

**Methodische Probleme bei der Erstellung von
Unkrautverteilungskarten mit
Geoinformationssystemen (GIS)**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität

zu Bonn

vorgelegt am 26. Oktober 2004

von

Dipl.-Ing. agr. Matthias Bernhard Backes

aus Bonn

Referent: Prof. Dr. L. Plümer
Koreferenten: Prof. Dr. W. Kühbauch
Prof. Dr.-Ing. D. Morgenstern
Tag der mündlichen Prüfung: 07. Januar 2005

Erscheinungsjahr: 2005

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

*Sammelt zuerst das Unkraut und bindet es in Bündel, um es zu verbrennen;
den Weizen aber bringt in meine Scheune.*

Mt 13, 30

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit den methodischen Problemen, die bei der Erstellung von Unkrautverteilungskarten mit Geoinformationssystemen (GIS) auftreten können. Im Vordergrund steht dabei die Frage nach der Repräsentativität der erfaßten Unkrautdaten und der daraus erstellten Verteilungskarten für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle.

Zur Erstellung von Unkrautverteilungskarten werden Unkräuter heutzutage mit Hilfe manueller oder bildanalytischer Verfahren stichprobenhaft erfaßt. Dabei werden sie in Zählflächen definierter Größe gezählt. Diese Stichprobe wird als repräsentativ für eine Referenzfläche erachtet. Dabei wird außer Acht gelassen, daß die Probenahme mit einer angemessen großen Anzahl von Zählflächen bereits vor 100 Jahren in der *Pflanzensoziologie* bzw. später auch im *Integrierten Pflanzenschutz*, ausschließlich der Bestimmung der mittleren Häufigkeiten einer Spezies in einem Areal diente. In Rahmen der *teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle* wird nur eine einzige Stichprobe herangezogen, um das Unkrautvorkommen innerhalb einer Teilfläche zu bestimmen. Daß dieses Vorgehen nicht zu zufriedenstellenden Verteilungskarten führt, wird in dieser Arbeit am Beispiel einer GIS-basierten Analyse verdeutlicht.

Aus den stichprobenhaft erfaßten Daten werden durch Interpolation in einem GIS Unkrautverteilungskarten erstellt. Bei dieser Transformation *vom Punkt zur Fläche* entstehen unterschiedliche Probleme bei der Wahl eines Interpolationsverfahrens vor dem Hintergrund seiner Anforderungen an die Eingangsdaten. In dieser Arbeit werden daher verschiedene Interpolationsverfahren, die in der Unkrautforschung verwendet werden, im Hinblick auf ihre Eignung für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle studiert.

Da die Frage nach der Repräsentativität der Stichproben für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle ohne die genaue Kenntnis der Grundgesamtheit nicht zweifelsfrei zu beantworten ist, wurde im Rahmen dieser Studie ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, einen präzisen Einblick in die Grundgesamtheit der Unkräuter auf einer Ackerfläche und die Genauigkeit der stichprobenhaften Datenerfassung für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle zu erhalten. Mit Hilfe eines Prototyps (WEEDSCANNER) zur hochauflösenden Erfassung von Unkräutern wurden auf mehreren Teilflächen detaillierte Verteilungskarten erstellt. In dieser Arbeit werden - basierend auf diesen Daten - Analysen zur Genauigkeit der stichprobenhafter Datenerfassung vorgestellt, die mit einer eigens dazu konzipierten GIS-Software (SAMPLING SIMULATOR) durchgeführt werden können. In diesem Zusammenhang wird demonstriert, daß eine adäquate, teilflächenspezifische Unkrautkontrolle erst bei Erfassungsgenauigkeiten gelingt, die mit manuellen Verfahren nicht zu realisieren sind. Es wird jedoch auch gezeigt, daß mit der Erfassungsgenauigkeit bildanalytischer Verfahren der Datenerhebung hinreichend gute Resultate erzielt werden.

Um die Schwierigkeiten beim Umgang mit Unkrautdaten vor ihrer eigentlichen Analyse zu verringern, wird außerdem ein Metadatenprofil nach dem ISO 19115 Standard vorgestellt, welches dabei helfen soll, Daten aus der Präzisionslandwirtschaft nachhaltig sichern, dokumentieren, beschreiben und verwalten zu können. Dies ist vor dem Hintergrund steigender Auslagerungen von Arbeitsprozessen zu Dienstleistern und der im kommenden Jahr in Kraft tretenden Dokumentationspflicht des Produktionsprozesses notwendig.

In dieser Arbeit wird der Nachweis erbracht, daß die heute verwendeten *offline*-Verfahren der Unkrautdatenerfassung den Anforderungen des *Präzisen Pflanzenbaus* nicht genügen. Außerdem wird mit dem WEEDSCANNER ein Werkzeug zur halbautomatischen, präzisen Erfassung der Grundgesamtheit einer Unkrautpopulation vorgestellt.

Abstract

This study discusses the methodical problems which occur during the process of generating weed distribution maps in geoinformation systems (GIS). Particular attention will be paid to the question of whether or not the weed sampling data and the weed distribution maps for site-specific weed control are sufficiently representative.

Manual or image-processing sampling procedures are applied in order to generate weed distribution maps. In these procedures weeds are counted in counting areas of a defined size distinguishing between different weed species. The samples gathered in this way are treated as being sufficiently representative for the specific site in question. This does not take into account the fact that the sampling procedure with a counting area or quadrat is transferred to site-specific weed control from *plant sociology* and *integrated pest management* which use this strategy for 100 years in order to estimate the mean frequencies of a species in a certain area. The number of samples in these particular strategies is chosen high enough to estimate the mean frequencies adequately. In *site-specific weed control* there is only one single sample taken for a reference area. This procedure can lead to non-representative, ambiguous weed distribution maps, which will be demonstrated by applying a GIS-based analysis.

Spatial interpolation processes in a GIS are applied in order to be able to produce weed distribution maps from the sampling data. Whilst this transformation from discrete sampling data to a continuous surface takes place, several problems occur during the choice of an interpolation method depending on its requirements towards the sampling data. In this study the interpolation methods recently used in weed research will be analysed and described in the context of site-specific weed control.

Recent methods of data acquisition and weed mapping so far can only be assessed by uncertain knowledge applying sampling data. Hence, in this study a new method was implemented which offers a detailed picture of the precision of recently applied sampling procedures for site-specific weed control. A prototype was constructed, (WEEDSCANNER) in order to detect weeds at a high resolution for a detailed analysis of some arable fields applying digital camcorders. Based on the resulting high resolution weed distribution maps several detailed studies have been conducted in this work.

A custom GIS-software (SAMPLING SIMULATOR) was developed in this study in order to be capable of calculating the errors of a sampling procedure based on the above described high resolution datasets or simulated populations. It will be demonstrated that manual weed sampling methods cannot lead to weed distribution maps which adequately represent the true weed distribution in the arable field. Nevertheless, it will also be shown that image-processing methods of sampling prove reliable results.

In order to minimize methodical problems during the working process with weed survey datasets a metadata profile conforming to ISO 19115 metadata standard for geospatial data was drafted. This profile will improve the sustainability of data and their administration. With regard to the outsourcing of production processes to agricultural service providers and the stipulated documentation of the production process in agriculture in the next year it will be vital to implement metadata management.

Objective evidence for the insufficiency of recently applied *offline*-methods of weed sampling for site-specific weed control is provided in this study. Besides, with the WEEDSCANNER a tool for the semi-automatic precise detection of the basic population of weeds in an arable field is introduced.

Inhaltsverzeichnis

Glossar	8
Verwendete Abkürzungen	8
Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	13
1 Einleitung	15
1.1 Unkräuter in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion	15
1.2 Präziser Pflanzenbau - Precision Farming	16
1.2.1 Teilflächenspezifische Unkrautkontrolle	19
1.3 Fragestellungen dieser Arbeit	21
2 Datenerfassung	23
2.1 Verfahren der Datenerfassung	23
2.1.1 Manuelle Verfahren	23
2.1.2 Bildanalytische Verfahren	25
2.1.3 Fernerkundung	26
2.2 Repräsentativität manueller Verfahren der Datenerfassung	27
2.2.1 Datengrundlage	27
2.2.2 Analyse der Daten in GIS	30
2.2.3 Ergebnisse des Verfahrensvergleichs	31
3 Datenmanagement	36
3.1 Metadaten	36
3.1.1 Metadaten in Geoinformationssystemen	37
3.1.1.1 Metadatenstandards	37
3.1.2 Metadatenprofil (ISO 19115) für die Präzisionslandwirtschaft	38
4 Interpolation und Kartierung	44
4.1 Interpolationsverfahren	44
4.1.1 Deterministische Verfahren der Interpolation	45
4.1.1.1 Lineare Triangulation	46
4.1.1.2 Natural Neighbors Interpolation	50
4.1.1.3 Inverse Distance Weighting	52
4.1.2 Geostatistische Verfahren	54
4.1.2.1 Semivariogrammanalyse	54

	7
4.1.2.2	Kriging 57
4.1.3	Bewertung der Interpolationsverfahren für die teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle 61
4.2	Generierung von Bewirtschaftungszonen 66
4.2.1	Klassifizierung der Unkrautdichte mit Schadensschwellen 66
5	Hochauflösende Erfassung, Kartierung und Bewertung 70
5.1	Versuchsstandort Klein-Altendorf 70
5.2	Hochauflösende Unkrauterfassungen mit digitalen Camcordern 71
5.2.1	WeedScanner - Aufbau und Prinzip des Prototyps 71
5.2.1.1	Verwendete Camcorder 73
5.2.1.2	Bestimmung von Referenzpunkten in der Ackerfläche 74
5.3	Georeferenzierte Unkrauterfassung in virtueller Ackerfläche 74
5.3.1	FarmlandBuilder - Aufbau und Prinzip 75
5.4	Systematische Bewertung der Datenerfassung 78
5.4.1	Sampling Simulator 78
5.4.2	Funktionsweise der Software 80
5.4.2.1	Fehlermaße und Kenngrößen im Sampling Simulator 80
5.4.2.1.1	Verwendete Variablen 80
5.4.2.1.2	Streuungsmaße und deskriptive Angaben zu den Erfassungsdaten 80
5.4.2.1.3	Fehlermaße 84
5.4.2.1.4	Minima und Maxima 86
5.4.2.1.5	Bias-, Standardabweichungs- und Varianz-Anteil des mittleren Fehlers 88
5.4.2.1.6	Kumulative Fehlermaße 89
5.4.2.1.7	weitere Kenngrößen 90
6	Diskussion 97
7	Ausblick 102
	Literaturverzeichnis 104
A	Anhang A 115
B	Anhang B 120
	Index 129

Glossar

Anmerkung zum Sprachgebrauch

In Übereinstimmung mit der angegebenen Fachliteratur wurden ausgewählte Fachausdrücke und Schlagwörter in ihrem originalen, englischen Sprachgebrauch belassen, beziehungsweise mit angegeben. Zur besseren Lesbarkeit sind diese im Text kursiv hervorgehoben.

Produkteigennamen sind durch eine kapitalisierte Schrift gekennzeichnet.

Im Glossar nicht erklärte Abkürzungen und Begriffe sind separat für jedes Kapitel in Form von Fußnoten erklärt.

Verwendete Abkürzungen

Abb.	A bbildung
ALF	A ccurate Positioning by L ow F requency
ArcGIS	G eo i nformationssystem der Firma E S R I
bzgl.	b ezüglich
bzw.	b eziehungsweise
ca.	c irca
CCD	Halbleiter Bildsensor (c harge c oupled d evice)
CHEAL	<i>Chenopodium albium L. nach Bayer-Code</i>
cm	Z entimeter
csv	C omma sperated v alues-Datei
DGPS	D ifferentielles G PS
d.h.	d as h eißt
3D	D reidimensional
ESRI	E nvironmental S ystems R esearch I nstitute, Inc.
et al.	und andere (e t a lii)
etc.	e t c etera
FUMOF	<i>Fumaria officinalis L. nach Bayer-Code</i>
GGGGG	G räser (allgemein) nach Bayer-Code
ggf.	g egebenenfalls
GIS	G eo i nformationssystem
GPS	G lobales P ositionierungssystem
ha	H ektar
IDW	I nverse D istance W eighting Interpolation
inkl.	i nklusive

ISO	International Organization for Standardization
LT	L ineare T riangulation
m	M eter
mm	M illimeter
MAD	M ean a bsolute d ifference (Mittlere absolute Abweichung)
MAE	M ean a bsolute e rror (Mittlerer absoluter Fehler)
MRE	M ean r elative e rror (Mittlerer relativer Fehler)
MS	M ais
NNI	N atural N eighbor I nterpolation
o.g.	o ben g enannt
OPK	O rdinary P oint K riging
PI	Lloyds p atchiness i ndex
POLSS	<i>Polygonum</i> Arten nach Bayer-Code
Px	P ixel
RDS	R adio D ata S ystem
RCTM	R adio T echnical C ommission for M aritime S ervices S pecial C ommittee
RMSE	R oot m ean squared e rror (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers)
s	S ekunde
s.	siehe
s. auch	siehe auch
SDV	S tandard d evelopment (Standardabweichung)
shp	S hapefile Datei
sog.	s ogenannt
SSW	S chadenschwelle
STEME	<i>Stellaria media</i> L. nach Bayer-Code
t	T onnen
u.a.	u nter a nderem
UML	U nified M odelling L anguage
u.U.	u nter U mständen
vgl.	v ergleiche
VIOAR	<i>Viola arvense</i> L. nach Bayer-Code
v.l.n.r.	von links n ach r echts
WG	W intergerste
WW	W interweizen
XML	E xtensible M arkup L anguage
z.T.	zum T eil
ZR	Z uckerrübe
2D	Z weidimensional
∈	Element von
⊂	Teilmenge von
\mathbb{R}^2	zweidimensionaler euklidischer Raum

Abbildungsverzeichnis

1.1	Variabilität der Ackerflächen - Digitalisierte Karte der Reichsbodenschätzung am Versuchsgut Dikopshof	18
1.2	Variabilität der Ackerflächen - Beispielhafte Ertragskarte einer Ackerfläche . . .	19
1.3	Der Kreislauf des <i>Präzisen Pflanzenbaus</i>	20
2.1	Der <i>Göttinger Schätzrahmen</i>	24
2.2	Das Versuchsgut Dikopshof mit den Versuchsflächen	28
2.3	Positionen der Stützpunkte der untersuchten Meßraster	29
2.4	Verschiebung simulierter Datenerfassungspunkte	31
2.5	Histogramme der zwei untersuchten Datenerfassungen für <i>Chenopodium album</i> L.	32
2.6	Karten der Verteilung von <i>Chenopodium album</i> L. in Abhängigkeit vom Startpunkt der Datenerfassung	33
3.1	Metadatenprofil aus dem ISO 19115 Metadaten Standard	39
3.2	Das Paket MD_Metadata des ISO 19115 Metadaten Standards	41
4.1	Prinzip der räumlichen Interpolation	45
4.2	Verfahren der <i>Delaunay Triangulation</i> - Dreiecksvermaschung	48
4.3	Beispiel einer Unkrautverteilungskarte - <i>Lineare Triangulation</i>	49
4.4	Interpolation nach <i>Natural Neighbors</i> Verfahren	50
4.5	Beispiel einer Unkrautverteilungskarte - <i>Natural Neighbors Interpolation</i>	51
4.6	Beispiel einer Unkrautverteilungskarte - <i>Inverse Distance Weighting</i> Interpolation mit Einflußfaktor $p = 2$	53
4.7	Beispiel einer Unkrautverteilungskarte - <i>Inverse Distance Weighting</i> Interpolation mit Einflußfaktor $p = 4$	53
4.8	Gewichtung der Abstände - Der Gewichtungsfaktor λ_i	54
4.9	Das Semivariogramm	55
4.10	Semivariogramme verschieden stark auftretender Unkräuter in einem Meßraster von 7,5x15 Meter	56
4.11	Einfluß der Modellierung des experimentellen Semivariogramms auf die Unkrautverteilungskarten	57
4.12	Richtungsabhängige Semivariogramme ausgewählter Unkrautarten	58
4.13	Beispiel einer Unkrautverteilungskarte - <i>Ordinary Point Kriging</i> mit exponentiellem Modell	59

4.14	Beispiel einer Unkrautverteilungskarte - <i>Ordinary Point Kriging</i> mit sphärischem Modell	60
4.15	Das Prinzip der Kreuzvalidierung für Interpolationsverfahren	62
4.16	Unkrautverteilungskarten für <i>Gräser</i> mit unterschiedlichen Interpolationsverfahren	63
4.17	Unkrautverteilungskarten für <i>Chenopodium album</i> L. mit unterschiedlichen Interpolationsverfahren	65
4.18	Unkrautverteilungskarte in 3D-Darstellung - Schwellenwertbildung	68
5.1	Das Versuchsgut Klein-Altendorf mit den Versuchsflächen	71
5.2	Der WEEDSCANNER - prototypisches Trägerfahrzeug für digitale Camcorder . .	72
5.3	Überlappung der Videoaufnahmen des WEEDSCANNERS	73
5.4	Einzelbildextraktion aus digitalen Videosequenzen	75
5.5	Hochauflösende Informationen zur Unkrautverteilung in Versuch 1	76
5.6	Hochauflösende Informationen zur Unkrautverteilung in Versuch 2	77
5.7	Screenshot der Simulationssoftware SAMPLING SIMULATOR	79
5.8	Arbeitsablauf der hochauflösenden Datenerfassung	81
5.9	Mittlere absolute Abweichung von 4 Unkrautarten auf den untersuchten Versuchsflächen	82
5.10	Vergleich zwischen mittlerer absoluter Abweichung und Standardabweichung der Unkrauterfassungen	83
5.11	Vergleich zwischen <i>RMSE</i> -Fehler und seiner <i>bereinigten</i> Form	86
5.12	Minimale und maximale Ausprägung eines Meßfehlers in Abhängigkeit von der Zählfläche	88
5.13	<i>Bias</i> - bzw. Varianzanteil am <i>MSE</i> -Fehler	89
5.14	Aufteilung des <i>Bias</i> in positive und negative Abweichungen	89
5.15	<i>RMSE</i> -Fehler und benötigte Zeit für die Datenerfassung auf einer Fläche von ca. 4 ha in einem Meßraster von 7x7 m	91
5.16	<i>Lloyds Patchiness Index</i> in Abhängigkeit von der Zählfläche	92
5.17	Korrelation zwischen Unkräutern in der Zählfläche (0,4 m ²) und Unkräutern in der Referenzfläche im Meßraster 7x7 m	93
5.18	Korrelation zwischen Unkräutern in der Zählfläche (1 m ²) und Unkräutern in der Referenzfläche im Meßraster 7x7 m	93
5.19	Korrelation zwischen Unkräutern in der Zählfläche (0,4 m ²) und Unkräutern in der Referenzfläche im Meßraster 2x3 m	94
5.20	Korrelation zwischen Unkräutern in der Zählfläche und Unkräutern in der Referenzfläche aus Versuch V2 (<i>Chenopodium album</i> L.)	94
5.21	Einfluß des Meßrasters auf das Kartenresultat	95
5.22	Simulation einer versetzt begonnenen Datenerfassung im Meßraster 7x7 m . . .	95
5.23	Simulation einer versetzt begonnenen Datenerfassung im Meßraster 2x3 m . . .	96
6.1	Satellitenaufnahme der Versuchsfläche V2 zum Zeitpunkt der Untersuchungen .	99

A.1	Karten der Verteilung von <i>Fumaria officinalis</i> L. in Abhängigkeit vom Startpunkt der Datenerfassung	115
A.2	Karten der Verteilung von <i>Stellaria media</i> L. in Abhängigkeit vom Startpunkt der Datenerfassung	117
A.3	Karten der Verteilung von <i>Gräsern</i> in Abhängigkeit vom Startpunkt der Datenerfassung	118
B.1	Screenshot der Simulationssoftware SAMPLING SIMULATOR im Boniturmodus .	121
B.2	Screenshot der Simulationssoftware SAMPLING SIMULATOR im Verteilungsmodus	122
B.3	Simulierte Populationen innerhalb der Grenzen von Feld 6	123
B.4	Arbeitsablauf im SAMPLING SIMULATOR	124
B.5	<i>Bias</i> mit positiven und stark negativen Abweichungen	125
B.6	Schätzung der mittleren Verunkrautung mit unterschiedlichen Zählflächen . . .	125
B.7	Semivariogramme aus dem SAMPLING SIMULATOR	126

Tabellenverzeichnis

2.1	Die untersuchten Verfahren der Datenerfassung im Vergleich	28
2.2	Durchschnittlich gezählte Unkräuter in Abhängigkeit von der Erfassungsmethode	32
2.3	Ergebnisse der Kreuzkorrelation: <i>Chenopodium album</i> L.	34
3.1	Metadatenstandards für Geodaten	38
3.2	Pakete des ISO 19115 Metadatenstandards	40
3.3	Elemente des ISO 19115 konformen Metadatenprofils	42
4.1	Die untersuchten Interpolationsverfahren im Überblick	47
4.2	Tabelle der Kreuzvalidierungsergebnisse in einer Übersicht	64
4.3	Feste Schadenschwellen für Unkräuter in Getreide	67
5.1	Gefundene Unkrautarten in Versuch 1 in Klein-Altendorf	78
5.2	Gefundene Unkrautarten in Versuch 2 in Klein-Altendorf	78
A.1	Ergebnisse der Kreuzkorrelation: <i>Fumaria officinalis</i> L.	116
A.2	Ergebnisse der Kreuzkorrelation: <i>Stellaria media</i> L.	116
A.3	Ergebnisse der Kreuzkorrelation: <i>Gräser</i>	119

1 Einleitung

Unkräuter sind Pflanzen, die die Funktionalität von Flächen beeinträchtigen.

(ZWERGER UND AMMON 2002)

1.1 Unkräuter in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion

In der Landwirtschaft spielen Unkräuter eine bedeutende Rolle. Sie verursachen weltweit großen Schaden in allen landwirtschaftlichen Kulturen. Die potentiellen Ernteverluste durch den Einfluß von Unkräutern werden von OERKE UND STEINER 1996 bei Kulturpflanzen aus den hiesigen Breiten, wie z.B. Weizen, Gerste oder Mais, mit über 50 Prozent beziffert. Neuere Schätzungen des Ertragsrückganges in diesen Kulturen bedingt durch Unkräuter kommen zu vergleichbaren Ergebnissen (ZWERGER *et al.* 2004). Dieses Schadpotential macht Unkräuter zu einem ernstzunehmenden Problem für die Produzenten landwirtschaftlicher Erzeugnisse.

Dieses Problem hat unterschiedliche Ursachen. Unkräuter konkurrieren mit der Kulturpflanze um alle Wachstumsfaktoren, wie z.B. Wasser, Nährstoffe und Licht. Außerdem verursachen sie indirekte Schäden an der Kulturpflanze durch die Erschwerung der Ernte, z.B. im Falle kletternder Unkräuter und durch die Förderung von Schädlingen, Pflanzenkrankheiten sowie als Wirtspflanzen für Virose (BÖRNER 1995). Unkräuter haben jedoch auch in einem gewissen Umfang positiven Einfluß auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion, indem sie die Ansiedlung von Nützlingen befördern können und dabei mitwirken, die Bodenerosion zu mindern (HANF 1998, MAHN 2002).

Durch die Anpassung ihres Entwicklungszyklusses an die Kulturpflanze treten in den Kulturen bestimmte typische Unkrautarten (Leitunkräuter einer Kultur) auf. Aufgrund dieser Tatsache kann das zeitliche Auftreten bestimmter Leitunkräuter in Abhängigkeit von der Felderfolge sehr gut vorausgesagt werden. Für alle flächenmäßig bedeutenden Kulturarten in der Landwirtschaft der Bundesrepublik Deutschland stehen außerdem ausreichend Herbizide mit unterschiedlichen Wirkstoffen zur Verfügung, die eine effektive Bekämpfung der Unkräuter vereinfachen. Da Herbizide zur Zeit noch relativ kostengünstig sind und eine sehr hohe Effektivität besitzen, verwenden Landwirte sie in großem Ausmaß. Allein im Jahr 2002 wurde in der Bundesrepublik Deutschland eine Menge von ca. 12.000 t herbizider Wirkstoffe abgesetzt (INDUSTRIEVERBAND AGRAR 2003). Nach ZWERGER *et al.* 2004 wurden hierzulande 80 bis 95 Prozent aller Getreide- bzw. Rapsflächen sowie 99 Prozent aller Zuckerrübenflächen mit Herbiziden behandelt.

Die flächendeckende Applikation von Herbiziden läßt allerdings außer Acht, daß Unkräuter auf den Ackerflächen in den meisten Fällen heterogen - in Form von Nestern - verteilt sind (MARSHALL 1989, MORTENSEN *et al.* 1993, NORDBO *et al.* 1994, CARDINA *et al.* 1997, DICKE *et al.* 2003). Somit werden Herbizide bei diesem Vorgehen auch an solchen Stellen gespritzt, an denen keine Unkräuter vorkommen, woraus sich ein großes Einsparungspotential ergibt (vgl.

MEDLIN UND SHAW 2000, GOUDY *et al.* 2001, TIMMERMANN *et al.* 2003). Der ökonomische und politische Druck auf die Landwirte, den Einsatz von Pestiziden generell, jedoch auch speziell von Herbiziden zu verringern, wächst stetig. Das Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) hat eine Initiative (*Reduktionsprogramm im Pflanzenschutz*) ins Leben gerufen, welche die nachhaltige Sicherung des Schutzes der Pflanzen, insbesondere der Kulturpflanzen, „[...] unter besonderer Beachtung der Gewährleistung ausreichender Möglichkeiten zur Schadensabwehr, des Schutzes der Gesundheit von Mensch und Tier sowie des Naturhaushaltes und der Minimierung des Risikos bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln [...]“ gewährleisten soll. Diese Initiative hat unter anderem zum Ziel

- die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln über dem notwendigen Maß maßgeblich zu senken,
- die Reduzierung der Überschreitungen von Pflanzenschutzmittel-Rückstandshöchstmengen in Agrarprodukten auf unter 1 Prozent in allen Produktgruppen voranzutreiben,
- die schlagbezogenen¹ Dokumentation der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln durchzusetzen.

Auch von Seiten der *Europäischen Kommission* sind Vorschläge für den reduzierten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln gemacht worden (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2002). Unter anderem ist hier von der „[...] Förderung von Anbaumethoden ohne oder mit geringem Pestizideinsatz [...]“ die Rede.

Diese veränderten Rahmenbedingungen kommen der Strategie des *Präzisen Pflanzenbaus* (*Precision Farming*, s. Abs. 1.2) entgegen. Die Umsetzung dieser Strategie für die Unkrautkontrolle mit Hilfe von Unkrautverteilungskarten und Geoinformationssystemen (GIS) sowie die in diesem Zusammenhang entstehenden methodischen Probleme werden in dieser Arbeit thematisiert.

1.2 Präziser Pflanzenbau - Precision Farming

Der *Präzise Pflanzenbau* als Strategie einer modernen, nachhaltigen Pflanzenproduktion hat die Optimierung des Betriebsmitteleinsatzes auf der Grundlage der Anwendung von teilflächenspezifischen Informationen zum Ziel. Teilflächen werden hierbei im Gegensatz zur konventionellen, ganzflächigen Bewirtschaftung zu den kleinsten Bewirtschaftungseinheiten einer Ackerfläche. Die georeferenzierten² Informationen über die räumliche Verteilung verschiedener Umweltfaktoren, wie z.B. Bodenart (vgl. Abb. 1.1), Nährstoffgehalt, Pflanzenkrankheiten, aber auch das Unkrautvorkommen innerhalb dieser Teilfläche, dienen dann der GPS-gesteuerten Reaktion auf diese Faktoren mit zielgerichteten Maßnahmen. Nach LUDOWICY *et al.* 2002 sind bei dieser Strategie die Aspekte

¹Ein *Schlag* entspricht einer bewirtschafteten Parzelle. Mehrere Schläge bilden einen *Feldblock*.

²Durch eine Georeferenzierung wird eine Positions- oder Ortsinformation auf der Erde mit einem Objekt (z.B. Bodenprobe, stichprobenhafte Unkrautdatenerfassung) gekoppelt.

- Einsparung von Betriebsmitteln
- Einsparung von Maschineneinsatz- und Arbeitszeiten
- Verbesserung der Ertragsleistung durch höhere Erträge und verbesserte Produktqualität
- Minimierung von Umweltbelastungen und Förderung naturräumlicher Bedingungen

sowie

- verbesserte Dokumentation des Produktionsprozesses

von größtem Interesse. Dabei erfüllt der *Präzise Pflanzenbau* die von politischer Seite geforderten Maßnahmen zur Reduzierung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln (vgl. Abs. 1.1). Seitdem GPS-Systeme Einzug in den landwirtschaftlichen Alltag gefunden haben, ist es möglich, aufgrund des Wissens über die eigene absolute Position mit einem Fahrzeug auf einer Ackerfläche, anfallende Daten im Produktionsprozeß mit Koordinaten zu versehen. Diese Tatsache ermöglicht eine angemessene Reaktion auf die jeweiligen teilflächenspezifischen Gegebenheiten mit der Hilfe von GIS bei hinreichend ausgestatteter Applikationstechnik.

Dabei werden im *Präzisen Pflanzenbau* allgemein verschiedene Ansätze verfolgt, um von der Datenerfassung zu einer Applikationsentscheidung zu gelangen. In sogenannten *offline*-Verfahren werden zunächst aus den gesammelten georeferenzierten Daten Verteilungskarten erstellt.

Auf der Basis von Expertenwissen zu diesen Informationen wird dann eine Applikationskarte generiert, die auf die - in der Verteilungskarte ersichtlichen - zu bewirtschaftenden Teilflächen abgestimmt ist. Dabei werden bei der Überschreitung spezifischer Schwellenwerte (vgl. auch Abs. 4.2.1) angemessene Maßnahmen eingeleitet, wie z.B. der Einsatz von Düngemitteln je nach Versorgungsstufe des Bodens.

Daneben gibt es auch sogenannte *online*-Verfahren, bei denen eine sensorgestützte Applikation ohne Kartenerstellung direkt erfolgt. Darüber hinaus existieren aber auch andere Formen der Datenerfassung, welche z.B. auf eine spezifische Sensorik in Flugzeugen oder Satelliten zurückgreifen, um Entscheidungen am Boden zu fällen. Diese unterschiedlichen Strategien werden im *Präzisen Pflanzenbau* angewendet und haben sich für viele Bereiche des Pflanzenbaus allgemein bereits in der Praxis etabliert.

Auf der Grundlage dieser Informationen zur Variabilität des Bodens und der Verteilung von Niederschlagsmengen in Abhängigkeit vom vorliegenden Relief des Geländes kann - bei vorhandener Technik - z.B. eine ortsspezifische Aussaat von Getreide erfolgen (ROTH UND KÜHN 2002). Nach SOMMER 2003 und VOSSHENRICH 2003 sind auch Systeme zur teilflächenspezifische Bodenbearbeitung, die auf georeferenzierten Informationen zur Bodenvariabilität und der elektrischen Leitfähigkeit³ des Bodens beruhen, vorhanden. Am weitesten entwickelt sind jedoch Systeme zur teilflächenspezifischen Düngung, die unter den Landwirten die höchste Akzeptanz genießen. Neben dem HYDRO-N-SENSOR (LUDOWICY *et al.* 2002), der in einem *online*-

³Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens wird primär durch den Tongehalt des Bodens, den Wassergehalt und die Leitfähigkeit der Bodenlösung bestimmt (SCHMIDHALTER UND ZINTEL 1999).

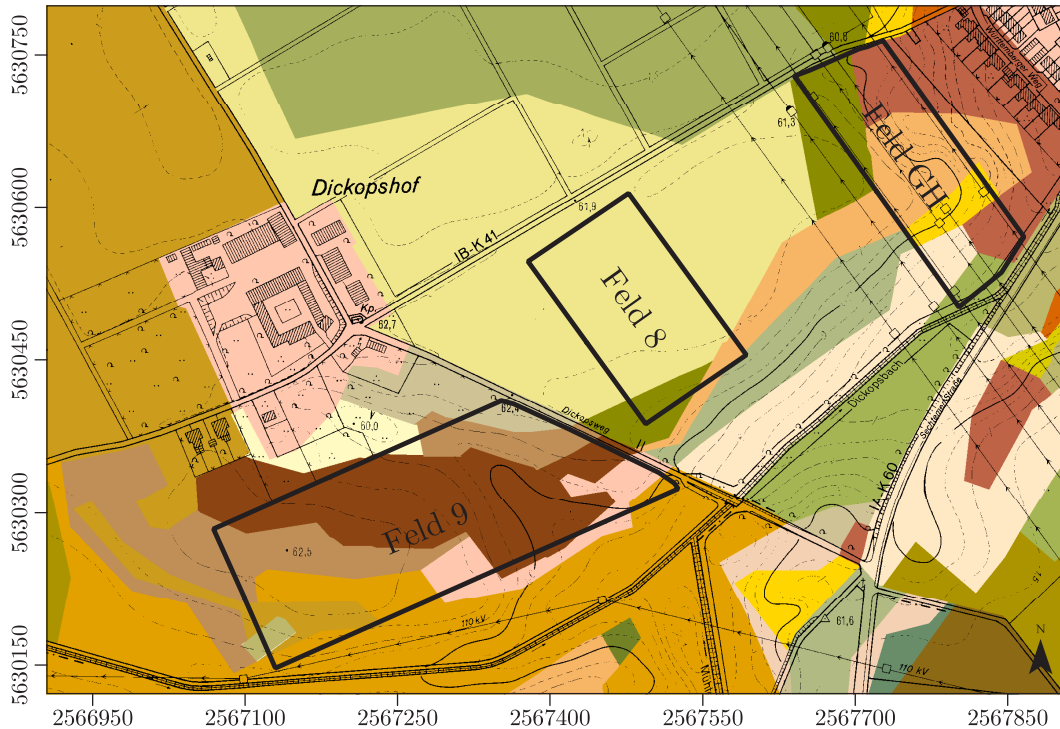


Abb. 1.1: Variabilität der Ackerflächen - Digitalisierte Karte der Reichsbodenschätzung am Versuchsgut Dikopshof der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn. Die Farbklassen weisen auf unterschiedliche Bodenarten innerhalb der Nutzflächen hin, DGK 5, © Landesvermessungsamt NRW, Bonn, 1184/2003.

Verfahren durch die Messung des vom Pflanzenbestand reflektierten Tageslichts mit hochempfindlichen Spektrometern direkt auf die Stickstoffversorgung der Kulturpflanzen schließt und eine variable Stickstoff-Ausbringung realisiert, wird auch mit dem sogenannten PENDELSSENSOR (EHLERT *et al.* 2003, EHLERT UND LANGNER 2004) gearbeitet. Dieser Sensor ermöglicht die teilflächenspezifische Reaktion auf die Pflanzenmassedichte während einer Überfahrt, indem der Widerstand dieser Pflanzenmasse mit einem Potentiometer gemessen wird. Dies gestattet es, Rückschlüsse auf den Versorgungszustand der Pflanzen zu ziehen und z.B. bedarfsgerecht Dünger auszubringen. Inzwischen werden mit diesem System auch Wachstumsregler und Pflanzenschutzmittel ausgebracht. Neben Informationen zur Bodenvariabilität werden im *Präzisen Pflanzenbau* auch GPS-gestützte Ertragsmessungen durchgeführt, die wiederum wichtige Hinweise zur Variabilität des Standorts liefern (STAFFORD *et al.* 1996, PIERCE *et al.* 1997) und damit zur Datengrundlage für pflanzenbauliche Maßnahmen im Folgejahr werden können (vgl. Abb. 1.2).

Im Pflanzenschutz beschränkt sich die Anwendung von Techniken des *Präzisen Pflanzenbaus* bisweilen noch auf wenige Einsatzgebiete (GUTSCHE *et al.* 2004). Die teilflächenspezifische Kontrolle von Pflanzenkrankheiten und Nematoden befindet sich noch im Stadium der Grundlagenforschung und wird zur Zeit unter anderem vom DFG-Graduiertekolleg 722 zum Thema *Einsatz von Informationstechniken zur Präzisierung des Pflanzenschutzes auf landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Flächen* der Universität Bonn untersucht. Unter Einsatz von GIS zur

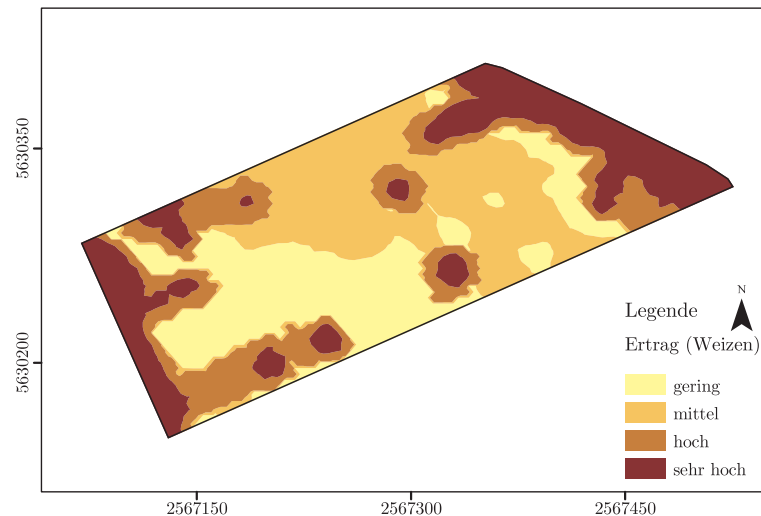


Abb. 1.2: Variabilität der Ackerflächen - Beispielhafte Ertragskarte einer Ackerfläche. Ziel des *Präzisen Pflanzenbaus* ist die teilflächenspezifische Reaktion auf diese Heterogenität mit Hilfe von GIS und GPS.

Einhaltung von Abstandsauflagen bei der Applikation von Pflanzenschutzmitteln können jedoch z.B. bereits heute Managementzonen besser bestimmt und eingehalten werden (SPICKERMANN 2003).

Techniken der teilflächenspezifische Unkrautkontrolle befinden sich inzwischen auf hohem Niveau, sie werden allerdings nur in Einzelfällen in der Praxis eingesetzt. Dabei hat die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle gegenüber anderen Elementen des Pflanzenschutzes im *Präzisen Pflanzenbau* den Vorteil, daß ein weitestgehend statischer Faktor - nämlich das Unkraut - behandelt werden muß. Nematoden, Insekten und Pflanzenkrankheiten sind mobiler und damit in einem wesentlich begrenzteren Zeitfenster teilflächenspezifisch zu bekämpfen (SWINTON *et al.* 2003). Dies macht die Unkrautkontrolle zu einem der wichtigsten Themen im Pflanzenschutz des *Präzisen Pflanzenbaus*.

1.2.1 Teilflächenspezifische Unkrautkontrolle

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, sind Unkräuter auf Ackerflächen heterogen verteilt und somit ein Schadfaktor, auf den die Landwirtschaft mit Maßnahmen des *Präzisen Pflanzenbaus* besonderes gut reagieren kann. Neben der heterogenen Verteilung treten Unkräuter zudem meist ortsstabil im Acker auf, d.h. in bestimmten Kulturarten bilden sich Leitunkräuter oft an der Stelle erneut, an der sie in der Vergangenheit bereits aufgetreten sind. Diese Ortsstabilität von Unkräutern bzw. Unkrautnestern wurde unter anderem von WILSON UND BRAIN 1991, WALTER 1996, GERHARDS *et al.* 1997, BARROSO *et al.* 2004 und KROHMANN 2004 beschrieben. Daher wäre es sinnvoll, an dieser Stelle mit Hilfe von Techniken des *Präzisen Pflanzenbaus*, hier im besonderen mit Maßnahmen der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle, einzugreifen. Aufgrund der bisweilen großflächigen Ausbringung von Herbiziden wird selbstverständlich auch an vielen Orten im Acker gespritzt, an denen keine Unkräuter wachsen. In Bereichen starker Verunkrautung - auf einer ansonsten unkrautfreien Ackerfläche - wäre

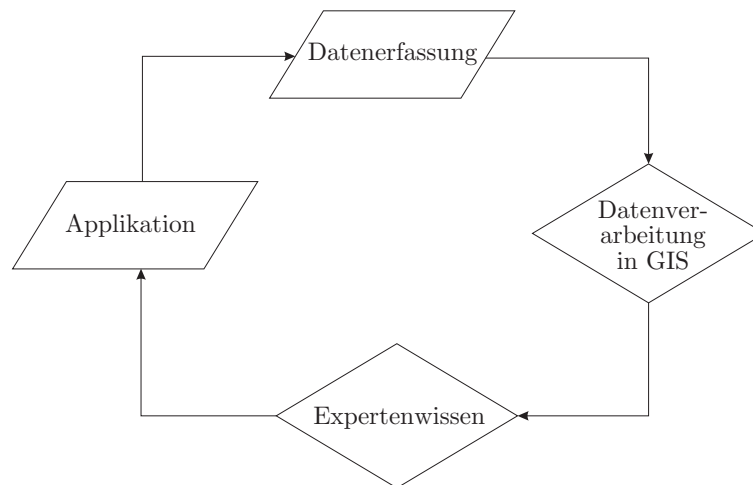


Abb. 1.3: Der Kreislauf teilflächenspezifischer Unkrautkontrolle im *Präzisen Pflanzenbau* basiert auf der *georeferenzierten* Datenerfassung von Unkräutern und der anschließenden Datenverarbeitung und -analyse in GIS. Auf der Grundlage von Expertenwissen entstehen beispielsweise Unkrautverteilungskarten, so daß eine teilflächenspezifische Applikation von Herbiziden vorgenommen werden kann.

daher bei teilflächenspezifischer Applikation eine höhere Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Herbiziden zu erwarten. Tatsächlich konnten in Abhängigkeit von der gewählten Methode für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle bisweilen Herbizideinsparungen in einer Bandbreite von 9 bis 92 Prozent realisiert werden (KTBL 2001). Die für den *Präzisen Pflanzenbau* allgemein vorgestellten *online*- und *offline*-Verfahren (Abs. 1.2) finden auch in der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle Anwendung. Die *online*-Verfahren nutzen das unterschiedliche Reflexionsverhalten von Pflanzen, Pflanzenresten und Boden im NIR⁴ aus, um eine Erkennung verunkrauteter Regionen und letztendlich eine *real-time* Applikation zu realisieren. FELTON UND MCCLOY 1992 stellen dieses Verfahren, das auch als DETECTSPRAY[©]-Verfahren bekannt ist, eingehend vor. Eine Weiterentwicklung dieses Systems u.a. im Hinblick auf die bessere Differenzierung zwischen Nutzpflanze und Unkraut wurde von BILLER 1998 entwickelt. Andere Verfahren, wie z.B. das WEEDSEEKER[©]-Verfahren (NTECH 2004) sowie das SELECTSPRAY-Verfahren (AUDENAERT *et al.* 1996), basieren auf dem gleichen Prinzip. Auch WARTENBERG UND DAMMER 2000 verwenden dieses *online*-Verfahren in den Fahrgassen eines Ackers zur teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung. All diese beschriebenen *online*-Verfahren haben gemein, daß eine Herbizidapplikation nur undifferenziert für alle Unkräuter durchgeführt wird. Teilweise kann man die Verfahren auch nur vor dem Auskeimen der Kulturart mit Totalherbiziden⁵ anwenden. Bildanalytische (*online*)-Verfahren (GERHARDS *et al.* 1998, GERHARDS *et al.* 2002a, OEBEL *et al.* 2004) der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle in Echtzeit befinden sich gerade an der Schwelle zur Praxisreife. Bisher wird dieser Ansatz noch mit einem Zwischenschritt - nämlich einer Kartierung der Resultate - vor der Applikation ausgeführt. Gegenstand der vorliegenden

⁴Strahlung im Bereich des nahen Infrarot (750 - 1000nm).

