ]	CV [%]	2%-Quantil [dt*ha <sup>-1</sup> ]	98%-Quantil [dt*ha <sup>-1</sup> ]	Max. [dt*ha <sup>-1</sup> ]
A_B063_TB_1255	18428	35.1	37.8	25	9.5	45.9	58.9
A_B_TB_1255	18428	44.9	46.8	29	12.3	67.4	82.5
A_B065_TB_1255	18428	35.6	38.3	25	9.6	46.6	59.1
A_B063_alle_1255	18428	35.5	38.0	25	9.8	47.9	68.4
A_B063_TB_000	18428	34.7	37.4	25	10.0	46.5	58.4

**Tab. A-7: Allgemeine Statistiken der Ergebnisse der Ertragsdaten-Interpolation mittels Block-Kriging (siehe Kap. 3.2.3.9) bei unterschiedlicher Rohdaten-Manipulation: Krige-Varianzen der Erträge**

Rohdatensatz	Anzahl [-]	Mittel [dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup> ]	Median [dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup> ]	CV [%]	2%-Quantil [dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup> ]	98%-Quantil [dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup> ]	Max. [dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup> ]	(Mittel) <sup>1/2</sup> [dt*ha <sup>-1</sup> ]	(Median) <sup>1/2</sup> [dt*ha <sup>-1</sup> ]
A_B063_TB_1255	18428	4.4	1.0	280	0.2	8.5	221.9	2.1	1.0
A_B_TB_1255	18428	16.9	7.2	173	2.3	40.5	524.2	4.1	2.7
A_B065_TB_1255	18428	4.6	1.1	276	0.2	8.9	226.4	2.1	1.0
A_B063_alle_1255	18428	4.8	1.2	290	0.2	9.2	294.1	2.2	1.1
A_B063_TB_000	18428	5.2	1.3	268	0.3	10.5	222.8	2.3	1.1

**Tab. A-8: Verhältnis verschiedener statistischer Größen nach der Interpolation zu den jeweiligen Größen der verwendeten Ertrags-Rohdatensätze für die Daten des Verfahrensvergleiches 'Rohdaten-Korrektur'**

<b>Rohdatensatz</b>	<b>Mittel</b> [%]	<b>Median</b> [%]	<b>CV</b> [%]	<b>2%-Quantil</b> [%]	<b>98%-Quantil</b> [%]	<b>Max.</b> [%]
A_B063_TB_1255	95	98	110	83	94	53
A_B_TB_1255	94	106	89	91	91	69
A_B065_TB_1255	95	98	110	82	94	53
A_B063_alle_1255	95	99	105	84	90	55
A_B063_TB_000	94	97	113	87	95	53

**Tab. A-9: Verhältnis der jeweiligen Krige-Varianz-Statistiken zu den Statistiken der Variante A\_B\_TB\_1255 bei Verwendung verschiedener Rohdatensätze (Verfahrensvergleich 'Rohdaten-Korrektur'; siehe Kap. 3.2.3.9 & Tab. A-7)**

<b>Rohdatensatz</b>	<b>Mittel</b> [%]	<b>Median</b> [%]	<b>CV</b> [%]	<b>2%-Quantil</b> [%]	<b>98%-Quantil</b> [%]	<b>Max.</b> [%]
A_B063_TB_1255	26.1	13.7	161.5	9.6	21.0	42.3
A_B_TB_1255	-	-	-	-	-	-
A_B065_TB_1255	27.3	14.8	159.0	10.8	22.0	43.2
A_B063_alle_1255	28.4	16.3	167.1	10.4	22.8	56.1
A_B063_TB_000	30.6	18.0	154.5	11.4	25.9	42.5

**Tab. A-10 Verhältnis der jeweiligen Krige-Varianz-Statistiken zu den Statistiken der Variante A\_B063\_TB\_000 bei Verwendung verschiedener Rohdatensätze (Verfahrensvergleich 'Rohdaten-Korrektur'; siehe Kap. 3.2.3.9 & Tab. A-7)**

<b>Rohdatensatz</b>	<b>Mittel</b> [%]	<b>Median</b> [%]	<b>CV</b> [%]	<b>2%-Quantil</b> [%]	<b>98%-Quantil</b> [%]	<b>Max.</b> [%]
A_B063_TB_1255	85.4	76.2	104.5	83.5	80.9	99.6
A_B_TB_1255	-	-	-	-	-	-
A_B065_TB_1255	89.2	82.2	102.9	94.0	84.8	101.6
A_B063_alle_1255	93.0	90.8	108.2	90.7	87.8	132.0
A_B063_TB_000	-	-	-	-	-	-

**Tab. A-11: Ergebnisse der Ertragsdaten-Interpolation aus dem Rohdatensatz A\_B063\_TB\_1255 (siehe Kap. 3.2.3.9) bei unterschiedlicher Verfahrensgestaltung: Ertragsschätzungen**

Verfahren	Block	Variogr.-Modell	Anzahl [-]	Mittel [dt*ha <sup>-1</sup> ]	Median [dt*ha <sup>-1</sup> ]	CV [%]	2%-Quantil [dt*ha <sup>-1</sup> ]	98%-Quantil [dt*ha <sup>-1</sup> ]	Max. [dt*ha <sup>-1</sup> ]
Block-Kriging	10x10 m	Sphärisch	18428	35.1	37.8	25	9.5	45.9	58.9
Block-Kriging	25x25 m	Sphärisch	18428	35.1	37.8	23	12.0	44.9	51.2
Block-Kriging	10x10 m	Exponentiell	18428	35.1	37.8	25	9.8	45.7	57.4
Punkt-Kriging	-	Sphärisch	18428	35.1	37.7	25	8.6	46.4	62.6

**Tab. A-12: Ergebnisse der Ertragsdaten-Interpolation aus dem Rohdatensatz A\_B063\_TB\_1255 (siehe Kap. 3.2.3.9) bei unterschiedlicher Verfahrensgestaltung: Krige-Varianzen**

Verfahren	Block	Variogr.-Modell	Anzahl [-]	Mittel [dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup> ]	Median [dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup> ]	CV [%]	2%-Quantil [dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup> ]	98%-Quantil [dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup> ]	Max. [dt <sup>2</sup> *ha <sup>-2</sup> ]	(Mittel) <sup>1/2</sup> [dt*ha <sup>-1</sup> ]	(Median) <sup>1/2</sup> [dt*ha <sup>-1</sup> ]
Block-Kriging	10x10 m	Sphärisch	18428	4.4	1.0	280	0.2	8.5	221.9	2.1	1.0
Block-Kriging	25x25 m	Sphärisch	18428	1.7	0.2	366	0.0	2.7	113.0	1.3	0.5
Block-Kriging	10x10 m	Exponentiell	18428	4.3	1.0	279	0.2	8.5	214.0	2.1	1.0
Punkt-Kriging	-	Sphärisch	18428	18.9	8.5	152	2.2	47.7	323.2	4.3	2.9

**Tab. A-13: Verhältnisse der Interpolationsdaten-Statistiken zur den Statistiken des Rohdatensatzes A\_B063\_TB\_1255 (siehe Kap. 3.2.3.9 & Tab. A-11)**