⁵Totalherbizide wirken auf **alle** grünen Pflanzen und töten diese ab.

Untersuchungen in dieser Arbeit sind jene Verfahren, bei denen eine Kartierung der Unkräuter notwendig ist.

Im Rahmen der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle sind die Verfahren mit einem Kartierungsansatz aus praktischen Gründen auf die Erfassung von Stichproben angewiesen, die als repräsentativ für eine Teilfläche angesehen werden. Ob dieser Anspruch der Repräsentativität mit den heute verwendeten Verfahren der stichprobenhaften Datenerfassung tatsächlich erfüllt werden kann, ist für die aus ihnen abgeleiteten Karten und die Wirksamkeit der, auf ihnen basierenden, Maßnahmen von entscheidender Bedeutung. Wenn eine Kartierung vor der Applikation erfolgt, sind manuelle Datenerfassungen mit Zählrahmen an bestimmten Positionen im Acker hierbei ebenso betroffen, wie bildanalytische Verfahren der Datenerfassung mit Trägerfahrzeugen, die wesentlich höhere räumliche Auflösungen bei der Datenerfassung erreichen. Des weiteren ist vor jeder teilflächenspezifischen Applikationsentscheidung die Generierung der Unkrautverteilungskarten aus diesen Daten von Bedeutung. Hierzu stehen eine Reihe unterschiedlicher Methoden der räumlichen Interpolation (vgl. Abs. 4.1) zur Verfügung, von denen einige im *Präzisen Pflanzenbau* eingesetzt werden. Dabei ist entscheidend, daß für die jeweiligen Daten das adäquateste Interpolationsverfahren ausgewählt wird, um eine möglichst aussagekräftige Unkrautverteilungskarte zu erhalten. Letztlich ist für den erfolgreichen Einsatz der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle mitentscheidend, wie der Anwender anschließend die Unkrautklassen bei der Erstellung von Applikationskarten einteilt. Hierbei ist umfangreiches Expertenwissen gefordert. Der Forderung nach Dokumentation und nachhaltiger Datenhaltung im Zusammenhang mit der anschließenden Applikation von Herbiziden können GIS und die Erhebung und Pflege von Metadaten Rechnung tragen.

1.3 Fragestellungen dieser Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit zum *Präzisen Pflanzenschutz* in der Unkrautkontrolle sollen an verschiedenen Stellen auftretende methodische Probleme innerhalb des Kreislaufs des *Präzisen Pflanzenbaus* (s. Abb. 1.3) für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle mit Unkrautverteilungskarten in GIS beschrieben werden. Die Kernprobleme dieser Strategie lassen sich in Form der folgenden Fragen eingrenzen:

- Ist die Datenerfassung im Rahmen bekannter Strategien adäquat für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle? → Kapitel 2 und 5
- Wie kann die nachhaltige Dokumentation und Datenhaltung des teilflächenspezifischen Einsatzes von Herbiziden mit GIS durchgeführt werden? → Kapitel 3
- Welches Interpolationsverfahren zur Erstellung von Unkrautverteilungskarten kann in der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle verwendet werden? → Kapitel 4
- Welchen Einfluß haben im Rahmen der Strategie des *Präzisen Pflanzenbaus* Schwellenwerte bei der Konturlinienherstellung für Unkrautverteilungskarten? → Kapitel 4

In Kapitel 2 wird auf der Grundlage unterschiedlicher Erfassungsgenauigkeiten dargestellt, inwieweit bei einer manuellen Datenerfassung von Unkräutern mit Zählrahmen das Kartener-

gebnis durch die Parameter Meßraster und Zählrahmenposition beeinflusst werden kann. Dabei werden visuelle Vergleiche und statistische Untersuchungen durchgeführt. Inwieweit in diesem Zusammenhang der Zählrahmen, der aus einem anderen wissenschaftlichen Kontext direkt auf den Einsatz in der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle übertragen wurde, das richtige Hilfsmittel zur Datenerfassung ist, wird hier diskutiert.

Inwieweit die nachhaltige Datenhaltung im System der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle mit Unkrautverteilungskarten gelingen kann, welche für ein tieferes Verständnis der Erfassungsdaten notwendig ist, wird auf der Grundlage eines Metadatenprofils für diesen Anwendungsbereich in Kapitel 3 beschrieben.

Kapitel 4 befaßt sich mit den unterschiedlichen Interpolationsverfahren, die zur Erstellung von Unkrautverteilungskarten eingesetzt werden und geht dabei auf deren methodische Unterschiede und Anforderungen ein. Beispielhaft werden diejenigen Interpolationsverfahren untersucht, welche für die Kartenerstellung der Verunkrautung in der Praxis bereits eingesetzt werden. Basierend auf dem Verfahren der Kreuzvalidierung werden die Interpolationsverfahren an dieser Stelle qualitativ verglichen.

Anschließend wird in Kapitel 5 eine neue GIS-Software (SAMPLING SIMULATOR) vorgestellt, mit der beschrieben werden kann, wie sich die einzelnen Parameter der Datenerfassung - basierend auf der Grundlage hochauflösender Informationen - auf die Genauigkeit der gesamten Datenerfassung auswirken. Zur Gewinnung dieser hochauflösenden Informationen wird ein Prototyp (WEEDSCANNER) vorgestellt, der diese mit Hilfe von Videoaufnahmen der Ackeroberfläche erfassen kann.

2 Datenerfassung für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle mit Unkrautverteilungskarten

Eine Kernfrage im Zusammenhang mit der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle ist, inwieweit die erfaßten Daten der Unkrautverteilung repräsentativ für die Verunkrautungssituation auf der untersuchten Ackerfläche bzw. für die räumliche Verteilung der vorliegenden Verunkrautung sind. Hierbei wird in diesem Kapitel zunächst ein genereller Überblick über die zur Verfügung stehenden Methoden der Datenerfassung für Unkräuter gegeben. Zur Klärung der Frage nach der Eignung der vorgestellten Verfahren konnte im Rahmen dieser Arbeit auf Unkrauterfassungsdaten, die in unterschiedlich feinen räumlichen Auflösungen auf derselben Fläche erfaßt wurden, zurückgegriffen werden. Im Sinne der aufgeworfenen Frage wurde dabei mit GIS untersucht, inwieweit der initiale Startpunkt der Datenerfassung im Acker die Erstellung von Unkrautverteilungskarten beeinflusst, da dies ein deutlicher Beleg für eine unzureichende Informationsdichte ist. Es wird demonstriert, daß bei der Erstellung von Unkrautverteilungskarten auf der Basis manuell erfaßter Daten Zweifel an der Plausibilität des Verfahrens entstehen.

2.1 Verfahren der Datenerfassung

Um teilflächenspezifische Unkrautkontrolle betreiben zu können, werden genaue Informationen zur aktuellen Verunkrautung einer Ackerfläche benötigt. Diese Informationen sollten präzise und repräsentativ Aufschluß über die räumliche Verteilung der Unkrautpflanzen auf einer Ackerfläche geben. Die unterschiedlichen Strategien, die in der Präzisionslandwirtschaft dazu angewendet werden, um diese Informationen zusammenzutragen, werden im folgenden beschrieben. Neben manuellen Verfahren der Datenerfassung wird ein bildanalytisches und ein sensorbasiertes Verfahren vorgestellt, das in der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle jedoch bisweilen noch eine untergeordnete Rolle spielt.

2.1.1 Manuelle Verfahren

Die manuelle Ermittlung der aktuellen Verunkrautungssituation auf einer Ackerfläche stellt einen erheblichen Arbeitsaufwand dar. In der Regel wird bei dieser Strategie die Verunkrautung der Ackerfläche mit Hilfe sogenannter Zähl- bzw. Schätzrahmen stichprobenhaft erfaßt. Hierbei wird die zu untersuchende Ackerfläche in ein Meßraster eingeteilt. In der Unkrautforschung werden solche Meßraster in verschieden großen Ausführungen angewendet. Eine Übersicht zu diesen Meßrastern findet sich bei GARIBAY *et al.* 2001. Die Meßraster variieren zwischen sehr groben (50 x 50 m (NORDMEYER UND DUNKER 1999), 40 x 40 m (HAMOUZ *et al.* 2004), 36 x 40 m (WILSON UND BRAIN 1991), 24 x 24 m (CHRISTENSEN UND HEISEL 1998)) und sehr feinen (0,5 x 0,5 m (DESSAINT *et al.* 1991), 1,8 x 1,8 m (DONALD 1994), 2 x 2 m (ZANIN *et*

al. 1998)) Varianten, in Abhängigkeit von der vorliegenden Zielsetzung und der untersuchten Fläche. Die praktische Durchführbarkeit (der manuellen Verfahren der Datenerfassung) im Feld bestimmt also, welche Art von Meßraster für die Datenerfassung gewählt wird.

Die manuellen Verfahren werden jedoch nicht nur zum Zwecke einer Kartierung für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle verwendet, sondern auch um populationsdynamische Erkenntnisse zu gewinnen oder das Erreichen von Schadensschwellen für den gesamten Untersuchungsbe- reich eines Ackers zu ermitteln. Außerdem wird mit diesen Verfahren die räumliche Variabilität und Stabilität von Unkrautpopulationen beschrieben.

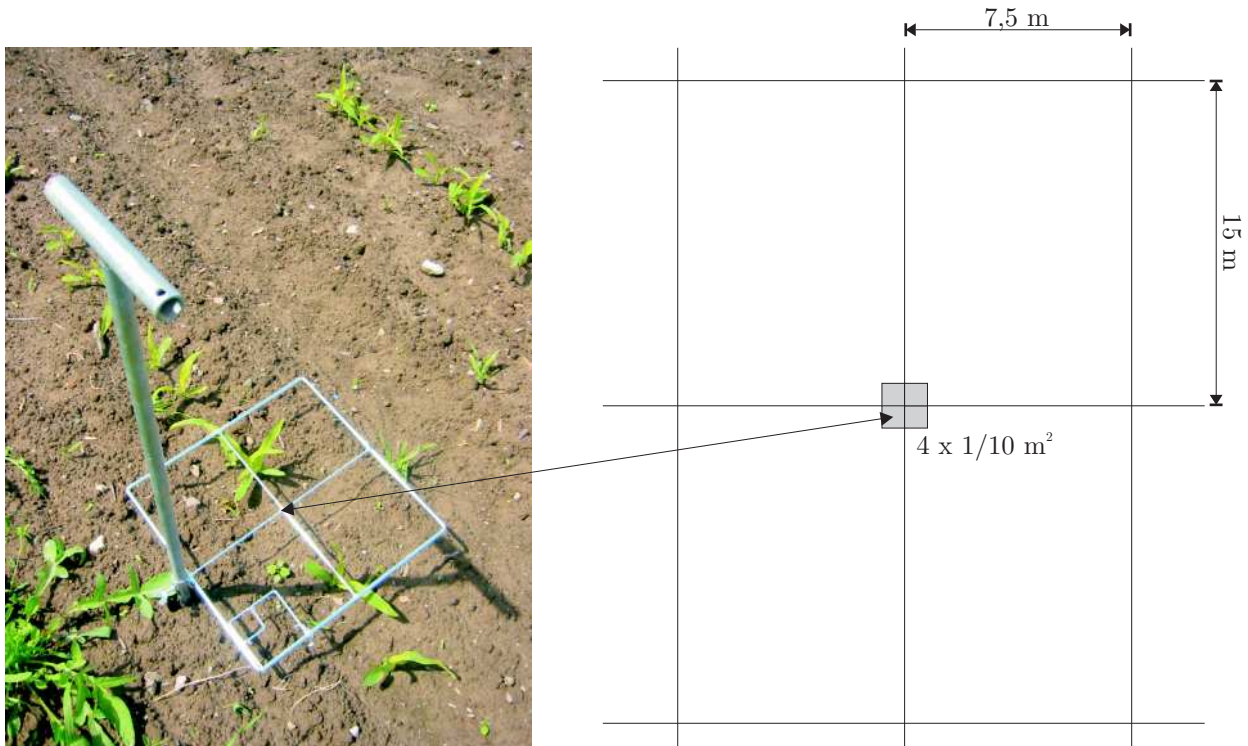


Abb. 2.1: 4 Zählrahmen (*Göttinger Schätzrahmen*) mit einer Fläche von je $0,1 \text{ m}^2$ wurden in einem Meßraster von $7,5 \times 15 \text{ m}$ an den Kreuzungspunkten ausgezählt. Die Anzahl der gefundenen Unkräuter und Arten wurde schriftlich festgehalten und auf die Fläche eines Quadratmeters normiert. Die Größe des Zählrahmens geht auf Arbeiten von BARTELS *et al.* 1983 zurück.

Die Daten, die im Rahmen dieser Untersuchung bearbeitet wurden, sind in einem Meßraster von $7,5 \times 15$ Meter erfaßt worden. In unterschiedlichen Untersuchungen (TIMMERMANN 2001, GERHARDS *et al.* 2002b sowie KROHMANN 2004) wurde dieses Meßraster bereits verwendet, um teilflächenspezifische Unkrautkontrolle zu betreiben. Die Kreuzungspunkte des verwendeten Meßrasters sind dabei die Stützpunkte der Datenerfassung. In regelmäßigen Meßrastern dieser Art werden mit Hilfe von Zählrahmen die vorkommenden Unkräuter gezählt. In der Pflanzensoziologie wurden Zählflächen zur Bestimmung der Artenzusammensetzung in Vegetationseinheiten an den unterschiedlichsten Vegetationsstandorten eingeführt und weiterentwickelt (DU RIETZ 1921, DU RIETZ 1929, BRAUN-BLANQUET 1964). Erstmals erwähnt wird die Idee der abgegrenzten Zählfläche bei VON POST 1867. Er schlägt vor: „[...] die Fläche, die die Individuen oder Stände jeder Art zusammen auf einem gewissen, vorher bekannten und begrenzten

Teil des Bodens einnehmen, zu schätzen und anzugeben [...]“. In späterer Zeit wurde hierbei meist eine Fläche zwischen 1 m² und 16 m² ausgezählt, um sogenannte Minimalareale⁶ einer Pflanzenassoziation bestimmen zu können. Zur Ermittlung der Verunkrautung ganzer Flächen beschrieb CHANCELLOR 1976 das Verfahren mit einer sehr viel kleineren Fläche von nur 0,1 m². MARSHALL 1989 setzte den Zählrahmen zur Ermittlung der Verteilung von Unkräutern ein und MORTENSEN *et al.* 1993 entwickelten ihn zu dem gleichen Zweck weiter. GERHARDS *et al.* 1996 und CLAY *et al.* 1999 adaptierten den Zählrahmen dann zur Untersuchung der Verteilung von Unkräutern für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle.

Die Auswahl der Fläche dieses Zählrahmens ist dabei nicht, wie in der Pflanzensoziologie beschrieben, an die jeweilige Verunkrautungssituation angepasst (im Sinne von BRAUN-BLANQUET 1964: „[...] *Im einzelnen muß das Taktgefühl des Forschers entscheiden, wie die Teilanalyse eines bestimmten Vegetationsflecks am zweckmäßigsten zu gestalten ist [...]“*), sondern aus rein pragmatischen Beweggründen gewählt. Bei gleichbleibender Meßrasterauflösung wäre ein Zählrahmen von 1 m² Fläche auf einer größeren Ackerfläche aus arbeitstechnischen und finanziellen Gründen nicht mehr einsetzbar (vgl. WILES UND SCHWEIZER 1999 und KRUEGER *et al.* 2000). Aus diesem Grund wurde bei den Untersuchungen, aus denen die in diesem Kapitel analysierten Daten stammen, ein Zählrahmen in Anlehnung an den *Göttinger Schätzrahmen* gewählt. Der *Göttinger Schätzrahmen*⁷ mit einer Fläche von 1/10 m² wurde im *Integrierten Pflanzenbau* zur Ermittlung von Schadensschwellen eingeführt (BARTELS *et al.* 1983) und ist erst später zur Erfassung der Variabilität der Verunkrautung für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle eingesetzt worden.

Nach der manuellen Datenerfassung folgt die Erstellung einer Unkrautverteilungskarte mit Hilfe verschiedener Interpolationsverfahren (Abs. 4.1). Auf der Grundlage von Schwellenwerten, die sich an den Schadensschwellen des *Integrierten Pflanzenschutzes* orientieren, werden dann Teilflächen bestimmt, auf denen eine Applikation von Herbiziden erfolgen muß (Abs. 4.2). Unter Zuhilfenahme dieses Verfahrens sind Herbizideinsparungen von durchschnittlich 21 - 75 Prozent erreicht worden (KTBL 2001).

2.1.2 Bildanalytische Verfahren

In den letzten Jahren sind große Anstrengungen unternommen worden, um Sensoren und Verfahren aus der digitalen Bildverarbeitung für die Erkennung, Differenzierung und Bekämpfung von verschiedenen Unkräutern nutzen zu können. Neben der bildanalytischen Untersuchung von digitalen Fotos in unterschiedlichen Farbräumen zur Erkennung (PHILIPP UND RATH 2002) und Kartierung (PHILIPP *et al.* 2003) von Unkräutern wurden verschiedene Farbindizes zur Diskriminierung und Kartierung von Unkräutern aus Bildinformationen verwendet (WOEBBECKE *et al.* 1995). FRANZ *et al.* 1991, ZHANG UND CHAISATTAPAGON 1995, ANDREASEN *et al.* 1997, STAFFORD UND BENLLOCH 1997, MEYER *et al.* 1998, sowie TANG *et al.* 1999 setzten unterschiedliche Strategien und Algorithmen zur Unterscheidung von Unkräutern und Kulturpflanze

⁶Ein Minimalareal einer Assoziation ist das kleinste Areal, auf dem die Assoziation ihre definitive Anzahl Konstanten erreicht. (vgl. dazu DU RIETZ 1921, S. 145)

⁷Namensgebend war das Institut für Pflanzenpathologie und Pflanzenschutz der Georg-August Universität Göttingen. (BARTELS *et al.* 1983)

sowie Boden und Pflanzenresten in digitalen Bildinformationen ein. Grundsätzlich wird hierbei zunächst eine Segmentierung von Pflanzen und Boden auf der Grundlage unterschiedlicher Kriterien (z.B. sichtbare Farbinformationen, Reflexionseigenschaften im nahen Infrarot) vorgenommen. Die Klassifikation der Unkräuter bzw. deren Unterscheidung von der Kulturpflanze wird in den genannten Arbeiten auf unterschiedliche Weise gelöst. Form- und Farbparameter werden hierbei jedoch fast immer zu Hilfe genommen.

Im Rahmen dieser Arbeit spielt insbesondere das von SÖKEFELD 1997, GERHARDS *et al.* 2002a, GERHARDS UND CHRISTENSEN 2003 und OEBEL *et al.* 2004 vorgestellte Verfahren der bildanalytischen Erkennung von Unkräutern eine Rolle. Dieses Verfahren beruht auf dem Einsatz von infrarotsensitiven CCD-schwarz-weiß-Kameras. Sie werden an einem Trägerfahrzeug in einem Abstand von ca. 3 m und in einer Höhe von 50 bis 100 cm befestigt. In Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit werden etwa alle 2 m jeweils 3 Bilder von der Ackeroberfläche aufgenommen. Die Einzelbilder decken eine Fläche von ca. 0,16 m² ab. Mit Hilfe von DGPS werden hierbei die Koordinaten der Bildergruppen (à 3 Bilder) erfaßt. Auf der Basis dieser Informationen im Zusammenspiel mit dem Konzept der Schadensschwellen können dann *online*-Applikationen oder Applikationen im Anschluß an die Erstellung einer Applikationskarte durchgeführt werden (GERHARDS UND CHRISTENSEN 2003, OEBEL *et al.* 2004). Letztere basieren wiederum auf dem bereits beschriebenen Vorgehen der Interpolation und der anschließenden Einteilung von Bewirtschaftungseinheiten. Mit diesem Verfahren sind (je nach Kulturart) Herbizideinsparungen von 11 bis 90 Prozent erreicht worden (GERHARDS UND CHRISTENSEN 2003). Die Klassifikation wird hierbei auf der Grundlage von *Fourier* Deskriptoren der Konturlinien verschiedener Unkräuter und deren Abgleich mit einer zuvor erstellten Wissensbasis realisiert (SÖKEFELD 1997).

2.1.3 Fernerkundung

Neben den beschriebenen manuellen (Abs. 2.1.1) und bildanalytischen (Abs. 2.1.2) Verfahren der Datenerfassung werden auch Ansätze verfolgt, das Unkrautvorkommen mit Hilfe der Fernerkundung durch Satelliten oder Flugzeuge zu erfassen. Es hat sich jedoch gezeigt, daß die räumliche und auch oft zeitliche Auflösung der Bilddaten nur selten ausreicht, um aussagekräftige und zur Applikation von Herbiziden nutzbare Informationen zu erhalten (KTBL 2001, LAMB UND BROWN 2001). Eine Erstellung von Unkrautverteilungskarten aus auf diese Weise gesammelten Informationen ist nur in wenigen Ausnahmefällen aussichtsreich. HÄUSLER *et al.* 1996 und BACKES 2004 nennen die Acker-Kratzdistel *Cirsium arvense* L. als Beispiel für ein Unkraut, daß aufgrund seiner Blattfläche und hohen Aggregation im Acker auf dem Luftbild deutlich zu erkennen ist. HÄUSLER UND NORDMEYER 2003 beschreiben außerdem den Acker-Fuchsschwanz *Alopecurus myosuroides* HUDS. als potentiell detektierbares Ungras. LAMB UND WEEDON 1998 erkennen 87 Prozent der vorkommenden Ungräser von *Panicum effusum* in Luftbildern. Als das grundlegende Problem beim Einsatz von Fernerkundungsdaten in der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle nennen HÄUSLER UND NORDMEYER 2003 die mangelhafte Detektion der Unkräuter in den Entwicklungsstadien, in denen die Applikationsentscheidung getroffen werden muß. Der Einsatz multispektraler Informationen zur Erkennung von Unkräutern wird von MEDLIN *et al.* 2000, GOEL *et al.* 2003 und GRAY 2004 beschrieben und als

in Zukunft aussichtsreicher erachtet. Die Identifizierung von Unkrautnestern unterschiedlicher Arten gelang hierbei ab Dichten von 10-20 Pflanzen pro Quadratmeter. Da beim Einsatz der Fernerkundung zwar auf Unkrautkarten in Form der Sensorinformationen zurückgegriffen, die Erstellung dieser Karten jedoch nicht durch Interpolation erfolgt, wurden die in diesem Bereich auftretenden speziellen methodischen Probleme in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

2.2 Repräsentativität manueller Verfahren der Datenerfassung für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle

Um die Repräsentativität der Datenerfassung für die Erstellung von Unkrautverteilungskarten mit Hilfe der beschriebenen manuellen Verfahren (Abs. 2.1.1) bzw. der stichprobenhaften Erfassung von Unkräutern generell zu beschreiben, wurde in dieser Arbeit eine Analyse mit Hilfe von GIS durchgeführt. Die Übereinstimmung der manuell erfaßten Stichproben auf der Ackerfläche mit einer Grundgesamtheit (in diesem Fall keiner *echten* Grundgesamtheit, sondern die Daten einer räumlich deutlich höher aufgelösten Datenerfassung mit dem bildanalytischen Verfahren) in der Art, daß die Struktur der Grundgesamtheit widerspiegelt wird, wird in dieser Studie dabei als repräsentativ betrachtet. Es sollte untersucht werden, ob bei der manuellen Datenerfassung in einem Meßraster unterschiedliche Unkrautverteilungskarten entstehen, wenn die Stützpunkte für die Stichprobe um wenige Meter versetzt werden. Die Unterschiede zwischen den generierten Unkrautverteilungskarten werden einerseits visuell bewertet und andererseits auf der Grundlage von Kreuzkorrelationen geschätzt. Unterschiede zwischen den Unkrautverteilungskarten wären somit deutliche Indikatoren dafür, ob die Unkrautverteilungskarten, die mit dieser Datengrundlage erstellt werden, repräsentativ für die vorliegende Verunkrautungssituation und damit für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle sind oder nicht. Im folgenden werden der Versuchsstandort der Untersuchung, die Datengrundlage und die Ergebnisse dieser GIS-Analyse dargestellt.

2.2.1 Datengrundlage

Auf dem Versuchsgut Dikopshof der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn wurden in den Jahren 1994 bis 2004 vom Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau umfangreiche Untersuchungen zum Befall einzelner Felder mit Unkräutern durchgeführt, um das System der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle praktisch durchführen sowie ökonomisch bewerten zu können (vgl. unter anderem TIMMERMANN 2001, GERHARDS *et al.* 2002b, TIMMERMANN *et al.* 2003 sowie KROHMANN 2004). Das Versuchsgut liegt in der Köln-Aachener Bucht bei Weseling und zeichnet sich durch einen Boden aus lehmigem Sand bis Lehm aus Löß aus. Das in dieser Untersuchung am intensivsten untersuchte Feld 8 liegt in einem Bereich weitestgehend homogener Bodenverhältnisse (Abb. 1.1).

Im Zusammenhang mit den angesprochenen Untersuchungen des Lehrstuhls für Allgemeinen Pflanzenbau wurde bei der Datenerfassung einerseits auf das Verfahren der manuellen Datenerfassung zurückgegriffen (Abs. 2.1.1), andererseits wurde jedoch auch ein bildanalytisches Verfahren zur Erfassung der Verunkrautungssituation eingesetzt. Daten aus beiden Verfahren wurden



Abb. 2.2: Das Versuchsgut Dikopshof der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn. Auf den markierten Versuchsfeldern wurden seit 1994 vom Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau Versuche im Zusammenhang mit dem System der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden hauptsächlich Daten von Feld 8 untersucht. DGK 5, ©Landesvermessungsamt NRW, Bonn, 1184/2003.

in die vorliegende Untersuchung mit aufgenommen. Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Versuche wurden mit Daten von Feld 8 (vgl. Abb. 2.2 und 1.1) durchgeführt, da auf dieser Fläche zeitnah beide Verfahren auf einer mit Mais bepflanzten Ackerfläche angewendet worden waren.

Tab. 2.1: Die wichtigsten Parameter der untersuchten Verfahren der Datenerfassung im Vergleich.

Verfahren	Meßraster	Fläche der Stichprobe	n	Anteil (%) ¹
manuell	7,5x15 m	4x0,1 m ²	238	3,9 %
bildanalytisch	≈2x3 m	≈0,16 m ²	2745	18,3 %

¹ Anteil der summierten Stichprobenflächen an der Gesamtfläche von ca. 2,4 ha

Auf der Grundlage dieser beiden Datenbestände wurden zunächst vergleichende Untersuchungen durchgeführt, um der Frage nachzugehen, ob und inwieweit es mit dem manuellen Verfahren der Datenerfassung möglich ist, adäquate Unkrautverteilungskarten für die teilflächenspezifische

Unkrautkontrolle zu erstellen (s. auch BACKES UND PLÜMER 2003a). Im Vordergrund stand dabei die Frage nach der Invarianz der Stichproben gegenüber einer räumlich verschobenen Datenerfassung, d.h. es sollte untersucht werden, welchen Einfluß es auf die erzeugte Unkrautverteilungskarte hat, wenn direkt an einem der Kreuzungspunkte des Meßrasters beprobt wird oder an einem wenige Meter (in diesem Fall 1,5 m) entfernten Stützpunkt.

Die manuell erfaßten Daten wurden in einem Meßraster von 7,5x15 Meter ermittelt (s. Abb. 2.1, Tab. 2.1). Hierbei wurde die Datenerfassung an den Kreuzungspunkten des Meßrasters mit Hilfe des bereits in Abs. 1.2.1 beschriebenen *Göttinger Schätzrahmens* durchgeführt. Die Fläche des Zählrahmens lag hierbei bei 0,1 m². Dieser wurde an den im Acker deutlich markierten Kreuzungspunkten des Meßrasters vier Mal ausgezählt, so daß eine Gesamtfläche von 0,4 m² pro Stützpunkt ausgezählt wurde. Die in dieser Art erfaßten Daten wurden dann später auf die Fläche von einem Quadratmeter normiert.

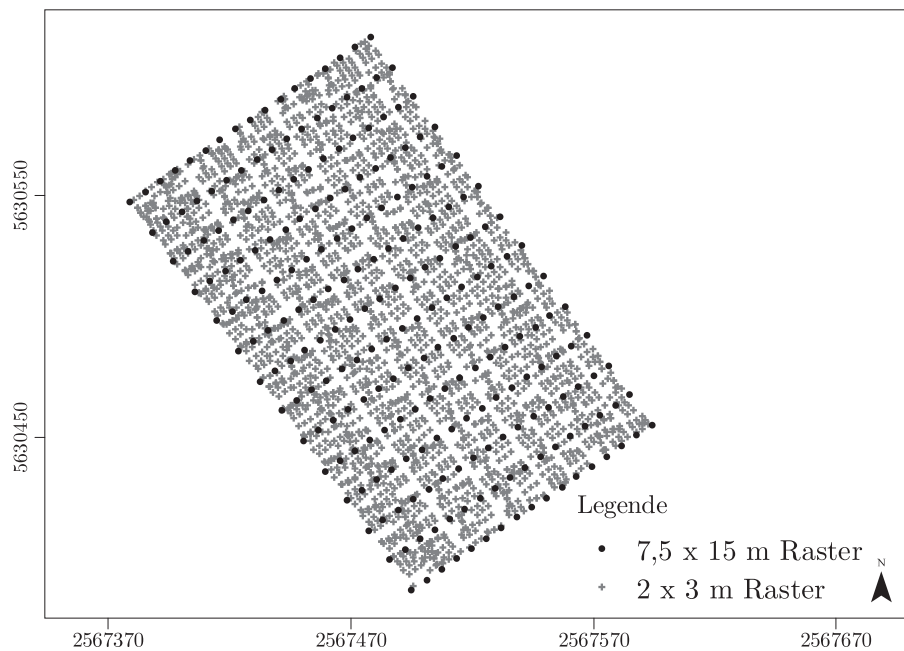


Abb. 2.3: Positionen der Stützpunkte für die Datenerfassung in den Meßrastern 7,5x15 (schwarze Punkte) sowie 2x3 Meter (graue Kreuze).

Die Daten, die mit Hilfe des bildanalytischen Verfahrens erfaßt wurden, standen zunächst nur in Form von zum Teil georeferenzierten Fotos der Ackeroberfläche zur Verfügung. Wie in Abs. 2.1.2 beschrieben, wurde die Datenerfassung dabei ungefähr in einem Meßraster von 2x3 Metern durchgeführt, da mit den 3 Kameras etwa alle 2 Meter Fotos von der Ackeroberfläche aufgenommen wurden. Die GPS Koordinaten lagen dazu jeweils nur am Montageort des GPS Geräts für eine Gruppe von 3 Bildern vor. Ausgehend von den gemessenen Abständen der Kameras zueinander und deren Abstand vom GPS Gerät, konnten die Koordinaten jedes einzelnen Bildes in dieser Studie berechnet und in eine MS-ACCESS Datenbank übertragen werden. Jeder Koordinate wurde in einem nächsten Arbeitsschritt ein Bild der Überfahrt mit dem Trägerfahrzeug zugeordnet.

Die Bildbearbeitungssoftware IRFANVIEW (SKILJAN 2004) wurde daraufhin dazu verwendet, jedes der 2745 innerhalb der Versuchsfläche (Feld 8, s. Abb. 2.2) aufgenommenen Fotos manuell am PC auszuwerten. Alle in den Fotos erkennbaren Unkräuter wurde in der MS-ACCESS-Datenbank vermerkt. Unterschieden wurden dabei die Arten *Chenopodium album* L. (Weißer Gänsefuß), *Galium aparine* L. (Kletten-Labkraut), *Veronica* ssp. (Ehrenpreis-Arten), *Viola* ssp. (Stiefmütterchen Arten), monokotyledone Pflanzen (*Gräser*) als Gruppe sowie *sonstige Unkräuter* als Gruppe, wenn eine Unterscheidung auf den Einzelbildern nicht oder nur unzureichend möglich war. Dieses Vorgehen mit der manuellen Auswertung jedes einzelnen Bildes wurde dem Adaptieren der ebenfalls vorliegenden Ergebnisse der automatischen Erkennung vorgezogen, da mit dem Erkennungsalgorithmus von SÖKEFELD 1997 noch eine Fehlerquote der Erkennung von - im günstigsten Fall - 19,8 Prozent zu erwarten ist und eine hochgenaue Erkennung der Unkräuter auf den Bildern gewährleistet sein muss, um einen Vergleich zwischen den beiden vorgestellten Methoden plausibel zu ermöglichen. Meßfehler, die im Rahmen der automatischen Erkennung der Unkräuter gemacht werden, sollten systematisch ausgeschlossen werden. Zudem beruht bei der automatischen Erkennung die größte Anzahl der Fehler auf der Verwechslung mit morphologisch ähnlichen Unkraut- bzw. Pflanzenarten. Als Untersuchungsgrundlage lagen somit für die beschriebene Untersuchung zwei Datensätze vom gleichen Feld in unterschiedlicher räumlicher Auflösung vor.

2.2.2 Analyse der Daten in GIS

Die beiden in Abs. 2.2.1 beschriebenen Datensätze wurden in das Geoinformationssystem ARC-GIS übertragen und dort visualisiert, (vgl. Abb. 2.3) um die anfangs angesprochene Fragestellung nach der Repräsentativität der Stichproben des manuellen Verfahrens der Datenerfassung mit GIS zu untersuchen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden Erfassungs- bzw. Stützpunkte im GIS simuliert, die eine Verschiebung der Stützpunkte des manuellen Verfahrens um $\Delta = 1,5\text{m}$ darstellen (vgl. dazu BACKES UND PLÜMER 2003a und BACKES UND PLÜMER 2003b sowie Abb. 2.4). Mit Hilfe eines im verwendeten Geoinformationssystem integrierten *Nearest Feature Script* (JENNESS 2003) wurden jedem simulierten Stützpunkt die nächstgelegenen Daten des bildanalytischen Verfahrens zugeordnet und mit diesen verknüpft (vgl. Abb. 2.4)

Somit standen für die weiteren Untersuchungen insgesamt acht Datensätze zur Verfügung (Die Datensätze des bildanalytischen Verfahrens in der räumlichen Auflösung 2x3 Meter, der manuellen Datenerfassung im Meßraster 7,5x15 Meter und sechs simulierte Datensätze der gleichen räumlichen Auflösung mit den Unkrautdaten der nächstgelegenen Daten aus dem bildanalytischen Verfahren (s. Abb. 2.4)).

Aus diesem Datenbestand wurden im folgenden Unkrautverteilungskarten der jeweiligen Unkrautarten erzeugt (s. Abb. 2.6, A.1, A.2, A.3). Dabei wurde das Interpolationsverfahren der *Natural Neighbor Interpolation* (vgl. Abs. 4.1.1.2) verwendet. Nach diesem Interpolationsschritt liegen im GIS Rasterdaten in Form von Unkrautverteilungskarten vor. Anschließend wurden die Unkrautverteilungskarten über eine Kreuzkorrelation im GIS sowie visuell miteinander verglichen. Hierbei wurde der Korrelationskoeffizient nach Formel 2.1 geschätzt, wobei die Software GRID PLUS (O'FLAHERTY UND LETHBRIDGE 2001) dazu verwendet wurde, die entsprechenden Berechnungen mit den Rasterdaten durchzuführen.

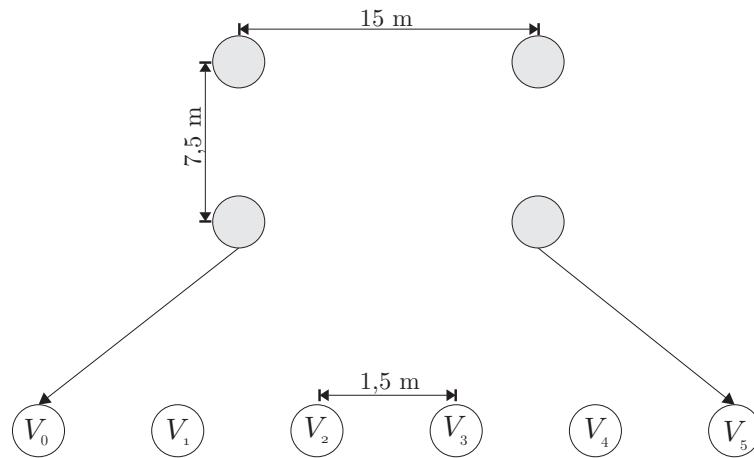


Abb. 2.4: Die simulierten Punkte für die Datenerfassung (weiße Kreise) wurden um jeweils 1,5 Meter in Arbeitsrichtung verschoben und mit den Unkrautdaten der nächstgelegenen Daten aus dem bildanalytischen Verfahren verknüpft. Die grauen Kreise symbolisieren das Meßraster von 7,5x15 Meter, zwischen dem diese Simulation durchgeführt wurde. Der Punkt V_0 entspricht dabei genau der Position des initialen Stützpunktes in o.g. Meßraster und der Punkt V_5 dem folgenden Stützpunkt.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}} \quad (2.1)$$

2.2.3 Ergebnisse des Verfahrensvergleichs

Die Resultate der Datenerfassungen mit der beschriebenen manuellen und bildanalytischen Methode weisen zunächst Unterschiede in der Schätzung der mittleren Verunkrautung auf. Generell ist hierbei festzustellen, daß beim manuellen Verfahren die Verunkrautung überschätzt wird. Wird mit dem bildanalytischen Verfahren gearbeitet, wird eine deutlich niedrigere mittlere Verunkrautung geschätzt. Ähnliche Ergebnisse werden von PHILIPP *et al.* 2003 beschrieben. Dies zeigt sich auch an den jeweiligen Unkrautverteilungskarten in den Abb. 2.6, A.1, A.2 und A.3 (s. Anhang). Mit dem bildanalytischen Verfahren wurde die Verunkrautung zwischen 157 und 6300 % geringer geschätzt. Hierbei wurden Unkräuter, die weniger stark aggregiert auftreten und auf der ganzen Fläche zu finden sind, ähnlicher geschätzt als solche Unkräuter, die auf der Fläche seltener oder in kleinen Nestern auftreten.

Beispiele hierfür sind z.B. *Chenopodium album* L. (in Tab. 2.2 CHEAL) mit einer Abweichung von rund 270 %, das bezogen auf die Gesamtfläche sehr häufig auftaucht und *Viola arvensis* L. (in Tab. 2.2 VIOAR) mit vereinzelt, geringem Auftreten. Betrachtet man beispielsweise die Histogramme der Unkrautart *Chenopodium album* L. in Abhängigkeit von der Erfassungsmethodik, so wird deutlich, daß nach der Datenerfassung in beiden Verfahren eine starke rechtsschiefe Verteilung vorliegt, bei der im vorliegenden Fall eine große Anzahl unkrautfreier Stützstellen wenigen schwach bis mittelstark verunkrauteten Stützstellen gegenübersteht. Diese typische

Tab. 2.2: Durchschnittlich gezählte Unkräuter in Abhängigkeit von der Erfassungsmethode.

Unkrautart ¹	CHEAL	FUMOF	POLSS	STEME	VIOAR	GGGGG
manuell	11,53	2,21	0,58	0,22	0,63	1,88
bildanalytisch	4,26	0,82	0,04	0,14	0,01	1,18
Abweichung in %	271	270	1450	157	6300	159

¹ Pflanzen pro Quadratmeter; Abkürzung der Artnamen nach Bayer-Code

Verteilung der Unkrautdaten zeigte sich für alle Unkräuter der Untersuchung und wird in dieser Form auch übereinstimmend von MARSHALL 1989, WILSON UND BRAIN 1991 und HEISEL *et al.* 1996 beschrieben. Diese typische Verteilung weist deutlich darauf hin, daß Aggregationen von Unkräutern vorliegen, d.h. daß Unkräuter punktuell in Form von Nestern auftreten.

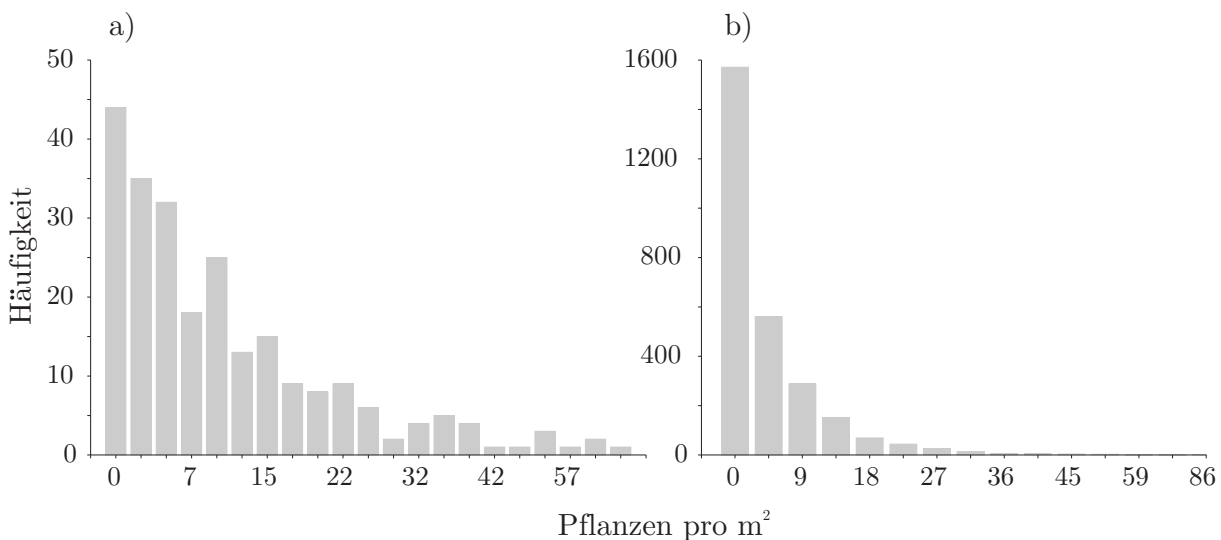


Abb. 2.5: Histogramme der Datenerfassungen im manuellen (a) und bildanalytischen Verfahren (b) für *Chenopodium album* L. im Juni 2001. Details zu den Verfahren s. Tab 2.1 und Abs. 2.2.1.

Um nun den Einfluß der Stützpunktauswahl auf das Resultat der Unkrautverteilungskarte für den Einsatz in der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle zu analysieren, wurden, wie beschrieben, zu den vorliegenden Datensätzen Unkrautverteilungskarten mit dem Verfahren der *Natural Neighbor Interpolation* erstellt.