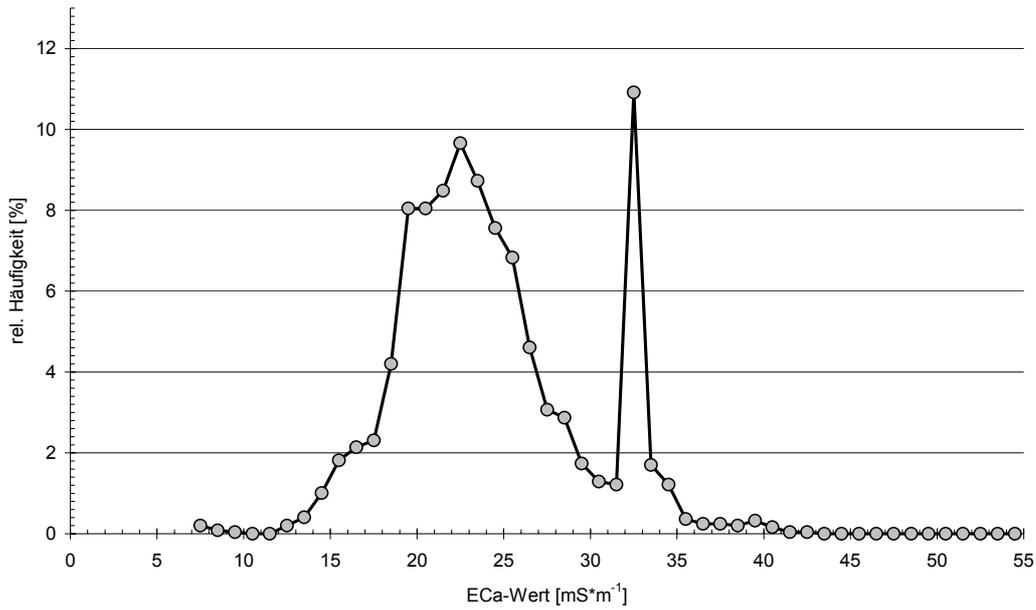
Verfahren	Block	Variogr.-Modell	Mittel [%]	Median [%]	CV [%]	2%-Quantil [%]	98%-Quantil [%]	Max. [%]
Block-Kriging	10x10 m	Sphärisch	95	98	110	83	94	53
Block-Kriging	25x25 m	Sphärisch	95	98	101	105	92	46
Block-Kriging	10x10 m	Exponentiell	95	98	109	85	93	52
Punkt-Kriging	-	Sphärisch	95	98	113	75	95	57

**Tab. A-14: Verhältnisse der jeweiligen Krige-Varianz-Statistiken zu den Statistiken der Verfahrens-Variante 'Punkt-Kriging' bei Anwendung unterschiedlicher Interpolationsverfahren (siehe Kap. 3.2.3.9 & Tab. A-12)**

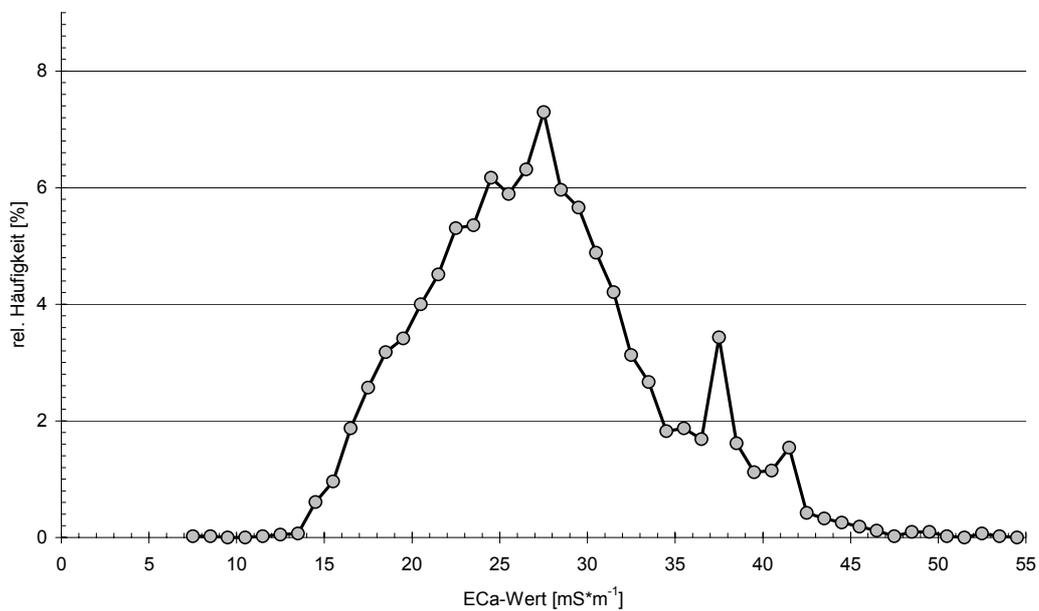
Verfahren	Block	Variogr.-Modell	Mittel [%]	Median [%]	CV [%]	2%-Quantil [%]	98%-Quantil [%]	Max. [%]
Block-Kriging	10x10 m	Sphärisch	23.4	11.7	183.6	9.8	17.8	68.7
Block-Kriging	25x25 m	Sphärisch	9.1	2.7	240.2	0.1	5.7	35.0
Block-Kriging	10x10 m	Exponentiell	22.7	11.9	183.3	10.8	17.7	66.2
Punkt-Kriging	-	Sphärisch	-	-	-	-	-	-

**Tab. A-15: Verhältnisse der jeweiligen Krige-Varianz-Statistiken zu den Statistiken der Verfahrens-Variante 'Block-Kriging / 10x10m / sphärisches Variogr.' bei Anwendung unterschiedlicher Interpolationsverfahren (siehe Kap. 3.2.3.9 & Tab. A-12)**

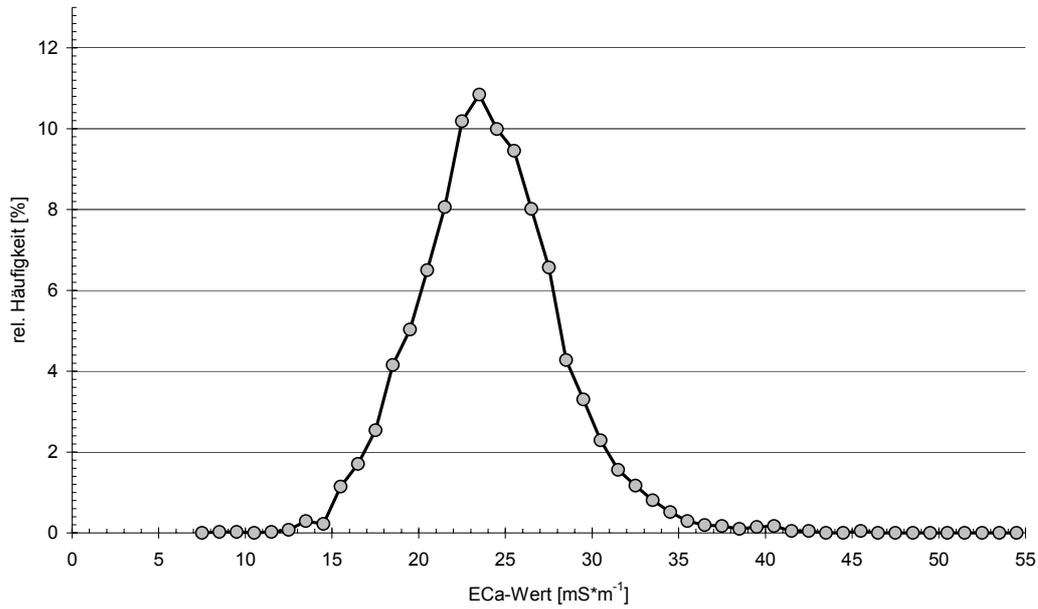
Verfahren	Block	Variogr.-Modell	Mittel [%]	Median [%]	CV [%]	2%-Quantil [%]	98%-Quantil [%]	Max. [%]
Block-Kriging	10x10 m	Sphärisch	-	-	-	-	-	-
Block-Kriging	25x25 m	Sphärisch	38.9	22.8	130.8	0.9	31.8	50.9
Block-Kriging	10x10 m	Exponentiell	97.0	102.3	99.8	110.5	99.3	96.4
Punkt-Kriging	-	Sphärisch	-	-	-	-	-	-