Die aus den Daten des bildanalytischen Verfahrens gewonnenen Karten zeichnen sich durch ein deutlich differenzierteres Bild der Verunkrautung aus. Wesentlich mehr Details der Verunkrautungssituation werden erkennbar. Dies ist jedoch nicht weiter verwunderlich, da in einer deutlich feineren Auflösung beprobt wurde. Erstaunlich sind jedoch die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren im direkten Vergleich. Deutliche Unterschiede in der Darstellung der Verunkrautungssituation sind für alle untersuchten Unkrautarten zu erkennen. Insbesondere ist

auffällig, daß in vielen Fällen die Unkrautnester, die in der Unkrautverteilungskarte des manuellen Verfahrens auftreten in der Karte des bildanalytischen Verfahrens entweder verschwinden oder wesentlich geringere Ausmaße haben. Teilweise ist auch eine Verschiebung der Nester zu erkennen. Der Verunkrautungstrend der Ackerfläche wird in beiden Verfahren ähnlich eingestuft. D.h. es wird z.B., wie in Abb. 2.6 ersichtlich im nördlichen Teil der Fläche eine stärkere Verunkrautung ermittelt als im südlichen Teil. Dies ist allerdings nicht Ziel der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle, die auf die heterogene Verteilung der Unkräuter reagieren will.

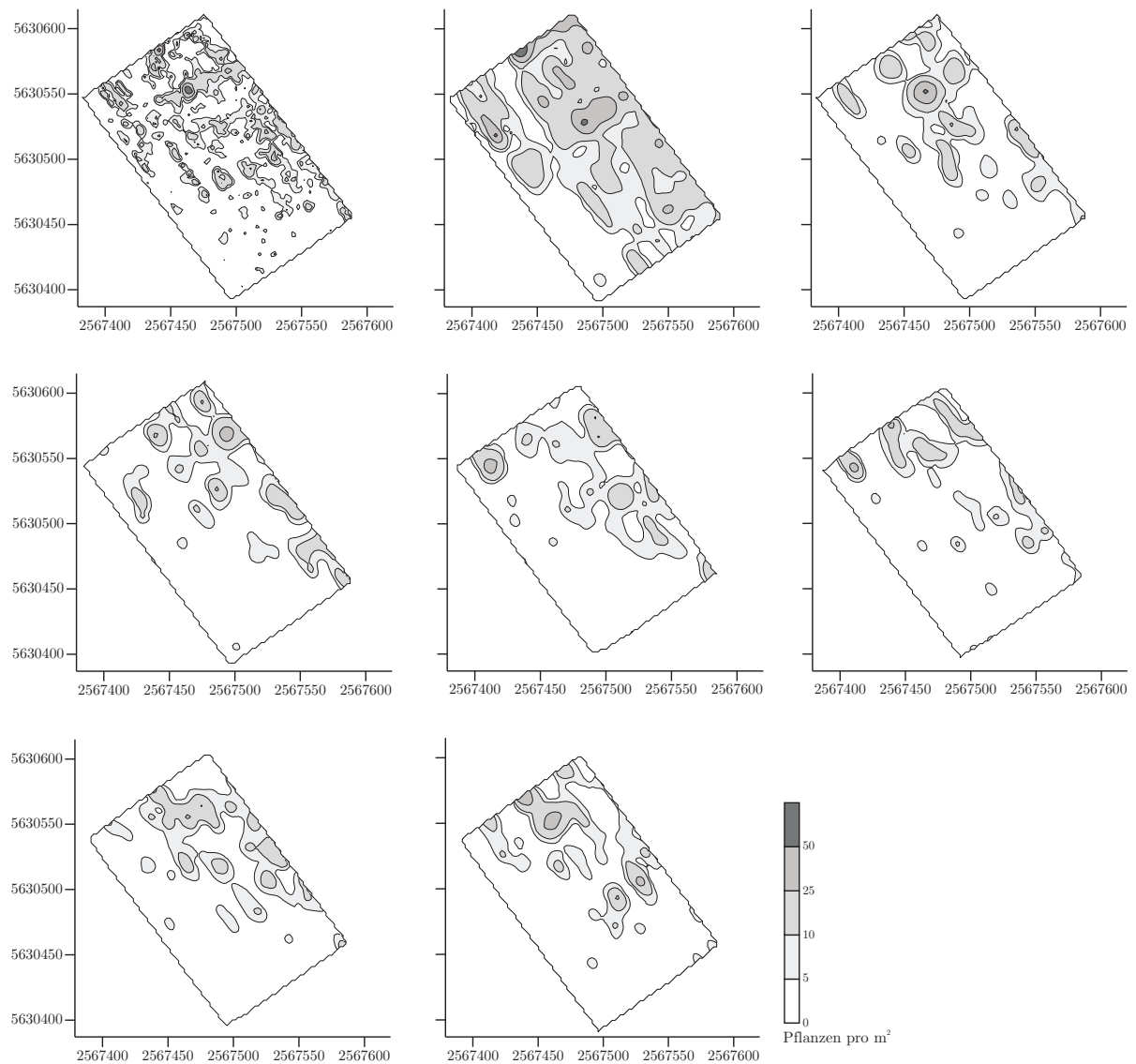


Abb. 2.6: Karten der Verteilung von *Chenopodium album* L. Dargestellt sind die unterschiedlichen Karten in Abhängigkeit vom Startpunkt der Datenerfassung. Die obere linke Karte zeigt die Verteilung nach der Datenerfassung mit digitalen Kameras, daneben die Karte aus der manuellen Datenerfassung und danach die Karten aus den simulierten Startpunkten der Datenerfassung im gleichen Meßraster.

Daher sollten die Unkrautnester, die es zu bekämpfen gilt, in beiden räumlichen Auflösungen sichtbar sein, wenn eine adäquate Bekämpfung erreicht werden soll. Die Korrelation der Un-

krautverteilungskarten aus dem manuellen und dem bildanalytischen Verfahren fällt allerdings weit weniger stark aus. Nach BROSIUS 2002 kann die Korrelation der Unkrautverteilungskarten (diese erreicht einen maximalen Wert in dieser Studie von 0,36 für die beobachteten *Gräser* (vgl. Tab. A.3)) aus den beschriebenen Verfahren als schwach bezeichnet werden. Grundsätzlich wird aus dem visuellen Eindruck und der statistischen Untersuchung deutlich, daß je nach Erfassungsmethode und initialem Startpunkt der Datenerfassung hinsichtlich des Einsatzes von Herbiziden unterschiedliche Entscheidungen getroffen worden wären.

Tab. 2.3: Ergebnisse der Kreuzkorrelation zwischen den erstellten Unkrautverteilungskarten für *Chenopodium album* L.

	K ¹	V ₀ ²	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	M ³
K	1,00	0,55	0,40	0,45	0,51	0,53	0,53	0,23
V ₀	0,55	1,00	0,48	0,39	0,52	0,47	0,55	0,30
V ₁	0,40	0,48	1,00	0,49	0,43	0,37	0,29	0,40
V ₂	0,45	0,39	0,49	1,00	0,62	0,39	0,34	0,28
V ₃	0,51	0,52	0,43	0,62	1,00	0,53	0,48	0,24
V ₄	0,53	0,47	0,37	0,39	0,53	1,00	0,65	0,30
V ₅	0,53	0,55	0,29	0,34	0,48	0,65	1,00	0,23
M	0,23	0,30	0,40	0,28	0,24	0,30	0,23	1,00

¹ Daten der Kameraüberfahren

² Die Verteilungskarten V₀-V₅ sind aus den Daten der simulierten Erfassungspunkte entstanden

³ Daten der manuellen Datenerfassung

Inwieweit der Startpunkt für die Datenerfassung im manuellen Verfahren einen Einfluß auf die Unkrautverteilungskarten hat, kann anhand der Abbildungen 2.6, A.1, A.2 und A.3 gezeigt werden. Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Unkrautverteilungskarten in Abhängigkeit vom Startpunkt der Datenerfassung. Jede der fünf auf *versetzt* erfaßten Unkrautdaten erstellten Unkrautverteilungskarten beschreibt eine andere Situation der Unkrautverteilung, insbesondere der auftretenden Unkrautnester. Grundsätzlich besteht, wie schon beim Vergleich der zwei verwendeten Erfassungsmethoden beschrieben, ein Zusammenhang zwischen den Unkrautverteilungskarten im Hinblick auf die grundsätzliche Tendenz der Verunkrautungssituation auf der Ackerfläche. Es ist jedoch auch in diesem Fall bei allen untersuchten Unkrautarten zu beobachten, daß in Abhängigkeit vom Startpunkt der Datenerfassung, unterschiedliche Entscheidungen bezüglich des Einsatzes von Herbiziden getroffen worden wären. Diese visuelle Interpretation der Verteilungskarten spiegelt sich auch in den Korrelationsmatrizen der untersuchten Rasterdateien wider. Die Werte der Korrelation schwanken zufällig zwischen hohen und sehr schwachen Korrelationen. Aus diesen Ergebnissen läßt sich ablesen, daß bei einer manuellen Datenerfassung in diesem Meßraster und mit dem verwendeten Zählrahmen keine adäquaten (*verschiebungsinvarianten*) Unkrautverteilungskarten erzeugt werden können, da nicht das zugrundeliegende Phänomen untersucht wird, sondern zufällige, nicht repräsentative Parameter das Kartenresultat bestimmen. Die Erkenntnis, daß ein nesterweise verteiltes Phänomen mit den Methoden der Stichprobe in einem Meßraster und mit Zählrahmen im ungünstigsten Fall

nicht erfaßt werden kann, ist dabei nicht neu. Bereits ANSCOMBE, F.J. 1950 und LLOYD 1967 weisen darauf hin, daß bei entsprechender Verteilung des zu untersuchenden Phänomens stets die Möglichkeit gegeben ist, keines der Individuen zu treffen, egal wieviele Zählrahmen verwendet werden. Dies ist eine in der Signalverarbeitung bereits seit langem bekannte Tatsache, die von NYQUIST 1928 und SHANNON 1949 eingehend beschrieben wurde und als Sampling- oder Abtasttheorem bekannt ist. Grundlegend ist dabei zunächst der Gedanke einer vollständigen Rekonstruktion eines eindimensionalen Signals.

Ein Signal mit einer maximalen Frequenz W kann nach den genannten Autoren nur dann vollständig rekonstruiert werden, wenn die Frequenz der Stichproben mindestens $2W$ beträgt. Überträgt man diese Erkenntnis auf den zweidimensionalen Fall eines adäquat zu erfassenden Unkrautnests, so würde dies bedeuten, daß mindestens eine Fläche von 450 m^2 kontinuierlich mit Unkräutern bewachsen sein müsste,⁸ um als Nest vollständig rekonstruiert werden zu können. Diese Betrachtungsweise läßt dabei allerdings den Einsatz eines Zählrahmens definierter Größe zur Probenahme außer Acht. Da die hier untersuchten Methoden der Unkrautdatenerfassung - in Ermangelung der Kenntnis über die tatsächliche Grundgesamtheit und Verteilung einer Unkrautpopulation - nur einen ersten Einblick in das Problem repräsentativer Datenerfassung bieten, wird in Kapitel 5 eine neue Methodik vorgestellt, die dies ermöglichen soll. Zudem ist ein Unkrautnest ein unscharf abgegrenzter Bereich bestimmter Verunkrautung im Sinne einer *unscharfen Menge* (SPIES 1993), der aufgrund seiner Unschärfe nicht in der gleichen Art und Weise wie ein kontinuierliches Signal abgetastet bzw. erfaßt werden kann. Die vollständige Rekonstruktion ist jedoch auch nicht Ziel der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle sondern vielmehr die repräsentative Erstellung von Unkrautverteilungskarten. Daß diese mit dem hier untersuchten, manuellen Verfahren nicht gewährleistet ist, konnte anhand mehrerer Beispiele gezeigt werden.

Inwieweit auch die Größe der Zählfläche einen Einfluß auf das Kartenresultat hat, wird in Kapitel 5 beschrieben.

⁸Ein zweidimensionales Signal im Sinne eines Unkrautnests müsste mit der vierfachen Genauigkeit der Ausgangsfrequenz abgetastet werden, was bei einem gegebenen Maßraster von $7,5 \times 15$ Meter bedeuten würde, daß eine Fläche von 15×30 Metern entsprechend mit einem Unkrautnest vollständig bedeckt ist.

3 Datenmanagement

Bei der Erstellung von Unkrautverteilungskarten mit GIS werden wie in den vorangegangenen Kapitel beschrieben, Erfassungsdaten unterschiedlicher Herkunft und Präzision herangezogen. Dies setzt umfangreiches Wissen über die vorliegenden Daten voraus. Sind die Erfassungsdaten und die im Resultat entstehende Unkrautverteilungs- bzw. Applikationskarte nicht aus einer Hand entstanden, entsteht in der Regel bereits bei der Analyse der Erfassungsdaten ein methodisches Problem. Es ist nicht immer eindeutig zu klären, auf welchem Weg die Erfassungsdaten entstanden sind und nicht alle Besonderheiten der vorliegenden Daten sind ohne die Hilfe des *Erhebenden* zu erkennen. Zusätzliche Informationen in Form von Metadaten sind hierbei hilfreich, denn diese liefern die wichtigsten Informationen zu den Erfassungsdaten oder auch den Unkrautverteilungskarten. Auch bei dem zu Beginn dieser Arbeit (vgl. Kapitel 1) angesprochenen Problem der Dokumentation betrieblicher Daten können Metadaten wichtige Bestandteile sein, denn neben der Reduzierung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln wird von politischer Seite eine bessere Dokumentation aller Vorgänge im Pflanzenschutz gefordert. Dies kann auf der Grundlage von Metadaten zu Unkrautverteilungs- und Applikationskarten geschehen. Um eine nachhaltige Datenhaltung mit einer solchen Dokumentation besser in Einklang zu bringen, können in GIS Metadaten zu allen Datenformaten eines solchen Systems erstellt und gepflegt werden. In diesem Kapitel werden dazu die Grundzüge der Metadatenhaltung in GIS beschrieben. Außerdem wird ein auf dem Metadatenstandard ISO 19115 basierendes Metadatenprofil für die Präzisionslandwirtschaft vorgestellt, welches die im Weiteren behandelten Probleme der Metadatenhaltung vermindern soll.

3.1 Metadaten

Die Metadaten eines Geoinformationssystems sind systematische und deduktive Informationen über die Inhalte, die Qualität, die (Modell-) Strukturen, die Beziehungen, die Klassifizierungs- und Darstellungsoptionen sowie die Verwendungszusammenhänge der dem System zugrunde liegenden Geodaten.

(HUBER *et al.* 1999)

Neben dieser weitreichenden Definition kann man Metadaten auch schlicht als *Daten über Daten* bezeichnen. Sie beschreiben im Falle von Geodaten z.B. deren Herkunft, ihren Raumbezug, die Qualität der Daten, die Datenformate oder -typen und verschiedene weitere Merkmale. Aufgrund dieser Merkmale können Metadaten zu bestimmten Geodaten u.a. dazu genutzt werden, eigene Daten zu Inventarisieren. Außerdem wird die Möglichkeit eröffnet, nach bestimmten Geodaten in Katalogsystemen systematisch zu recherchieren und letztlich kann eine Dokumentation zu den Geodaten durchgeführt werden.

Diese Eigenschaften von Metadaten werden auch bei der Erstellung von Unkrautverteilungskarten in GIS benötigt. Im Grunde genommen werden erst durch vorhandene Metadaten aus den Unkrautverteilungskarten *Informationen*, die eine effiziente und nachhaltige Nutzung der Daten in einem GIS ermöglichen (vgl. HUBER 2002). Bei der Erstellung von Unkrautverteilungskarten kann es bereits beim Analysieren der Eingangsdaten zu Problemen kommen, wenn verschiedene Personen mit den Daten arbeiten müssen. Genaue Informationen über die Art und Weise der Datenerfassung sind wichtig, um Fehler bei der Kartenerstellung zu verhindern. Ebenso wird in Zukunft von großem Interesse sein, welche Arbeitsschritte bei der Applikation anhand einer gegebenen Applikations- bzw. Verteilungskarte durchgeführt wurden. Dies ist für den *Präzisen Pflanzenbau* besonders wichtig, da zusätzlich die von der Politik geforderte Dokumentation mit der Haltung von Metadaten zu einer jeweiligen Unkrautverteilungskarte und Applikationskarte möglich ist.

3.1.1 Metadaten in Geoinformationssystemen

Kommerzielle GIS bieten Katalogsysteme an, die die Erstellung und Pflege von Metadaten ermöglichen. Der Marktführer auf diesem Gebiet, ESRI⁹, bietet in seinem Katalogsystem, ARC-CATALOG, unterschiedliche Eingabemasken für Metadaten an. Hier werden neben den Informationen zum Bearbeiter, bzw. Eigner der Daten, umfassende Informationen zu den Daten erfasst und abgespeichert. Dies führt dazu, daß die Daten nachhaltig verwendbar sind und auch rasch von Dritten interpretiert und genutzt werden können. Außerdem steigen die Möglichkeiten eines Datenaustauschs innerhalb eines vernetzten Systems. Methodische Probleme entstehen hierbei an zwei Stellen. Einerseits stehen mehrere optionale Standards zur Eingabe zur Verfügung und andererseits sind in den Eingabemasken der Standards unübersichtlich viele Daten einzutragen. Hieraus ergibt sich die Forderung nach der Vorgabe *eines* Standards für den *Präzisen Pflanzenbau* und die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle, der auch in Zukunft Bestand hat. Zudem muß für diesen Fachbereich eine Optimallösung zwischen Standardkonformität und minimalem Aufwand zur Datenerfassung gefunden werden.

3.1.1.1 Metadatenstandards

In der Vergangenheit wurden eine Reihe von Initiativen ins Leben gerufen, die das Ziel hatten, Metadaten systematisch zu standardisieren. Insbesondere die Entwicklung und Implementierung des CSDGM (vgl. Tab. 3.1) vom US-amerikanischen Federal Geographic Data Committee in kommerziellen GIS führte zu einer gesteigerten Metadatenhaltung auch im Bereich des *Präzisen Pflanzenbaus* (KORDUAN 2003, KORDUAN *et al.* 2004). Die in Tab. 3.1 aufgeführten Standards für Metadaten zu Geodaten stellen eine Auswahl der bekanntesten Standards aus diesem Bereich dar. Es existieren noch eine Reihe weitere Metadatenstandards, die jedoch zu meist auf nationaler Ebene gelten. In dieser Arbeit wurde jedoch mit dem seit 2003 verfügbaren ISO 19115 Metadatenstandard gearbeitet, der auf internationaler Ebene eingeführt wurde.

⁹Environmental Systems Research Institute Inc.

Tab. 3.1: Auswahl bekannter Metadatenstandards für Geodaten mit Geltungsbereich und Jahr der Etablierung.

Organisation	Standard	Geltung	Jahr
Federal Geographic Data Committee	FGDC-STD-001-1998 (CSDGM) ¹	USA/ Global	1998
Open Geospatial Consortium	Abstract Specification, Topic 11: Metadata V.4 ²	Global	1999
Comité Européen de Normalisation	CEN / TC 287 Env 12657 ²	Europa	1999
Dublin Core	DC Metadata ³	Europa	1998
Int. Organization for Standardization	ISO 19115 Metadata	Global	2003

¹ Content Standard for Digital Geospatial Metadata; Harmonisierung mit dem ISO TC / 211 seit 1997.

² Das Projekt wurde nicht mehr fortgesetzt zu Gunsten der Unterstützung des ISO TC / 211.

³ Genereller Metadatenstandard nicht nur für Geodaten. Das Geodatenprojekt wurde zu Gunsten des CEN Standards eingestellt.

3.1.2 Metadatenprofil (ISO 19115) für die Präzisionslandwirtschaft

Das größte methodische Problem bei der Erstellung von Metadaten zu entsprechenden Unkrauterfassungsdaten -verteilungskarten und -applikationskarten ist die große Anzahl an Pflichtelementen, die in einem vollständigen Metadatenatz gemäß eines Standards auszufüllen sind. Aus diesem Grund werden häufig keine Metadaten erstellt, was den Umgang mit diesen Daten massiv erschwert. Nicht nur Dienstleistungsunternehmen wird ohne Metadaten die Arbeit erschwert, die ggf. in Zukunft die erfassten Daten für eine Applikation oder Dokumentation benötigen, sondern auch innerbetrieblich kann es ohne Metadaten zu Problemen kommen, wenn z.B. verschiedene Personen mit denselben Daten arbeiten müssen. Oftmals kann nicht mehr genau nachvollzogen werden, um welche Daten es sich genau handelt, wer sie erstellt hat und wie sie ggf. anzuwenden sind. Um die Anzahl der Pflichtelemente so gering wie möglich zu halten, ohne dabei die Anforderungen eines Standards zu verletzen, wurde von BACKES *et al.* 2003 ein Profil des ISO 19115 Metadatenstandards für die Präzisionslandwirtschaft vorgestellt, das diesem Anspruch gerecht wird. Zur Erstellung des Profils wurden folgende Punkte für besonders wichtig gehalten und in dem Profil berücksichtigt:

- Administrative Informationen
 - Kontaktinformationen (z.B. zu Personen, Arbeitsgruppen, beteiligten Organisationen)
 - Informationen zur Aktualisierung der Daten und dem Verwendungszweck

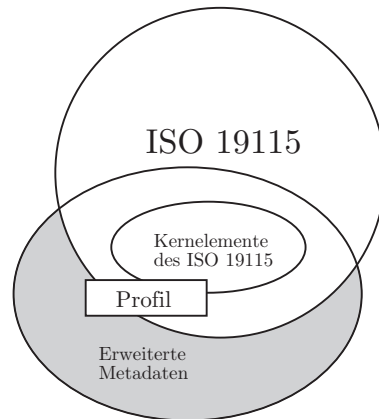


Abb. 3.1: Zusammensetzung eines Metadatenprofils aus dem ISO 19115 Metadaten Standard. Das Profil ist die Schnittmenge aus den Kernelementen des gesamten Standards, einzelnen für die Nutzergruppe wichtigen Elementen und hinzugefügten, erweiterten Metadatenelementen. (verändert nach ISO 2003)

- Sicherheitsinformationen (Wer darf auf die Daten zugreifen?)
- Datenbezogene Informationen
 - Kurzbeschreibung der Daten
 - Informationen zum Ersteller der Daten inkl. Kontaktinformationen
 - Erstellungsdatum
 - Datenformat
 - innerhalb der Daten verwendete Abkürzungen und Einheiten
- Raumbezogene Informationen
 - verwendetes Koordinatensystem und Projektion
- *Experten*-informationen
 - Methoden der Datenerfassung, Sensoren etc.
 - Verwendete Spezialsoftware, für die Daten essentielle Software

Dabei wurde der ISO Standard gewählt, weil die Hersteller von GI Systemen mittel- und langfristig mit diesem Metadatenstandard arbeiten werden. Wie in Tab. 3.1 ersichtlich, haben bereits einige, in diesem Bereich maßgebliche, Organisationen ihre proprietären Standardisierungsbemühungen zu Gunsten der Zusammenarbeit am ISO Standard eingestellt, bzw. streben eine Harmonisierung der Standards an den ISO Standard an. Weiterhin ausschlaggebend für die Wahl des ISO Standards zur Erstellung eines Profils für die Präzisionslandwirtschaft war die generell bereits in diesem Standard vorgesehene Möglichkeit der Profildbildung mit dem Ziel

der fachgruppenspezifischen Metadatenerstellung. Der prinzipielle Aufbau dieses Profils im ISO 19115 Metadatenstandard ist in Abb. 3.1 dargestellt. Das Profil bedient sich aller Kernelemente (*mandatory* elements) des Standards, die als Pflichtfelder einzugeben sind. Zusätzlich werden solche Informationen aus dem vollständigen Standard in das Profil integriert, die nach den bereits geschilderten Minimalanforderungen an einen Metadatenatz des *Präzisen Pflanzenbaus* benötigt werden. Dabei kann es vorkommen, daß bestimmte Elemente des Standards (*conditional* elements) zu Pflichtfeldern werden. Zusätzlich existieren optionale Elemente im Standard, die ausgefüllt werden können (*optional* elements). Um nun die Anforderungen des hier vorgestellten Profils für die Präzisionslandwirtschaft genüge zu tragen, sind alle diese Elemente Pflichtelemente. In Tab. 3.3 sind die unterschiedlichen Elemente des Metadatenprofils dargestellt.

Der Standard wurde von der *International Organization for Standardization* (ISO) seit 2003 als internationaler Standard eingeführt. Die Struktur und Zusammengehörigkeit seiner Elemente wird im Standard selbst (ISO 2003) in Form von UML¹⁰-Diagrammen dargestellt. Dabei werden sechs unterschiedliche *Pakete* (vgl. Tab. 3.2) angeboten, um Metadaten zu erheben.

Tab. 3.2: Pakete des ISO 19115 Metadatenstandards.

Paketkürzel ¹	Inhalt
CI	Citation - allgemeine Informationen zu Herkunft und Inhalt der Geodaten
DQ	Data Quality - Angaben zu Qualität bzw. Genauigkeit der Geodaten
EX	Extent - geographische Ausmaße der Geodaten
LI	Lineage - Fortführung der Bearbeitung der Geodaten
MD	Metadata - Informationen zu den Metadaten selbst
RS	Reference System - Informationen zum verwendeten Referenzsystem der Geodaten

¹ Die Pakete CI, EX und MD wurden im Profil verwendet.

Jedoch nicht alle dieser Pakete sind für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle und deren Geodaten relevant. Somit konnte bei der Erstellung des Metadatenprofils für diesen Zweck auf bestimmte Teile des Standards zurückgegriffen werden. Wie bereits geschildert sind nur die in Tab. 3.3 genannten Elemente notwendig, um einen standardkonformen Satz Metadaten im Sinne des nach BACKES *et al.* 2003 vorgeschlagenen Profils zu erstellen. Dabei befinden sich die meisten der benötigten Elemente im *Paket MD_Metadata* (vgl. Abb. 3.2). Grundsätzlich sollten mit Hilfe des Profils nach ISO 19115 die Fragen nach dem *Was*, *Wo*, *Wann* und *Wer* beantwortet werden. D.h. es sollte klar ersichtlich werden, um welche Geodaten mit welchem Inhalt es sich handelt sowie wo und wann sie von wem erfaßt wurden. Derart editierte Metadaten nach dem vorgeschlagenen Profil können zukünftig in GIS oder spezieller Software auf ISO-Konformität überprüft werden.

¹⁰Unified Modelling Language.

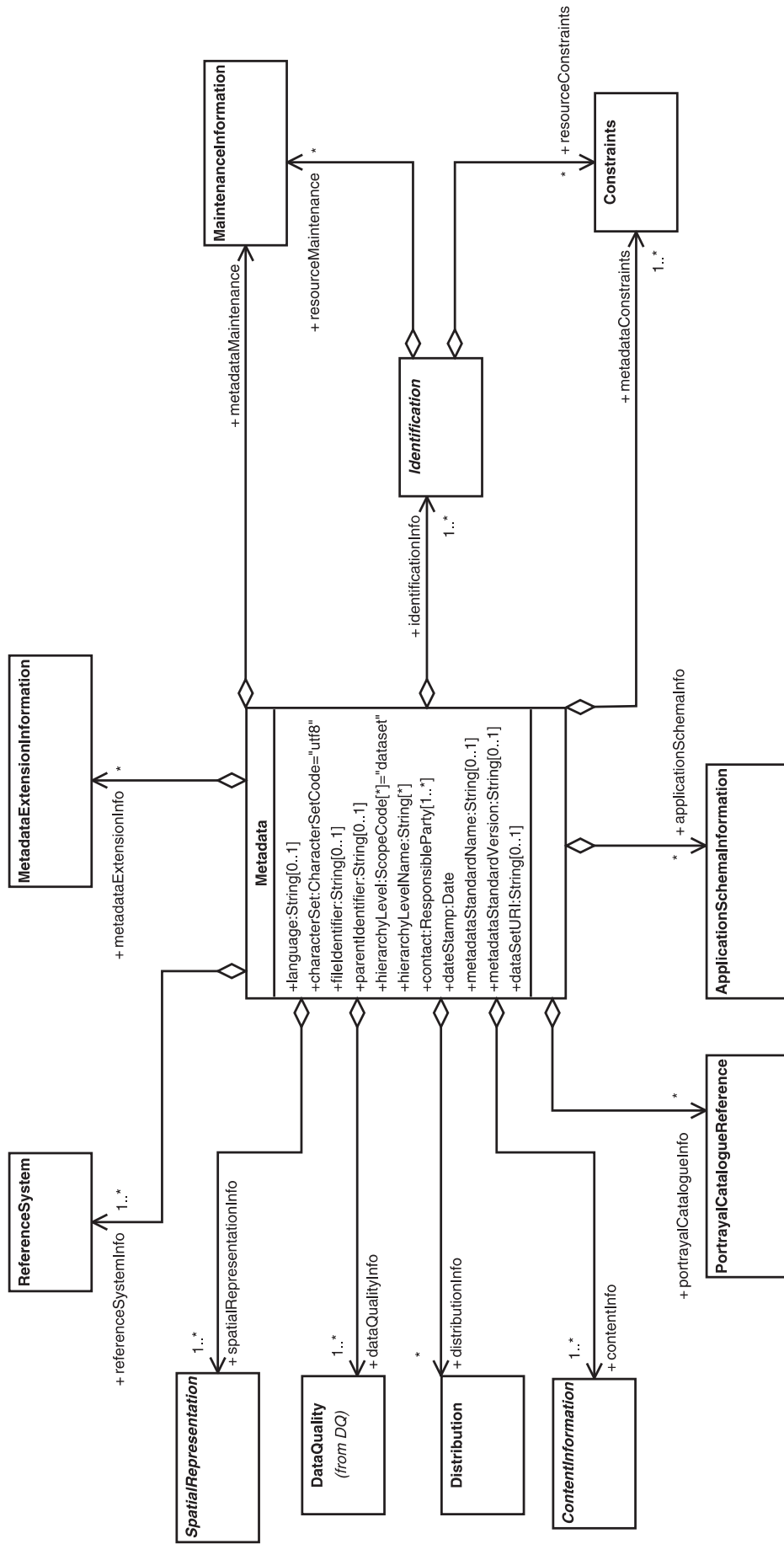


Abb. 3.2: Das Paket MD_Metadata des ISO 19115 Metadaten Standards in der UML Notation. Die Multiplizitäten sind an das Profil für die Präzisionslandwirtschaft angepasst.

Tab. 3.3: Pflichtelemente des ISO 19115 konformen Metadatenprofils. Ein > Zeichen deutet auf die Vererbung der Information von einem untergeordneten Paket bzw. Element hin.

Kernelemente des Standards (M)	
MD_Metadatas.identificationInfo > MD_Identification.citation > CI_Citation.title	Name des Datensatzes
MD_Metadatas.identificationInfo > MD_Identification.abstract	Kurzfassung der Datenbeschreibung
MD_Metadatas.identificationInfo > MD_Identification.citation > CI_Citation.date	Publikationsdatum
MD_Metadatas.identificationInfo > MD_DataIdentification.topicCategory	Standardwert im Profil: farming
MD_Metadatas.identificationInfo > MD_DataIdentification.language	Verwendete Sprachen im Datensatz
MD_Metadatas.contact > CI_ResponsibleParty	Anspruchspartner für den Metadatenatz
MD_Metadatas.dateStamp	Erstellungsdatum des Metadatenatzes
Konditionale Elemente im Profil (C)	
MD_Metadatas.identificationInfo > MD_DataIdentification.extent > EX_Extent	Geographische Ausmaße des Datensatzes
> EX_GeographicBoundingBox oder EX_GeographicDescription	Schriftsatz
MD_Metadatas.identificationInfo > MD_DataIdentification.characterSet	Sprache des Metadatenatzes
MD_Metadatas.language	Zugriffsbeschränkungen
MD_Metadatas > MD_LegalConstraints.otherConstraints	
Optionale Elemente im Profil (O)	
MD_Metadatas.identificationInfo > MD_Identification.descriptiveKeywords > MD_Keywords.keyword	Schlüsselwörter
MD_Metadatas.identificationInfo > MD_DataIdentification.pointOfContact > CI_ResponsibleParty	Anspruchspartner für den Datensatz
MD_Metadatas.identificationInfo > MD_DataIdentification.environmentDescription	Softwareumgebung für den Datensatz
MD_Metadatas.identificationInfo > MD_Identification.status > MD_ProgressCode	Fortschritt der Metadatenhaltung
MD_Metadatas.metadataMaintenance > MD_MaintenanceInformation.maintenanceAndUpdateFrequency	Updateinformationen zum Metadatenatz
MD_Metadatas.distributionInfo > MD_Distribution.distributor > MD_Distributor	Anspruchspartner für Datenweitergabe
MD_Metadatas.distributionInfo > MD_Distribution.distributionFormat > MD_Format.name	Weitergabeformat
und MD_Format.version	
MD_Metadatas.referencesSystemInfo > MD_ReferencesSystem	Referenzsystem des Datensatzes
MD_Metadatas.identificationInfo > MD_DataIdentification.spatialRepresentationType	Datentyp
MD_Metadatas.distributionInfo > MD_Distribution > MD_DigitalTransferOption.online	Online Datenquelle
> CI_OnlineResource	
MD_Metadatas.metadataConstraints > MD_Constraints	Zugriffsbeschränkungen

Generell kann gesagt werden, daß die Bearbeitung von Unkrauterfassungsdaten mit einem GIS erst auf der Grundlage von Metadaten nachhaltig möglich ist. Die Details der Datenerfassung oder - im Falle von Unkrautverteilungskarten - der Interpolationsvorschrift, können wichtige Bestandteile der Datensätze sein. Sie sind zwar nicht explizit im Profil mit Elementen berücksichtigt, können und sollen aber durchaus im Rahmen der allgemeinen Beschreibung des Datensatzes berücksichtigt werden. Das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Profil bietet die Möglichkeit, dem ISO Standard konforme Metadaten zu erstellen. Neben den bereits vorgestellten Bestandteilen des Profils können nach dem Regelwerk des ISO Standards natürlich auch noch weitere optionale Pakete oder Elemente hinzugefügt werden.

4 Interpolation und Kartierung - Erstellung von Unkrautverteilungskarten in GIS

Sind repräsentative Daten zur Verunkrautungssituation mit den eingangs beschriebenen Methoden stichprobenhaft erfaßt worden und mit Hilfe von Metadaten eindeutig interpretierbar, können in GIS Unkrautverteilungskarten erstellt werden. In diesem Kapitel werden die Methoden zur Erstellung von Unkrautverteilungskarten, die in der Praxis angewendet werden, systematisch untersucht. Ziel dabei war es, einen Überblick über die Funktionsweise der einzelnen Interpolationsmethoden zu geben und den Einfluß der Meßdaten zur Verunkrautung auf das Ergebnis der Interpolation in Form von Unkrautverteilungskarten zu verdeutlichen. Die unterschiedlichen Resultate der untersuchten Verfahren sollen dabei dazu dienen, angemessene Entscheidungen bezüglich der Wahl eines der Verfahren zu ermöglichen.

Wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, weisen die Daten zum Unkrautvorkommen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen aus stichprobenhafter Datenerfassung (Abs. 2.1) einen räumlichen Bezug auf. Die Punkte, an denen Daten zum Unkrautvorkommen erhoben wurden, sind in diesem Fall zweidimensionale Koordinatenvektoren. Durch diesen Ortsbezug werden die erhobenen Daten Grundlage der Darstellung in einem GIS. Der Ortsbezug ermöglicht es, in einem GIS die erhobenen Daten z.B. auf einer vorhandenen digitalen Landkarte darzustellen. Dabei gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Visualisierung dieser Daten.

In diesem Fall können sie in GIS z.B. als lokale Signaturen, Punkte oder lokale Diagramme visualisiert werden (vgl. BERTIN 1982, HAKE *et al.* 2002). In der Präzisionslandwirtschaft besteht jedoch besonders großes Interesse an der Darstellung der Daten in Form kontinuierlicher Flächen mit differenzierbaren Bewirtschaftungssektoren, die die gesamte Ackerfläche abdecken (s. auch GERHARDS *et al.* 1997). Dies ist eminent wichtig, da die Applikationstechnik in landwirtschaftlichen Fahrzeugen zur teilflächenspezifischen Applikation von z.B. Herbiziden auf dem Input von Rasterdaten basiert (LUDOWICY *et al.* 2002), wobei ebenfalls erstellbare Vektordaten der Bewirtschaftungssektoren nicht verwendet werden können. Aus diesem Grund bedient sich die Präzisionslandwirtschaft unterschiedlicher methodischer Ansätze der räumlichen Interpolation in GIS, um die Verteilung von Unkräutern zu visualisieren und im Sinne einer teilflächenspezifischen Applikation nutzbar zu machen. Es werden Rasterdaten einer bestimmten räumlichen Auflösung benötigt. Die Gesamtheit der Rasterzellen entspricht dabei der in diesem Kapitel mehrfach verwendeten Definitionsmenge D der Ackerfläche.

4.1 Interpolationsverfahren

Um das genannte Ziel zu erreichen, bieten GIS unterschiedliche Interpolationsverfahren an (vgl. Abb. 4.1). Generell wird bei den Verfahren der räumlichen Interpolation eine Vorschrift \hat{Z} ge-

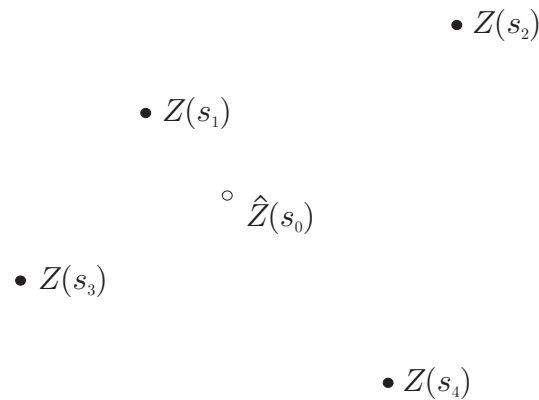


Abb. 4.1: Räumliche Interpolation dient der Berechnung / Schätzung von Werten an unbeprobten Orten $\hat{Z}(s_0)$ des Untersuchungsgebietes D auf der Grundlage benachbarter Stütz- bzw. Meßpunkte s_1, \dots, s_4 .

sucht, so daß jedem beliebigen Punkt $s_0 \in D \subset \mathbb{R}^2$ ein eindeutiger Wert $\hat{Z}(s_0)$ zugeordnet werden kann (Abb. 4.1). Dies wird mit Hilfe der bekannten Stützpunkte $S \subset D$ innerhalb des Untersuchungsgebietes erreicht. Dabei gehen zwei wesentliche Bestandteile in ein solches Vorgehen ein. Einerseits die Nachbarschaftsbeziehung zwischen den Orten der Datenpunkte s_1, \dots, s_n und andererseits die Vergabe von Gewichtungsfaktoren (λ_i) zu bestimmten benachbarten Punkten. Dies spiegelt sich in allgemeiner Form in Formel 4.5 wider. Diejenigen Interpolationsverfahren, die zur Erstellung von Unkrautverteilungskarten für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle Verwendung finden, werden im folgenden vor diesem Hintergrund auf ihre Vor- und Nachteile hin untersucht. Außerdem wird beschrieben, inwieweit die Ausgangsdaten aus der Erfassung von Unkräutern (vgl. Abs. 2.1) die Voraussetzungen für die Anwendung des jeweiligen Interpolationsverfahrens erfüllen.

Die Verfahren zur räumlichen Interpolation, die zur Erstellung von Unkrautkarten mit GIS verwendet werden, können grundsätzlich in zwei Arten unterteilt werden. Deterministische Verfahren der Interpolation (Abs. 4.1.1), bei denen eine *a priori* Grundannahme des räumlichen Zusammenhangs zwischen den zu interpolierenden Punkten gemacht wird, werden von geostatistischen Verfahren (Abs. 4.1.2) der Interpolation unterschieden, denen eine vorherige Modellierung des räumlichen Zusammenhangs zwischen den Stützpunkten des Untersuchungsbereichs S vorangeht. Neben diesen beiden Gruppen von Interpolationsverfahren existieren noch sogenannte *Globale Interpolationsverfahren*, die jedoch für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle keine Rolle spielen, da bei diesen Verfahren die kleinräumige Variabilität - auf die in der Strategie der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle regiert werden soll - als unstrukturiertes *Rauschen* eines Regressionsmodells betrachtet wird.

4.1.1 Deterministische Verfahren der Interpolation

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten deterministischen Interpolationsverfahren, die zur Erstellung von Unkrautverteilungskarten verwendet werden, basieren auf der Eigenschaft, daß eine Anweisung im Interpolationsalgorithmus an einem zu schätzenden Punkt s_0 einen eindeuti-

gen Wert $\hat{Z}(s_0)$ ergibt, wobei dieser Vorgang für alle Punkte $s_0 \in D \subset \mathbb{R}^2$ stets mit der gleichen Anweisung durchgeführt wird. Im Gegensatz dazu werden bei geostatistischen Verfahren der Interpolation in Abhängigkeit von der Distanz der Stützpunkte zueinander unterschiedliche Anweisungen durchgeführt (vgl. Abs. 4.1.2). Allen hier vorgestellten deterministischen Interpolationsverfahren ist gemein, daß *a priori* Annahmen über den Zusammenhang zwischen den erhobenen Daten gemacht werden. Die Verfahren der *Linearen Triangulation* und der *Natural Neighbors Interpolation* benötigen neben den Meßdaten keine weiteren Eingangsparameter bzw. Einstellungen innerhalb eines GIS. Im Verfahren der *Inverse Distance Weighting* Interpolation kann neben dem allgemeinen Gewichtungsfaktor (λ_i) zusätzlich eine Nachbarschaftsumgebung bestimmt werden, die in den beiden Verfahren der *Linearen Triangulation* und der *Natural Neighbors Interpolation* implizit vorhanden ist.

Ebenfalls allen Verfahren deterministischer Interpolation gemein ist das Fehlen eines Gütemaßes des Interpolationsresultats. Letztlich entscheidet bei diesen Verfahren der Anwender, inwieweit die Unkrautverteilungskarte der Realität auf dem Acker bzw. den Ansprüchen des Anwenders nahe kommt oder nicht. Aufgrund der wenigen Eingangsparameter sind die deterministischen Verfahren der räumlichen Interpolation allerdings unkompliziert zu verwenden und in der Praxis sehr beliebt.

4.1.1.1 Lineare Triangulation

Das Verfahren der *Linearen Triangulation* ist im Bereich der Kartierung von Unkräutern aus stichprobenhafter Datenerfassung weit verbreitet. GERHARDS *et al.* 1996 sowie GERHARDS *et al.* 1997 stellen dieses Verfahren für Kartierung von Unkräutern eingehend vor und kommen zu dem Schluß, daß dieses Interpolationsverfahren besonders gut für die Erstellung von Unkrautverteilungskarten geeignet ist.

Grundsätzlich wird hierbei der Zusammenhang zwischen den in einem regelmäßigen Meßraster erhobenen Unkrautdaten als an jedem Punkt linear betrachtet. Zunächst wird in diesem Interpolationsverfahren eine Triangulation (Dreiecksvermaschung) der untersuchten Fläche durchgeführt. Diese in diesem speziellen Fall verwendete *Delaunay Triangulation* ist eine Methode um aus einer Menge Knoten eine Dreiecksvermaschung (Abb. 4.2) zu erstellen.

Jedem Punkt (s_i) aus der Unkrautdatenerfassung wird dabei zunächst seine *Voronoi Region* zugeordnet (Abb. 4.2). Diese *Voronoi Region* ist definiert als Teilmenge $V_i \subset D \subset \mathbb{R}^2$, wobei jedes ihrer Elemente dabei näher an Punkt (s_i) liegt, als an irgendeinem anderen Ort innerhalb von S . Die *Delaunay Triangulation* ergibt sich dann aus den *Voronoi Regionen*, indem man je zwei Punkt verbindet, deren *Voronoi Regionen* benachbart sind. Die *Delaunay Triangulation* maximiert den kleinste Innenwinkel über alle Dreiecke und verhindert, daß unterschiedliche Ergebnisse bei einer zufälligen Wahl der zu triangulierenden Knoten entstehen. Ein Sonderfall ist dabei zu berücksichtigen. Sind die Stützpunkte der Datenerfassung in einem rechteckigen Meßraster erhoben worden, sind mehrere potentielle *Delaunay Triangulierungen* möglich. Für solche Fälle bieten GIS Voreinstellungen an, die es dringend zu berücksichtigen gilt, da ansonsten bei der Wiederholung einer Interpolation mit diesem Verfahren unterschiedliche Karten entstehen können (BOOTH 2000). Weitere Details dieser Methodik werden von ISAAKS UND SRIVASTA-

Tab. 4.1: Die untersuchten Interpolationsverfahren im Überblick.

Verfahren	Verfahrensart	Vorteile	Nachteile	Exakt	R-Raster ¹	U-Raster ²	Extrap. ³
<i>Linear Triangulation</i>	deterministisch	Einfache Handhabung, kein Parameter einstellbar	Abrupte Übergänge der Unkrautdichteklassen, mehrdeutig bei regelmäßigen Meßrastern	+	+/-	+	-
<i>Natural Neighbors</i>	deterministisch	Einfache Handhabung, kein Parameter einstellbar, weiche Übergänge der Unkrautdichteklassen	Mehrdeutig bei regelmäßigen Meßrastern	+	+/-	+	-
<i>Inverse Distance Weighting</i>	deterministisch	Einfache Handhabung, wenig Parameter einstellbar	Produziert <i>bull s-eyes</i> oder <i>duck-eggs</i> an Datenpunkten	+	+	+	+
<i>Ordinary Point Kriging</i>	geostatistisch	Sehr flexibles Verfahren, Einblick in den räumlichen Zusammenhang der Daten	Viele Parameter einstellbar, Gefahr der Überparametrisierung mit einem Modell	+ ⁴	+	+	+

¹ Eignung bei regelmäßigen Meßrastern² Eignung bei unregelmäßigen Meßrastern³ Extrapolation außerhalb der Ackergrenze⁴ Wenn der Meßfehler der Datenerfassung außer Acht gelassen wird

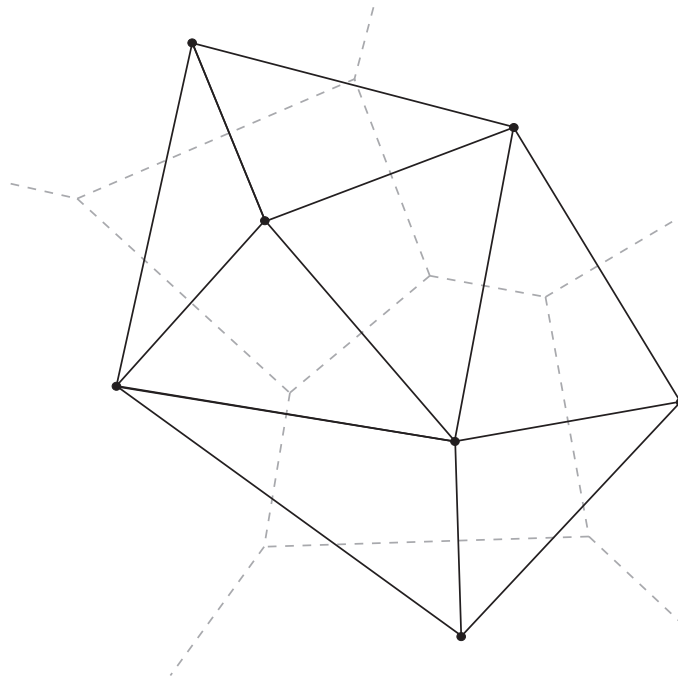


Abb. 4.2: Im Rahmen der Interpolation nach *Linearen Triangulation* wird eine Triangulation oder Dreiecksvermaschung durchgeführt. Grundlage hierfür ist die Bildung von *Voronoi Regionen* (graue Polygone). Innerhalb der daraus folgenden Dreiecksmasche kann nach Formel 4.1 der Wert $\hat{Z}(s_0)$ an jedem beliebigem Punkt ermittelt werden.

VA 1998, CRESSIE 1991, WORBOYS 1995, BURROUGH AND MCDONNELL 1998 sowie CHILÈS UND DELFINER 1999 beschrieben.

Anschließend kann der Wert $\hat{Z}(s_0)$ an jedem beliebige Punkt s_0 innerhalb einer Dreiecksmasche geschätzt werden. Dazu wird die Ebenengleichung (Formel 4.1) der Ebene durch die drei Punkte $(x_1, y_1, Z(s_1))$, $(x_2, y_2, Z(s_2))$ und $(x_3, y_3, Z(s_3))$ berechnet (vgl. Formel 4.2).

$$\hat{Z}(s_0) = ax + by + c \quad (4.1)$$

mit $s_0 = (x, y)$, wobei $a, b, c \in \mathbb{R}$

Die Unbekannten a , b , und c ergeben sich nach ISAACS UND SRIVASTAVA 1998 aus folgendem Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} ax_1 + by_1 + c &= Z(s_1) \\ ax_2 + by_2 + c &= Z(s_2) \\ ax_3 + by_3 + c &= Z(s_3) \end{aligned} \quad (4.2)$$

mit $s_i = (x_i, y_i)$, $i = 1, 2, 3$

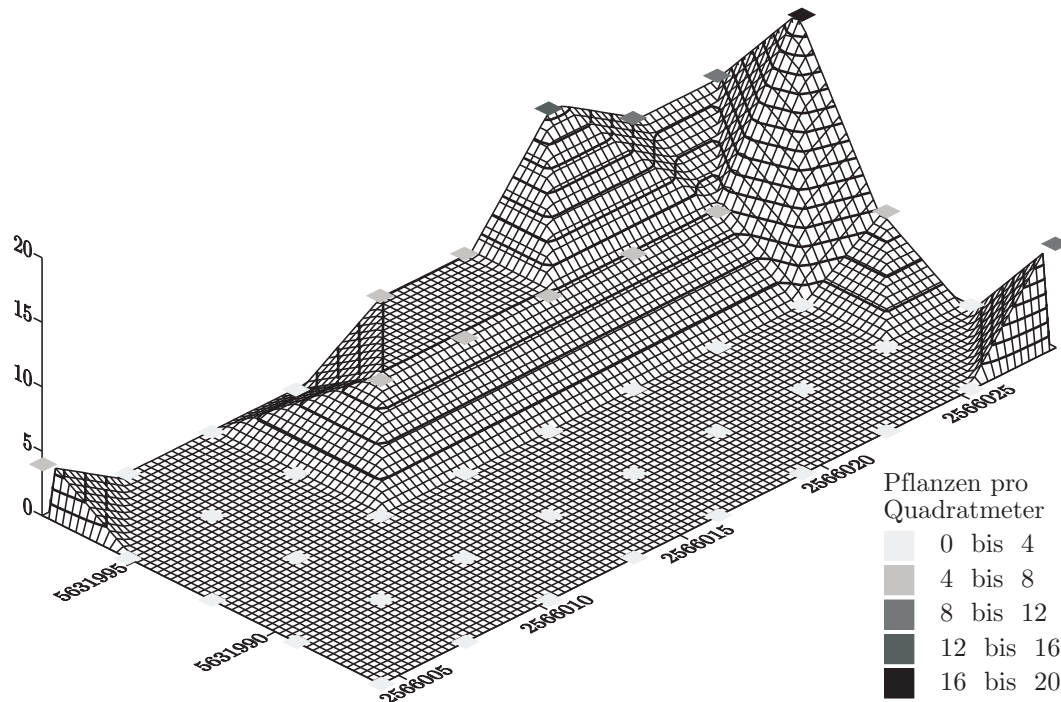


Abb. 4.3: Beispiel einer Unkrautverteilungskarte erstellt mittels *Linearer Triangulation*. Deutlich sichtbar sind in dieser 3D-Visualisierung die scharf abgrenzbaren Regionen der *Delaunay Triangulation*. Die Regionen gleicher Unkrautdichte ändern sich in diesem Verfahren abrupt.

Nun ergibt sich der Wert an der Stelle s_0 durch Einsetzen in die Ebenengleichung (Formel 4.1).

Die Unkrautverteilungskarten aus diesem Interpolationsverfahren zeichnen sich durch scharf begrenzte Bereiche unterschiedlicher Unkrautdichten aus (Abb. 4.16 d), Abb. 4.17 d)). Aufgrund der Dreiecksvermaschung wird in diesem Interpolationsverfahren nicht außerhalb der beprobten Ackergrenzen extrapoliert. Bei der *Linearen Triangulation* handelt es sich außerdem um ein exaktes Interpolationsverfahren, welches die Original- bzw. Eingangsdaten in der resultierenden Karte abbildet (vgl. dazu Formel 4.16).

Die Vorteile dieses Verfahrens der räumlichen Interpolation sind:

- Einfache Handhabung, da kein Parameter verändert werden muß
- Eindeutige Unkrautdichteklassen mit scharfen Grenzen
- An den Erfassungsstellen ist das Verfahren exakt
- keine Extrapolation außerhalb der Ackergrenzen

Als nachteilig stellt sich im Sonderfall eines rechteckigen Meßrasters (dieses liegt in einem Meßraster nach Abs. 2.1.1 vor) für die Erfassung von Unkräutern die Tatsache heraus, daß mehrere mögliche Triangulationen denkbar sind. Eine nicht eindeutige Karte wäre das Ergebnis. Die verwendete GIS Software muß daher Optionen für diesen Sonderfall anbieten.

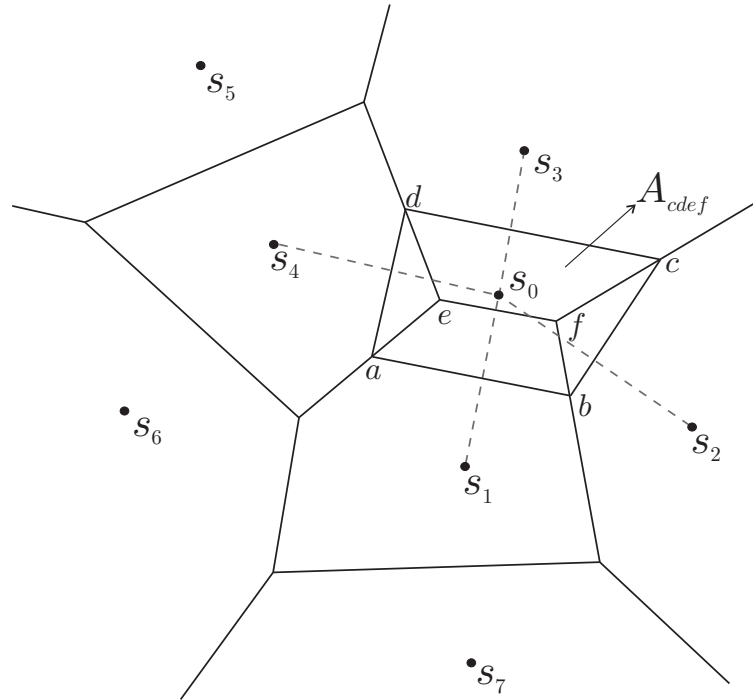


Abb. 4.4: Interpolation nach *Natural Neighbors* Verfahren (verändert nach SUKUMAR *et al.* 2001).

4.1.1.2 Natural Neighbors Interpolation

Die *Natural Neighbors Interpolation* ist eine mit der *Linearen Triangulation* verwandte Methode der räumlichen Interpolation, die erstmals von SIBSON 1981 beschrieben wurde. SUKUMAR 1997 und SUKUMAR *et al.* 2001 bieten einen Überblick zu möglichen Anwendungsbereichen und eine umfassende Beschreibung dieser Interpolationsmethode. Von BACKES UND PLÜMER 2003a wird die Methode zur Erstellung von Unkrautverteilungskarten erstmalig verwendet und zum Vergleich unterschiedlicher räumlicher Auflösungen der Datenerfassung herangezogen. Im Kartenresultat zeigen sich die Unterschiede der *Natural Neighbors Interpolation* zur *Linearen Triangulation* in Form deutlich weichere Übergänge zwischen den Unkrautdichteklassen. Hierbei entsteht ein natürlicherer Eindruck der Verunkrautungssituation. Dieser Unterschied liegt in der andersartigen Gewichtung der Stützpunkte begründet (vgl. Abb. 4.4).

Im Verfahren der *Natural Neighbors Interpolation* wird kein linearer Zusammenhang wie bei der *Linearen Triangulation* zwischen den Stützpunkten unterstellt. Um den zu schätzenden Punkt $\hat{Z}(s_0)$ wird eine zusätzliche *Voronoi Region* (mit den Bedingungen aus Abs. 4.1.1.1) gebildet (Siehe Abb. 4.4). Der Gewichtungsfaktor λ_i ergibt sich aus dem Quotienten der Fläche (A) der *Voronoi Region 2. Ordnung* der Punkte s_0 und s_i und der Fläche der neu entstandenen *Voronoi Region 1. Ordnung* des Punktes s_0 (In Formel 4.3 ist dies beispielhaft für die Berechnung des Gewichtungsfaktors λ_3 aus Abb. 4.4 dargestellt).

$$\lambda_3(s_0) = \frac{A_{cdef}}{A_{abcd}} \quad (4.3)$$

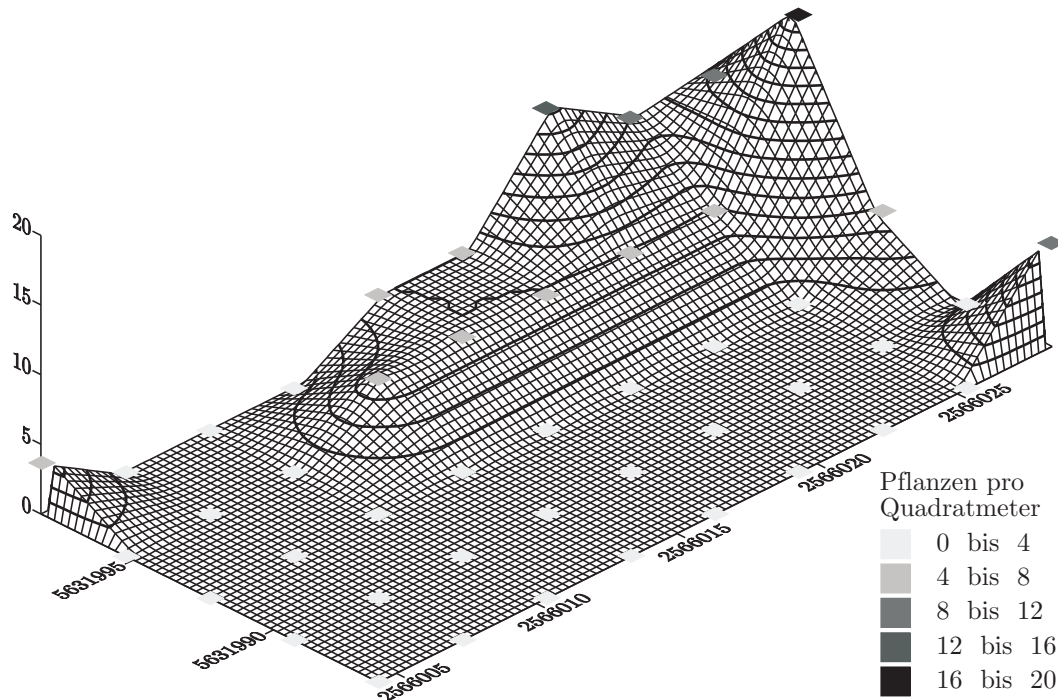


Abb. 4.5: Beispiel einer Unkrautverteilungskarte erstellt mittels *Natural Neighbors Interpolation*. Im Vergleich zum verwandten Verfahren der *Linearen Triangulation* zeigen sich weichere Übergänge zwischen den Unkrautdichteklassen.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0) = 1, \quad 0 \leq \lambda_i(s_0) \leq 1 \quad (4.4)$$

Dieser Gewichtungsfaktor λ_i wird dann in Formel 4.5 eingesetzt, um einen Wert der Unkrautdichte für jeden zu schätzenden Punkt $\hat{Z}(s_0)$ zu erhalten. Diese allgemeine Formel (Formel 4.5) für eine gewichtete Interpolation wird auch in den im folgenden beschriebenen Verfahren der räumlichen Interpolation verwendet.

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i) \quad (4.5)$$

Neben einer einfachen Handhabung ohne die vorherige Einstellung von Parametern werden auch mit diesem Interpolationsverfahren eindeutige Unkrautdichteklassen erzeugt. Die *Natural Neighbors Interpolation* ist ebenfalls im Sinne von Formel 4.16 exakt und extrapoliert genau wie die *Lineare Triangulation* nicht außerhalb des Stichprobenbereichs einer Ackerfläche. Daneben erzeugt dieses Verfahren weichere Übergänge zwischen den Unkrautdichteklassen (s. Abb. 4.5). Im Falle unregelmäßig verteilter Stützpunkte der Datenerfassung muß bei diesem Interpolationsverfahren damit gerechnet werden, daß weit entfernte Stützpunkte erheblich stärker gewichtet werden können. Da jedoch Unkrautdaten zumeist in regelmäßigen Meßrastern aufgezeichnet werden, ist dies für die Erstellung von Unkrautverteilungskarten von geringer Bedeutung. Wie schon bei der *Linearen Triangulation* gilt auch bei der *Natural Neighbors Interpolation*, daß bei

regelmäßigen Mefrastern mehrere mögliche Triangulationen und damit auch mehrere mögliche Unkrautverteilungskarten denkbar sind.

4.1.1.3 Inverse Distance Weighting

Auch das Verfahren der *Inverse Distance Weighting* wird zur Erstellung von Unkrautverteilungskarten verwendet (DILLE *et al.* 2002, MUELLER-WARRANT *et al.* 2003). Bei diesem deterministischen Interpolationsverfahren wird ebenfalls ein Gewichtungsfaktor λ_i mit einbezogen. Dabei wird λ_i in Formel 4.5 eingesetzt. Die Berechnung von λ_i erfolgt nach Formel 4.6 mit den Nebenbedingungen aus Formel 4.4.

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_{i0}^{-p}} \quad (4.6)$$

Der Parameter d_{i0} aus Formel 4.6 ist der Abstand der Punkte s_i und s_0 . Die zur Berechnung von λ_i herangezogenen Stützpunkte ergeben sich aus einem vorher festgelegten Suchradius d . Alle Punkte, deren Abstand zu $s_0 \leq d$ sind, werden in die Berechnung einbezogen. p stellt den Faktor des Einflusses eines Erfassungspunktes dar. Die Gewichtung der Stützpunkte mit dem Gewichtungsfaktor λ_i verläuft in diesem Interpolationsverfahren umgekehrt proportional zur Größe des Parameters p . Das heißt, mit steigender Distanz zu $\hat{Z}(s_0)$ sinkt der Gewichtungsfaktor eines Stützpunktes $Z(s_n)$ schnell. Je größer der Parameter p gewählt wird, desto geringer ist der Gewichtungsfaktor für weiter entfernte $Z(s_n)$. Für $p = 0$ ergibt sich somit keine Abnahme des Gewichtungsfaktors mit der Distanz. Da in diesem Fall alle Gewichtungsfaktoren gleich groß sind, ergibt sich für $\hat{Z}(s_0)$ das Mittel aller einbezogenen $Z(s_n)$.

Der entsprechende Suchradius d wird frei gewählt und ist somit der zweite Faktor, der neben dem Gewichtungsfaktor λ_i in diesem Interpolationsverfahren vorab bestimmt werden muß. Hierbei ist allerdings die Grundlage für eine Entscheidung nicht die tatsächliche (statistische) Kenntnis über den Zusammenhang zwischen den benachbarten Stützpunkten, sondern die intuitive Annahme des Anwenders. GIS bieten darüberhinaus die Möglichkeit die Suchradien ihrerseits zusätzlich in Suchsektoren zu unterteilen.

Über eine Kreuzvalidierung (vgl. Abs. 4.1.3 und Abb. 4.15) können diese Faktoren optimiert werden. Unter Veränderung der Parameter λ_i und d wird der *RMSE*-Fehler jeder Einstellung ermittelt. Diejenige mit dem kleinsten *RMSE*-Fehler sollte damit auch die Optimaleinstellung für die Unkrautverteilungskarte widerspiegeln. Durch diese Vorgehensweise zeichnet sich das Verfahren der *Inverse Distance Weighting* als besonders einfach zu handhaben und zu optimieren aus. Im Ergebnis entstehen, wie bereits beim Verfahren der *Natural Neighbors Interpolation* geschildert, Unkrautverteilungskarten mit weichen Übergängen zwischen den Unkrautdichteklassen.

Die *Inverse Distance Weighting* Interpolation ist ebenso wie die beiden vorher beschriebenen Verfahren ein exaktes Verfahren im Bezug auf die einbezogenen Stützpunkte gemäß Formel 4.16. Ein typisches Problem dieses Verfahrens ist aufgrund der Art der Gewichtung der Stützpunkte und seiner Exaktheit die Entstehung von sogenannten *bull's-eyes* (LUDOWICY *et al.* 2002) bzw. *duck-eggs* (BURROUGH AND MCDONNELL 1998). Diese entstehen in der Karte an Stützstellen,

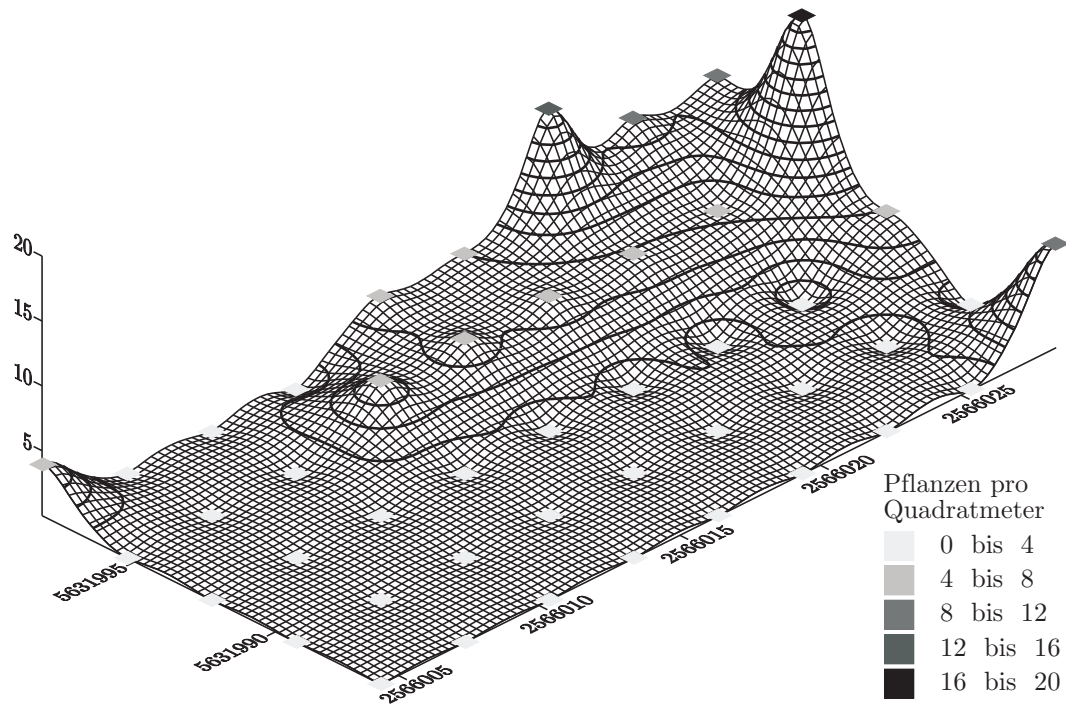


Abb. 4.6: Beispiel einer Unkrautverteilungskarte erstellt mittels *Inverse Distance Weighting* Interpolation. Der Einflußfaktor p aus Formel 4.6 wurde in diesem Fall auf 2 eingestellt. Die *bull's-eyes* (vgl. Abs. 4.1.1.3) sind deutlich zu erkennen.

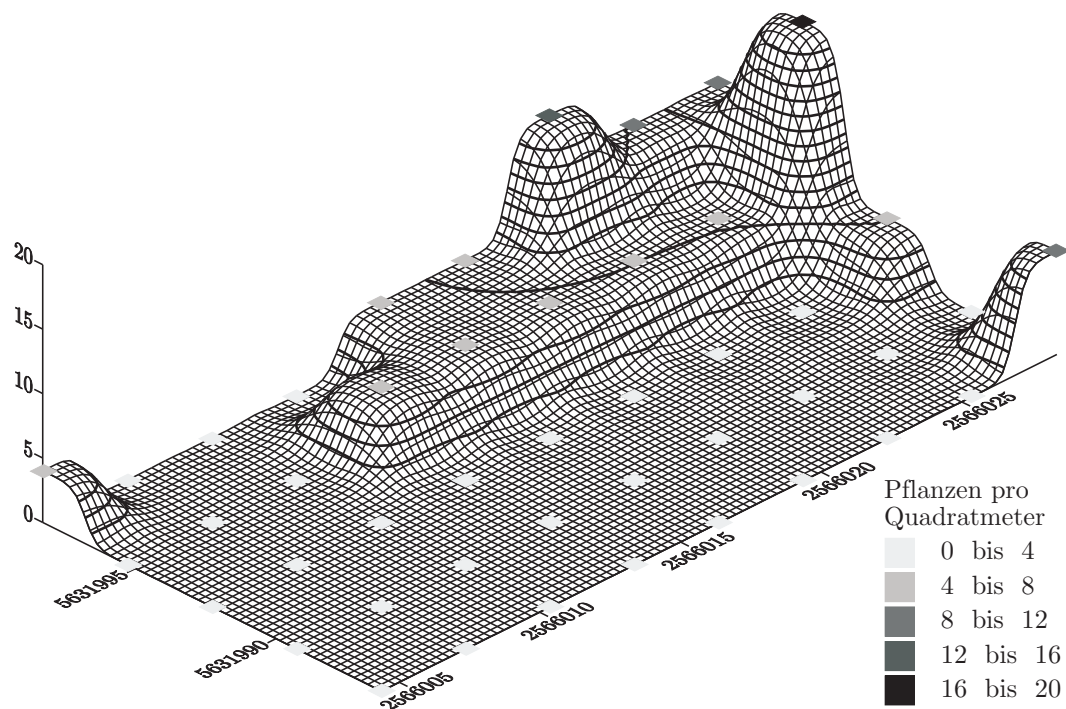


Abb. 4.7: Beispiel einer Unkrautverteilungskarte erstellt mittels *Inverse Distance Weighting* Interpolation. Der Einflußfaktor p aus Formel 4.6 wurde in diesem Fall auf 4 eingestellt. Weiter entfernt von zu schätzenden Punkt liegende Stützpunkte fallen nicht mehr so stark ins Gewicht wie in Abb. 4.6.

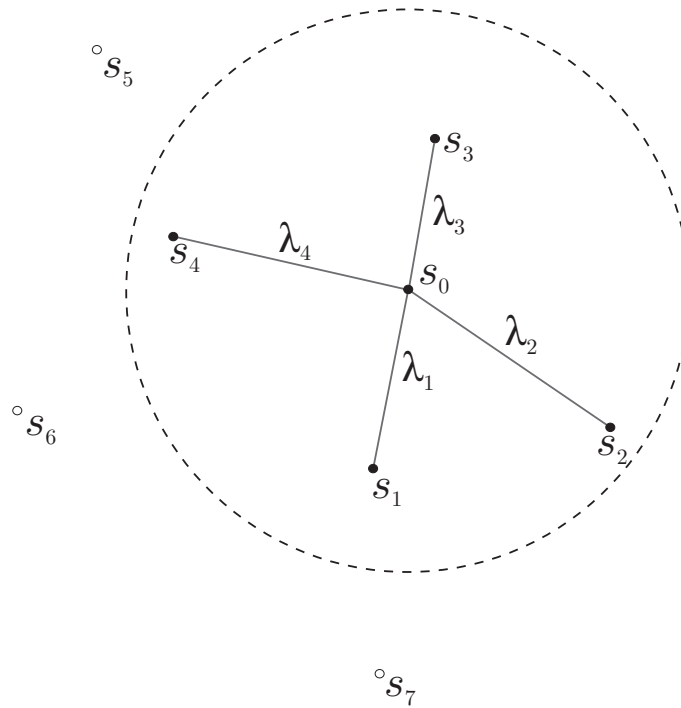


Abb. 4.8: Die Gewichtung der Abstände mit dem Faktor λ_i für jeden im Suchradius d befindlichen Stützpunkt s_i .

die große Unkrautdichten aufweisen und von weiteren Stützpunkten geringer Unkrautdichte umgeben sind (siehe Abb. 4.6).

4.1.2 Geostatistische Verfahren

Geostatistische Verfahren der Interpolation basieren auf der *Theorie der regionalisierten Variablen* (MATHERON 1971). Diese faßt die vorliegenden Daten mit Ortsbezug als Realisationen von Zufallsvariablen, bzw. eines räumlich-stochastischen Prozesses auf (DUTTER 1985, HEINRICH 1992, WACKERNAGEL 1998, WAMELING 2002). Die Variable \hat{Z} , die im Falle von Daten zur Verunkrautung am Ort s_0 eine bestimmte Unkrautdichte aufweist, wird als eine solche *regionalisierte Variable* verstanden. Hierbei werden nicht nur alle Stützpunkte $s_i \in S$, sondern auch alle Punkte $s_0 \in D$ als Realisationen möglichen Zufallsvariablen angesehen. In einer geostatistischen Interpolation werden die Realisationen der Zufallsvariablen an den unbeprobten Orten aus den bekannten Realisationen der Stützpunkte geschätzt. Auf der Grundlage des Semivariogramms (Abs. 4.1.2.1) kann dieser räumlich-stochastische Prozeß modelliert werden und zur Grundlage der Interpolation mit *Kriging* (Abs. 4.1.2.2) werden.

4.1.2.1 Semivariogrammanalyse

Grundsätzlich wird vor der Modellierung des beschriebenen räumlich-stochastischen Prozesses mit der Hilfe von Semivariogrammen davon ausgegangen, daß die Erwartungswertfunktion¹¹

¹¹Der Erwartungswert E errechnet sich als die Summe der Wahrscheinlichkeit jedes möglichen Ergebnisses eines Zufallsexperiments multipliziert mit dem „Wert“ dieses Ergebnisses aller Zufallsvariablen.

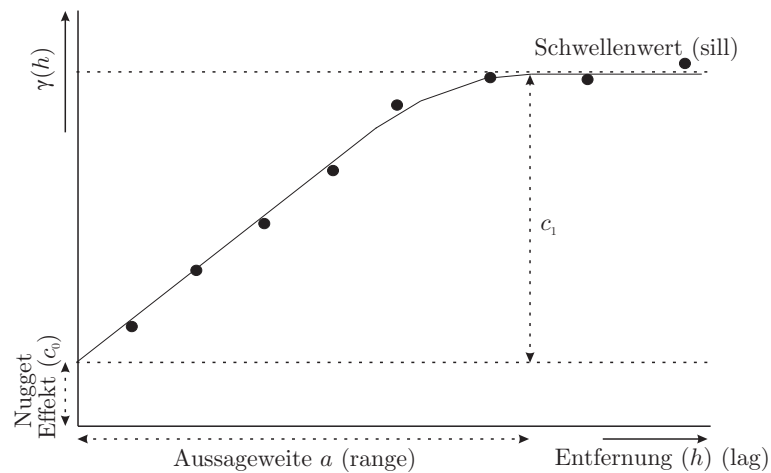


Abb. 4.9: Das Semivariogramm. Dargestellt sind die Parameter: Experimentelles Semivariogramm (angedeutet durch die schwarzen Kreise), theoretisches Semivariogramm (schwarze Linie), *Nuggeteffekt*, *sill* und *range*.

einer Zufallsfunktion $Z(s_i)$, $s_i \in D$ (Formel 4.7) der Inkremente¹² und die Varianzfunktion (Formel 4.8) der Inkremente in D letztlich eine Funktion der jeweiligen Distanz h ist (SCHAEBEN UND LINDNER 2000).

$$E[Z(s_i + h) - Z(s_i)] = m(h) \quad \text{für alle } s_i, s_i + h \in D \quad (4.7)$$

$$\sigma^2[Z(s_i + h) - Z(s_i)] = 2\gamma(h) \quad \text{für alle } s_i, s_i + h \in D \quad (4.8)$$

Diese als *intrinsic*¹³ *Hypothese* bezeichneten Forderungen sind Grundlage der Modellierung des räumlichen Zusammenhangs zwischen den Stützpunkten mit dem Semivariogramm.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (Z(s_i) - Z(s_i + h))^2 \quad (4.9)$$

Um diesen Zusammenhang modellieren zu können, wird ein Maß für die Stärke des räumlich-stochastischen Prozesses benötigt. Hierbei verwendet man das Semivariogramm nach Formel 4.9. Das Semivariogramm ist unanfällig von der geographischen Lage der Stützpunkte und stellt die mittlere Differenz zwischen allen Stützpunkten - in Form einer regionalisierten Variablen - mit gleichem Abstand (h) dar (vgl. Abb. 4.9). Dabei existieren $n(h)$ Punktpaare mit dem Abstand h . Die Varianz der Differenzen zweier Zufallsvariablen nimmt mit steigendem Abstand h zu. Dies ist ein Zeichen für einen verminderten räumlichen Zusammenhang mit größerem Abstand.

Die beiden Größen *sill* (Schwellenwert) und *range* (Aussageweite) bieten die Möglichkeit, Aussagen zum räumlichen Zusammenhang zwischen den Zufallsvariablen zu machen (vgl. Abb. 4.9). Derjenige Abstand h , an dem $\gamma(h)$ nicht weiter ansteigt, sich also quasi asymptotisch dem Schwellenwert (*sill*) annähert, wird *range* oder Aussageweite (a) genannt. Weiter entfernte

¹²Änderung des Werts h einer Variablen $Z(s_i)$ auf den nächsthöheren Wert $Z(s_i + h)$.

¹³von Innen kommend.

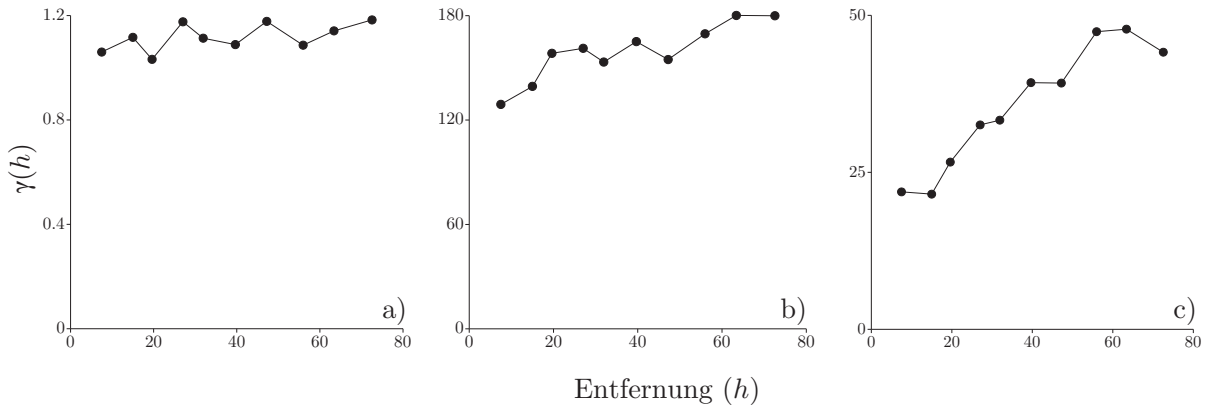


Abb. 4.10: Semivariogramme von a) *Stellaria media* L., b) *Chenopodium album* L. sowie c) *Fumaria officinalis* L. in einem Meßraster von 7,5x15 Meter im Jahr 2001 in Mais.

Stützpunkte weisen keinen nachweisbaren, räumlichen Zusammenhang mehr auf. Daher weisen KERRY UND OLIVER 2003, BAXTER *et al.* 2003 sowie GRINGARTEN UND DEUTSCH 2001 darauf hin, daß das Erfassungsraster etwa halb so groß sein soll wie die mittlere range (a) des Semivariogramms. Schneidet, wie in Abb. 4.9 zu sehen, die modellhafte Ausgleichsfunktion (Das theoretische Semivariogramm, s. auch Formeln 4.11, 4.12 und 4.13) des experimentellen Semivariogramms die Ordinate oberhalb ihres Ursprungs in der Höhe c_0 , so wird dieser Anteil als *Nugget-* oder Klumpeneffekt bezeichnet. Dieser *Nuggeteffekt* setzte sich nach CRESSIE 1991 und GRINGARTEN UND DEUTSCH 2001 aus den Faktoren kleinräumiger Variabilität (MS) und Meßfehler (ME) zusammen (Formel 4.10). Der *Nuggeteffekt* kann Hinweise auf fehlerhafte Messungen und vor allem auf Mängel in der Stützpunktwahl hinweisen. Wird die Variabilität des untersuchten Phänomens (in diesem Fall Unkräuter) nicht hinreichend erfaßt, ist bei der kleinsten Abstandsklasse ein großer *Nuggeteffekt* zu erwarten (vgl. Abb. 4.10). Aus diesem Grund kann der *Nuggeteffekt* als Indikator für die Notwendigkeit einer Meßnetzoptimierung herangezogen werden.

$$c_0 = c_{MS} + c_{ME} \quad (4.10)$$

Das theoretische Semivariogramm als Modell des Zusammenhangs zwischen den Stützpunkten muß eine *bedingt negativ definite* Funktion sein, d.h. sie darf keine positiven Eigenwerte haben (vgl. dazu WACKERNAGEL 1998). Die Herleitung solcher Funktionen ist in der Praxis unüblich, da eine Reihe definierter (sog. zulässiger oder autorisierter) Funktionen oder Kombinationen solcher Funktionen zur Modellierung zur Verfügung stehen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde dabei ein sphärisches (Formel 4.12) und ein exponentielles (Formel 4.13) Modell verwendet. Außerdem wurde zur Modellierung des *Nuggeteffekts* eine Kombination der genannten Modelle mit einem Nugget-Modell (Formel 4.11) verwendet. Prinzipiell wird bei der Wahl eines der Modelle so vorgegangen, daß das theoretische Semivariogramm die Punktwolke des experimentellen Semivariogramms möglichst passend approximiert. Entscheidenden Einfluß auf das Kartenresultat hat dabei insbesondere die Modellierung des *Nugget-Bereichs*, der die

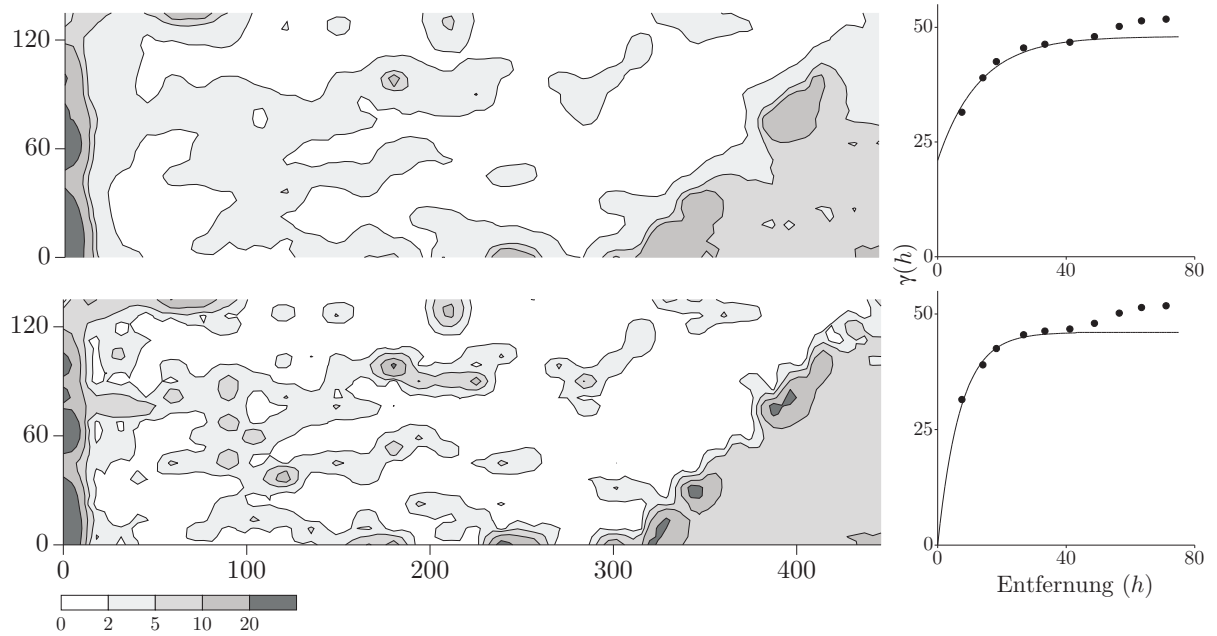


Abb. 4.11: Einfluß der Modellierung des experimentellen Semivariogramms auf die Unkrautverteilungskarten. In beiden Fällen wurde zur ein exponentielles Modell verwendet (Formel 4.13). Im oberen Beispiel ist dabei jedoch zusätzlich ein *Nugget*-Modell (Formel 4.11) mit einbezogen worden.

kleinräumige Variabilität möglichst gut schätzen soll. Beispielhaft sind die Auswirkungen der Modellierung des *Nugget*-Bereichs in Abb. 4.11 dargestellt.

$$g(h) = \begin{cases} 0, & \text{falls } h = 0 \\ 1, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.11)$$

$$g(h) = \begin{cases} 1,5\frac{h}{a} - 0,5\frac{h^3}{a^3}, & \text{falls } h < a \\ 1, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.12)$$

$$g(h) = 1 - \exp\left(\frac{-3h}{a}\right) \quad (4.13)$$

4.1.2.2 Kriging

Als *Kriging* wird eine ganze Gruppe von Interpolations- bzw. Schätzverfahren zusammengefaßt. Alle diese Verfahren beruhen auf der bereits beschriebenen *Theorie der regionalisierten Variablen* (vgl. Abs. 4.1.2) (MATHERON 1971) und wurden nach dem südafrikanischen Ingenieur D. Krige benannt. Ziel des *Kriging* generell ist die Minimierung der Schätzvarianz bei der Interpolation. Hierbei stellt *Kriging* ein lineares Schätzverfahren mit einer gewichteten räumlichen Mittelwertbildung dar. Die Gewichte (s. Abb. 4.8) sollen mit einem geostatistischen Modell - dem Semivariogramm - derart optimiert werden, daß der Schätzwert im Mittel den wahren Wert schätzt und keine systematischen Fehler gemacht werden (WACKERNAGEL 1998, STEIN 1999).