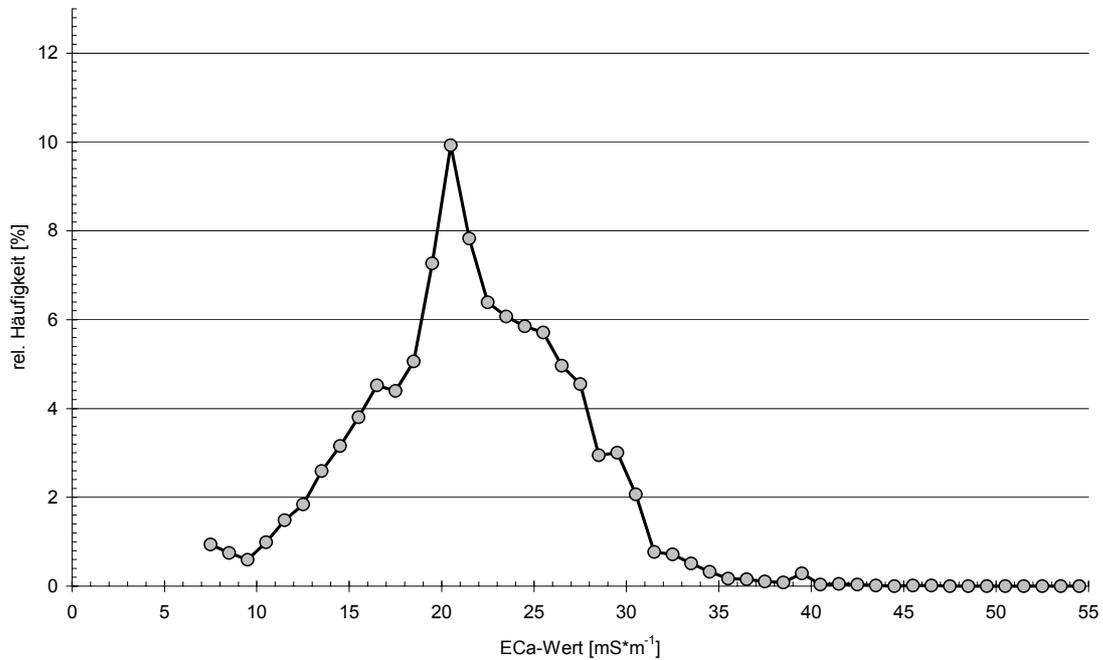
**Abb. A-5: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 600 im April 1999 (Schlitten-Messung, n = 2474)**



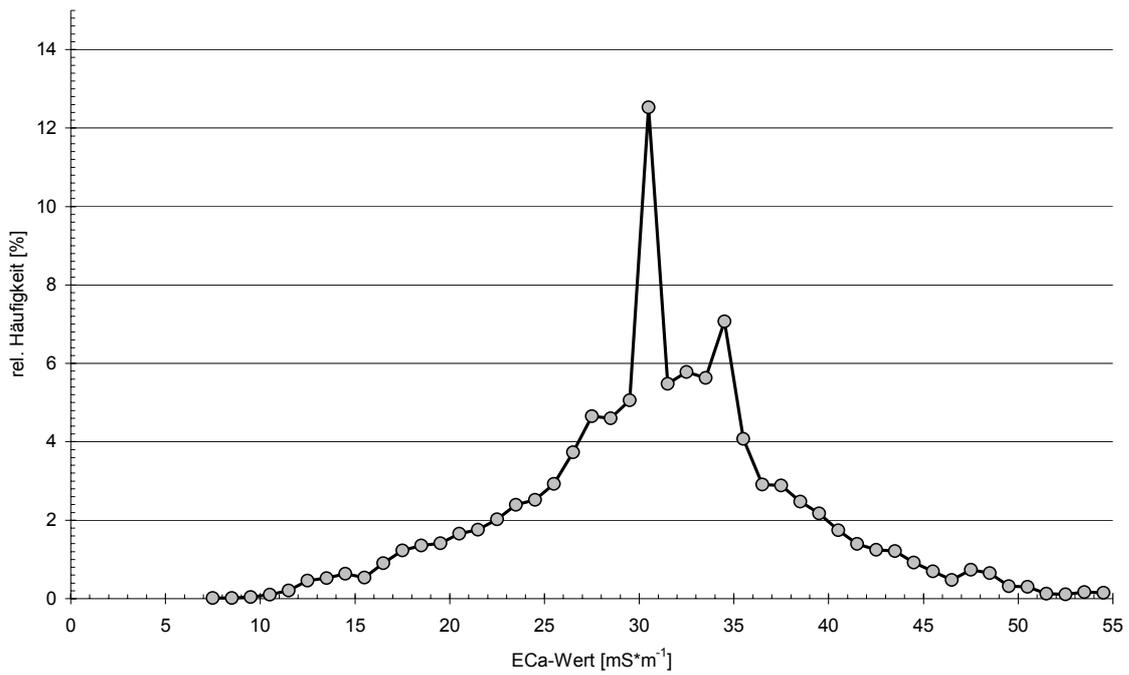
**Abb. A-6: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 1000 (südliche 50 ha) im April 1999 (Schlitten-Messung, n = 4278)**



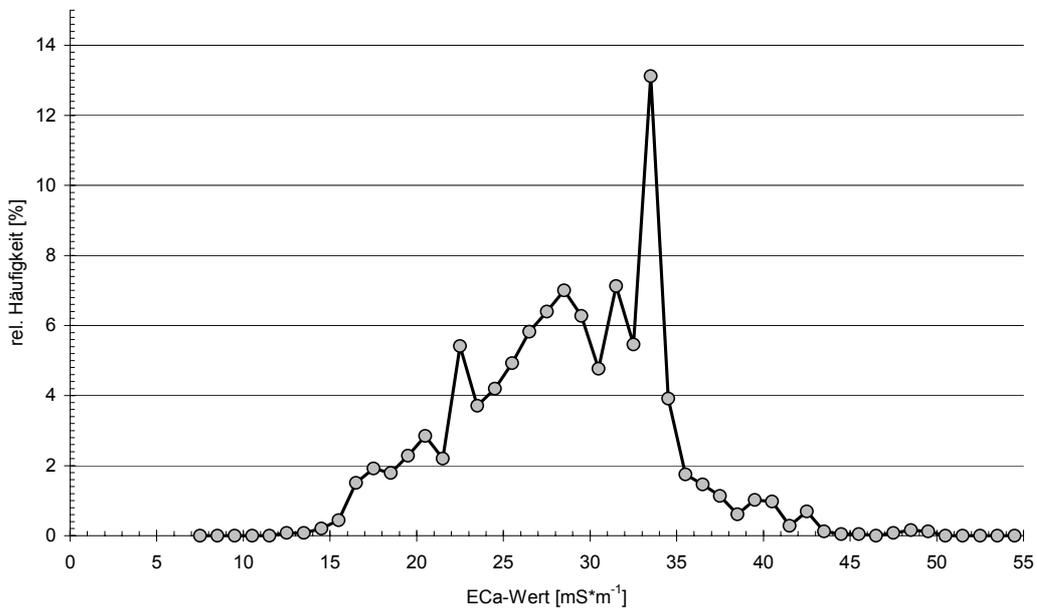
**Abb. A-7: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 1100 im April 1999 (Schlitten-Messung, n = 4094)**



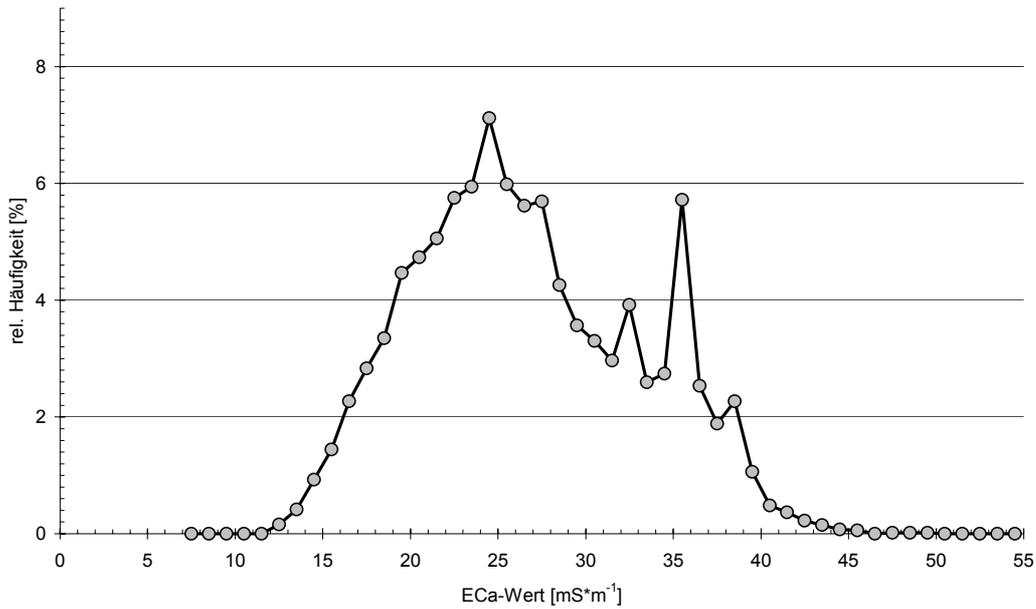
**Abb. A-8: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 101 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 5864)**