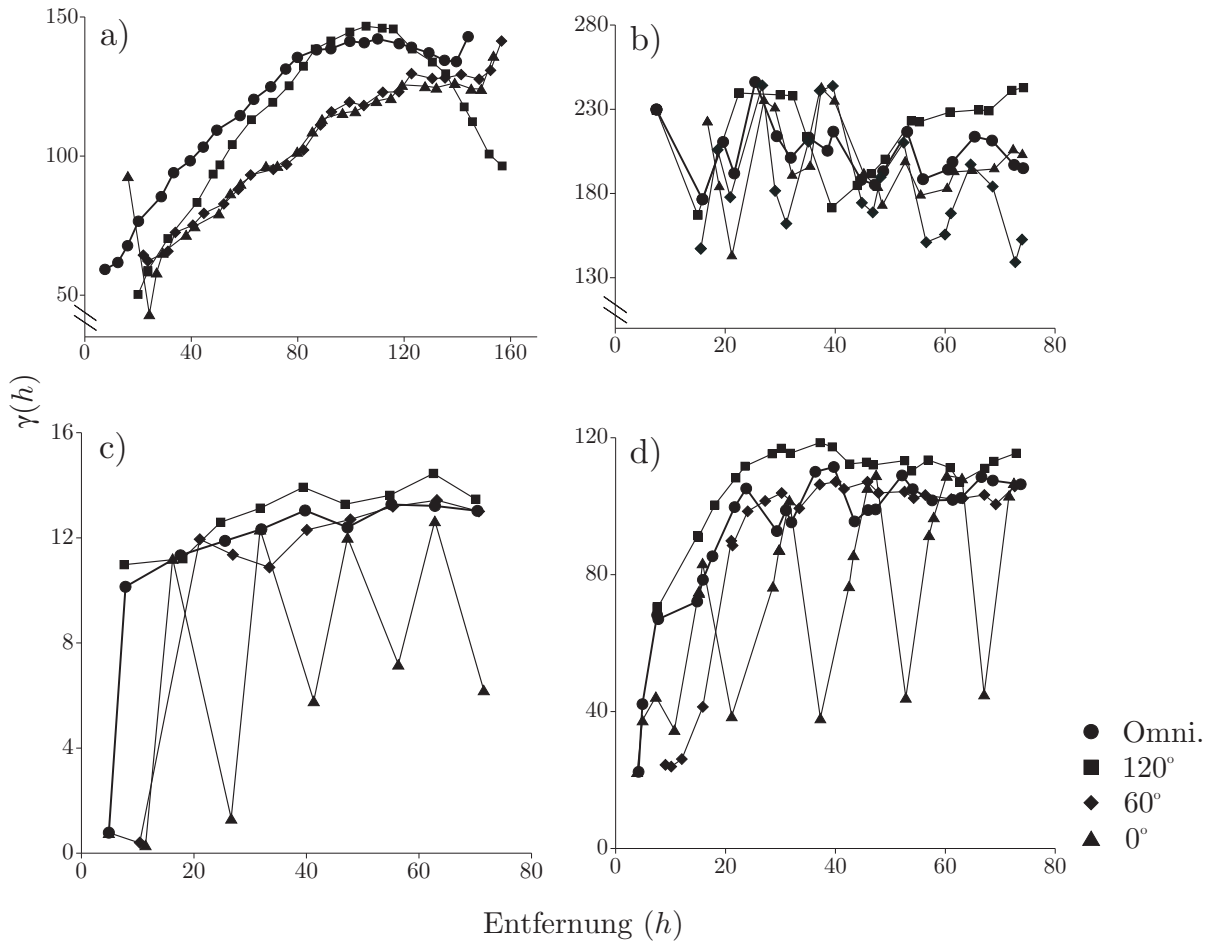


Abb. 4.12: Richtungsabhängige Semivariogramme von a) *Chenopodium album* L. (Feld 9, 2002) b) *Gräsern* als Gruppe (Feld 8, 2003) c) *Galium aparine* L. (Feld 6, 2002) und d) *Gräsern* als Gruppe (Feld 6, 2002). (Omni.=Omnidirektionales Semivariogramm).

Aus diesem Grund wird der *Kriging*-Schätzer auch als *best linear unbiased estimator (BLUE)* bezeichnet.

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0) Z(s_i) \quad (4.14)$$

Basierend auf den Unkrautdichten an den Stützpunkten $Z(s_1), \dots, Z(s_n) \in \mathbb{R}$ soll in *Kriging* der Wert an jedem beliebigen Ort s_0 durch eine Linearkombination geschätzt werden (Formel 4.14). In dieser Studie wurden das Verfahren des *Ordinary Point Kriging* verwendet. Es unterscheidet sich von anderen Verfahren des *Kriging* dadurch, daß es nur in einer lokalen Suchumgebung (s. Abb. 4.8) einen konstanten Erwartungswert E (Mittelwert) voraussetzt, der zuvor geschätzt werden muß. Dabei geschieht dies ebenfalls mittels *Kriging*.

$$\hat{Z}_{OK}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i^{OK}(s_0) Z(s_i), \quad \text{mit} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i^{OK}(s_0) = 1 \quad (4.15)$$

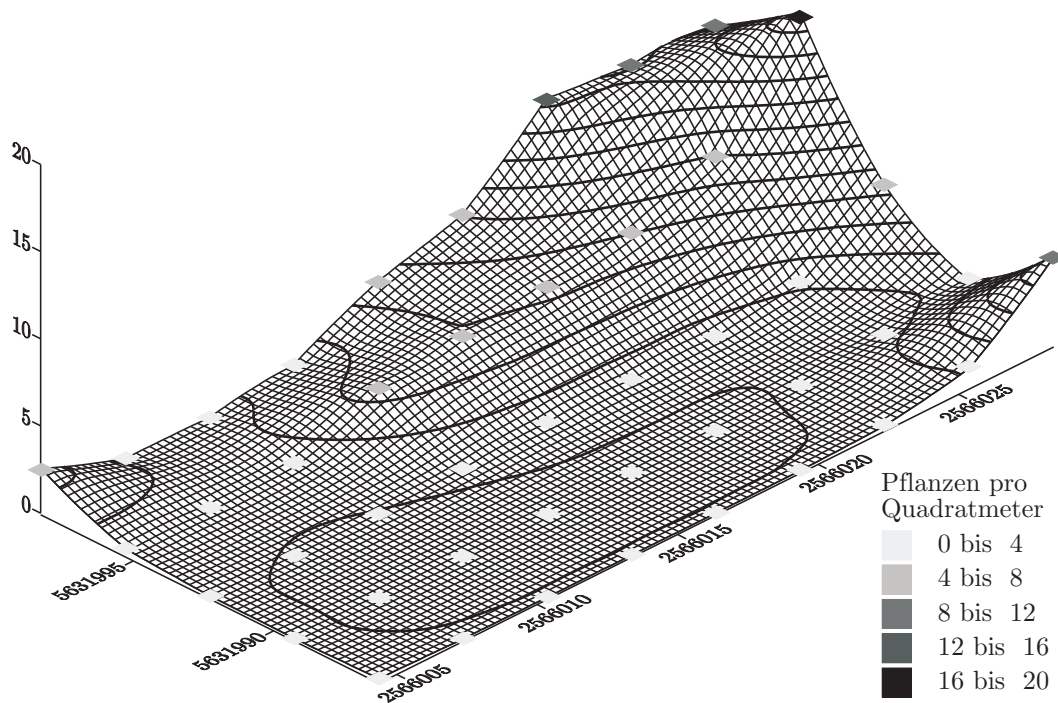


Abb. 4.13: Beispiel einer Unkrautverteilungskarte erstellt mittels *Ordinary Point Kriging* und einem exponentiellem Modell.

Unter der Voraussetzung, daß die Stützpunkte jeweils Teile einer Realisierung einer schwach stationären Funktion mit einem zugehörigen Semivariogramm sind, kann die Interpolation gemäß der modellierten Schätzfunktion (vgl. Abs. 4.1.2.1) durchgeführt werden. Hierbei wird, wie bereits erwähnt, die Schätzvarianz minimal gehalten. *Ordinary Point Kriging* ist ebenso wie die bereits beschriebenen Verfahren deterministischer Interpolation ein exaktes Interpolationsverfahren im Sinne von Formel 4.16.

$$\hat{Z}(s_0) = Z(s_i), \quad \text{für } s_0 = s_i \quad (4.16)$$

In der Unkrautforschung wurde *Kriging* sehr oft verwendet. Nicht nur zur Beschreibung der Verteilung von bestimmten Unkräutern auf einer Ackerfläche (DONALD 1994, CARDINA *et al.* 1997, COUSENS *et al.* 2002) sondern auch, um die Stabilität von Unkrautnestern zeitlich-räumlich verfolgen zu können (JOHNSON *et al.* 1996) sowie um auf diese Nester reagieren zu können (HEISEL *et al.* 1996, ZANIN *et al.* 1998). REW *et al.* 2001 beschreiben den Einsatz von *Kriging* als Interpolationsverfahren für den Einsatz in der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle. Das Kartenresultat in diesem Interpolationsverfahren zeichnet sich durch stark ausgeglichene Unkrautdichteklassen aus (s. Abb. 4.13 und 4.14). Das Ergebnis der Interpolation hängt dabei allerdings stets von der Güte der Anpassung des theoretischen Semivariogramms an das experimentell ermittelte Semivariogramm ab. Insbesondere der *Nuggeteffekt* muß möglichst gut modelliert werden, da sonst die kleinräumigen Unterschiede in der Karte in Form von Nestern verschwinden (vgl. Abb. 4.11).

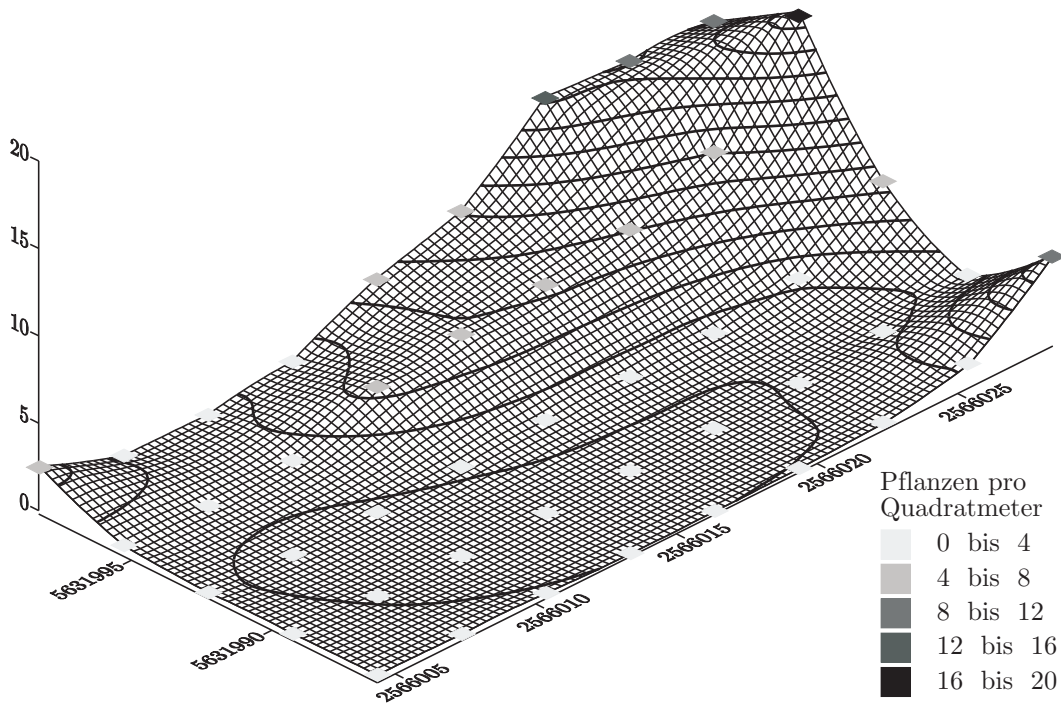


Abb. 4.14: Beispiel einer Unkrautverteilungskarte erstellt mittels *Ordinary Point Kriging* und einem sphärischem Modell.

Grundsätzlich steht bei diesem Verfahren die Frage im Raum, ob bei sehr deutlich ausgeprägtem *Nuggeteffekt* eine Interpolation mit diesen Verfahren noch Sinn macht. Differenzierbare Bewirtschaftungszonen sind unbedingt für eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung notwendig. Auch REW *et al.* 2001 kommen zu dem Schluß, daß insbesondere vor dem Hintergrund der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle *Kriging* wenig zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Dies liegt daran, daß diskrete Spritzentscheidungen auf der Grundlage der Unkrautverteilungskarten getroffen werden müssen. Dies kann insbesondere bei Unkrautverteilungskarten aus einer *Kriging*-Interpolation dazu führen, daß bei der Herbizidapplikation die Verunkrautung an eigentlich unkrautfreien Bereichen überschätzt wird und *vice versa*. Kann das Semivariogramm besonders im Bereich kleiner Abstände der Meßpunkte nur schlecht geschätzt werden und treten große *Nuggeteffekte* auf, so werden mitunter Unkrautnester zu stark geglättet und daher deutlich extensiver - wenn überhaupt - mit Herbiziden behandelt (vgl. Abb. 4.11). Als größter Vorteil dieses Interpolationsverfahrens im Kontext der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle ist die Modellierung des räumlichen Zusammenhangs der erhobenen Daten herauszustellen. Auf der Grundlage des Semivariogramms wird nicht mehr nur ein *a priori* festgelegter, sondern einer der räumlichen Beziehung der Stützpunkte untereinander gerechtwerdender Zusammenhang unterstellt. Nachteilig wirkt sich diese Tatsache jedoch auf die Unkrautverteilungskarten aus, wenn sich ein Modell nur sehr schlecht oder garnicht an das experimentelle Semivariogramm anpassen läßt. Die dabei entstehenden Probleme wurden bereits erläutert.

Generell setzt das Verfahren des *Ordinary Point Kriging* voraus, daß die Eingangsdaten einer Normalverteilung folgen (GOOVAERTS 1997, STEIN 1999, JOHNSTON *et al.* 2001). Betrachtet

man jedoch die Histogramme der erhobenen Daten (vgl. Abb. 2.5), kann von einer Erfüllung dieser Voraussetzung nicht die Rede sein. Werden Unkrautdaten mit Zählrahmen erhoben, liegen Unkräuter nach GOLD *et al.* 1996, JOHNSON *et al.* 1996, CARDINA *et al.* 1997, WILES UND SCHWEIZER 1999, KRUEGER *et al.* 2000 und REW UND COUSENS 2001 meist in Form einer negativen Binomialverteilung, bzw. einer Poisson Verteilung vor. Dies wird auch durch die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Histogramme gestützt (vgl. Abb. 2.5). Außerdem erschwert die *räumliche Anisotropie*, also die Richtungsabhängigkeit der Unkrautverteilung, die Arbeit mit diesem Interpolationsverfahren. In vielen Fällen muß ein gerichtetes Semivariogramm für die Modellierung verwendet werden (vgl. Abb. 4.12). Die Gründe für diese *Anisotropie* sind vielfältig. Im Falle der Unkräuter sind oftmals die Verteilung von Ernterückständen mit dem Mähdrescher in der vorherrschenden Arbeitsrichtung oder die angewendete Bodenbearbeitung in einer bestimmten Arbeitsrichtung ausschlaggebend.

4.1.3 Bewertung der Interpolationsverfahren für die teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle

Um eine qualitative Aussage zum Vergleich unterschiedlicher Interpolationsverfahren machen zu können, wurde in dieser Arbeit das Verfahren der Kreuzvalidierung angewendet. Dieses eingehend von ISAAKS UND SRIVASTAVA 1998, CRESSIE 1991, SHAO UND TU 1995, TOMCZACK 1997, CHILÈS UND DELFINER 1999 und OLEA 1999 beschriebene Verfahren bietet die Möglichkeit, diese Bewertung durchzuführen. Hierbei wird ein Vergleichsmaß auf der Grundlage von Abb. 4.15 berechnet.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - Z(s_i))^2} \quad (4.17)$$

Jeder einzelne Stützpunkt $s_i \in S$ wird dabei einmalig aus der Menge der Stützpunkte S entfernt, wobei an seiner Position mit dem jeweiligen Interpolationsverfahren ein Wert $\hat{Z}(s_i)$ geschätzt wird. Der vorherrschende mittlere Fehler für alle $s_i \in S$ stellt dann ein Maß für den Vergleich der Güte der Interpolation dar. Von WEBER UND ENGLUND 1992 wurde dabei der *RMSE*-Fehler als bestes Vergleichsmaß ermittelt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Software SURFER (GOLDEN SOFTWARE 2004) dazu verwendet, den *RMSE*-Fehler (Formel 4.17) als Vergleichsmaß zu berechnen.

Dabei wurden die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Interpolationsverfahren auf Daten vom Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau der Universität Bonn angewendet. Einen Überblick über die verwendeten Daten und die Resultate dieses Vergleichs gibt Tab. 4.2 (Hierbei ist in jeder Spalte der *RMSE*-Fehler, den eines der verglichenen Interpolationsverfahren ergibt, angegeben. Die großen Unterschiede zwischen den Zeilen ergeben sich aus der z.T. stark schwankenden Unkrautdichte der verschiedenen Unkrautarten auf einer Ackerfläche). Die Ergebnisse dieses Vergleichs zeigen, daß keines der Interpolationsverfahren auf den untersuchten Flächen als generell optimal für die Erstellung der Unkrautverteilungskarten zu bewerten ist. Je nach Unkrautart und Jahr stellt sich ein anderes Verfahren als optimal heraus. Auffällig ist das Abschneiden der *Linearen Triangulation* und der *Inverse Distance Weighting* Interpolation

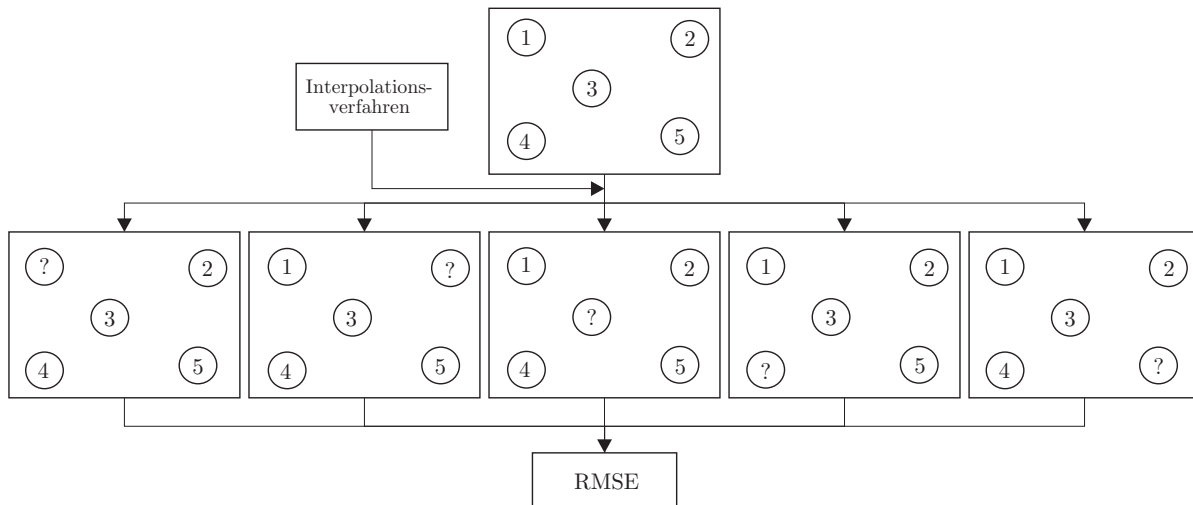


Abb. 4.15: Das Prinzip der Kreuzvalidierung (verändert nach TOMCZACK 1997). Zur Bestimmung des $RMSE$ Fehlers nach Formel 4.17 wird jeder einzelne Punkt einer Datenerfassung ausgelassen und mit dem jeweiligen Interpolation bestimmt. Die Größe des Fehlers gibt Aufschluß über die Güte des Interpolationsverfahrens.

mit größerem Gewichtungsfaktor in dieser Studie, denn mit diesen beiden Verfahren wurde in keinem der untersuchten Fälle der kleinste $RMSE$ -Fehler erreicht. Aufgrund der schlechten Modellierbarkeit des starken *Nuggeteffekts* in einigen der untersuchten Fälle sind die Resultate des *Ordinary Point Kriging* den anderen Interpolationsverfahren unterlegen. Im Kartenresultat (vgl. Abb. 4.16 und 4.17) sind die Abweichungen der einzelnen Unkrautverteilungskarten in Abhängigkeit vom gewählten Interpolationsverfahren beispielhaft zu sehen.

Insbesondere den glättenden Effekt der mangelnden Modellierbarkeit im *Ordinary Point Kriging* kann man deutlich erkennen. Die Kartenresultate der Verfahren der *Linearen Triangulation* und der *Natural Neighbors Interpolation* unterscheiden sich - im hier vorgestellten Fall - kaum voneinander. Dies liegt insbesondere am regelmäßigen Meßraster, das zur Datenerfassung verwendet wurde, da hier eine ähnliche Gewichtung in beiden Verfahren vorliegt (vgl. Abs. 4.1.1.2). Auch das Verfahren der *Inverse Distance Weighting* mit größerem Gewichtungsfaktor zeigt nur geringe Unterschiede bei einem visuellen Vergleich mit den beiden letztgenannten Interpolationsverfahren. Mit kleinerem Gewichtungsfaktor nimmt auch der Einfluß weiter entfernt liegender Stützpunkte zu und es tritt ein glättender Effekt ein, der in den beiden Abbildungen gut zu erkennen ist. Wie bereits beschrieben, ist es für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle von großer Bedeutung, eindeutig zu bewirtschaftende Teilflächen zu identifizieren, die bei einer maximalen Wirkung gegen den Schadfaktor Unkraut minimal mit Herbiziden behandelt werden müssen. Daher sind unscharfe, geglättete Unkrautkarten von geringem Nutzen. Die einfachere Handhabung deterministischer Interpolationsverfahren und die für den Anwender besser nachzuvollziehenden Resultate der Interpolation sprechen für die Nutzung dieser Verfahren im Zusammenhang mit der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle. Ist jedoch die Modellierung der kleinräumigen Variabilität der Verteilung von Unkräutern mit einem Semivariogramm ohne Weiteres möglich, so ist das *Ordinary Kriging*-Verfahren den deterministischen Verfahren zu

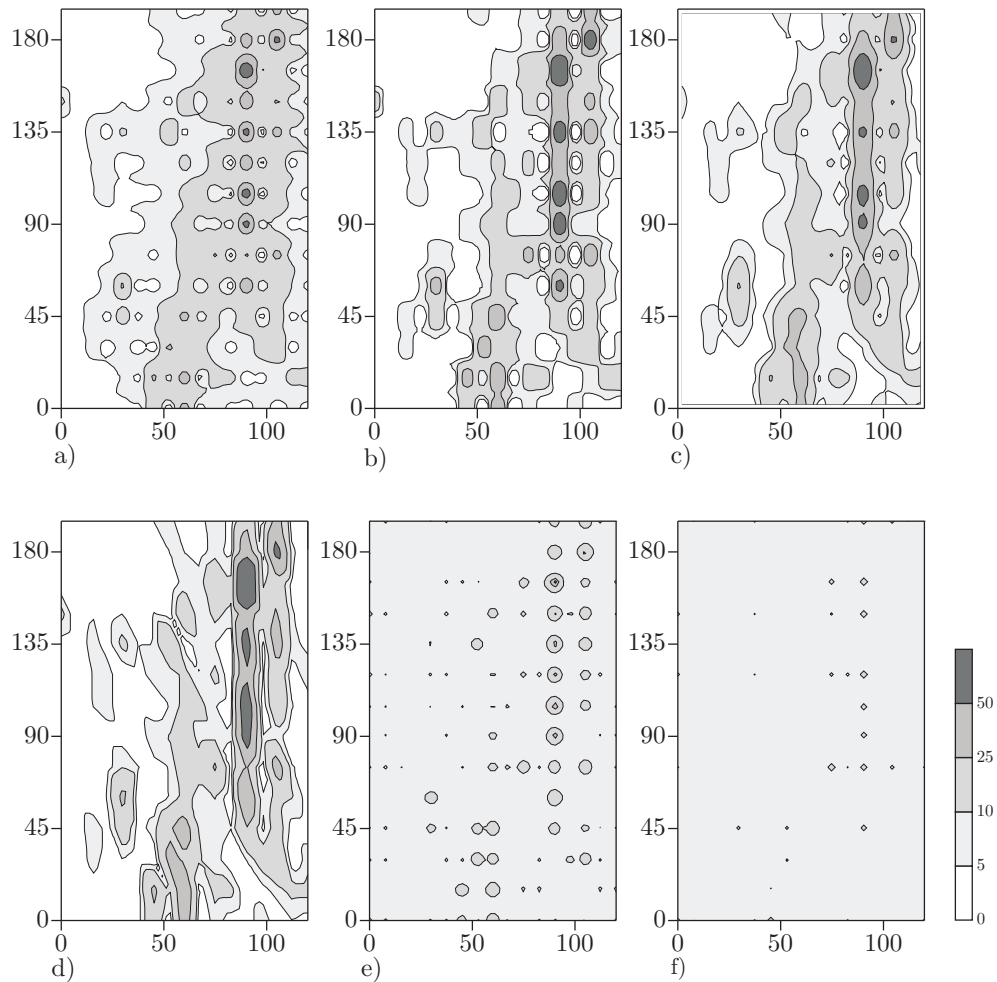


Abb. 4.16: Erstellungen von Unkrautverteilungskarten für *Gräser* mit 4 unterschiedlichen Interpolationsverfahren. a) b) *Inverse Distance Interpolation* (Abs. 4.1.1.3) mit größerem Gewichtungsfaktor in b), c) *Natural Neighbors Interpolation* (Abs. 4.1.1.2), d) Interpolation nach *Linearer Triangulation* (Abs. 4.1.1.1), e) f) *Kriging* (Abs. 4.1.2.2) mit exponentiellem und sphärischem Modell.

bevorzugen. Dies liegt insbesondere daran, daß nur in diesem Fall eine Grundannahme zum räumlichen Zusammenhang der Werte an den Stützpunkten gemacht wird, die durch statistische Berechnungen für jeden Einzelfall abgesichert ist.

In den deterministischen Verfahren ist streng genommen die Grundvoraussetzung für eine Interpolation ebensowenig gegeben, wie beim *Kriging*, denn weder ein linearer Zusammenhang noch ein durch Suchradien und Gewichtungsfaktoren bestimmter Zusammenhang ist für die Verteilung von Unkräutern auf einem Acker beschrieben worden. Genausowenig ist die statistische Notwendigkeit einer normalverteilten Grundgesamtheit für das *Kriging* bei den vorliegenden Erfassungsdaten gegeben. Aus diesem Grund sollte die Auswahl eines der Interpolationsverfahren nach dem sicheren Umgang mit den vorliegenden Daten sowie der Plausibilität der Verteilungskarte getroffen werden (vgl. BACKES UND PLÜMER 2004). Einen weitaus größeren Einfluß als das Verfahren der räumlichen Interpolation hat die Bestimmung von Schwellenwerten auf die

Unkrautverteilungskarte (Abs. 4.2).

Eine vollständige, abschließende Bewertung der einzelnen Interpolationsverfahren für die Erstellung von Unkrautverteilungskarten kann mit der hier vorgestellten Methodik nicht vorgenommen werden.

Tab. 4.2: Tabelle der Kreuzvalidierungsergebnisse in einer Übersicht. Die Ergebnisse wurden in SURFER (GOLDEN SOFTWARE 2004) nach Formel 4.17 berechnet.

Frucht	Bezeichner ¹	LT ²	NNI ³	IDW1 ⁴	IDW2 ⁵	KR1 ⁶	KR2 ⁷
ZR	S6 2001 CHEAL	30,19	28,49	31,17	34,23	26,40	27,03
ZR	S6 2001 GALAP	3,94	3,85	3,52	4,22	3,68	3,39
ZR	S6 2001 FUMOF	0,53	0,53	0,50	0,57	0,56	0,45
ZR	S6 2001 GGGGG	24,02	23,55	24,20	23,74	23,79	23,79
ZR	S6 2001 MATSS	6,93	6,40	8,24	8,74	9,17	9,18
MS	S8 2001 CHEAL	0,95	0,92	0,85	0,90	0,85	0,84
MS	S8 2001 GALAP	0,40	0,41	0,33	0,37	0,37	0,37
MS	S8 2001 FUMOF	3,26	3,18	2,70	2,99	2,63	3,04
MS	S8 2001 GGGGG	68,47	66,93	61,88	64,06	53,85	53,89
MS	S8 2001 MATSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WG	S9 2001 CHEAL	3,89	3,77	3,27	3,75	3,46	3,19
WG	S9 2001 GALAP	0,49	0,47	0,41	0,46	0,41	0,41
WG	S9 2001 FUMOF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WG	S9 2001 GGGGG	10,11	9,54	10,79	11,50	9,28	9,40
WG	S9 2001 MATSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WW	S6 2002 CHEAL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WW	S6 2002 GALAP	3,99	3,92	3,36	3,75	3,79	3,61
WW	S6 2002 FUMOF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WW	S6 2002 GGGGG	9,02	8,28	9,31	9,66	9,54	9,58
WW	S6 2002 MATSS	4,17	3,33	4,99	5,47	4,38	5,35
ZR	S8 2002 CHEAL	4,54	4,26	3,96	4,30	4,01	4,01
ZR	S8 2002 GALAP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ZR	S8 2002 FUMOF	3,20	3,25	2,70	2,92	2,78	2,78
ZR	S8 2002 GGGGG	5,72	5,22	5,16	5,78	5,73	5,73
ZR	S8 2002 MATSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MS	S9 2002 CHEAL	8,76	8,30	8,23	8,61	7,86	7,84
MS	S9 2002 GALAP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MS	S9 2002 FUMOF	1,67	1,63	1,41	1,54	1,47	1,58
MS	S9 2002 GGGGG	75,29	29,34	108,81	111,99	122,61	-
MS	S9 2002 MATSS	5,13	4,78	4,30	4,83	4,27	-

¹ Feldnummer, Jahr und Unkrautart (BAYER-CODE)

² Triangulation mit linearer Interpolation

³ Natural Neighbor Interpolation

⁴ Inverse Distance Weighted Interpolation (Gewichtungsfaktor 2)

⁵ Inverse Distance Weighted Interpolation (Gewichtungsfaktor 4)

⁶ Ordinary Point Kriging (Exponentielles Modell)

⁷ Ordinary Point Kriging (Sphärisches Modell)

Es ergeben sich nur Einblicke in grundsätzliche Unterschiede der Verfahren der räumlichen Interpolation für den beschriebenen Zweck. Dies liegt insbesondere daran, daß die tatsächliche

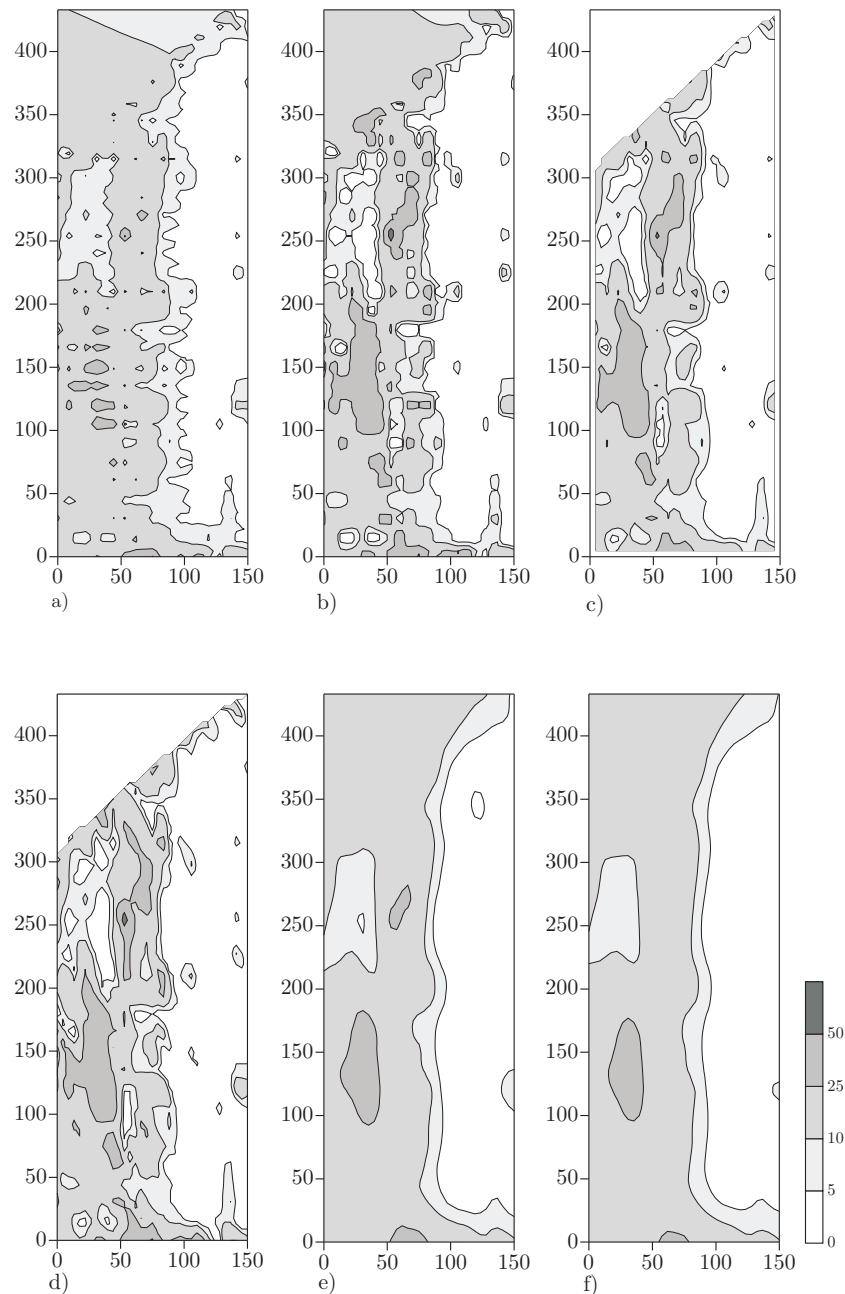


Abb. 4.17: Erstellungen von Unkrautverteilungskarten für *Chenopodium album* L. mit 4 unterschiedlichen Interpolationsverfahren. a)/b) *Inverse Distance Interpolation* (Abs. 4.1.1.3) mit größerem Gewichtungsfaktor in b), c) *Natural Neighbors Interpolation* (Abs. 4.1.1.2), d) Interpolation nach *Linearer Triangulation* (Abs. 4.1.1.1), e)/f) *Kriging* (Abs. 4.1.2.2) mit exponentiellem und sphärischem Modell.

räumliche Verteilung der Unkräuter auf einer Ackerfläche nicht, oder nur unzureichend bekannt ist. Letztlich wäre nur auf der Grundlage vollständigen Wissens im Sinne der Grundgesamtheit aller Unkräuter auf einer Ackerfläche eine Lösungsmöglichkeit gegeben. Eine Methodik, dieses Ziel zukünftig zu erreichen, wird in Kapitel 5 vorgestellt.

Abschließend sei noch einmal darauf hingewiesen, daß neben den hier vorgestellten Methoden der räumlichen Interpolation noch eine ganze Reihe weiterer, hier nicht weiter vorgestellter Verfahren existieren. Diese wurden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weitergehend betrachtet, da sie in der Unkrautforschung nicht verwendet werden. Einen tieferen Einblick in die räumliche Interpolation findet der interessierte Leser insbesondere bei CRESSIE 1991 und BURROUGH AND MCDONNELL 1998.

4.2 Generierung von Bewirtschaftungszonen

Nach der Interpolation der Stichproben zu einer Unkrautverteilungskarte erfolgt die Klassifizierung der geschätzten Werte. Dieser Arbeitsschritt ist notwendig, da ausgehend von Expertenwissen in Form von wirtschaftlichen oder festen Schadensschwellen eine Applikationsentscheidung getroffen werden muß. Die beispielsweise in Tab. 4.3 aufgeführten Schadensschwellen werden auf die Resultate der Interpolation angewendet, um letztendlich mit einer GPS-gesteuerten Feldspritze Herbizide an den Stellen ausbringen zu können, an denen Unkräuter in einer Dichte oberhalb der Schadensschwellen auftreten. An allen anderen Orten soll nicht gespritzt werden. Wie in Abb. 4.18 verdeutlicht, spielt dabei die Einteilung der Verunkrautungsklassen nach Schadensschwellen eine wichtige Rolle. Bereits kleine Veränderungen in der Klassifizierung führen dazu, daß wesentlich mehr bzw. wesentlich weniger Herbizide ausgebracht würden. Dieser Effekt stellt sich als weit stärker dar, als die Unterschiede in den Verteilungskarten in Abhängigkeit vom gewählten Interpolationsverfahren (Abs. 4.1).

4.2.1 Klassifizierung der Unkrautdichte mit Schadensschwellen

Die Anwendung wirtschaftlicher Schadensschwellen ist ein grundlegender Bestandteil des *Integrierten Pflanzenschutzes*. Dieser gliedert in den konventionellen, chemischen Pflanzenschutz mit Pestiziden, auch Kulturmaßnahmen zur Schadensabwehr und den direkten und indirekten Einsatz von Nützlingen sowie biologische und biotechnische Maßnahmen ein (DIERCKS UND HEITEFUSS 1994). Außerdem soll im *Integrierten Pflanzenschutz* der Einsatz von Informationstechnologien zur Überwachung und Prognose von Schaderregern in die Pflanzenschutzmaßnahmen eingebettet werden. Die im *Integrierten Pflanzenschutz* geforderte gezielte und sparsame Applikation chemischer Pflanzenschutzmittel setzt für Unkräuter auch die Anwendung von wirtschaftlichen Schadensschwellen vor der Applikation von Chemikalien voraus. Ob eine solche wirtschaftlichen Schadensschwellen für Unkräuter erreicht ist, wird bestimmt, indem auf der Basis von Stichproben auf die mittlere Verunkrautung auf einem Acker geschlossen wird. Dabei kann nach Formel 4.18 (ZWERGER UND AMMON 2002) die Verunkrautung bestimmt werden, unterhalb der ein wirtschaftlicher Schaden nicht zu erwarten ist.

$$SSW = \frac{B_K}{I \frac{E_{UF}}{100} P} \quad (4.18)$$

wobei: SSW = Schadensschwelle, B_K = Kosten der Unkrautbekämpfung,
 I = Parameter für die Ertragsverluste pro Quadratmeter abgeleitet aus einer linearen Regression,
 E_{UF} = Ertragsersparnis bei Unkrautfreiheit, P = Preis für das angebaute Produkt

Neben dieser Form der wirtschaftlichen Schadensschwelle gibt es auch feste Schadensschwellen, die bei der Konturlinienerstellung eine Rolle spielen. Hierbei wird die Bekämpfung beim Überschreiten einer bestimmten Unkrautdicke für Ungräser oder zweikeimblättrige Unkräuter sowie bestimmter Problemunkräuter, wie z.B. *Galium aparine* L. und *Cirsium arvense* L. festgelegt (GEROWITT UND HEITEFUSS 1990, SWANTON *et al.* 1999, ZWERGER UND AMMON 2002). Einen Überblick hierzu bietet Tab. 4.3.

Tab. 4.3: Feste Schadensschwellen für Unkräuter in Getreide (verändert nach GEROWITT UND HEITEFUSS 1990).

Pflanze	Schadenschwellenbereich
Monokotyle Ungräser	20-30 Pflanzen / m ²
Dikotyle Unkräuter	40-50 Pflanzen / m ²
<i>Galium aparine</i> L.	0,1-0,5 Pflanzen / m ²
<i>Cirsium arvense</i> L. ¹	2 Pflanzen / m ²
Unkrautdeckungsgrad	5-10 %

¹ nach DICKE *et al.* 2004

Anhand der Schadensschwellen werden einer Unkrautverteilungskarte Isolinien zugewiesen, die Bereiche gleicher Unkrautdichten definieren sollen. In Abb. 4.18 wird sichtbar, welchen Einfluß die Veränderung der Schwellenwert in Form von Schadensschwellen auf die Pflanzenschutzentscheidung haben kann. In Abhängigkeit von der Schadensschwelle werden einige Bereiche der Ackerfläche behandelt oder nicht. Aus diesem Grund ist es für den GIS-Anwender bei der Erstellung von Unkrautverteilungskarten enorm wichtig, zuverlässige Schadensschwellen zur Verfügung stehen zu haben. Da insbesondere die wirtschaftlichen Schadensschwellen für Unkräuter gemäß Formel 4.18 jedoch in Abhängigkeit von vielen Einflußfaktoren schwanken, sollte hier in Zukunft eine Debatte über die Nutzung dieser Schwellenwerte in GIS geführt werden, um verbindliche Richtlinien für die Erstellung von Unkrautverteilungskarten zu erlangen.