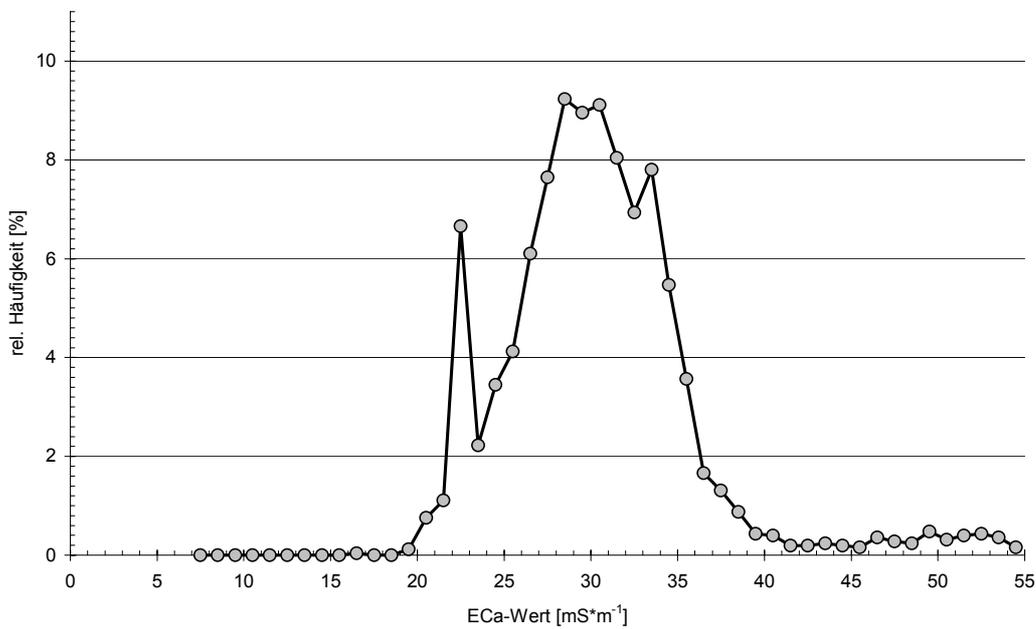
**Abb. A-9: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 200 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 11068)**



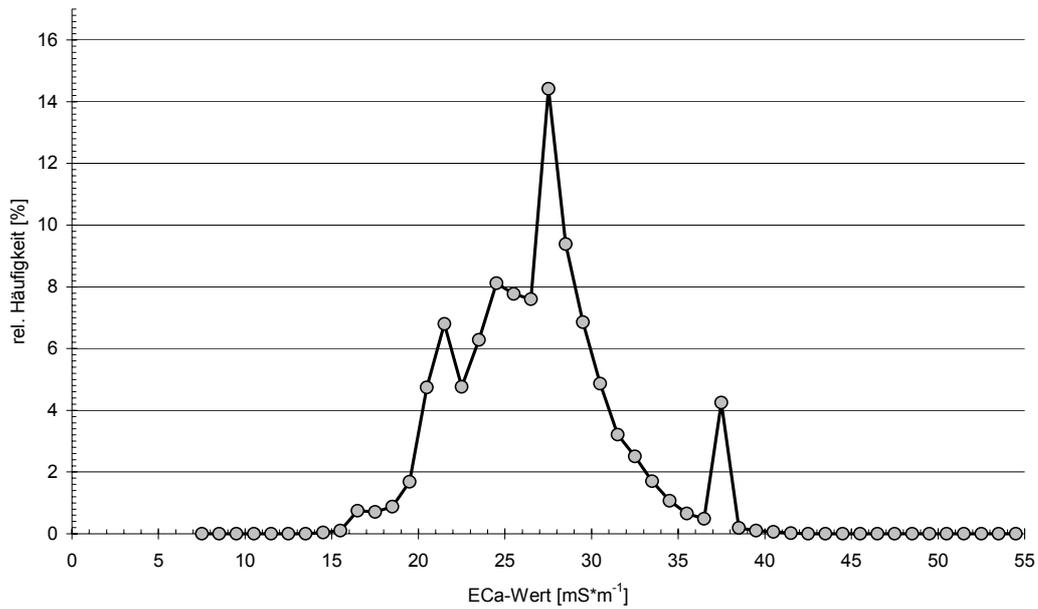
**Abb. A-10: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 501 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 2455)**



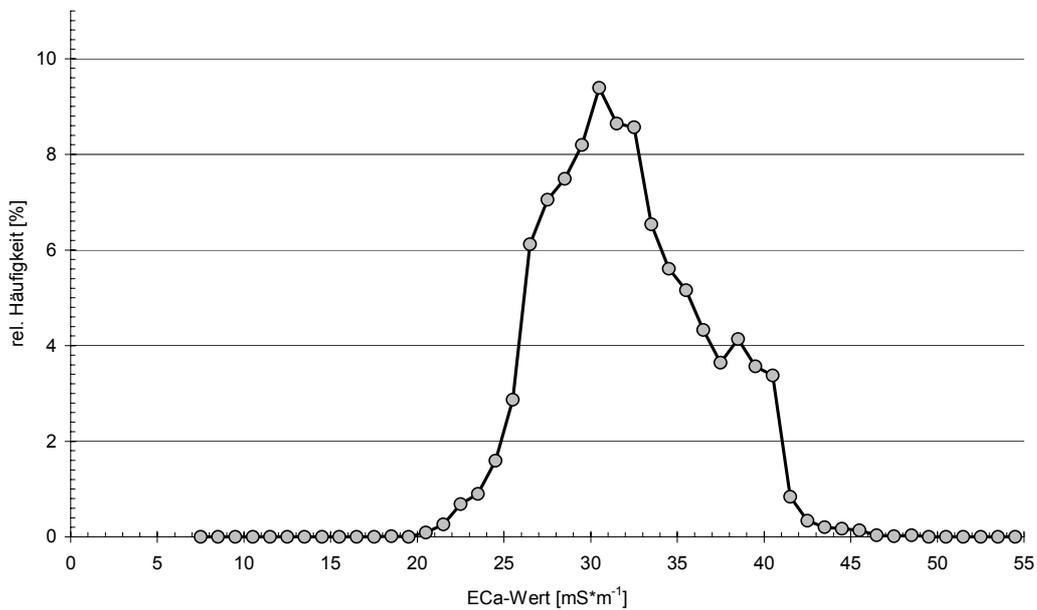
**Abb. A-11: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 1000 (nördliche 50 ha) im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 6782)**



**Abb. A-12: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 2000 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 2524)**



**Abb. A-13: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 2700 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 5223)**



**Abb. A-14: Häufigkeitsverteilung der Originaldaten der EM38-Messung auf dem Feld 3000 im März 2000 (Schlitten-Messung, n = 6453)**

**Tab. A-16: Allgemeine Statistiken der EC<sub>25</sub>-Kartenerstellung mittels Punkt- und Block-Kriging und einer Nächst-Nachbar-Zuordnung (siehe Kap. 3.4.3.4) bei unterschiedlicher Originaldaten-Filterung: EC<sub>25</sub>-Werte**

Datensatz (evtl. GIS-Filterung)	Daten- Filterung	Verfahren der Kartenerstellung	Anzahl [-]	Mittel [mS*m <sup>-1</sup> ]	Median [mS*m <sup>-1</sup> ]	CV [%]	Min. [mS*m <sup>-1</sup> ]	2%-Q. [mS*m <sup>-1</sup> ]	98%-Q. [mS*m <sup>-1</sup> ]	Max.
Originaldaten	keine	-	5005	26.94	27.76	20.8	6.89	15.08	38.59	49.43
Originaldaten	CV3 < 10%	-	4156	27.32	28.38	19.9	11.92	15.09	38.58	49.43
Rasterdaten	keine	NN-Zuordnung	18428	26.50	26.89	21.3	6.89	15.03	38.19	49.43
Rasterdaten	CV3 < 10%	NN-Zuordnung	18428	26.64	27.14	21.7	11.92	14.90	38.91	49.43
Rasterdaten (Modal)	CV3 < 10%	NN-Zuordnung	17865	26.50	27.00	21.3	13.00	15.00	38.00	47.00
Rasterdaten (Mittel)	CV3 < 10%	NN-Zuordnung	18428	26.10	26.76	19.0	5.51	15.18	35.47	42.69
Rasterdaten	keine	Punkt-Kriging	18428	26.52	26.99	19.4	11.49	15.40	37.19	48.89
Rasterdaten	keine	Block-Kriging (10x10)	18428	26.52	27.00	19.1	12.79	15.56	37.08	47.67
Rasterdaten	CV3 < 10%	Punkt-Kriging	18428	26.62	27.03	19.4	12.86	15.50	37.37	49.21
Rasterdaten (Modal)	CV3 < 10%	Punkt-Kriging	17725	26.45	27.00	18.9	13.00	15.00	36.00	47.00
Rasterdaten	CV3 < 10%	Block-Kriging (10x10)	18428	26.62	27.05	19.1	13.11	15.66	37.26	48.59

**Tab. A-17: Verhältnis von verschiedenen statistischen Kenngrößen der auf unterschiedliche Weise erstellten Rasterkarten zu den jeweils verwendeten EC<sub>25</sub>-Originaldatensätzen**

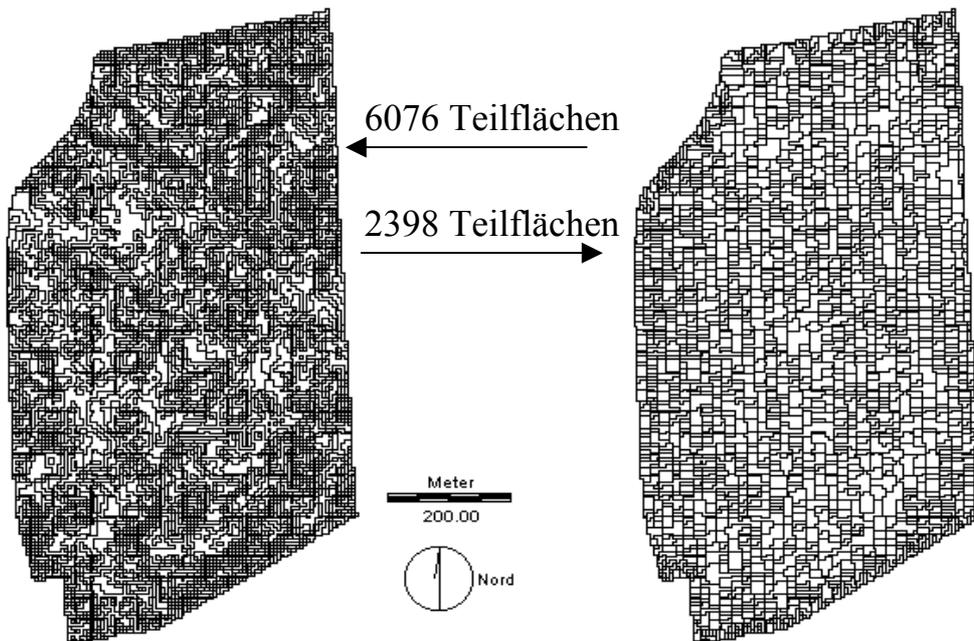
Datensatz	Daten-Filterung	Verfahren der Kartenerstellung	Mittel	Median	CV	Min. [%]	2%-Q.	98%-Q.	Max.
Rasterdaten	keine	NN-Zuordnung	98.4	96.9	102.3	100.0	99.7	99.0	100.0
Rasterdaten	CV3 < 10%	NN-Zuordnung	97.5	95.6	108.7	100.0	98.7	100.8	100.0
Rasterdaten	keine	Punkt-Kriging	98.4	97.2	93.5	166.7	102.1	96.4	98.9
Rasterdaten	keine	Block-Kriging (10x10)	98.4	97.3	92.1	185.6	103.2	96.1	96.4
Rasterdaten	CV3 < 10%	Punkt-Kriging	97.4	95.3	97.3	107.9	102.7	96.8	99.6
Rasterdaten	CV3 < 10%	Block-Kriging (10x10)	97.4	95.3	96.0	110.0	103.7	96.6	98.3

**Tab. A-18: Allgemeine Statistiken der EC<sub>25</sub>-Kartenerstellung mittels Punkt- und Block-Kriging (siehe Kap. 3.4.3.4) bei unterschiedlicher Originaldaten-Filterung: Krige-Varianzen**

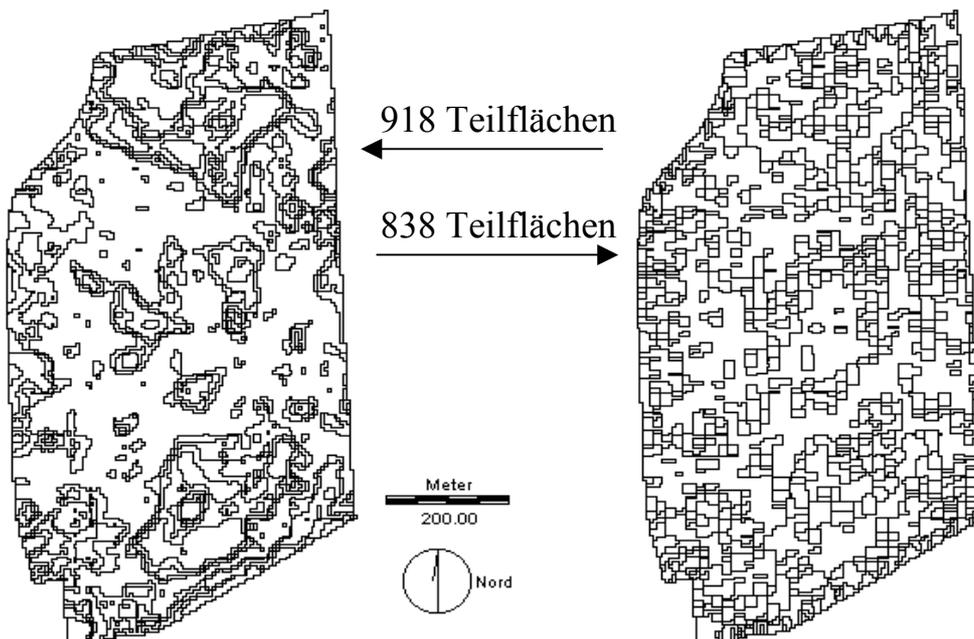
Datensatz	Daten-Filterung	Verfahren der Kartenerstellung	Mittel	Median	Min. [mS <sup>2</sup> *m <sup>-2</sup> ]	2%-Q.	98%-Q.	Max.
Rasterdaten	keine	Punkt-Kriging	6.17	4.87	0.08	1.91	11.80	59.84
Rasterdaten	keine	Block-Kriging (10x10)	1.64	1.19	0.05	0.53	2.89	33.80
Rasterdaten	CV3 < 10%	Punkt-Kriging	5.58	4.49	0.03	1.78	10.69	42.04
Rasterdaten	CV3 < 10%	Block-Kriging (10x10)	1.90	1.31	0.05	0.51	3.61	28.39

**Tab. A-19: Verhältnis von verschiedenen statistischen Kenngrößen der Krige-Varianzen bei Verwendung des CV3-gefilterten Originaldatensatzes zu den Krige-Varianzen bei Verwendung des ungefilterten Originaldatensatzes zur E.Ca<sub>25</sub>-Karten-Interpolation mit zwei Kriging-Verfahren**