Vor dem Hintergrund der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle stellt sich heraus, daß das Konzept der Schadensschwellen mit einem drastischen Informationsverlust verbunden ist. Liegen die Unkrautverteilungsinformationen aus stichprobenhafter Datenerfassung nach dem Interpolationsschritt noch dreidimensional vor (mit der Unkrautdicke als *z*-Wert), so wird durch die Anwendung von Schadensschwellen aus diesen Daten zweidimensionale Daten. Hierbei werden die unscharfen Grenzen der ursprünglichen Karte in scharfe Bewirtschaftungszonen transformiert. Da die Schadensschwellen jedoch inhärent fehlerbehaftet sind, werden bei der Applikationsentscheidung weniger Informationen genutzt, als tatsächlich vorhanden sind. Die Informationen über schwankende Unkrautdichten deutlich über, bzw. deutlich unterhalb der angewendeten Schadensschwellen gehen verloren. Im Gesamtkomplex von der Datenerfassung über die Interpolation und die Schwellenwertbildung kommt es damit zu einer kontinuierlichen Minderung der Genauigkeit verglichen mit der realen Verunkrautungssituation. Diese Minderung der Genauig-

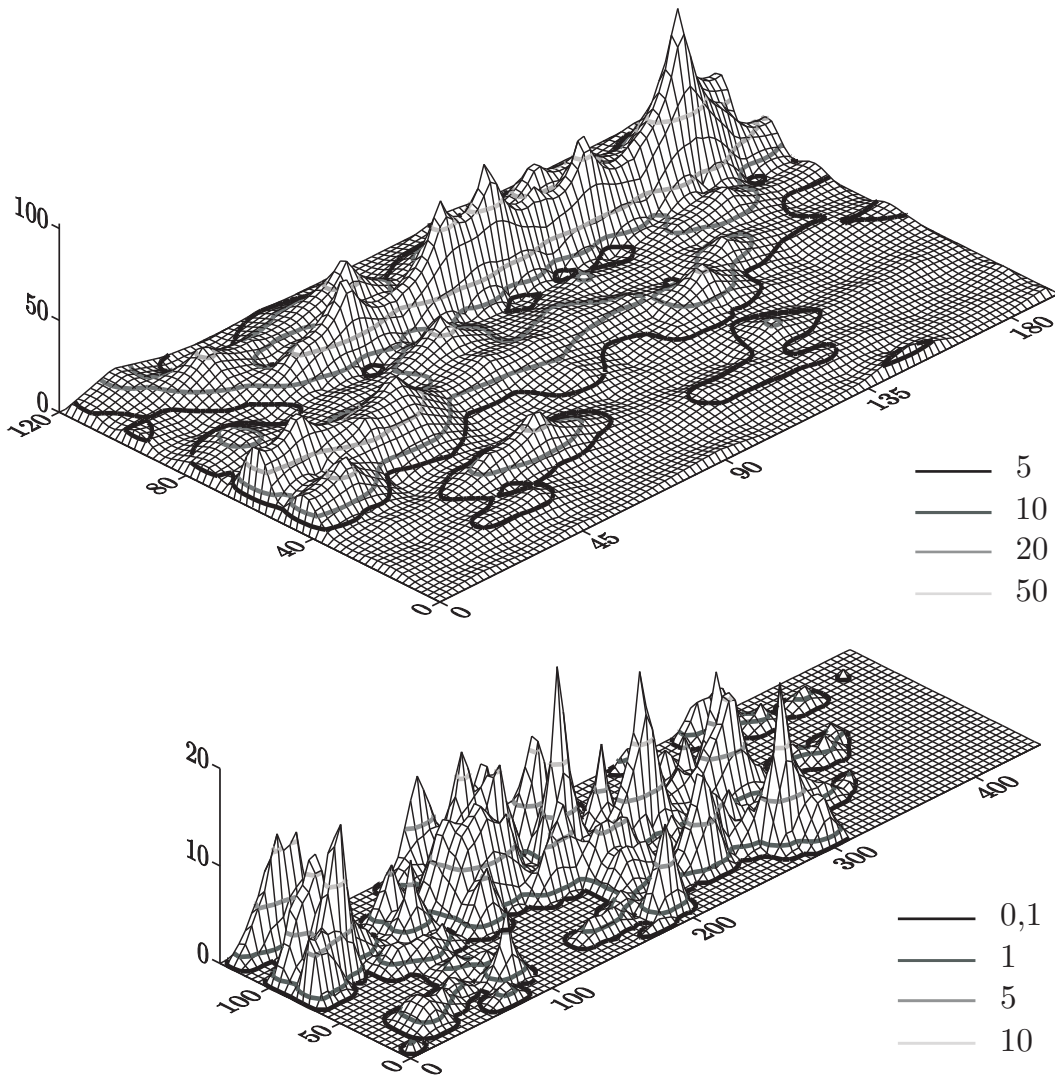


Abb. 4.18: Unkrautverteilungskarten in 3D-Darstellung. Durch unterschiedliche Graustufen markiert sind die Isoplethen gleicher Unkrautdichte. Oben: Verteilung der *Gräser* als Gruppe auf Feld 8 im Jahr 2003, Unten: Verteilung von *Galium aparine* L. auf Feld 6 im Jahr 2001.

keit beruht auch auf den jeweiligen methodischen Schwierigkeiten der einzelnen Arbeitsschritte, die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt worden sind.

Neben der Feststellung des Erreichens bestimmter Schadensschwellen, ist auch die Frage nach der Definition eines zu bekämpfenden Unkrautnestes mit der Schwellenwertbildung eng verknüpft. Ausgehend von den über Interpolation erstellten Unkrautverteilungskarten wird z.B. vom Vorhandensein eines Nests gesprochen. Zudem wird dabei die Stabilität, also das zeitlich wiederkehrende Auftreten einer Unkrautpopulation am gleichen Ort, unter anderem anhand dieser Karten festgemacht. Wie jedoch bereits in Abs. 2.2.3 festgestellt wurde, kann es dabei zu immensen Unterschieden in den Unkrautverteilungskarten in Abhängigkeit von der Erfassungsgenauigkeit der Daten und dem verwendeten Interpolationsverfahren kommen. Können die genannten Faktoren mit einem negativen Einfluß auf die Erstellung von Unkrautverteilungskarten

mit GIS systematisch ausgeschlossen werden, kann mit der Hilfe von festgelegten Schwellenwerten, die Stabilität und auch die semantische Definition eines Unkrautnestes gelingen. Mit der Hilfe von geometrischen Formparametern kann die Ausdehnung eines solchen Unkrautnestes bestimmt und über die Jahre verfolgt werden. Zusätzlich bieten *Fourier Deskriptoren* (WELLE 2003) die Option, auch die Form eines Unkrautnests in einer Unkrautverteilungskarte zu analysieren und mit Unkrautnestern vergangener Jahre zu vergleichen.

5 Hochauflösende Erfassung und Kartierung der Verunkrautungssituation - Bewertung des Systems stichprobenhafter Unkrautdatenerfassung

Inwieweit die erhobenen Daten zur Verunkrautung eines Feldes repräsentativ für die teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle sein können oder nicht, wurde in Abs. 2.1 beantwortet. Inwieweit es dabei prinzipiell möglich ist, im Rahmen der gegebenen natürlichen Umstände und zeitlicher Beschränkungen eine adäquate Erfassung von Unkräutern für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle mit manuellen Erfassungsmethoden durchzuführen, wird in diesem Kapitel beschrieben. Um die Frage nach der notwendigen Präzision für eine repräsentative Datenerfassung zweifelsfrei beantworten zu können, sind die bisher verwendeten Daten und Methoden der Datenerfassung nicht geeignet, denn hochauflösende Informationen sind hierfür essentiell. Mit dem Ziel solche - der Grundgesamtheit einer Unkrautpopulation nahe kommenden - Informationen zu erhalten, wird in diesem Kapitel ein prototypisches Verfahren zur hochauflösenden Erfassung von Unkräutern zu Simulationszwecken und eine neue GIS-Software zur Durchführung der benötigten Simulationen vorgestellt. Diese Methodik kann daher Ausgangsbasis für Entscheidungsprozesse bei der Planung von Meßrastern zur Unkrautdatenerfassung werden.

5.1 Versuchsstandort Klein-Altendorf

Als Standort für die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Datenerfassungen wurde das Versuchsgut Klein-Altendorf der Universität Bonn bei Meckenheim ausgewählt. Der Standort ist klassischer Zuckerrübenstandort mit einer Parabraunerde auf Löß und tonigem Schluff. Die jährliche Niederschlagsmenge beträgt im Mittel der Jahre 600 mm.

Ziel der an diesem Standort durchgeführten Datenerfassungen war die methodische Untersuchung des Systems der stichprobenhaften Erfassung von Unkräutern zum Zweck der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle. Auf Teilflächen einer Ackerfläche mit Winterweizen (ca. 2000 m², Abb. 5.1 [V1]) und einer Ackerfläche mit Zuckerrüben (ca. 6000 m², Abb. 5.1 [V2]) des beschriebenen Versuchsgutes wurden im Frühjahr 2003, vor der Behandlung mit Herbiziden, die nachfolgenden Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden alle - visuell in digitalen Videoaufnahmen erkennbaren - Unkräuter nach Arten differenziert georeferenziert festgehalten. Diese Daten konnten dann im Verlauf der Untersuchungen mit dem Ziel der Simulation von Erfassungsverfahren und deren Kartierungsergebnis mit einer neuen GIS-Software bearbeitet werden.

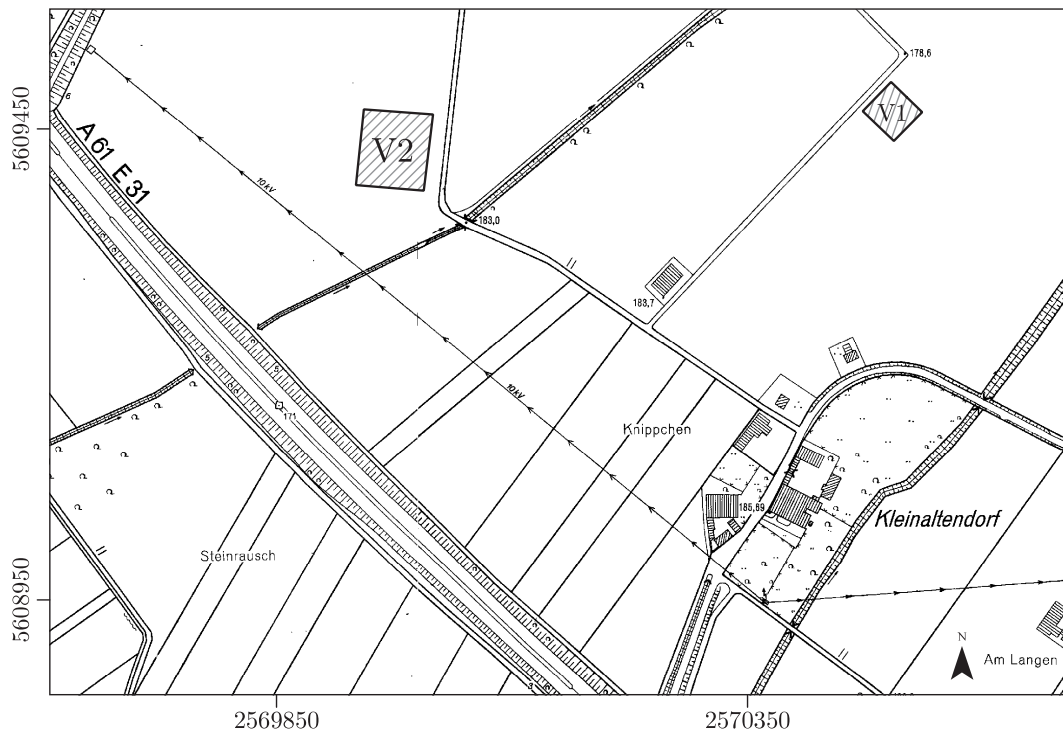


Abb. 5.1: Das Versuchsgut Klein-Altendorf der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn bei Meckenheim. Auf den markierten Versuchsfächen (V1 und V2) wurden im Frühjahr 2003 Untersuchungen mit dem in Abs. 5.2.1 vorgestellten WEEDSCANNER durchgeführt. DGK 5, ©Landesvermessungsamt NRW, Bonn, 1184/2003

5.2 Hochauflösende Unkrauterfassungen mit digitalen Camcordern

Bisher wurden Untersuchungen zur Genauigkeit von Unkrauterfassungen für die teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle entweder auf der Basis simulierter Grundgesamtheiten (z.B. DILLE *et al.* 2002) oder über die (geo-) statistische Analyse von Stichproben (z.B. COLBACH *et al.* 2000) durchgeführt (vgl. Abs. 4.1.2.1).

Im Rahmen dieser Studie sollten allerdings reale Daten aus eigenen Vollerhebungen für weitergehende Analysen zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund wurde in dieser Studie eine prototypische Methodik entwickelt, die diese Vollerhebung von Unkräutern bildanalytisch ermöglicht. Die zwei grundlegenden Bestandteile dieses Systems sind ein speziell angefertigtes Trägerfahrzeug (WEEDSCANNER) für die lückenlose, flächenhafte Aufnahme von Videosequenzen der Ackeroberfläche und eine Software (FARMLANDBUILDER) zur Bearbeitung und Auswertung der gewonnenen Bilddaten im Sinne einer virtuellen Unkrauterfassung am Computer.

5.2.1 WeedScanner - Aufbau und Prinzip des Prototyps

Um die Unwegsamkeiten der Datenerfassung in den, in Abs. 2.2.1 vorgestellten Methoden zu umgehen und hochaufgelöste Unkrautdaten zu erhalten, wurde in dieser Studie ein eigenes



Abb. 5.2: Der WEEDSCANNER auf einer Zuckerrübenfläche am Versuchsgut Klein-Altendorf bei Meckenheim. Die digitalen Camcorder sind auf einer Montageleiste flexibel befestigt und nehmen kontinuierlich Videosequenzen der Ackeroberfläche auf.

Trägerfahrzeug zur Aufnahme von Videosequenzen auf Ackerflächen konzipiert und gebaut. In Abb. 5.2 ist der WEEDSCANNER auf einer der Versuchsfelder zu sehen. Der Rahmen des Trägerfahrzeugs besteht aus Lochplatten aus verzinktem Stahl sowie Aluminiumprofilen. Diese Komponenten sind mit Sechskantschrauben miteinander verbunden und flexibel erweiterbar. Das Fahrzeug hat eine Gesamtbreite von ca. 1,50 m und eine Länge von ca. 1,20 m. Die starren Achsen aus verzinkten Unterpfostenlaschen der Breite 101 mm dienen der Montage von Luftreifen der Größe 380x90 mm und einer möglichst einfachen Fahrt mit dem Fahrzeug in der Reihe eines unebenen Ackers. Querverstrebungen aus Kupferleisten gewährleisten die Stabilität des Fahrzeugs während der Fahrt. Am hinteren Ende des Fahrzeugs ist ein Plastikrohr als Griff zum Schieben befestigt. An der vorderen Seite des Fahrzeugs sind auf einem Aluminiumprofil verzinkte Winkelverbinder montiert, die das Anbringen der digitalen Camcorder ermöglichen. Hierbei wurden die Camcorder mit Hilfe von Stativschrauben an den Winkelverbindern befestigt und mit Kabelbindern zusätzlich gegen Verrutschen gesichert. Die Camcorderobjektive befinden sich in einer Höhe von ca. 45 cm über der Ackeroberfläche (vgl. auch Abb. 5.2). Alle Bauteile des Trägerfahrzeugs sind miteinander verschraubt und sind somit flexibel austauschbar bzw. um weitere Komponenten ergänzbar.

Auf der Ackerfläche wird das Fahrzeug in der Bearbeitungsrichtung geschoben. Jede Fahrtreihe deckt dabei einen Ackerstreifen von 1,30 m Breite ab. Um eine vollständige Abdeckung der

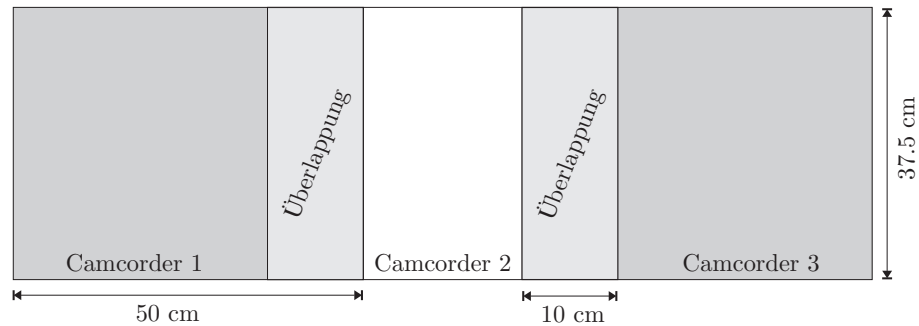


Abb. 5.3: Dargestellt ist die Überlappung der einzelnen Camcorderaufnahmen. Ein Überlappungsbereich von 20 Prozent soll die Verknüpfung der Einzelbildreihen ermöglichen.

Ackerfläche zu gewährleisten wurde in der entgegengesetzten Fahrtrichtung ein Überlappungsbereich mit dem bereits abgefahrenen adjazenten Ackerstreifen von 20-30 cm erneut abgefahren.

5.2.1.1 Verwendete Camcorder

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden digitale MINIDV Camcorder vom Typ SONY TRV 900E für die Aufnahmen der Ackeroberfläche verwendet. Die Camcorder dieses Typs sind mit 3 CCD (Charge Coupled Device) Chips ausgestattet, die eine Größe von 1/4 Zoll haben und jeweils 380.000 Pixel aufnehmen können. Sollen, wie in dieser Arbeit vorgesehen, digital aufgezeichnete Videos am Computer modifiziert oder ausgewertet werden, kann im verwendeten Camcordermodell der sogenannte Progressive Scan Modus (PROG.SCAN) zugeschaltet werden. Die aufgenommenen Videosequenzen werden dann Bild für Bild mit höherer Auflösung gemacht. Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn Bewegungen oder Aktionen analysiert werden müssen. Bei normalen Videoaufnahmen wird das aufgenommene Bild in zwei Halbbilder (*Interlacing*) aufgeteilt, die in Abständen von 1/50 Sekunden abwechselnd gezeigt werden, d.h. das Bild, das zu einem bestimmten Zeitpunkt tatsächlich angezeigt wird, füllt nur die Hälfte (abwechselnd gerade und ungerade Zeilen) des sichtbaren Bildbereichs. Dies führt dazu, daß die Einzelbilder der Videoaufnahmen nur sehr eingeschränkt für die in dieser Arbeit notwendigen Analysen brauchbar wären. Für die Bewertung der Verunkrautungssituation ist daher das beschriebene Aufnehmen im Progressive Scan Modus sinnvoll (vgl. auch LANGNER UND BÖTTGER 2003). Wird der aufgenommene Film aus dieser Aufnahmetechnik als Video betrachtet, erscheint der Film ruckartiger, da nur alle 1/12,5 Sekunden eine Aufnahme gemacht, bzw. angezeigt wird. Dies ist jedoch für die im weiteren beschriebene Analyse wünschenswert, da in dieser Arbeit Einzelbilder analysiert werden sollen. Während der Aufnahmen der Ackeroberfläche wird der gesamte Bereich zwischen der Bereifung des Trägerfahrzeug abgefilmt. Dieser ca. 1,30 m breite Zwischenraum wird von den drei Camcordern vollständig abgedeckt, denn jeder Camcorder filmt einen Ackerstreifen von ca. 50 cm Breite. Da die Camcorder, wie bereits beschrieben, in einer Höhe von ca. 45 cm montiert sind, entspricht ein Pixel der Aufnahmen ca. 0,07 cm, weil bei einer Aufnahmeauflösung von 720x576 Pixel eine Ackerfläche von 50x37,5 cm angezeigt werden.

Dabei ist eine Überlappung zwischen den filmenden Camcordersegmenten von ca. 20 Prozent gegeben, die gewährleisten soll, daß keine Fehlstellen in Form von nicht abgefilmten Bereichen während einer Überfahrt auftreten (Abb. 5.3) und hinreichend Bildmaterial für eine Verknüpfung der Einzelreihen gegeben ist. Um möglichst scharfe, kontrastreiche Bilder bei einer Fahrtgeschwindigkeit von ca. 2-3 km/h zu erhalten, wurde außerdem der Reifendruck des Trägerfahrzeugs gemindert und die Verschlusszeit der Blende auf 1/1000 Sekunde eingestellt.

5.2.1.2 Bestimmung von Referenzpunkten in der Ackerfläche

Um einen Bezug zu den realen Ortskoordinaten der Versuchsfläche zu erhalten, wurde mit einem GPS Gerät der Firma Garmin (GARMIN ETREX VISTA) und einem angeschlossenen DGPS Empfänger (D-BLACKBOX, GPS GmbH) jeweils am Startpunkt der Videoaufnahmen und am Ende der ersten und letzten befahrenen Reihe an Referenzpunkten, die im Video zu erkennen sind, die Position bestimmt. Das DGPS Gerät empfängt die bundesweit auf Langwelle ausgesendeten Korrekturdaten des ALF Datendienstes¹⁴. Daher wird eine Genauigkeit der Messung von 1-3 Meter erreicht, die ausreichend für eine Betrachtung und Analyse des relativen Ortsbezugs der Unkrautpflanzen zueinander ist. Die über Langwelle im RDS¹⁵-Format gesendeten Korrekturdaten werden vom DGPS Gerät im RTCM 2.0-Format¹⁶ zur weiteren Verarbeitung dem GPS Gerät zur Verfügung gestellt. Die Ausgabe der RTCM-Daten erfolgt dabei über eine RS-232 Schnittstelle. Im Video ist an den mit dieser Hardware eingemessenen Stellen eine gesondert markierte orangefarbene Führungsschnur zu erkennen, die Start- und Endpunkt jeder Videosequenz erkennbar macht. Diese Markierungen sind von Bedeutung, da die Wendepunkte der Überfahrten nur auf diese Weise in der nachträglichen Videobearbeitung und Bildverarbeitung erkennbar sind.

5.3 Georeferenzierte Unkrauterfassung in virtueller Ackerfläche

Die Videosequenzen, die mit den in Abschnitt 5.2.1.1 beschriebenen digitalen Camcordern aufgenommen wurden, dienen der hochauflösenden Bestimmung der Position der in der Ackerfläche auftretenden Unkräuter. Ziel dabei war es, eine von der Arbeitszeit für eine Vollerhebung auf dem Acker unabhängige Methodik zu erhalten, die es ermöglicht, eine solche Vollerhebung in einem minimalen Zeitfenster zu erreichen. Die Nachteile einer manuellen Datenerfassung mit Zählrahmen im Acker bestehen einerseits im enormen Zeitaufwand für die Begehung, die u.U. mehrere Tage in Anspruch nehmen würde. Dabei würde das Aufkeimen neuer Unkräuter in Kauf genommen werden müssen, was einer Momentaufnahme widerspricht. Außerdem können dabei größere Beschädigungen durch das Betreten des Bestandes nicht vermieden werden. Andererseits ist die exakte Bestimmung der Position aller einzelnen Unkräuter auf dem Acker ohne Bildmaterial mit einem kaum realisierbaren Anspruch an die Genauigkeit der Messung verbunden.

¹⁴Accurate Positioning by Low Frequency der Deutschen Telekom AG

¹⁵Radio Data System, ermöglicht die Übermittlung von Informationen im UKW-Bereich.

¹⁶Das Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee hat 1985 einen Standard zur Übertragung von DGPS-Korrekturen vorgestellt

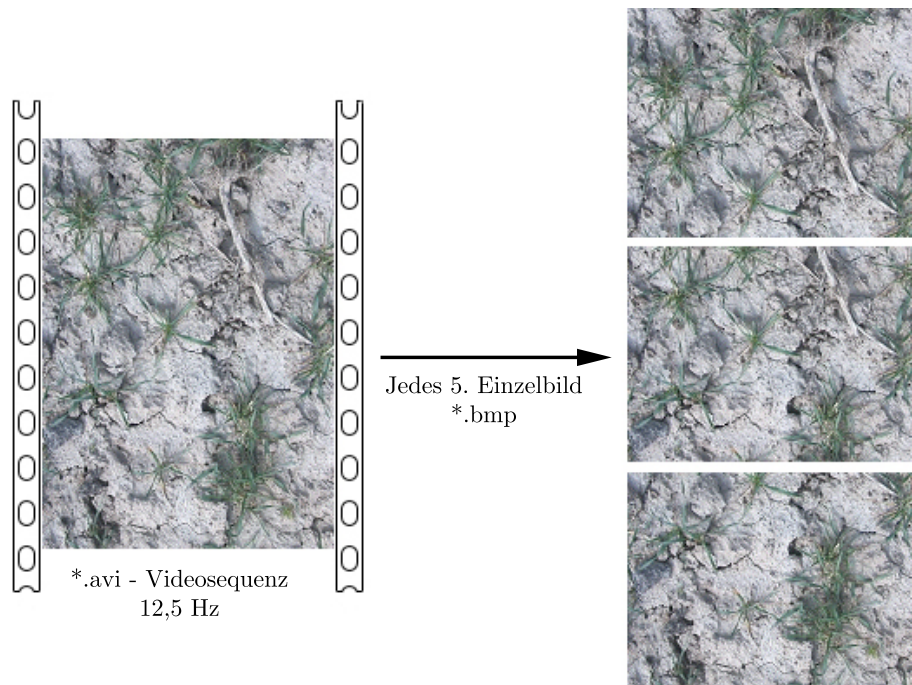


Abb. 5.4: Jedes fünfte Einzelbild wurde aus den Videosequenzen extrahiert und als Bitmap (*.bmp) gespeichert.

Die berührunglose Datenerfassung mit anschließender Auswertung, unabhängig von Zeit und Ort, mit möglichst exakter Positionsbestimmung war daher das Ziel der Entwicklung dieser Methodik. Die Informationen, die mit den digitalen Camcordern des WEEDSCANNERS aufgenommen wurden, benötigen einige weitere Arbeitsschritte, um ausgewertet werden zu können.

Die Videosequenzen der Ackeroberfläche müssen derart bearbeitet werden, daß eine Zuordnung von Geokoordinaten möglich wird. Um dieses vorrangige Ziel zu erreichen, mussten die Videosequenzen mit einer Videobearbeitungssoftware (ADOBE PREMIERE 6.0, ADOBE 2003) in Einzelbilder transformiert werden. Jedes fünfte Einzelbild der Videosequenzen wurde in eine *.bmp-Datei übertragen (Abb. 5.4). Anschließend konnte eine Software zur Generierung von Panoramaansichten (PANAVUE IMAGE ASSEMBLER 2.12, PANAVUE 2003) aus zusammengehörigen Einzelbildern verwendet werden, um vollständige zusammenhängende Szenen jedes gefilmten Ackerstreifens zu erhalten. Dieser *stiching* Prozess konnte nicht vollständig automatisch durchgeführt werden, da die Ähnlichkeiten in den Einzelbildern zu einzelnen Fehlverknüpfungen von Bildern führten. Eine manuelle Nachbearbeitung war daher in allen Fällen notwendig. Die resultierenden, langen Bilderreihen wurden dann in der Software FARMLANDBUILDER weiter bearbeitet (Abs. 5.3.1).

5.3.1 FarmlandBuilder - Aufbau und Prinzip

In der Software FARMLANDBUILDER (DÖRSCHLAG *et al.* 2003, BACKES *et al.* 2004, DÖRSCHLAG *et al.* 2004) werden die Bilderreihen, die mit dem WEEDSCANNER und der anschließenden Bildverarbeitung erstellt wurden (Abs. 5.2.1, 5.3.1), weiterbearbeitet und bezüglich der

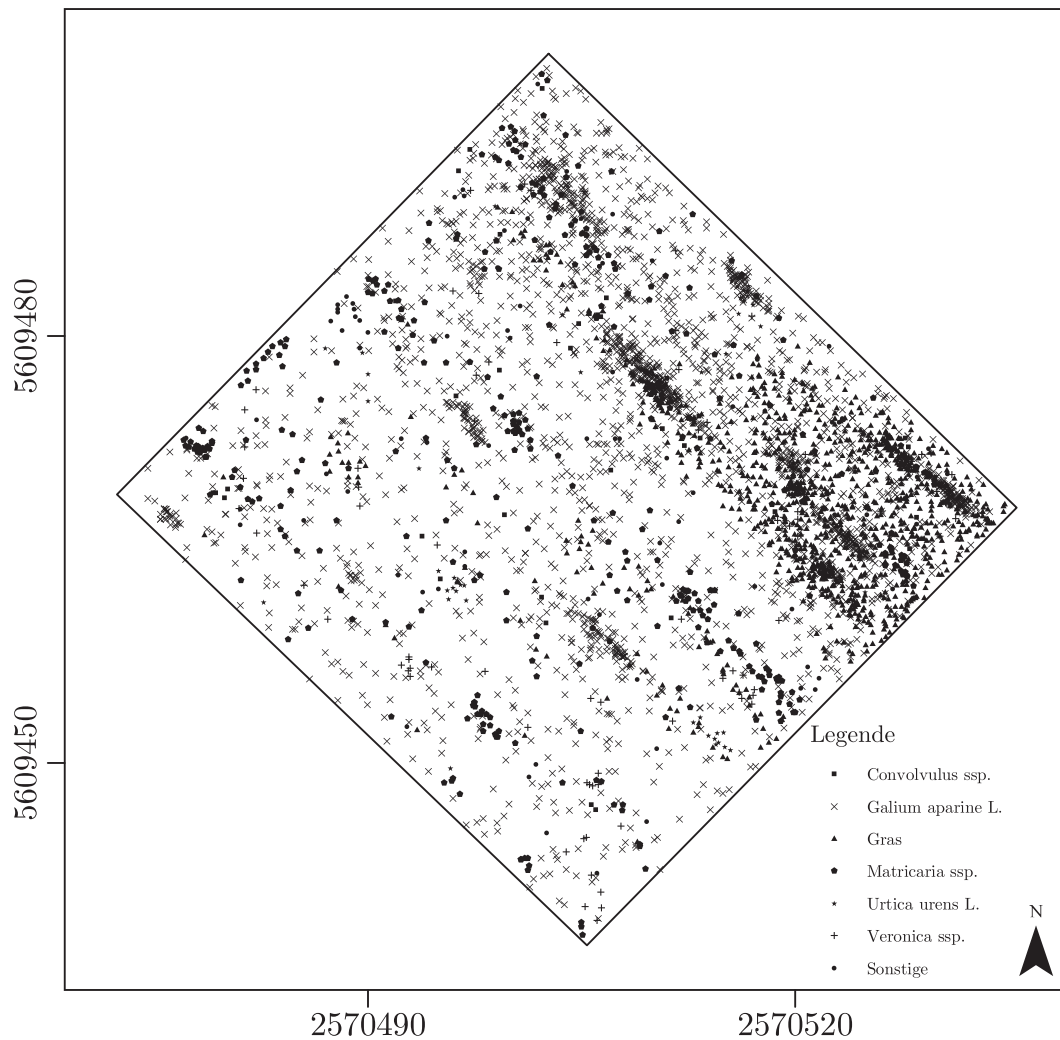


Abb. 5.5: Hochauflösende Informationen zur Unkrautverteilung in Versuch 1 (Winterweizen). Die folgenden Unkrautarten wurden in dieser Teilfläche differenziert: *Convolvulus*-Arten (Winde), *Galium aparine* L. (Kletten-Labkraut), diverse Ungräser, *Matricaria*-Arten (Kamille), *Urtica urens* L. (Brennnessel) sowie *Veronica*-Arten (Ehrenpreis).

darin enthaltenen Unkräuter ausgewertet. Zunächst werden hierbei die einzelnen Bilderreihen der Ackeroberfläche in einem weiteren *stiching* Prozess mit der Hilfe von visuell deutlich erkennbaren Passpunkten miteinander verknüpft. Auf diese Weise entsteht eine Verknüpfungsmatrix der einzelnen Bilderreihen.

Diese wird benötigt, um mit den einzelnen Bilderreihen am PC arbeiten zu können, ohne den Arbeitsspeicher mit einer vollständigen Einzeldatei aller Bilderreihen aneinander zu belasten. Sind alle Bilderreihen miteinander verknüpft, werden den Bildkoordinaten mit Hilfe der Referenzpunkte, die während der Datenerfassung aufgenommen wurden, (Abs. 5.2.1.2) Gauss-Krüger Koordinaten basierend auf einer *affinen Transformation* zugeordnet (DÖRSCHLAG *et al.* 2003, DÖRSCHLAG *et al.* 2004).

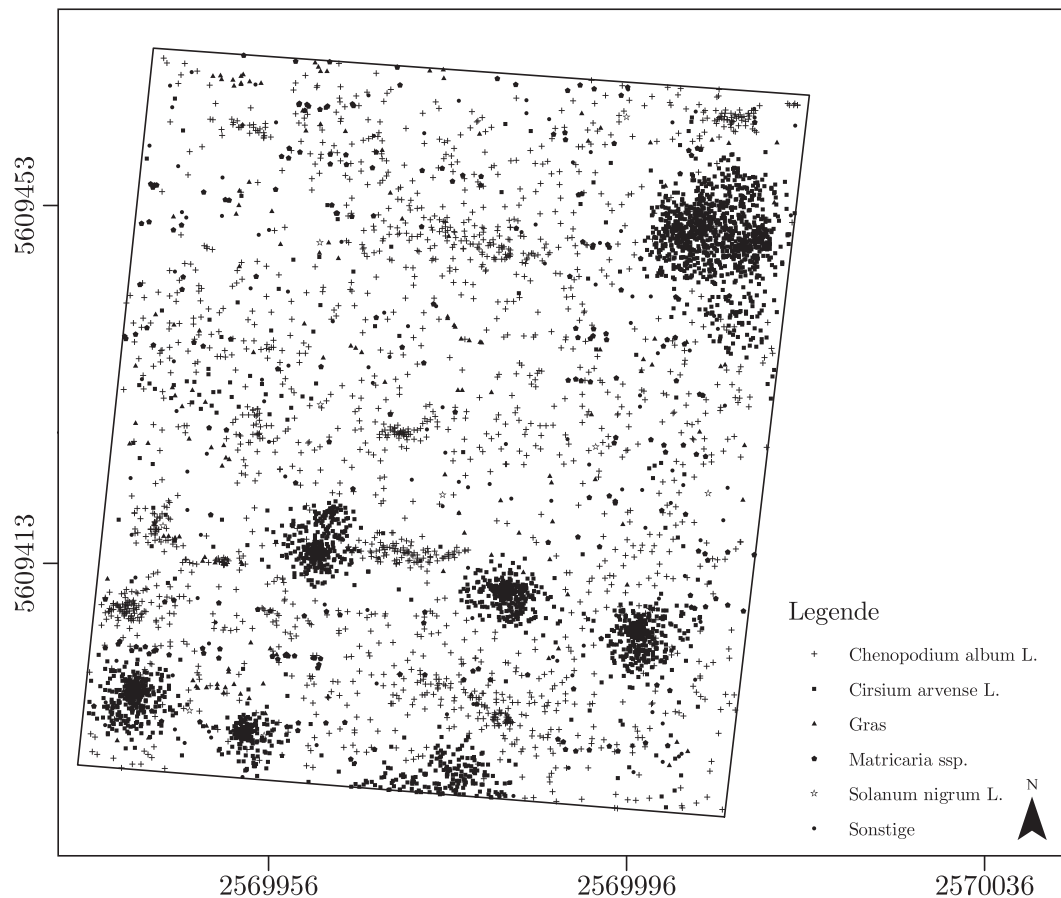


Abb. 5.6: Hochauflösende Informationen zur Unkrautverteilung in Versuch 2 (Zuckerrübe). Die folgenden Unkrautarten wurden in dieser Teilfläche differenziert: *Chenopodium album* L. (Weißer Gänsefuß), *Cirsium arvense* L. (Acker-Kratzdistel), diverse Ungräser, *Matricaria*-Arten (Kamille) sowie *Solanum nigrum* L. (Schwarzer Nachtschatten).

Im Anschluß an diesen Arbeitsschritt werden die Bilderreihen in einer Auswertungsoberfläche der Software analysiert. Die komplette Bilderreihe wird manuell ausgewertet, indem sie betrachtet wird und jedes erkennbare bzw. differenzierbare Unkraut markiert wird. Hierbei wurden die in Tab. 5.1 und Tab. 5.2 dargestellten Unkrautarten unterschieden. Jeder Markierung kann in dieser Software eine Unkrautart aus einer Liste zugewiesen und damit einer Koordinate in der Bilderreihe eine Unkrautart bzw. Position zugeordnet werden. Auf diese Weise wird mit allen verfügbaren Bilderreihen verfahren. Beim Wechsel zwischen den Bilderreihen in der Software werden bereits markierte Unkräuter in einer anderen Bilderreihe ebenfalls angezeigt, um Mehrfachmarkierungen zu verhindern.

Während der Arbeit am PC wird der Arbeitsfortschritt in einer Projektdatei abgespeichert. Diese Projektdatei wird nach Abschluß jeder Analyse zusätzlich als XML- bzw. ASCII- (*.csv-Format) Datei gespeichert. Diese Dateien bilden die Grundlage einer Visualisierung der Datenerfassungen in einem GIS. In den Abb. 5.5 und Abb. 5.6 sind diese Visualisierungen in Form der Koordinaten aller erkannten Unkrautarten als Symbole dargestellt. Jedes Symbol in den dargestellten Karten repräsentiert ein Unkraut einer bestimmten Unkrautart. Die dargestellten

Tab. 5.1: Gefundene Unkrautarten in Versuch 1 in Klein-Altendorf.

	Anzahl in V1 ¹	Anzahl pro m ² in V1 ²
<i>Convolvulus ssp.</i>	42	0,02
<i>Galium aparine</i> L.	2511	1,27
Gras ³	1048	0,52
<i>Matricaria ssp.</i>	392	0,20
<i>Urtica urens</i> L.	47	0,02
<i>Veronica ssp.</i>	87	0,04
Sonstige ⁴	94	0,05

¹ Versuch 1 am Standort Klein-Altendorf s. Abb. 5.1

² ca. 2000 m² Versuchsfläche

³ Gras $\hat{=}$ diverse Ungräser in einer Gruppe zusammengefaßt

⁴ in den Bildern s. Abb. 5.4 nicht eindeutig einer Art zuzuordnende Pflanzen

Tab. 5.2: Gefundene Unkrautarten in Versuch 2 in Klein-Altendorf.

	Anzahl in V2 ¹	Anzahl pro m ² in V2 ²
<i>Matricaria ssp.</i>	231	0,04
<i>Cirsium arvense</i> L.	2741	0,46
<i>Solanum nigrum</i> L.	10	0,00
Gras ³	155	0,03
<i>Chenopodium album</i> L.	1872	0,32
Sonstige ⁴	143	0,02

¹ Versuch 2 am Standort Klein-Altendorf s. Abb. 5.1

² ca. 6000 m² Versuchsfläche

³ Gras $\hat{=}$ diverse Ungräser in einer Gruppe zusammengefaßt

⁴ in den Bildern s. Abb. 5.4 nicht eindeutig einer Art zuzuordnende Pflanzen

Ergebnisse dieses Systems bilden die Datenbasis für die Untersuchung der stichprobenhaften Datenerfassung von Unkräutern mit einer GIS-Software, die im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurde (Abs. 5.4.1).

5.4 Systematische Bewertung der Datenerfassung

5.4.1 Sampling Simulator

Um die Ergebnisse der vorgestellten Systematik zur Vollerhebung von Unkrautpopulationen (Abs. 5.2.1, 5.3.1) im Hinblick auf die Genauigkeit der stichprobenhaften Unkrauterfassungen für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle untersuchen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine speziell an diese Anforderungen angepasste GIS-Software (SAMPLING SIMULATOR) entwickelt. Mit dieser Software ist es möglich, unterschiedliche Vorgehensweisen der Datenerfassung auf der Grundlage der Vollerhebungen zu simulieren. Neben der Untersuchung des Einflusses der Zählrahmengröße (Abb. 2.1, Abs. 2.1) auf die Genauigkeit der Aussagen können

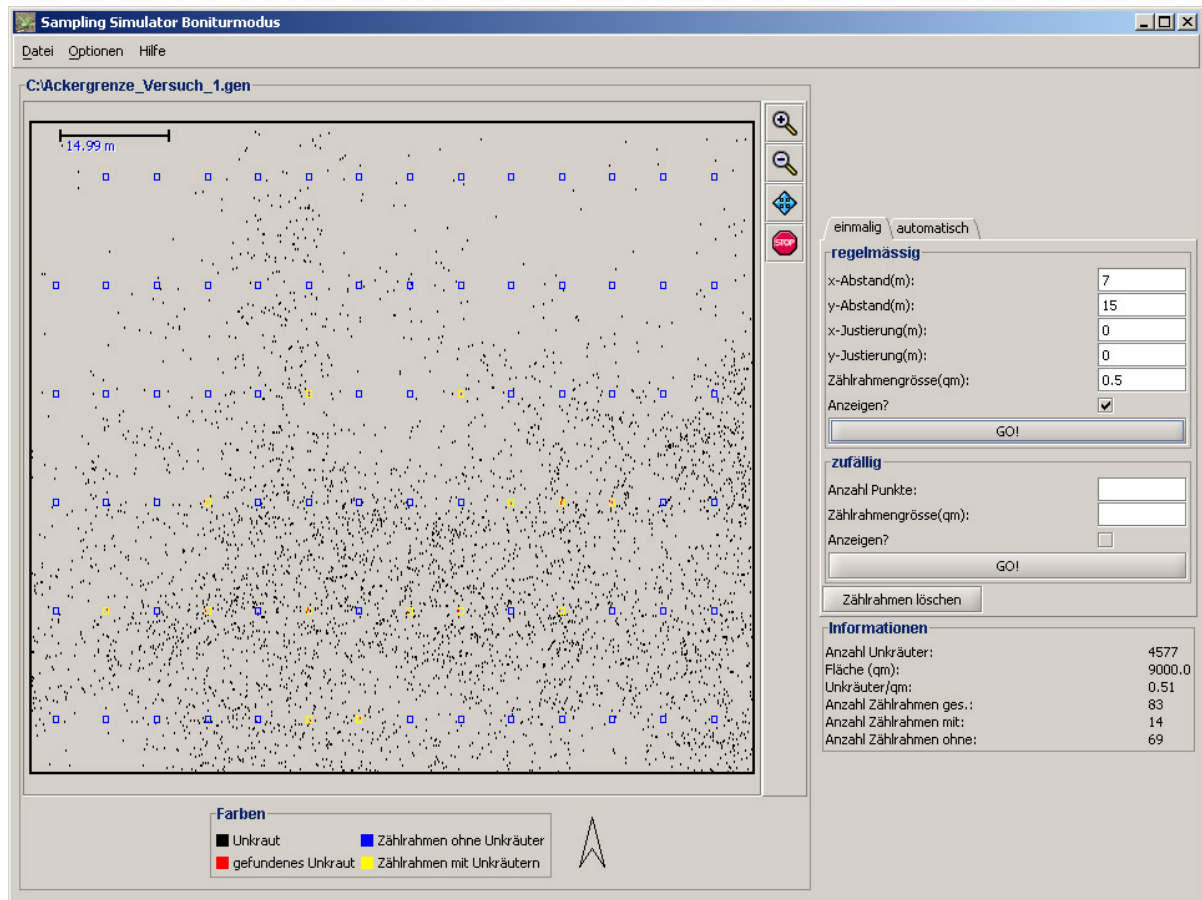


Abb. 5.7: Screenshot der Simulationssoftware SAMPLING SIMULATOR. Sind Ackerbegrenzungen sowie die Unkrautdaten geladen, können beliebige, regelmäßige Meßraster und Zählrahmengrößen und Startpositionen für die Erfassung der Daten simuliert werden.

auch unterschiedliche Meßrasterabstände (vgl. Abs. 2.1) in einem regelmäßigen Meßraster variiert und analysiert und Zufallsstichproben unterschiedlichen Umfangs simuliert werden. Die Möglichkeiten, die sich aus der Arbeit mit dieser Software für eine systematisch methodische Analyse der Genauigkeit der stichprobenhaften Unkrauterfassung ergeben, sind jedoch nicht nur auf der Basis der im Zusammenhang dieser Arbeit erhobenen Daten nutzbar. Die zusätzliche Option innerhalb der Software zur Erzeugung beliebiger Populationen zum Zweck der Simulation eigener Erfassungsmethodik eröffnet den Anwendern der Strategie der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle die Möglichkeit, eigene Erfahrungen und Kenntnisse bezüglich der räumlichen Verteilung von Unkräutern in eine Analyse mit einzubeziehen.