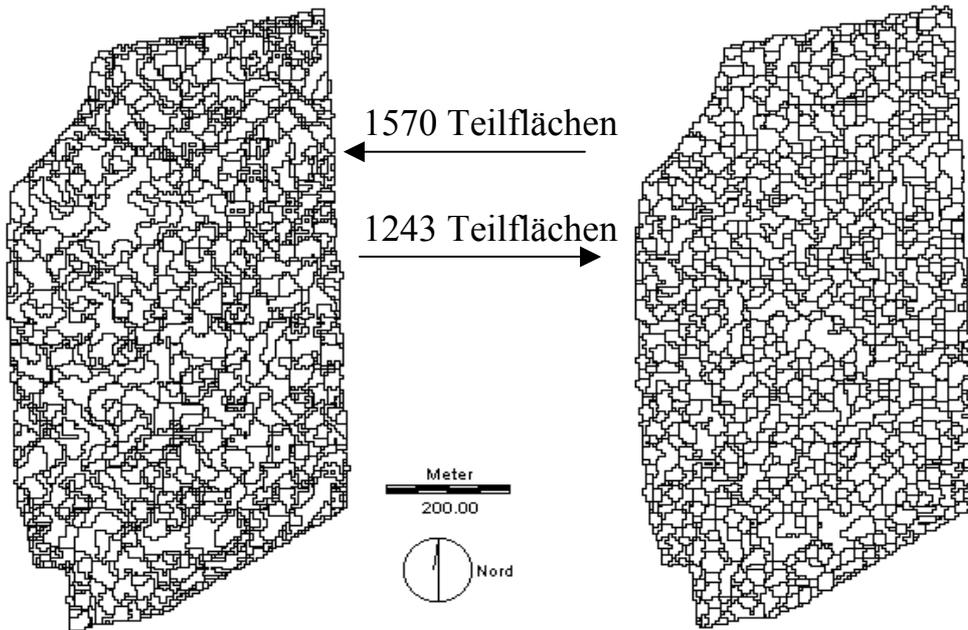
Datensatz	Daten-Filterung	Verfahren der Kartenerstellung	Mittel	Median	Min .	2%-Q.	98%-Q.	Max.
						[%]		
Rasterdaten	CV3 < 10%	Punkt-Kriging	90.4	92.2	38.1	93.1	90.6	70.3
Rasterdaten	CV3 < 10%	Block-Kriging (10x10)	116.2	110.4	113.5	96.8	125.0	84.0



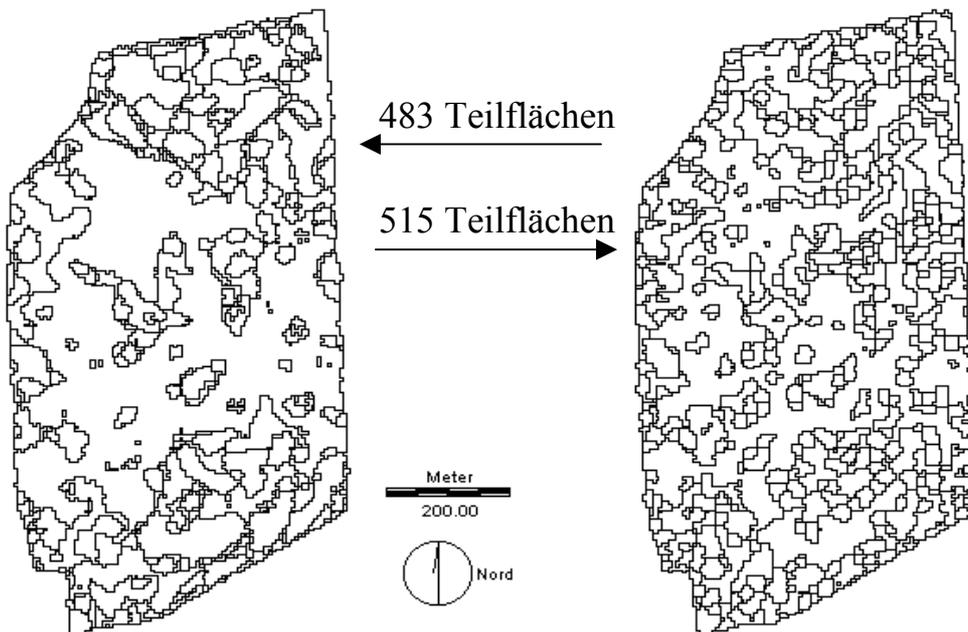
**Abb. A-15: Grenzlinien der EC<sub>a25</sub>-Teilflächen für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts) und anschließender Vektorisierung der Unterschiede von 1 mS\*m<sup>-1</sup> (siehe auch Abb. 32)**



**Abb. A-16: Grenzlinien der EC<sub>a25</sub>-Teilflächen für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts), Klassifizierung der Rasterdaten (Tab. 17) und anschließender Vektorisierung der Unterschiede von 1 mS\*m<sup>-1</sup> (siehe auch Abb. 40)**



**Abb. A-17: Grenzlinien der ECa<sub>25</sub>-Teilflächen für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts), 5x5 Modalfilterung der Rasterdaten und anschließender Vektorisierung der Unterschiede von 1 mS\*m<sup>-1</sup> (siehe auch Abb. 37)**



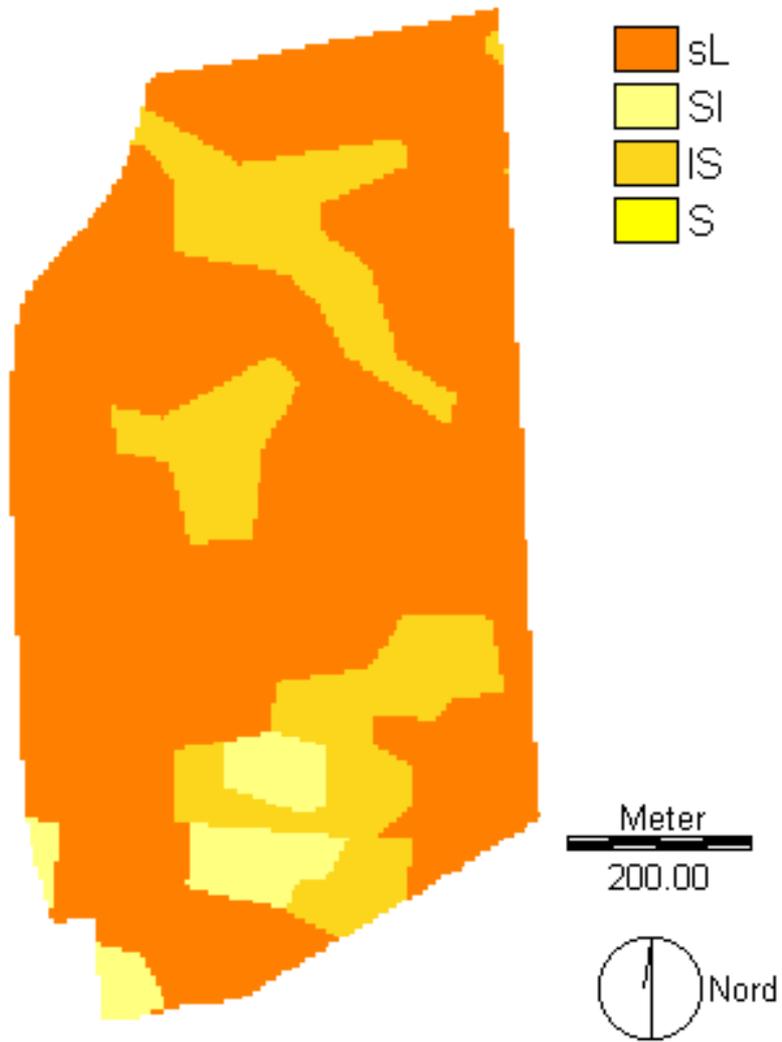
**Abb. A-18: Grenzlinien der ECa<sub>25</sub>-Teilflächen für das Feld 2600 (46 ha): Kartenerstellung durch Punkt-Kriging-Interpolation (links) und NN-Zuordnung (rechts), 5x5 Modalfilterung und Klassifizierung der Rasterdaten (Tab. 17) und anschließender Vektorisierung der Unterschiede von 1 mS\*m<sup>-1</sup> (siehe auch Abb. 41)**

**Tab. A-20: Prozentualer Anteil der Bildpunkte der überwachten Luftbild-Klassifikation (Spalten) in den jeweiligen Klassen alternativer Verfahren der Klassifikation (Zeilen) für eine Luftbildaufnahme des Feldes '3300' vom 18.7.2001 (siehe auch Abb. 52 bis Abb. 56; alle Klassifikationskarten wurden mit einer 5x5-Modalfilterung generalisiert)**