Neben der Berechnung unterschiedlicher Fehlermaße und Kenngrößen als Anhaltspunkte für Aussagen zur Genauigkeit der verwendeten Erfassungsstrategien können auch die Ergebnisse jeder einzelnen stichprobenhaften Datenerfassung in GIS weiter betrachtet werden. Aus den simulierten Ergebnissen können jeweils Karten erzeugt werden, die alle in dieser Arbeit aufgezeigten methodischen Probleme systematisch visualisierbar machen.

5.4.2 Funktionsweise der Software

Mit der vorgestellten Software werden die Daten der Vollerhebungen analysiert. Dazu werden jedoch neben den vorgestellten Daten (Abb. 5.5, 5.6) die Begrenzungen der untersuchten Ackerfläche in Form eines Polygons benötigt. Ausgangsdatenformate sind das ESRI-spezifische ungenerate Format (*.gen) und Shapefiles (*.shp). Diese können direkt aus kommerziellen GIS in die Software übertragen werden.

Prinzipiell wird in dieser Software von der Grundannahme ausgegangen, daß die Stichprobe in einem quadratischen Zählrahmen (Abb. 2.1) beliebiger Größe durchgeführt wird. Diese Stichprobe wird dann direkt einer Referenzfläche, auf die sich dieser Zählrahmen in einem bestimmten Meßraster bezieht, zugeordnet. Im Falle eines Meßrasters nach Abb. 2.1 würde einem Zählrahmen beliebiger Größe eine Referenzfläche von 112,5 m² zugeordnet. D.h. ein Zählrahmen in diesem Meßraster repräsentiert einen Ackerbereich mit Unkräutern der genannten Fläche. Auf der Basis dieser beiden Größen (Zählrahmenfläche - Referenzfläche) werden in dieser Software eine Reihe unterschiedlicher Fehlermaße und Kenngrößen berechnet. Eine Dokumentation der erstellten Software ist in Anhang B zu finden. Hier werden die Arbeitsschritte von der unter Umständen notwendigen Datengenerierung, bis hin zur Bestimmung und Auswertung der Eingangsparameter beschrieben (vgl. Abb. B.4).

5.4.2.1 Fehlermaße und Kenngrößen im Sampling Simulator

Mit dem SAMPLING SIMULATOR werden, wie bereits erwähnt, verschiedene Fehlermaße und Kenngrößen zur Interpretation der Unkrautdatenerfassungen berechnet. Diese Maße werden im folgenden im Hinblick auf ihre Aussage bzgl. der Unkrauterfassungsdaten beschreiben.

5.4.2.1.1 Verwendete Variablen

Folgende Variablen werden für die Berechnung der unterschiedlichen Fehlermaße und Kenngrößen in der Software SAMPLING SIMULATOR verwendet:

n = Anzahl aller Stützstellen S , an denen Unkrautdaten erhoben wurden

\tilde{n} = Anzahl aller Stützpunkte S , an denen in der Referenzfläche Unkräuter vorkamen

x_i = Anzahl der Unkräuter pro Quadratmeter in der i -ten Referenzfläche

\hat{x}_i = Anzahl der Unkräuter pro Quadratmeter im i -ten Zählrahmen

\bar{x} = Mittelwert der Unkräuter pro Quadratmeter über allen Referenzflächen

$\bar{\hat{x}}$ = Mittelwert der Unkräuter pro Quadratmeter über allen Zählrahmen

5.4.2.1.2 Streuungsmaße und deskriptive Angaben zu den Erfassungsdaten

Neben den Angaben zur absoluten Anzahl der auf der Ackerfläche vorkommenden Unkräuter und dem Mittelwert pro Quadratmeter (\bar{x}), werden auch die bereits beschriebenen Angaben zu $\bar{\hat{x}}$, also die durchschnittliche Anzahl gezählter Unkräuter über alle Zählrahmen, in die Outputdatei jeder Simulation geschrieben. Daneben werden weitere Streuungsmaße berechnet:

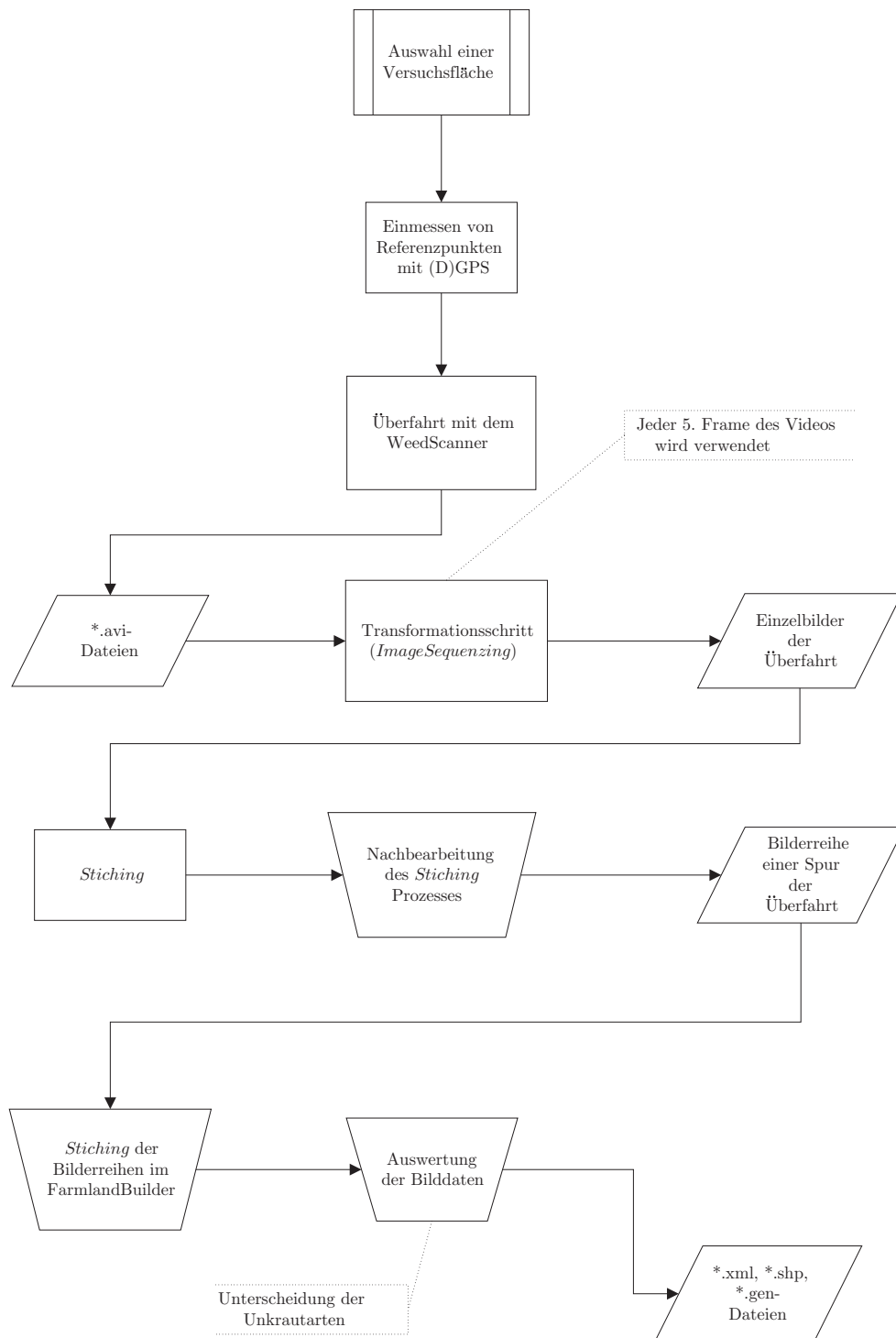


Abb. 5.8: Arbeitsablauf der hochauflösenden Datenerfassung mit dem WEEDSCANNER und der Software FARMLANDBUILDER.

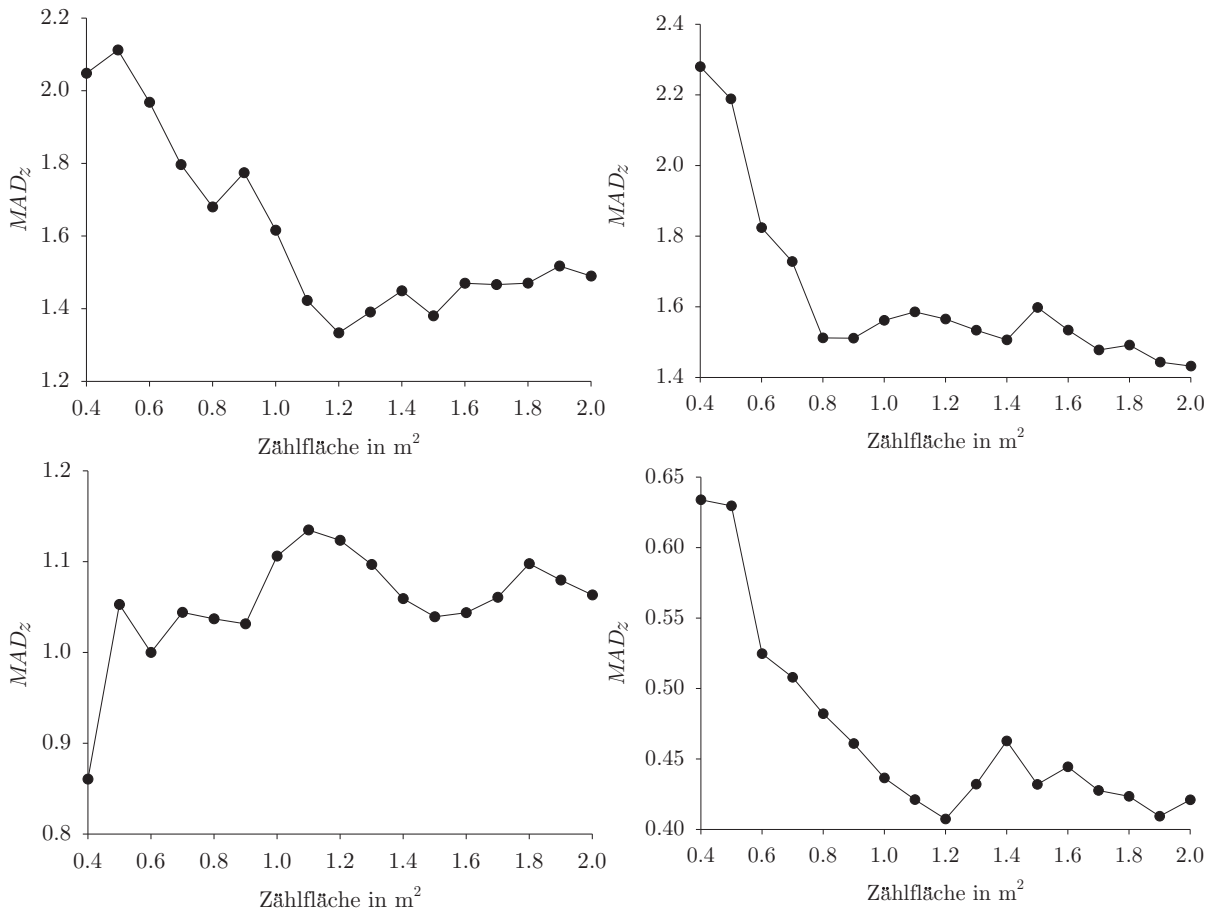


Abb. 5.9: Mittlere absolute Abweichung von 4 Unkrautarten (oben: *Galium aparine* L., Gräser als Gruppe, unten: *Cirsium arvense* L., *Chenopodium album* L.) auf den untersuchten Versuchsflächen in Abhängigkeit von der Zählfläche in m². Das verwendete Meßraster lag bei 7x7 m.

MAD_r

Die mittlere absolute Abweichung der Referenzflächen (*Mean absolute deviation*) gibt die durchschnittliche Abweichung der Unkrautdichte in den Referenzflächen vom Mittelwert \bar{x} der Gesamtfläche an. Dieser Wert spiegelt damit in gewissem Sinne die Variabilität der Verunkrautung auf der Ackerfläche wider. Nach SACHS 2002 ist dieser Wert insbesondere bei kleinen Stichprobenumfängen und der Gefahr vorhandener Ausreißer der Standardabweichung überlegen.

$$MAD_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (5.1)$$

MAD_z

Die mittlere absolute Abweichung der Zählflächen gibt die durchschnittliche Abweichung der Unkrautdichte in den Zählflächen vom Mittelwert \bar{x} der Gesamtfläche an. Aus diesem Grund können bereits mit diesem Maß Erkenntnisse darüber gewonnen werden, inwieweit mit den Zählflächen bzw. -rahmen der Mittelwert der Verunkrautung auf einer Ackerfläche geschätzt

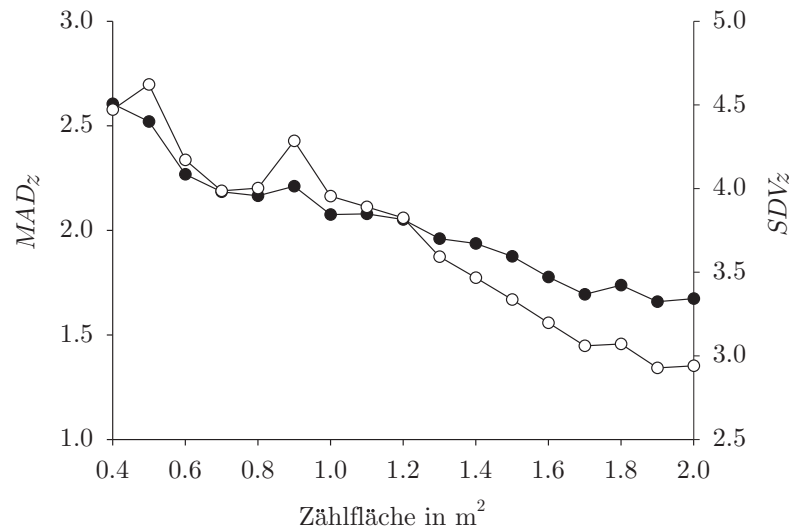


Abb. 5.10: Vergleich zwischen mittlerer absoluter Abweichung und Standardabweichung der Unkrauterfassungen im Meßraster 5x5 m in Abhängigkeit von der Zählfläche in m². In diesem Fall wurden die *Gräser* als Gruppe betrachtet.

werden kann. Auch in diesem Fall gilt, daß dieser Wert bei kleinen Stichprobenumfängen und vorhandenen Ausreißern der Standardabweichung überlegen ist.

$$MAD_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{x}_i - \bar{\hat{x}}| \quad (5.2)$$

SDV_r

Die Standardabweichung (*Standard deviation*) der Anzahl vorkommender Unkräuter pro Quadratmeter in den Referenzflächen von der mittleren Verunkrautung der Gesamtackerfläche ist ein klassisches Streuungsmaß, daß in diesem speziellen Fall einen Eindruck von der Variabilität innerhalb der Referenzflächen gibt. Bei kleinen Stichprobenumfängen und dem wahrscheinlichen Vorhandensein von Ausreißern ist nach SACHS 2002 die bereits vorgestellte mittlere absolute Abweichung (MAD) ein geeigneteres Maß zur Beschreibung der Variabilität der Verunkrautung in den Referenzflächen.

$$SDV_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.3)$$

SDV_z

Die Standardabweichung der Anzahl vorkommender Unkräuter pro Quadratmeter in den einzelnen Zählrahmen von der mittleren Verunkrautung über allen Zählrahmen deutet auf die Variabilität innerhalb der Zählrahmen hin. Ebenfalls besonders hoch ist hierbei der Einfluß einzelner Ausreißer und zu kleiner Stichprobenumfänge in diesem Streuungsmaß.

$$SDV_z = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{\hat{x}})^2} \quad (5.4)$$

5.4.2.1.3 Fehlermaße

Fehlermaße beschreiben im Rahmen dieser Untersuchung den Unterschied zwischen zwei Datensätzen. Im SAMPLING SIMULATOR werden Sie berechnet, um den Unterschied zwischen realer mittlerer Verunkrautung in einer Referenzfläche und der entsprechenden Schätzung mit einem Zählrahmen auf derselben Fläche zu beschreiben.

Bias

Der *Bias* entspricht dem arithmetischen Mittel der Differenzen zwischen der mittleren Verunkrautung in den Zählrahmen und der tatsächlichen Werte in den Referenzflächen. Der *Bias* gibt die durchschnittliche Abweichung der mittleren Verunkrautung in den Zählrahmen von der tatsächlichen mittleren Verunkrautung an. Dieses Fehlermaß beschreibt die grundsätzliche Tendenz der Unkrautdatenerfassung. Mit der Hilfe des *Bias* kann die durchschnittliche Überschätzung beziehungsweise Unterschätzung der mit den Zählrahmen ermittelten Verunkrautung bestimmt werden. Je näher der *Bias* dem Wert Null ist, desto niedriger ist die globale Überbeziehungsweise Unterschätzung der tatsächlichen mittleren Verunkrautung. Dieses Fehlermaß kann damit besonders deutliche Hinweise auf die Eignung einer Erfassungsmethode geben, da z.B. eine stetige Unterschätzung der Verunkrautung im *Präzisen Pflanzenbau* nicht toleriert werden kann.

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i) \quad (5.5)$$

MAE

Der mittlere absolute Fehler (*Mean absolute error*) gibt die durchschnittliche Differenz zwischen der mittleren Verunkrautung in den Zählrahmen und der tatsächlichen mittleren Verunkrautung an. Dabei wird nur die Abweichung zwischen den beiden Parametern berechnet; Ob die Abweichungen positiv oder negativ sind, ist ohne Bedeutung, denn durch die Betrachtung der absoluten Abweichungen kommt es zu einer Aufsummierung der Fehler ohne den Ausgleich von Über- bzw. Unterschätzungen.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{x}_i - x_i| \quad (5.6)$$

RMSE

Die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (*Root mean squared error*) gibt an, inwieweit die mittlere Verunkrautung in den Zählrahmen im Durchschnitt der tatsächlichen Verunkrautung entspricht, ohne daß sich dabei positive und negative Abweichungen gegenseitig ausgleichen können. Größere Abweichungen werden bei diesem Fehlermaß deutlich stärker gewichtet als Kleinere. Dieses Fehlermaß, das auch schon im Zusammenhang mit der in Abs. 4.1.3 beschriebenen Kreuzvalidierung verwendet wurde, ist eines der bekanntesten Fehlermaße.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (5.7)$$

MRE

Der mittlere relative Fehler (*Mean relative error*) zeichnet sich insbesondere dadurch aus, daß die Abweichungen von mittlerer Verunkrautung in den Zählrahmen und tatsächlicher Verunkrautung durch die jeweilige tatsächliche Verunkrautung in der Referenzfläche dividiert und damit bezüglich dieser Variable normiert wird.

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i} \quad (5.8)$$

MARE

Der mittlere absolute relative Fehler (*Mean absolute relative error*) ist das relative Äquivalent zum mittleren absoluten Fehler (*MAE*).

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i} \right| \quad (5.9)$$

RMSRE

Der *RMSRE* ist das relative Äquivalent zum *RMSE*.

$$RMSRE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i} \right)^2} \quad (5.10)$$

Bereinigte Fehlermaße

Die *bereinigten* Fehlermaße ergeben sich folgendermaßen: Es werden zur Berechnung nur diejenigen Stützpunkte s_n herangezogen, an denen eine Unkrautdichte von > 0 in der Referenzfläche gezählt wurde. Ansonsten sind die bereinigten Fehlermaße identisch mit den bereits zuvor genannten Fehlermaßen. Durch dieses Vorgehen sinkt gegebenenfalls die Anzahl der ausgewerteten Stützstellen. Es ergibt sich dabei der Vorteil, daß relative Fehler immer berechnet werden können, da eine Division durch Null ausgeschlossen ist. Ein kleines b hinter dem Namen des Fehlermaß indiziert die Bereinigung. In vielen Fällen einer Unkrautdatenerfassung bestehen Referenzflächen ohne Unkrautbewuchs. In diesen Fällen ist naturgemäß auch die mittlere geschätzte Verunkrautung in einem dazugehörigen Zählrahmen gleich Null. Da bei einem gehäuften Auftreten solcher Ereignisse die Fehleranfälligkeit nur aufgrund der geringen Verunkrautung klein ist und nicht aufgrund einer systematisch-methodisch besseren Datenerfassung (s. auch Abb. 5.17) wurden in den SAMPLING SIMULATOR auch die bereinigten Fehlermaße integriert, die diese Verzerrungen der Fehlermaße ausgleichen sollen:

$$BIAS_b = \frac{1}{\bar{n}} \sum_{x_i > 0} (\hat{x}_i - x_i) \quad (5.11)$$

$$MAE_b = \frac{1}{\bar{n}} \sum_{x_i > 0} |\hat{x}_i - x_i| \quad (5.12)$$

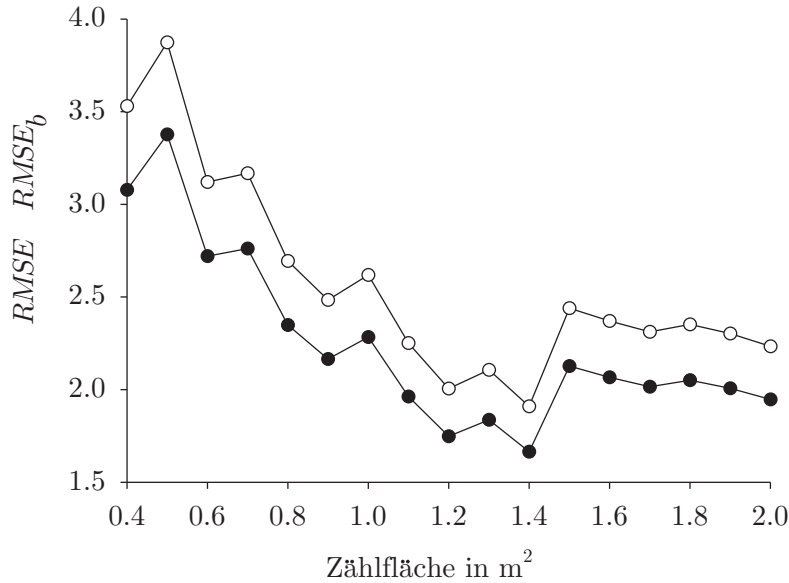


Abb. 5.11: Vergleich zwischen $RMSE$ -Fehler und seiner *bereinigten* Form ($RMSE_b$) in Abhängigkeit von der Zählfläche. In diesem Fall wurden die *Gräser* als Gruppe in einem Mefraster von 7x7 m betrachtet.

$$RMSE_b = \sqrt{\frac{1}{\tilde{n}} \sum_{x_i > 0} (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (5.13)$$

$$MRE_b = \frac{1}{\tilde{n}} \sum_{x_i > 0} \frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i} \quad (5.14)$$

$$MARE_b = \frac{1}{\tilde{n}} \sum_{x_i > 0} \left| \frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i} \right| \quad (5.15)$$

$$RMSRE_b = \sqrt{\frac{1}{\tilde{n}} \sum_{x_i > 0} \left(\frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i} \right)^2} \quad (5.16)$$

5.4.2.1.4 Minima und Maxima

Die zugehörigen Minima und Maxima jedes vorgestellten Fehlermaßes, welches im SAMPLING SIMULATOR berechnet wird, sollen Aufschluß darüber geben, in welcher Spannweite sich die Fehler im Zusammenhang mit der Unkrautdatenerfassung befinden. Dies zeigt dem Anwender des *Präzisen Pflanzenbaus* im Hinblick auf die teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung, ob grobe Einzelfehler bei der Unkrautdatenerfassung auf der Ackerfläche gemacht wurden.

Bias_{max}

Die größte vorkommende Differenz zwischen der Verunkrautung in einem Zählrahmen und der tatsächlichen Verunkrautung in der Referenzfläche.

$$Bias_{max} = \max \{ \hat{x}_i - x_i | i = 1 \dots n \} \quad (5.17)$$

Bias_{min}

Die kleinste vorkommende Differenz zwischen der Verunkrautung in einem Zählrahmen und der tatsächlichen Verunkrautung in der Referenzfläche.

$$Bias_{min} = \min \{\hat{x}_i - x_i | i = 1 \dots n\} \quad (5.18)$$

Bias_{minb}

Die kleinste vorkommende Differenz zwischen der Verunkrautung in einem Zählrahmen und der tatsächlichen Verunkrautung in der Referenzfläche, wenn Unkräuter vorkommen.

$$Bias_{minb} = \min \{\hat{x}_i - x_i | x_i > 0\} \quad (5.19)$$

MAE_{max}

Die größte vorkommende absolute Differenz zwischen der Verunkrautung in einem Zählrahmen und der tatsächlichen Verunkrautung in der Referenzfläche.

$$MAE_{max} = \max \{|\hat{x}_i - x_i| | i = 1 \dots n\} \quad (5.20)$$

MAE_{min}

Die kleinste vorkommende absolute Differenz zwischen der Verunkrautung in einem Zählrahmen und der tatsächlichen Verunkrautung in der Referenzfläche.

$$MAE_{min} = \min \{|\hat{x}_i - x_i| | i = 1 \dots n\} \quad (5.21)$$

MAE_{minb}

Die kleinste vorkommende absolute Differenz zwischen der Verunkrautung in einem Zählrahmen und der tatsächlichen Verunkrautung in der Referenzfläche, wenn Unkräuter vorkommen.

$$MAE_{minb} = \min \{|\hat{x}_i - x_i| | x_i > 0\} \quad (5.22)$$

MSE_{max}

Die größte vorkommende quadratische Differenz zwischen der Verunkrautung in einem Zählrahmen und der tatsächlichen Verunkrautung in der Referenzfläche.

$$MSE_{max} = \max \{(\hat{x}_i - x_i)^2 | i = 1 \dots n\} \quad (5.23)$$

MSE_{min}

Die kleinste vorkommende quadratische Differenz zwischen der Verunkrautung in einem Zählrahmen und der tatsächlichen Verunkrautung in der Referenzfläche.

$$MSE_{min} = \min \{(\hat{x}_i - x_i)^2 | i = 1 \dots n\} \quad (5.24)$$

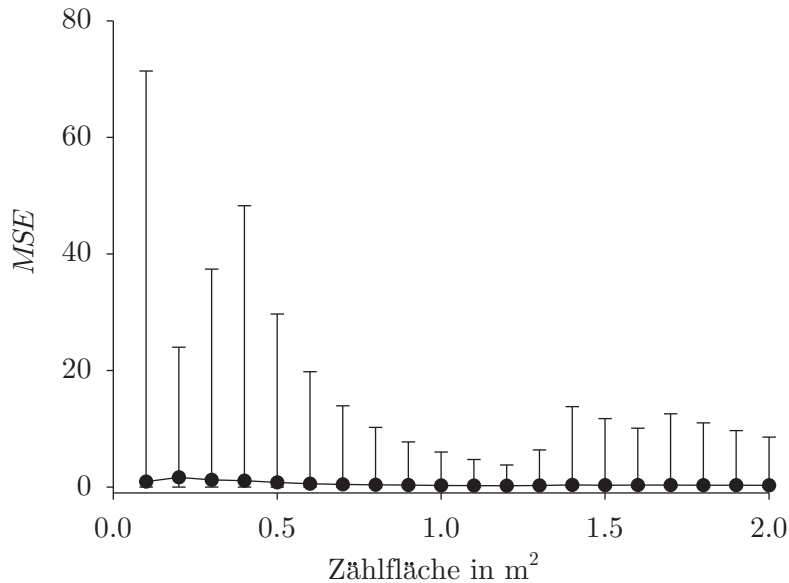


Abb. 5.12: Minimale und maximale Ausprägung eines Meßfehlers (hier: MSE), in Abhängigkeit von der Zählfläche am Beispiel von *Chenopodium album* L. in einem Meßraster von 7x7 m.

MSE_{min}

Die kleinste vorkommende quadratische Differenz zwischen der Verunkrautung in einem Zählrahmen und der tatsächlichen Verunkrautung in der Referenzfläche, wenn Unkräuter vorkommen.

$$MSE_{min} = \min \{(\hat{x}_i - x_i)^2 | x_i > 0\} \quad (5.25)$$

5.4.2.1.5 Bias-, Standardabweichungs- und Varianz-Anteil des mittleren Fehlers

Diese Fehlermaße zerlegen den $RMSE$ (bzw. $MSE = RMSE^2$) in systematische und unsystematische Fehleranteile. Weicht beispielsweise der $Bias$ -Anteil von Null ab, so ist dies als eine systematische Unter- bzw. Überschätzung der tatsächlichen Verunkrautung durch die Datenerfassung in den Zählrahmen zu interpretieren.

Ist der Varianz-Anteil abweichend von Null, können die Schwankungen in den Referenzflächen um deren arithmetisches Mittel \bar{x} mit den Zählrahmen erfasst werden, wobei jedoch das Ausmaß der Erfassung zu stark bzw. zu schwach ist. WEBER 1998 nennt diesen Anteil auch *systematische Abweichungs-Fehlprognose*:

$$Bias_a = \frac{(\bar{x} - \hat{\bar{x}})^2}{MSE} ; \text{ für } MSE \neq 0 \quad (5.26)$$

$$SDV_a = \frac{(SDV_r - SDV_s)^2}{MSE} ; \text{ für } MSE \neq 0 \quad (5.27)$$

$$VAR_a = \frac{((SDV_r)^2 - (SDV_s)^2)^2}{MSE} ; \text{ für } MSE \neq 0 \quad (5.28)$$

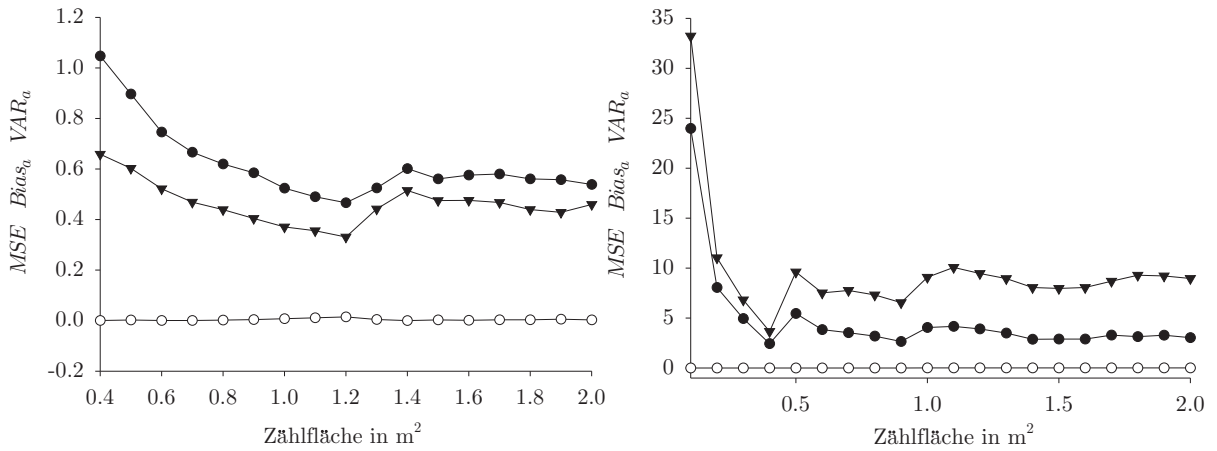


Abb. 5.13: Bias- bzw. Varianzanteil am mittleren quadratischen Meßfehler. Links: *Chenopodium album* L., rechts: *Cirsium arvense* L., erhoben in einem Meßraster von 7x7 m. (Weiße Kreise: $Bias_a$, schwarze Kreise: MSE , schwarze Dreiecke: VAR_a).

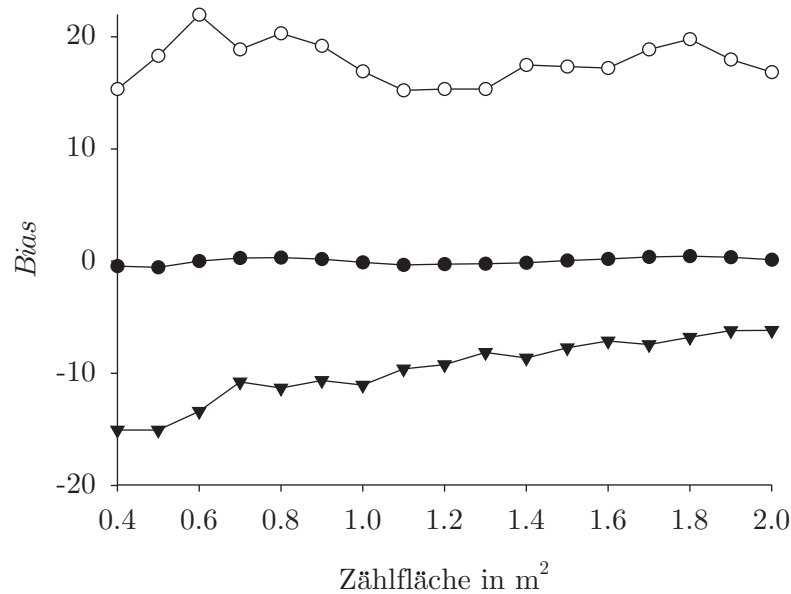


Abb. 5.14: Aufteilung des $Bias$ in positive und negative Abweichungen, hier am Beispiel von *Chenopodium album* L. in einem Meßraster von 7x7 m. (Weiße Kreise: $Bias_{pos}$, schwarze Kreise: $Bias$, schwarze Dreiecke: $Bias_{neg}$).

5.4.2.1.6 Kumulative Fehlermaße

Bei diesen Fehlermaßen werden jeweils nur die positiven bzw. die negativen Differenzen zwischen Prognose- und tatsächlichem Wert addiert. Auf diese Weise können Informationen über die Größe des gesamten Über- bzw. Unterschätzungspotentials gewonnen werden.

Bias_{pos}

Hier werden die positiven Differenzen aufsummiert und durch die Gesamtanzahl dividiert.

$$Bias_{pos} = \frac{1}{n} \sum_{\hat{x}_i - x_i > 0} \hat{x}_i - x_i \quad (5.29)$$

Bias_{neg}

Hier werden die negativen Differenzen aufsummiert und durch die Gesamtanzahl dividiert.

$$Bias_{neg} = \frac{1}{n} \sum_{\hat{x}_i - x_i < 0} \hat{x}_i - x_i \quad (5.30)$$

Bias_{posb}

Hier werden die positiven Differenzen aufsummiert und durch die Anzahl positiver Differenzen dividiert.

$$Bias_{posb} = \frac{1}{\dot{n}} \sum_{\hat{x}_i - x_i > 0} \hat{x}_i - x_i \quad (5.31)$$

$$\dot{n} = \#\{i \mid \hat{x}_i - x_i > 0\} \quad (5.32)$$

Bias_{negb}

Hier werden die negativen Differenzen aufsummiert und durch die Anzahl negativer Differenzen dividiert.

$$Bias_{negb} = \frac{1}{\ddot{n}} \sum_{\hat{x}_i - x_i < 0} \hat{x}_i - x_i \quad (5.33)$$

$$\ddot{n} = \#\{i \mid \hat{x}_i - x_i < 0\} \quad (5.34)$$

5.4.2.1.7 weitere Kenngrößen

Neben den klassischen statistischen Fehler- und Streuungsmaßen werden mit dem SAMPLING SIMULATOR auch einige für den *Präzisen Pflanzenbau* im speziellen interessante Größen berechnet. Neben einem Zeitfaktor für die Datenerfassung werden bestimmte Indizes berechnet, die in der Unkrautforschung eine Rolle spielen und zur Beschreibung der Aggregation von Unkräutern verwendet werden. Zusätzlich wird die Korrelation zwischen gezählten Unkräutern in einer vorgegebenen Zählfläche und der zugehörigen Referenzfläche berechnet.

benötigte Zeit

Die benötigte Zeit (*BZ*) ist eine Schätzung der Zeit, die für die Datenerfassung benötigt wird. Es wird hierbei nur die Zeit zum Auszählen aller Schätzrahmen summiert; die Wegstrecke zwischen den einzelnen Schätzrahmen wird nicht betrachtet. Diese Größe gibt einen wichtigen Einblick in die Ökonomie der Unkrautdatenerfassung und in die generelle Realisierbarkeit eines Meßrasters mit bestimmter Zählrahmenfläche.

$$BZ = n * f * t \quad (5.35)$$

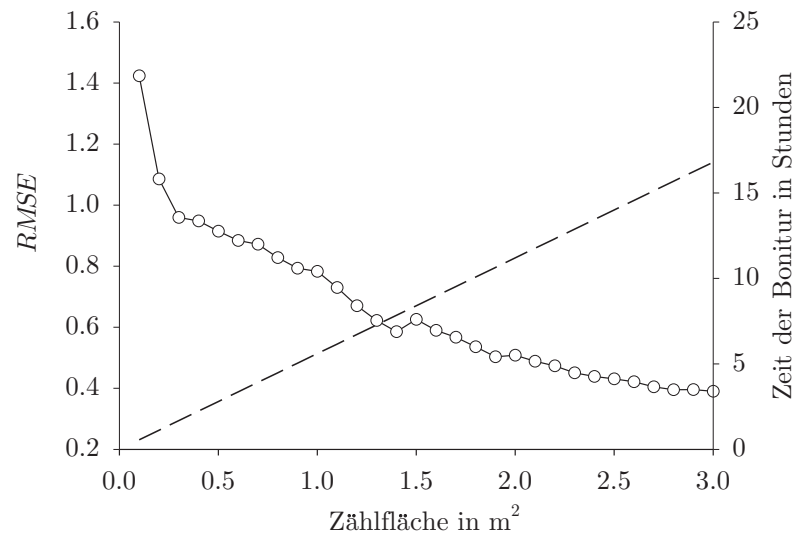


Abb. 5.15: *RMSE*-Fehler und benötigte Zeit für die Datenerfassung auf einer Fläche von ca. 4 ha in einem Meßraster von 7x7 m.

t ist die dabei benötigte Zeit in Sekunden [s] pro Flächeneinheit des Zählrahmens, f entspricht der Zählrahmengröße in Quadratmetern.

Patchiness Index

Der Patchiness Index nach Lloyd (LLOYD 1967) gilt in der Unkrautforschung als ein Maß zur statistischen Beschreibung des nesterhaften Auftretens einer mit Zählrahmen erfaßten Unkrautpopulation (DESSAINT *et al.* 1991, KROHMANN 2004). Ein hoher Wert für den Index weist auf stark geklumpstes Vorkommen einer Population hin. Ein Wert von $PI > 1$ deutet dabei nach HAMOUZ *et al.* 2004 bereits darauf hin, daß eine nesterförmige Verteilung der Unkräuter vorliegt.

PI

Der PI wird auf der Grundlage der Zählungen in den Zählrahmen berechnet:

$$PI = \frac{\bar{\hat{x}} + \frac{(SDV_s)^2}{\hat{x}} - 1.0}{\hat{x}} \quad (5.36)$$

PI_r

Der PI_r wird auf der Grundlage der Zählungen in den Referenzflächen berechnet:

$$PI_r = \frac{\bar{\bar{x}} + \frac{(SDV_r)^2}{\bar{x}} - 1.0}{\bar{x}} \quad (5.37)$$

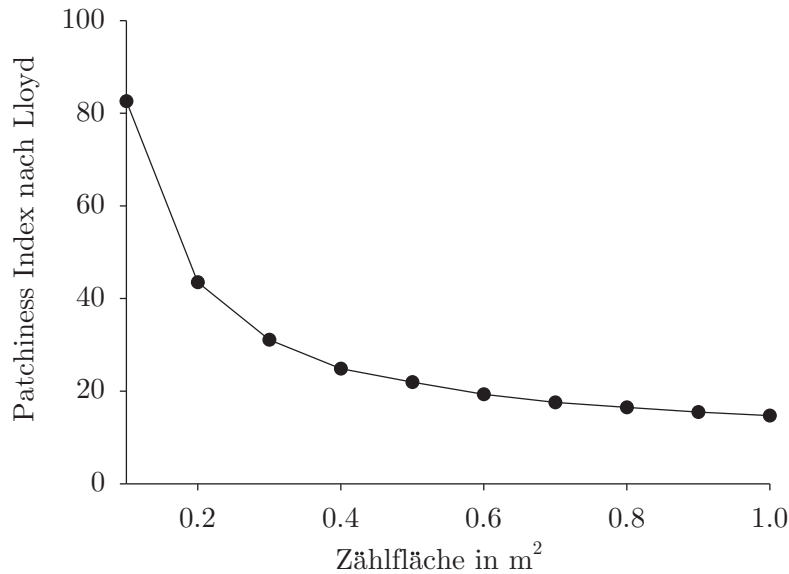


Abb. 5.16: *Lloyds Patchiness Index* in Abhängigkeit von der verwendeten Zählfläche in m². Hierbei wurde eine simulierte Population mit einer flächenhaften Ausbreitung und großen Nestern (> 15 m²) zugrunde gelegt.

Korrelationskoeffizient

Der Korrelationskoeffizient r gibt in diesem speziellen Fall die Stärke der linearen Abhängigkeit von mittlerer Verunkrautung in einem Zählrahmen und der dazugehörigen Referenzfläche an.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \hat{x}_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \hat{x}_i \right)}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n \hat{x}_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \hat{x}_i \right)^2 \right]}} \quad (5.38)$$

Von unterschiedlichen Autoren (WEBER 1998, ANDRES UND SPIWOKS 2000) wird im Zusammenhang mit der Bestimmung der Güte einer *Prognose* vorgeschlagen, eine Mischung aus vielen der hier vorgestellten Maße und Größen heranzuziehen. Im SAMPLING SIMULATOR stehen nach einer simulierten Unkrautdatenerfassung alle hier vorgestellten Maße zur Verfügung. Im Zusammenspiel mit der Ausgabe von simulierten Datenerfassungen an beliebig großen Stützpunkten steht neben der statischen Beschreibung auch eine visuelle Form der Analyse zur Verfügung, die mit der Hilfe von GIS ein wichtiges Werkzeug bei der Planung von Meßnetzen und Zählrahmengrößen für den praktischen Einsatz sowie der Ermittlung des Arbeitszeitbedarfs darstellt. Die Fehlermaße geben an, welchen Fehler eine bestimmte Vorgehensweise der Datenerfassung hervorruft. Dies ist besonders vor dem Hintergrund der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle von Bedeutung, da hier die präzise Reaktion auf die heterogene Verunkrautungssituation im Vordergrund steht. Bereits kleine Fehlapplikationen könnten zur Folge haben, daß im Verlauf mehrerer Jahre eine Zunahme der Verunkrautung an unbehandelten Stellen der Ackerfläche entsteht. Zu große Fehler bei zu klein bemessenen Zählflächen oder zu groben Meßrastern können zu diesem Problem führen. Durch die Analyse vorhandener Daten zur Verunkrautung oder

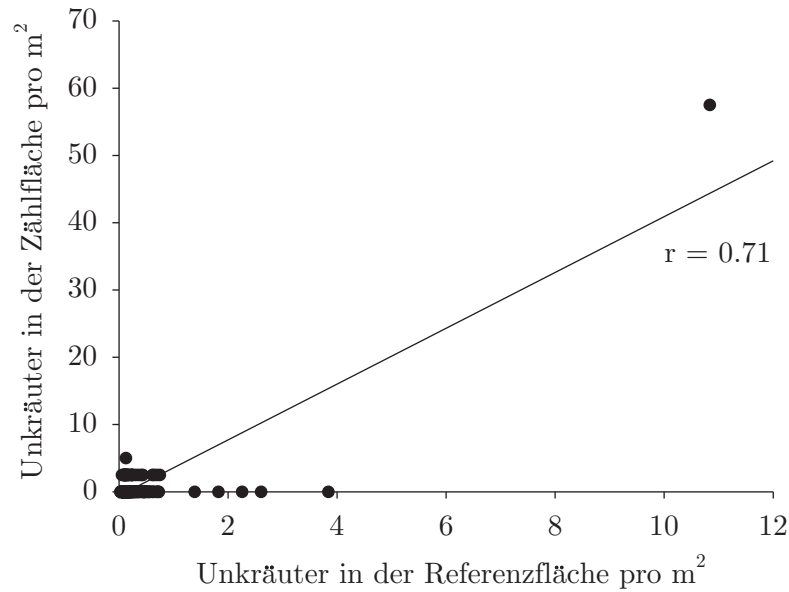


Abb. 5.17: Korrelation zwischen Unkräutern in der Zählfläche und Unkräutern in der Referenzfläche. Simulierte Verunkrautungssituation mit kleinen Nestern und weiten Bereichen ohne Verunkrautung, erhoben in einem Meßraster von 7x7 m und einer Zählfläche von 0,4 m².