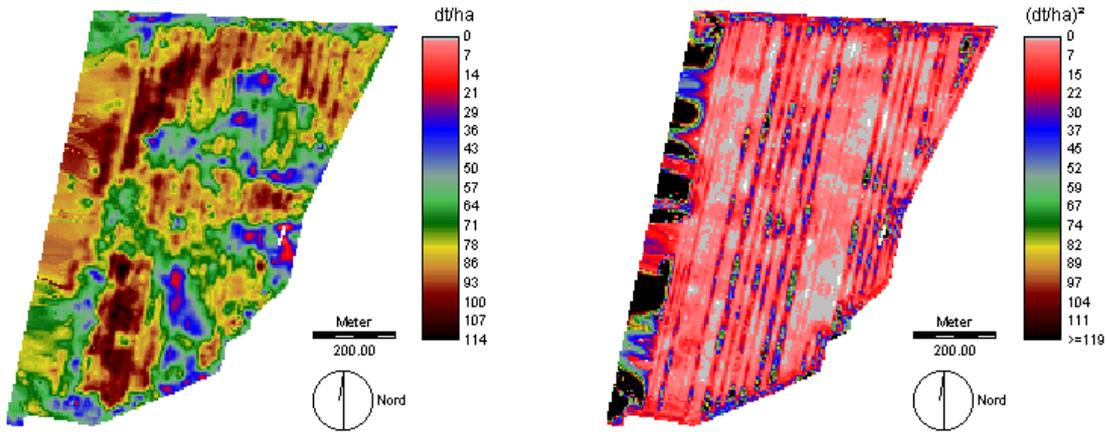
Alternative Methode der Klassifikation	Bezeichnung der Klasse	Bezeichnung der Klasse der überwachten Klassifikation					Gesamtfläche [ha]
		'Boden'	'braun'	'hellgrün'	'grün'	'dunkelgrün'	
manuell	braun	7.6	50.3	41.6	0.1	0.3	53.3
	hellgrün	2.6	2.1	58.6	33.1	3.7	
	dunkelgrün	0.1	0.0	3.2	82.2	14.5	
Q-20-Methode (Modalfilterung)	1-20 %	3.1	38.7	56.2	1.7	0.3	52.1
	21-40 %	0.0	0.3	70.3	28.0	1.5	
	41-60 %	0.0	0.0	4.0	92.4	3.6	
	61-80 %	0.0	0.0	0.4	95.5	4.1	
	81-100 %	0.1	0.0	0.4	63.5	36.0	
Q-10-Methode (Modalfilterung)	1-10 %	5.3	57.4	36.1	0.8	0.5	51.9
	11-20 %	0.0	14.3	82.6	2.9	0.3	
	21-30 %	0.0	0.9	89.1	8.4	1.6	
	31-40 %	0.0	0.1	40.7	58.0	1.3	
	41-50 %	0.0	0.0	12.2	84.7	3.0	
	51-60 %	0.0	0.0	1.8	93.7	4.5	
	61-70 %	0.0	0.0	0.7	93.2	6.1	
	71-80 %	0.0	0.0	0.4	95.1	4.6	
	81-90 %	0.0	0.0	0.6	90.3	9.0	
91-100 %	0.0	0.0	0.7	43.1	56.2		

**Tab. A-21: Feld-spezifische lineare Korrelationskoeffizienten (r) zwischen den NDVI-Rasterwerten der Jahre 1997 und 1998, sowie Umfang der Stichprobe und Bestimmtheitsmaß (P - Populationsorte; H - Hybridsorte)**

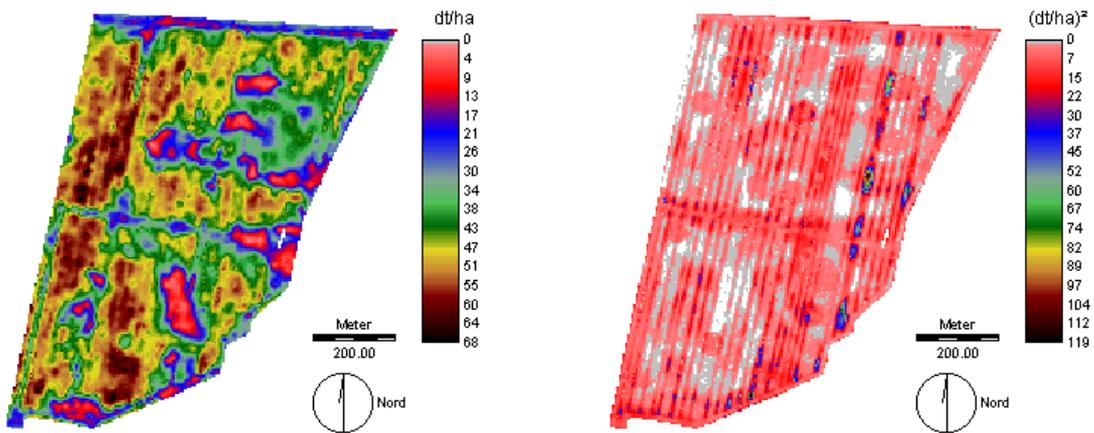
Feldnummer	Fruchtart 1997	Fruchtart 1998	r	n	R <sup>2</sup>
2502	Winterroggen (H)	Winterraps	0.89	132	0.80
1400-1	Winterroggen (P)	Winterroggen (P)	0.84	296	0.71
1400-2	Winterroggen (P)	Winterroggen (P)	0.84	346	0.71
3400	Winterroggen (H)	Winterraps	0.80	431	0.64
1700	Winterroggen (P)	Winterroggen (P)	0.74	571	0.55
4001	Winterroggen (P)	Winterroggen (P)	0.64	345	0.41
1500	Mais	Winterroggen (P)	0.61	143	0.37
902	Winterroggen (H)	Winterroggen (H)	0.60	312	0.37
2300	Stilllegung	Stilllegung	0.55	217	0.31
700	Sommergerste	Winterraps	0.55	686	0.31
1400-3	Winterroggen (P)	Winterroggen (P)	0.54	59	0.29
2501-1	Winterraps	Winterweizen	0.53	72	0.28
1100	Wintergerste	Winterroggen (H)	0.50	601	0.25
800	Winterraps	Winterroggen (H)	0.49	594	0.24
4200	Winterroggen (P)	Winterroggen (P)	0.47	357	0.22
101	Winterweizen	Wintergerste	0.46	556	0.22
1601	Winterroggen (P)	Winterraps	0.45	323	0.20
1900	Winterraps	Winterroggen (P)	0.45	722	0.20
3800	Winterroggen (P)	Winterraps	0.44	404	0.20
1300	Winterweizen	Wintergerste	0.40	113	0.16
1200	Kartoffel	Mais	0.39	761	0.15
2700	Sommergerste	Winterweizen	0.37	586	0.13
2000	Winterweizen	Winterweizen	0.35	526	0.13
2600	Erbse	Wintergerste	0.35	514	0.12
2900	Sommergerste	Zuckerrübe	0.34	493	0.12
300	Zuckerrübe	Mais	0.33	744	0.11
4301	Erbse	Wintergerste	0.33	898	0.11
3300	Winterroggen (H)	Kartoffel	0.32	594	0.11
3200	Winterroggen (H)	Winterraps	0.31	277	0.10
4303	Stilllegung	Mais	0.27	44	0.07
500-2	Winterroggen (H)	Wintergerste	0.16	164	0.02
3100	Winterroggen (H)	Wintergerste	0.15	507	0.02
2501-2	Winterraps	Winterweizen	0.14	146	0.02
2101	Mais	Wintergerste	0.13	255	0.02
2400-2	Mais	Winterweizen	0.07	283	0.00
2800	Mais	Winterroggen (H)	0.00	104	0.00
400	Lein	Zuckerrübe	0.00	894	0.00
1800	Stilllegung	Stilllegung	-0.06	214	0.00
2102-2	Winterraps	Winterroggen (H)	-0.08	178	0.01
2400-1	Mais	Winterweizen	-0.08	30	0.01
1000	Wintergerste	Kartoffel	-0.09	1100	0.01
500-1	Winterroggen (H)	Wintergerste	-0.15	166	0.02
600	Winterweizen	Wintergerste	-0.16	428	0.02
901	Mais	Wintergerste	-0.20	170	0.04
200	Mais	Winterweizen	-0.28	1095	0.08
102	Zuckerrübe	Erbse	-0.30	417	0.09
4302-1	Stilllegung	Mais	-0.31	82	0.10
3000	Kartoffel	Winterweizen	-0.35	1078	0.12
4302-2	Stilllegung	Mais	-0.42	82	0.18
2102-1	Winterraps	Winterroggen (H)	-0.51	214	0.26



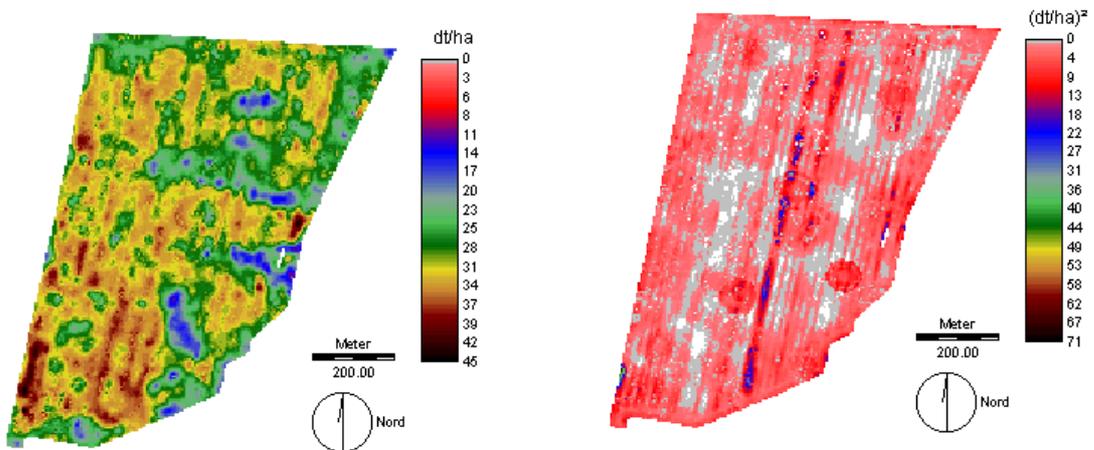
**Abb. A-19: Karte der RBS-Bodenarten für das Feld 2600 (46 ha)**



**Abb. A-20: Interpolierte Ertragskarte und Karte der Krige-Varianzen für das Feld 3300 (54 ha) für das Jahr 1999 (Winterweizen)**



**Abb. A-21: Interpolierte Ertragskarte und Karte der Krige-Varianzen für das Feld 3300 (54 ha) für das Jahr 2000 (Winterweizen)**



**Abb. A-22: Interpolierte Ertragskarte und Karte der Krige-Varianzen für das Feld 3300 (54 ha) für das Jahr 2001 (Körnererbse)**

**Tab. A-22: F-Quotienten der einfaktoriellen Varianzanalyse von Ertragsdaten aus drei Jahren von dem Feld '3300' mit den Informationen der RBS als Faktoren**

Erntejahr	Fruchtart	Faktor der Varianzanalyse		
		Bodenart	Bodenzahl	Teilflächen-Nr.
1999	Winterweizen	84	57	22
2000	Winterweizen	83	51	20
2001	Erbse	65	39	17

**Tab. A-23: F-Quotienten der einfaktoriellen Varianzanalyse von Ertragsdaten aus drei Jahren von dem Feld '3300' mit den Bezeichnungen der verschiedenen Methoden der Luftbild-Klassifikation als Faktoren**

Jahr	Fruchtart	Faktor der Varianzanalyse						
		manuell	über- wacht	über- wacht (Filter)	Q-10	Q-10 (Filter)	Q-20	Q-20 (Filter)
1999	WW	350	126	180	69	85	128	183
2000	WW	300	137	187	76	98	153	192
2001	Erbse	170	82	99	46	48	92	99

**Tab. A-24: F-Quotienten der einfaktoriellen Varianzanalyse von Ertragsdaten aus drei Jahren von dem Feld '3300' mit den Informationen der RBS<sub>LB</sub> als Faktoren (Grenzlinien der Teilflächen auf der Grundlage von Luftbild-Informationen nachträglich geändert)**

Erntejahr	Fruchtart	Faktor der Varianzanalyse		
		Bodenart	Bodenzahl	Teilflächen-Nr.
1999	Winterweizen	147	93	38
2000	Winterweizen	151	91	40
2001	Erbse	96	59	31

## **Danksagung**

Ich danke Herrn Prof. Dr. Brunk Meyer für den Vorschlag des Themas, die damit verbundenen lehrreichen und vielseitigen Diskussionen und die mir zuteil gewordene Unterstützung bei der Anfertigung der Dissertation.

Den Geschäftsführern der Nuthequelle GmbH Herrn Siegfried Schütze und Herrn Günther Vikum sowie allen Mitarbeitern danke ich für die unkomplizierte Zusammenarbeit und die stets gewährte 'Narrenfreiheit' im Rahmen des alltäglichen Arbeitsablaufes. Für meine nie enden wollenden wissenschaftlichen Sonderwünsche und die über fast alle Felder verstreuten Profilgruben und weißen Markierungsstangen, die ich für die Durchführung einer solchen Arbeit in einem Marktfrucht-Betrieb als unerlässlich erachtete, fand ich großes Verständnis.

Dr. Reinhold Roth und Dr. Klaus-Wenzel Becker haben mich bei der konkreten Gestaltung von Untersuchungen und der Bewältigung auftretender Probleme zu allen Zeiten unterstützt, wofür ich ihnen meinen Dank aussprechen möchte. Ihre vieljährige Vertrautheit mit den Alltäglichkeiten der landwirtschaftlich-bodenkundlichen Forschung haben geholfen, bei all den Details auch immer an das 'große Ganze' zu denken.

Stellvertretend für die gewährte Unterstützung durch die Mitarbeiter des Instituts für Bodenwissenschaften der Universität Göttingen möchte ich mich bei Susanne Richter bedanken. Ihre diversen mehrtägigen Aufenthalte im Fläming, ihre Verlässlichkeit, ihr konstruktives Mitdenken sowie nicht zuletzt ihre hilfsbereite, fröhlich-unkomplizierte Art haben mir den Einstieg in die bodenkundliche Forschung und viele der umfangreichen Bodenkartierungen in den ersten Untersuchungsjahren stark erleichtert. Susanne danke ich auch für Ihre Nachsicht in der Endphase der Arbeit und die durch sie begründete Motivation, endlich fertig zu werden.

Besonderer Dank geht auch an Sigfried Ehlert für ihre Hilfe bei meinen ersten Gehversuchen in der Welt der Geographischen Informationssysteme im Herbst 1998. Stellvertretend für die übrigen Mitarbeiter des Instituts für Landnutzungssysteme und Landschaftsökologie des ZALF e.V. Müncheberg, die zu unterschiedlichen Terminen bei der Probenahme oder -aufbereitung geholfen haben, danke ich Gunhild Rosner. Sie hat fast alles möglich gemacht, so kurzfristig und kompliziert es auch war.

Sibylle Itzerott und Stefan Erasmi waren verlässliche Ansprechpartner bei den verschiedensten Fragen zur Fernerkundung.

## Lebenslauf

Name: Eike Stefan Dobers  
Geburtstag und -ort: 13.1.1971, Neumünster  
Eltern: Hans-Jürgen und Gunhild Dobers

1976 - 1981: Wippendorf Grundschule Neumünster

1981 - 1990: Klaus-Groth-Gymnasium Neumünster  
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

1990 - 1992: Zivildienst in Zeven/Bademühlen und Neumünster

1992: Landwirtschaftliche Praktikantenausbildung (½ Jahr)

1992 - 1994: Grundstudium der Agrarwissenschaften an der  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Abschluss: Vordiplom

1994 - 1995: Landwirtschaftliche Praktikantenausbildung (1 Jahr)

1995 - 1998: Hauptstudium Agrarwissenschaften (Fachrichtung: Pflanzenproduktion) an  
der Georg-August-Universität zu Göttingen  
Abschluss: Diplom

seit Okt. 1998: Betreuung des brandenburgischen Landesprojekt  
"Reduzierte Bodenbearbeitung" als wissenschaftlicher Angestellter  
der Nuthequelle GmbH in Niedergörsdorf

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und keine weiteren als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen verwendet habe.

Jüterbog, im Mai 2002