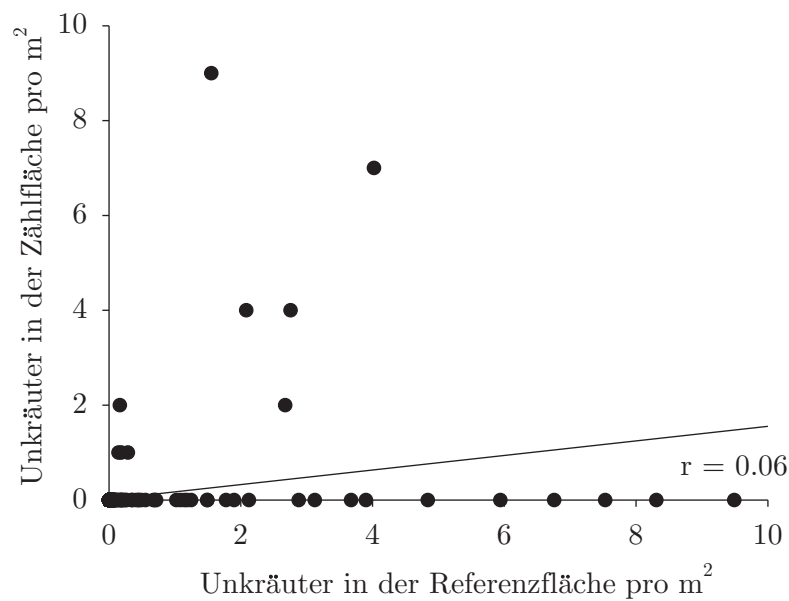


Abb. 5.18: Korrelation zwischen Unkräutern in der Zählfläche und Unkräutern in der Referenzfläche. Simulierte Verunkrautungssituation mit vereinzelt kleinen Nestern und einer starken mittleren Verunkrautung, erhoben in einem Meßraster von 7x7 m und einer Zählfläche von 1 m².

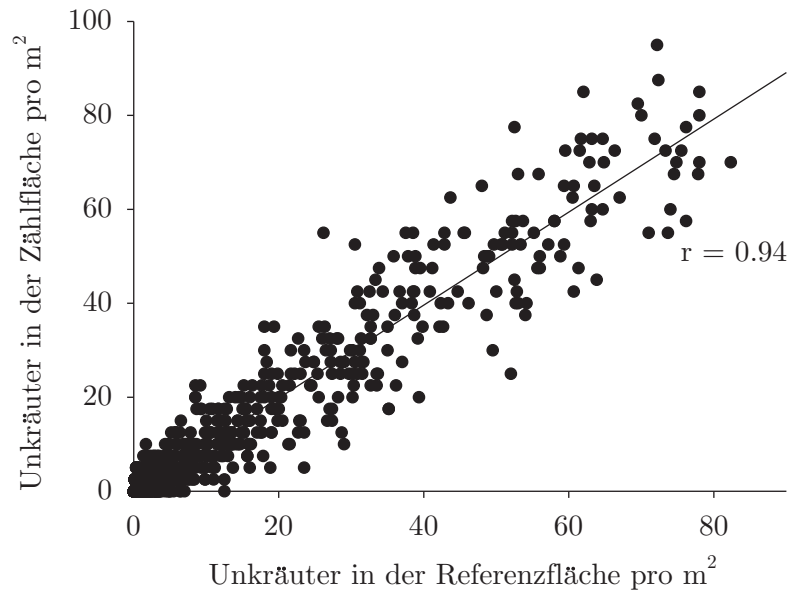


Abb. 5.19: Korrelation zwischen Unkräutern in der Zählfläche und Unkräutern in der Referenzfläche. Simulierte Verunkrautungssituation mit vereinzelt kleinen Nestern und einer starken mittleren Verunkrautung, erhoben in einem Meßraster von 7x7 m und einer Zählfläche von 1 m².

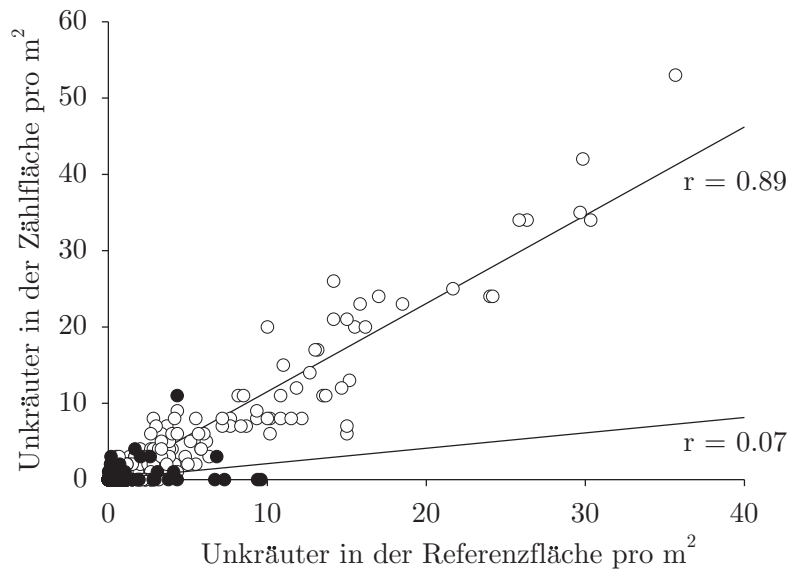


Abb. 5.20: Korrelation zwischen Unkräutern in der Zählfläche und Unkräutern in der Referenzfläche aus Versuch V2 (*Chenopodium album* L.). Weiße Kreise: Meßraster 2x3 m, Zählrahmen 1 m², schwarze Kreise: Meßraster 7x7 m, Zählrahmen 1 m².

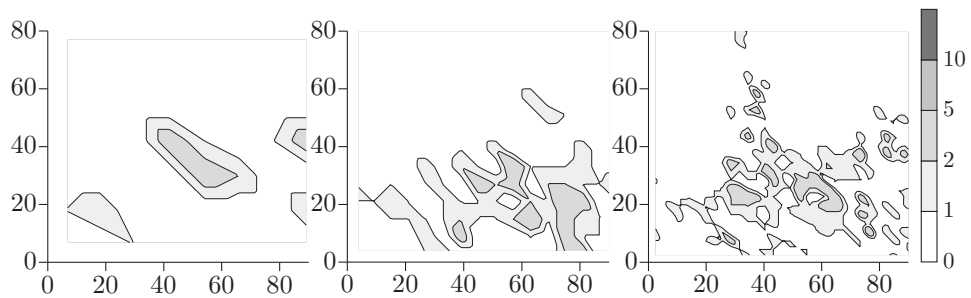


Abb. 5.21: Einfluß des Meßrasters auf das Kartenresultat. Hier am Beispiel der Unkrautart *Chenopodium album* L. in den Meßrastern 12x12, 6x6 und 3x3 m (v.l.n.r.). Der Zählrahmen hatte dabei stets eine Größe von 1 m².

simulierter Daten aus Expertenwissen, lassen sich solche Probleme bereits im Vorfeld einer Datenerfassungsplanung minimieren.

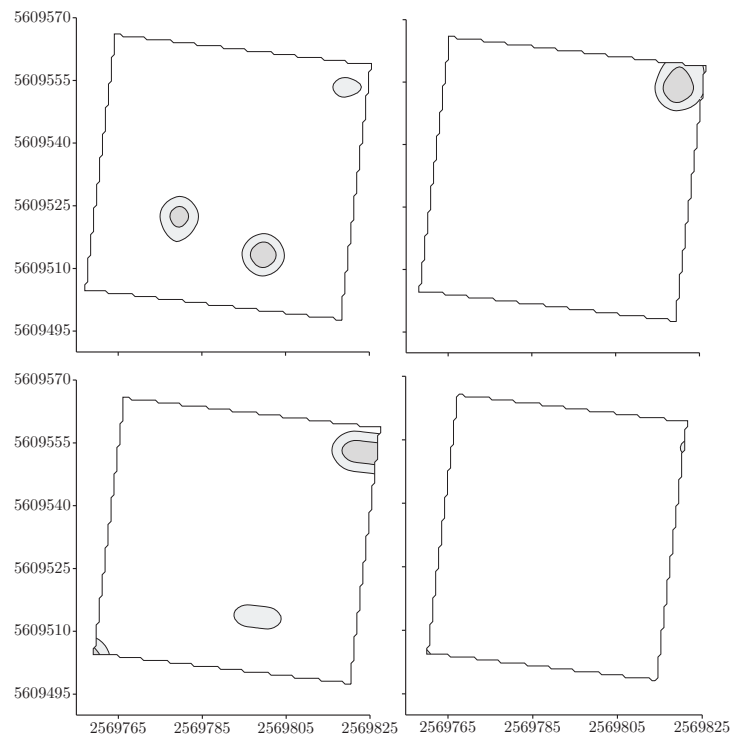


Abb. 5.22: Simulation einer versetzt begonnenen Datenerfassung im Meßraster 7x7 m. Die Stützpunkte der Datenerfassung sind von oben links nach unten rechts um je 1,5 m versetzt.

Neben den Fehlermaßen sind natürlich auch die entstehenden Rohdaten¹⁷ einer simulierten Datenerfassung von großer Bedeutung, denn auf ihrer Grundlage können wie z.B. in Abb. 5.21 dargestellt Erfassungsszenarien bzw. letztendlich Applikationsentscheidungen in GIS visualisiert werden. Auch dies dient einer vereinfachten Planung der Datenherfassung in der Praxis. Gleichzeitig kann der bereits in Kapitel 2 vorgestellte Einfluß der Startposition einer Datenerfassung

¹⁷Rohdaten sind die Koordinaten aller Stützpunkte mit der jeweiligen Anzahl Unkräuter an diesen Stellen pro Quadratmeter.

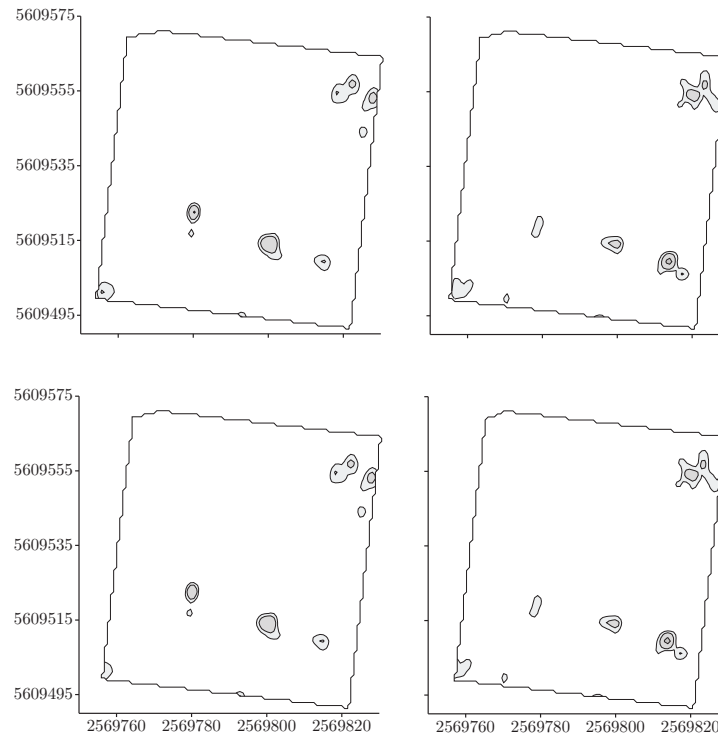


Abb. 5.23: Simulation einer versetzt begonnenen Datenerfassung im Meßraster 2x3 m. Die Stützpunkte der Datenerfassung sind von oben links nach unten rechts um je 1,5 m versetzt.

zeigen, inwieweit die geplante Erfassungsmethode in der Lage ist, *verschiebungsinvariante* Resultate zu erbringen. Dies ist exemplarisch in den Abb. 5.22 und 5.23 zu sehen. Anhand der Analyse des *Patchiness Index* (LLOYD 1967) mit dem SAMPLING SIMULATOR konnte demonstriert werden, inwieweit die Aussagekraft dieses Aggregationsindex durch verschiedene Parameter der Erfassung derart beeinflusst werden kann, daß unterschiedliche Interpretationen bezüglich der Aggregation der Unkrautpflanzen möglich sind. Daher erscheint es fraglich, ob ein solcher Index überhaupt in der Lage ist, die Aggregation von Unkräutern zu beschreiben. DIGGLE 2003 schlägt eine Reihe weitere Indikatoren vor, um die Verteilung von räumlichen Punkten adäquat beschreiben zu können. Diese und andere Indikatoren werden in die Weiterentwicklung der Software einfließen. Die Korrelation zwischen der Verunkrautung in der Referenzfläche und der Verunkrautung in der Zählfläche liefert einen guten Eindruck von der Präzision der Datenerfassung. In den Abb. 5.17 bis 5.20 ist deutlich erkennbar, daß das Meßraster und auch die Größe der Zählfläche einen signifikanten Einfluß auf die mögliche Genauigkeit der Datenerfassung hat. Hierbei bleibt es wichtig zu berücksichtigen, daß natürlich auch die Art der Verteilung eines Unkrauts eine Rolle spielt. Wie z.B. in Abb. 5.17 zu erkennen, kann durch eine große Anzahl unkrautfreier Bereiche auf einer Ackerfläche eine hohe Korrelation erreicht werden, die bei starker mittlerer Verunkrautung ohne unkrautfreie Bereiche (s. Abb. 5.18) nicht erreicht worden wäre. Auch die Größe der Unkrautnester auf einer Ackerfläche spielt eine entscheidende Rolle bei der Berechnung der Fehlermaße und Korrelationen. Liegen große Unkrautnester (z.B. $> 15 \text{ m}^2$) vor, so werden deutlich geringere Fehler bezogen auf die Gesamtfläche gemacht und deutlich höhere Korrelationen erreicht.

6 Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurden die methodischen Probleme, die bei der Erstellung von Unkrautverteilungskarten mit GIS an unterschiedlichen Stellen auftreten, untersucht und beschrieben. Zunächst stand hierbei die Frage nach der Repräsentativität der Stichproben für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle bzw. die *Verschiebungsinvarianz* der Datenerfassung (s. Abs. 2.2) im Vordergrund. Hierbei konnte auf der Grundlage unterschiedlich präziser Datenerfassungen auf derselben Ackerfläche verdeutlicht werden, daß die zur Zeit üblichen Stichprobenverfahren und Meßrasterabstände, die für die Erstellung von Unkrautverteilungskarten verwendet werden, bei vielen Unkrautarten zu unbefriedigenden Ergebnissen führen. Zufällige Effekte haben bei dieser Art der Datenerfassung einen größeren Einfluß auf das Kartenresultat, als das beobachtete Phänomen Unkraut.

Mit Hilfe GIS-basierter Simulationen konnte demonstriert werden, daß bei einer zu groben Auflösung des Meßrasters der Position des Zählrahmens eine Schlüsselrolle bei der Unkrautkartenerstellung zukommt (vgl. auch COUSENS *et al.* 2002). Unterschiedliche Unkrautverteilungskarten können je nach Initialposition des Zählrahmens auf der Ackerfläche entstehen. Die Informationsdichte zu grob bemessener Meßraster genügt der Anforderung der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle nach einer *Verschiebungsinvarianz* der Datenerfassung nicht. Vor diesem Hintergrund ist eine adäquate, teilflächenspezifische Herbizidapplikation nicht möglich. Auch die Ergebnisse der Simulationen mit der Software SAMPLING SIMULATOR weisen auf diesen Sachverhalt hin. Zu grobe Meßraster, aber auch zu klein bemessene Zählrahmen, sind Fehlerquellen, die Fehlentscheidungen bei der Herbizidapplikation hervorrufen können.

Systematische Unterschätzungen der Verunkrautungssituation mit einer Erfassungsmethodik, wie in Abb. B.5 dargestellt, führen dazu, daß sich Unkräuter im Verlauf der Jahre etablieren bzw. ausbreiten können, wenn die Strategie der teilflächenspezifischen Herbizidapplikation in dieser Art durchgeführt wird. Die geforderte Invarianz gegenüber der Initialposition des Meßrasters für die Datenerfassung tritt - bei einem sehr heterogen Verteilten Phänomen wie dem Unkraut - erst bei hochauflösender Datenerfassung ein. Diese ist mit manuellen Verfahren der Datenerfassung aus ökonomischen aber auch ökologischen Gründen nicht mehr zu bewerkstelligen. Am Beispiel der Entwicklung des *RMSE*-Fehlers in Abhängigkeit von der benötigten Arbeitszeit für die Datenerfassung ist dies exemplarisch in Abb. 5.15 dargestellt.

Bildanalytische Verfahren der Datenerfassung operieren in ebensolchen, hohen räumlichen Auflösungen und können aus diesem Grund bei der Erstellung von Unkrautverteilungskarten einen repräsentativen Eindruck der Verunkrautungssituation vermitteln. Das in Abs. 2.1.2 vorgestellte Verfahren der bildanalytischen Unkrautdetektion (vgl. SÖKEFELD 1997, GERHARDS *et al.* 2002a, GERHARDS UND CHRISTENSEN 2003, OEBEL *et al.* 2004) leistet mit ca. 2x3 m räumlicher Auflösung eine gegenüber einer Verschiebung der Erfassungspunkte weitestgehend invariante Datenerfassung (vgl. Abb. 5.23).

Mit Hilfe der Untersuchungen im SAMPLING SIMULATOR konnte allerdings auch gezeigt werden, daß die manuellen Verfahren der Datenerfassung mit großem Erfolg bei der Bestimmung der mittleren Verunkrautung einer Ackerfläche helfen können. Bereits bei Zählrahmengrößen unter 1 m² Fläche, konnte in vielen Fällen die mittlere Verunkrautung sehr gut geschätzt werden (s. Abb. B.6). Dies ist ein deutlicher Indikator dafür, daß der Zählrahmen, so wie er bereits vor mehr als 100 Jahren in der Pflanzensoziologie verwendet wurde und auch im *Integrierten Pflanzenschutz* Anwendung findet, ein ausgezeichnetes Maß darstellt. Die Menge der Stichproben für die Bestimmung der mittleren Verunkrautung ist auf einer mit einem Meßraster belegten Ackerfläche relativ hoch. BARTELS *et al.* 1983 verwenden auf einer 5 ha großen Ackerfläche 30, zufällig verteilte Zählrahmen zur Bestimmung der mittleren Verunkrautung. Bei der Erfassung von Unkrautdaten mit regelmäßigen Meßrastern für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle ist eine weitaus größere Anzahl Stichproben - bezogen auf die Gesamtfläche - vorhanden, so daß die mittlere Verunkrautung adäquat geschätzt werden kann (vgl. Abb. B.6).

Die Ermittlung der mittleren Verunkrautung ist jedoch nicht das Ziel der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle. Diese soll auf die teilflächenspezifischen Unterschiede der Verunkrautungssituation reagieren. Bezogen auf die Teil- oder Referenzfläche steht allerdings jeweils nur eine einzige Stichprobe zur Verfügung. Daß diese naturgemäß einem extrem hohen Fehler unterliegt, der zur völligen Fehleinschätzung der Verunkrautungssituation führen kann, ist einleuchtend. Der Grund für die kleine Anzahl von Stichproben ist hauptsächlich in der begrenzten Zeit, die für die Erfassung von Unkrautdaten zur Verfügung steht, zu suchen. Trotzdem muß bei der wissenschaftlichen Planung eines adäquaten Meßrasters das Wissen zur Verteilung und räumlichen Struktur des zu untersuchenden Phänomens im Vordergrund stehen und weniger die tatsächliche Realisierbarkeit des Erfassungsverfahrens.

Die neue Methodik der Datenerfassung mit den Komponenten WEEDSCANNER, FARMLAND-BUILDER und SAMPLING SIMULATOR bietet eine komfortable Möglichkeit, einen Einblick in die tatsächliche Verteilung von Unkräutern - in Form der Grundgesamtheit - auf einer Ackerfläche zu bekommen und die Präzision der Erfassungsverfahren zu analysieren. Wenn die Integration weiterer Automatisierungsschritte bei der Bildanalyse und Auswertung (Verknüpfung der Bilderreihen, automatische Detektion der Unkrautarten mit Hilfe etablierter Algorithmen, automatisierte Analyse der Ergebnisse des SAMPLING SIMULATOR) in Zukunft gelingt, kann dieses Verfahren auch zur *online*-Bekämpfung von Unkräutern genutzt werden.

Mit Hilfe der gewonnenen, hochauflösenden Daten des vorgestellten Systems, können in Zukunft diverse weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Zum Beispiel können Daten aus der Fernerkundung besser analysiert und im Hinblick auf das tatsächliche Auftreten von Unkräutern hin ausgewertet werden. Die aus dem Verfahren gewonnenen Daten sind dann im Sinne von *Ground Truth* Daten nutzbar. Erste Untersuchungen hierzu deuten auf einen klaren Zusammenhang zwischen bestimmten Bereichen eines Satellitenbildes und den hochauflösenden Daten aus dem neuen Verfahren hin (s. Abb. 6.1). Außerdem wird es möglich, populationsdynamische Modelle besser erstellen und validieren zu können, da die hochauflösenden Informationen auch dazu genutzt werden können, Modellparameter zu bestimmen, die bisweilen über Grundannahmen z.B. zur räumlichen Verteilung von Unkräutern geschätzt werden mussten.

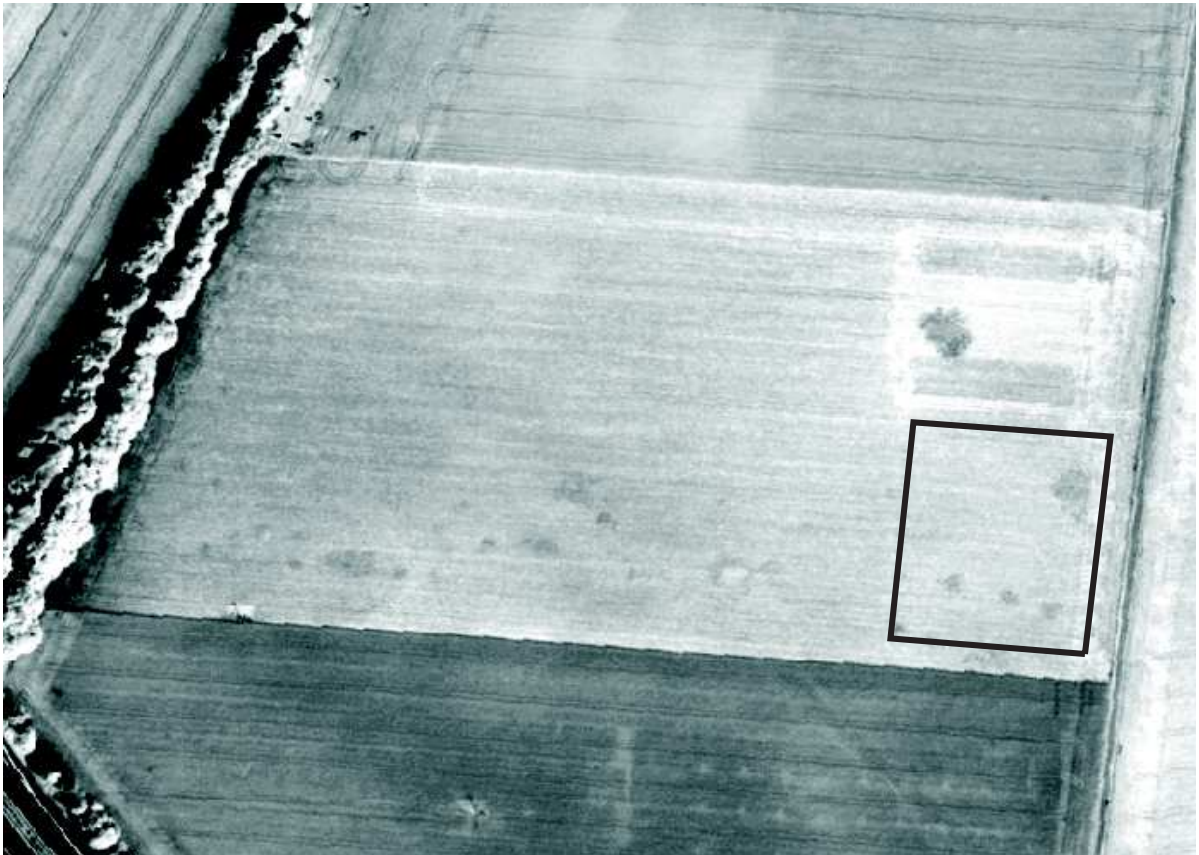


Abb. 6.1: Satellitenaufnahme der Versuchsfläche V2 zum Zeitpunkt der Untersuchungen am Versuchsgut Klein-Altendorf der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn. Die schwarz markierte Box entspricht der Fläche des Versuchs V2 aus Abb. 5.6. Neben den Zuckerrüben (BBCH 10 im März 2003) auf diesem Satellitenbild von *QuickBird 2* (panchromatische Aufnahme) sind Nester von *Cirsium arvense* L. zu erkennen. *Quelle:* DFG - Graduiertenkolleg 722 der Universität Bonn, Projekt J. Jacobi.

Generell sind die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Komponenten natürlich auch auf andere Forschungsbereiche übertragbar. Voraussetzung hierfür ist die mögliche Differenzierbarkeit eines Objekts in den Videosequenzen. Dabei spielt es keine Rolle, ob ein Unkraut, eine Kulturpflanze, eine Pflanzenkrankheit oder ein Schädling zu erkennen ist. Der WEEDSCANNER bietet auch die Option, andere Sensoren als handelsübliche digitale Camcorder zu montieren. Insbesondere der Einsatz multispektraler Kameras wäre von großem Nutzen bei der systematischen Eliminierung von Einflußparametern, die einer automatischen Erkennung der Unkräuter in den Bildsequenzen entgegenstehen. So könnten z.B. Probleme mit der Abschattung während einer Überfahrt minimiert werden.

Die Untersuchung der in der Unkrautforschung bereits angewendeten Interpolationsverfahren hat gezeigt, daß keine universelle Antwort auf die Frage nach dem besten Interpolationsverfahren für die Erstellung von Unkrautverteilungskarten gegeben werden kann. Dies liegt unter anderem auch daran, daß das Verfahren des *Kriging*, welches in vielen naturwissenschaftlichen Fragestellungen als überlegen beschrieben wird, aufgrund der mangelhaften Modellierbarkeit des Semivariogramms in dieser speziellen Anwendung nur begrenzt einsetzbar ist. Die Datenerfas-

sung ergibt aufgrund der gerade geschilderten Problematik keine plausiblen Semivariogramme. Diese weisen insbesondere im *Nugget*-Bereich deutliche Schwächen auf. Mit Hilfe des SAMPLING SIMULATOR konnten Rohdaten aus den hochauflösenden Daten (Abs. 5.2) sowie aus simulierten Populationen (Abb. B.3) gewonnen werden, die diesen Sachverhalt verdeutlichen können. In Abb. B.7 sind die Semivariogramme hochauflösender Datenerfassungen dargestellt. Hier ist eine klare Differenzierbarkeit des Semivariogramms ebenso wie eine gute Modellierbarkeit des *Nugget*-Bereichs gegeben. Bereits eine minimale Verringerung der Auflösung verdeutlicht in dieser Abbildung, welchen Einfluß auf die Modellierbarkeit des Semivariogramms entsteht. Dies kann mit der enormen kleinräumigen Variabilität der Verunkrautung erklärt werden. Die mehr oder weniger intuitive Handhabbarkeit aller anderen in dieser Arbeit vorgestellten Interpolationsverfahren, ist als deren größter Vorzug zu nennen. Die Modellierung eines räumlichen Zusammenhangs fällt bei den deterministischen Interpolationsverfahren weitestgehend weg, da dieser bereits *a priori* in den Verfahren festgelegt ist. Die Unterschiede in den mit deterministischen Interpolationsverfahren erstellten Unkrautverteilungskarten sind relativ gering und weisen daher darauf hin, daß ein möglichst einfach zu handhabendes Verfahren gewählt werden sollte, wenn geostatistische Interpolationsverfahren aufgrund mangelhafter Modellierbarkeit des räumlichen Zusammenhangs zwischen den Erfassungspunkten ausscheiden. Hingewiesen sei jedoch darauf, daß die Verteilung der Erfassungspunkte auf der Untersuchungsfläche einen entscheidenden Einfluß auf die Unkrautverteilungskarte aus diesen Interpolationsverfahren haben kann. In dieser Arbeit wurden nur regelmäßige Meßraster verwendet, die dieses Problem nicht aufwerfen. Sind jedoch unregelmäßige Erfassungspunkte Grundlage der Dateninterpolation, so kann es, wie in Abs. 4.1.1 beschrieben, zu deutlichen Unterschieden in den Verteilungskarten auch aus den deterministischen Verfahren untereinander kommen.

Neben den Interpolationsverfahren wurden in dieser Arbeit auch die Schwellenwerte für die Bestimmung von Bereichen gleicher Unkrautdichte in den Unkrautverteilungskarten untersucht. Hierbei stellte sich heraus, daß die Anwendung der Schwellenwerte einen weitaus größeren Einfluß auf das Kartenresultat haben kann, als das verwendete Interpolationsverfahren. Umfangreiches Expertenwissen ist notwendig, um die korrekten Schwellenwerte auszuwählen. Eine praktikable Möglichkeit der Wahl von Schwellenwerten für die Erstellung von Unkrautverteilungskarten ist die Verwendung von Schadensschwellen aus dem *Integrierten Pflanzenschutz*, da hierbei auch die Ökonomie einer Applikation mit einbezogen wird. Die Herleitung dieser Schadensschwellen ist jedoch auch in Expertenkreisen nicht unumstritten (vgl. BUHLER *et al.* 2000, WILKERSON *et al.* 2002) und multifaktoriell, wodurch auch hier keine eindeutige Ableitung für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle getroffen werden kann. Für präzisen Pflanzenschutz in der Unkrautkontrolle bieten jedoch auch die in Abs. 4.2.1 genannten festen Schadensschwellen einen Richtwert zur Erstellung von Unkrautverteilungskarten. Wie allerdings in Kapitel 4 dargestellt wurde, stellt sich aufgrund der inhärenten Fehler in den Schadensschwellen die Frage, ob die Schadensschwellen in der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle überhaupt ein adäquates Hilfsmittel zum o.g. Zweck sein können. In Zukunft muß daher geprüft werden, ob die Informationen über die Unkrautdichteverteilung, die im Rahmen der Schwellenwertbildung verloren gehen, besser von der Applikations- bzw. Verfahrenstechnik genutzt werden können.

Die innerhalb dieser Arbeit aufgezeigte Problematik der Metadatenhaltung zur nachhaltigen Verwaltung und Dokumentation der Unkrautverteilungs- bzw. Applikationskarten wird in Zukunft eine bedeutendere Rolle spielen. Vielfach wurde bereits darauf hingewiesen, daß die lückenlose Dokumentation aller betrieblichen Vorgänge seitens der Politik angestrebt wird und zum 01.01.2005 durch das Inkrafttreten der EU-Verordnung¹⁸ Nr. 178/2002 bereits Realität wird. Die pragmatisch motivierte Auswahl standard-konformer Metadatenelemente aus dem neuen ISO 19115 Standard für Metadaten zu Geodaten stellt damit eine einfache und komfortable Lösung für dieses Problem dar. Die in der Vergangenheit oftmals vernachlässigte Erstellung und Pflege von Metadaten zu bestimmten Geodaten könnte somit vorangetrieben werden.

¹⁸vgl. dazu (EG) Nr. 178/2002 §18 Abs. 4

7 Ausblick

Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit weisen auf die Schwierigkeiten der stichprobenhaften Erfassung von Unkräutern vor den Anforderungen des *Präzisen Pflanzenbaus* hin. Sie zeigen allerdings auch einen Weg durch die unterschiedlichen Optionen und Verfahren, die dem Anwender der Strategie des *Präzisen Pflanzenbaus* gegeben werden.

Hierbei hat sich erwiesen, daß insbesondere stichprobenhafte Verfahren der Datenerfassung eklatante Fehler bei der Erstellung von Unkrautverteilungskarten hervorrufen können, so daß in Zukunft nur automatische oder stark automatisierte Verfahren der Unkrauterkenkung und -bekämpfung eine Chance haben, in der Praxis umgesetzt zu werden. Diese stellen einen bedeutenden Schritt in Richtung auf die Objektivierung der Datenerfassung im *Präzisen Pflanzenbau* dar. Eine weitere Verbesserung der Erkennungsalgorithmen für Unkräuter mit der gleichzeitig einhergehenden Minimierung der Fehlerkennungen oder Mißdeutungen wird in Zukunft unumgänglich sein. Entscheidend dabei ist auch die Unterscheidung einzelner Unkrautarten. Vorrangiges Ziel sollte jedoch die weitere Verbesserung der Applikationstechnik sein, die in der Lage sein muß, neben der teilflächenspezifischen Bekämpfung aller Unkräuter, langfristig auch deutlich schneller mit spezifischen Pflanzenschutzmitteln gegen einzelne Unkrautarten in einer Überfahrt vorzugehen.

Unkrautverteilungskarten bilden einen *feldhaften* Zugang zur Unkrautproblematik für den GIS-Bereich. Von Objekten ist in diesem Zusammenhang noch nicht die Rede. Die heutige Applikationstechnik für Herbizide drängt jedoch immer stärker in Richtung der Bekämpfung von Unkrautnestern. Entscheidend hierfür wird die begrifflich präzise Definition des *Unkrautnests* sein, die bislang noch nicht realisiert worden ist. Der GIS-Bereich benötigt aber für eine (ökonomische) Bewertung sowie Unterstützung und Umsetzung der Strategie der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle klare Modellierungsanweisungen. Neben der Verwendung eindeutiger Schadenswellen zur Kartierung der Nester muß eine Möglichkeit entwickelt werden, ein unscharf begrenztes Unkrautnest adäquat zu behandeln, ohne weite Teile der Schadfläche bei der Behandlung mit Herbiziden fälschlicherweise auszulassen.

Welches Interpolationsverfahren für einen bestimmten Anwendungszweck geeignet ist, kann im Einzelfall schwer zu entscheiden sein. Die für diese Entscheidung notwendigen mathematischen und statistischen Vorkenntnisse können bei Anwendern des *Präzisen Pflanzenbaus* nicht in jedem Fall vorausgesetzt werden. Daher zeichnet sich außerhalb der Unkrautforschung ein Trend in Richtung automatisierter Auswahlverfahren für die optimale Interpolation ab, bei dem die notwendigen Entscheidungen einem Computersystem überlassen bleiben. Welches Interpolationsverfahren warum gewählt wird, sollte künftig mit Hilfe von Algorithmen auf der Grundlage

statistischer Analysen der Erfassungsdaten entschieden werden. Ein entscheidender Impuls wird hierbei von der diesjährigen SIC2004¹⁹ ausgehen, die sich mit diesem Thema befassen wird.

Prinzipiell zeichnet sich im Pflanzenschutz ein Trend in Richtung teilflächenspezifischer Behandlung unterschiedlichster Schadfaktoren ab. Insbesondere die gestiegene Anzahl von Beiträgen auf Internationalen Konferenzen zu diesem Themengebiet verdeutlicht dies. Gerade die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle hat dabei aufgrund der Spezifika des Schadfaktors Unkraut (relative Ortsstabilität, gute Erkennbarkeit mit verschiedenen Sensoren und Methoden) die aussichtsreichsten Chancen sich letztenendes auch in der Praxis durchzusetzen. Dabei bleibt die Vision einer zielgerichteten *online*-Applikation von Herbiziden stets im Fokus der Forschung. KÜHBAUCH hat diese Vision bereits 1996 mit folgenden eindringlichen Worten formuliert:

„Bemerkenswert ist, daß die Unkrautkontrolle in ihrer ursprünglichsten Form das war, was wir uns heute als Endprodukt der Technikentwicklung wünschen, ein Online-Verfahren: Das sehende Auge als der Sensor, der direkt die Eliminierungstechnik, nämlich die hackeführende Hand, auslöste und steuerte. Dahin, zu gezielten Maßnahmen, müssen wir mit moderner Technik wieder zurück.“

Der systematische Informationsverlust von der Stichprobe über die Interpolation bis zur Konturlinienerstellung kann in Zukunft mit einer erweiterten *dichtespezifischen* Reaktion beim Einsatz von Herbiziden minimiert werden. Daten aus manuellen Verfahren könnten bereits heute zur dreidimensionalen Kartierung verwendet werden und sind möglicher Ausgangspunkt für eine *Fuzzy Herbicide Applikation*. Diese würde die Unsicherheiten der Kartierung dadurch minimieren, daß nicht nur in scharf abgrenzbaren Sektoren der Ackerfläche nach Schadensschwellen Herbizide appliziert würden, sondern in Abhängigkeit von der - durch Interpolation geschätzten - Unkrautdichte. Variable Herbizidmengen könnten auf diese Weise innerhalb der unscharfen Grenzen eines potentiellen Unkrautnestes appliziert werden. Die Möglichkeiten der GIS-Technologie sind in diesem Bereich bei weitem nicht vollständig ausgelotet.

¹⁹Der *Spatial Interpolation Comparsion* Wettbewerb wird regelmäßig von den führenden Geostatistik- und GIS-Experten ausgerichtet und beschäftigt sich in diesem Jahr ausschließlich mit der Automatisierung der Interpolationstechnologien zur Kartierung (SIC2004).

Literaturverzeichnis

- ADOBE SYSTEMS INC., USA: ADOBE PREMIERE 6.0, 2003.
- ANDREASEN, C., RUDEMO, M., SEVESTRE, S., Assessment of weed density at an early stage by use of image processing, *Weed Research*, **37** : 5-18, 1997.
- ANDRES, P., SPIWOKS, M., Prognosegütemaße - State of the art der statistischen Ex-post-Beurteilung von Prognosen, In: *Sofia-Studien zur Institutionenanalyse*, **001**, Darmstadt, 2000.
- ANSCOMBE, F.J., Sampling theory of the negative binomial and logarithmic series distributions, *Biometrika*, **37** : 358-382, 1950.
- AUDENEART, J.A.R., Selektive Herbizidapplikation mit dem Selectspray System, In: *Innovative Verfahren zur Unkrauterkennung*, KTBL Arbeitspapier **236** : 95-100, 1996.
- BACKES, M., Weed patches in satellite images - Verification by ground truth information. 24th *EARSeL Symposium - New Strategies for European Remote Sensing* - Dubrovnik, Kroatien, 2004. (*unveröff.*)
- BACKES, M., DÖRSCHLAG, D., PLÜMER, L., A metadata profile for precision agriculture based on ISO 19115 standard, In: STAFFORD, J., A. WERNER (Ed.), *Precision Agriculture*, Wageningen Academic Publishers, Niederlande, 41-46, 2003.
- BACKES, M., DÖRSCHLAG, D., PLÜMER, L., A new approach towards the validation of weed sampling strategies, *Journal of Plant Diseases and Protection*, Special Issue **XIX** : 439-443, 2004.
- BACKES, M., PLÜMER, L., On the adequacy of GIS-generated weed maps for Precision Farming, In: VIRRANTAU, K., H. TVEITE (Ed.) *Proceedings of the 9th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Sciences (ScanGIS)*, Espoo, Finnland, 261-268, 2003a.
- BACKES, M., PLÜMER, L., Use of geographic information systems to evaluate the plausibility of weed maps, In: WERNER, A., A. JARFE (Ed.), *Programme book of the joint conference of ECPA-ECPLF*, Berlin, 355-356, 2003b.
- BACKES, M., PLÜMER, L., Comparative studies on the generation of weed maps applying different interpolation methods, *Journal of Plant Diseases and Protection*, Special Issue **XIX** : 371-381, 2004.

- BARROSO, J., FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C., RUIZ, D., HERNAIZ, P., REW, L.J., Spatial stability of *Avena sterilis ssp. ludoviciana* populations under annual applications of low rates of imazamethabenz, *Weed Research*, **44** : 178-186, 2004.
- BARTELS, J., WAHMHOF, W., HEITFUSS, R., So kann der Praktiker Schadenschwellen feststellen - Hinweise zur praktischen Anwendung von Schadenschwellen für Unkräuter im Getreide, *DLG-Mitteilungen*, **5** : 270-274, 1983.
- BAXTER, S.J., OLIVER, M.A., GAUNT, J., A Geostatistical Analysis of the Spatial Variation of Soil Mineral Nitrogen and Potentially Available Nitrogen Within an Arable Field, *Precision Agriculture*, **4** : 213-226, 2003.
- BERTIN, J., Graphische Darstellungen - Graphische Verarbeitung von Informationen, Walter de Gruyter & Co., Berlin, New York, 1982.
- BILLER, R.H., Pflanzenunterscheidung und gezielter Einsatz von Herbiziden, *Forschungsreport des BMVEL* (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft), **1** : 34-37, 1998.
- BÖRNER, H., Unkrautbekämpfung, Gustav Fischer Verlag, Jena, 1995.
- BOOTH, B., Using ArcGIS 3D Analyst, Environmental Systems Research Institute Inc. (*ESRI*), 2000.
- BRAUN-BLANQUET, J., Pflanzensoziologie - Grundzüge der Vegetationskunde. 3. Aufl., Springer-Verlag, Wien, New York, 1964.
- BROSIUS, F., SPSS 11, 1. Aufl., mitp-Verlag, Bonn, 2002.
- BUHLER, D.D., LIEBMAN, M., OBRYCKI, J.J., Theoretical and practical challenges to an IPM approach to weed management, *Weed Science*, **48** : 274-280, 2000.
- BURROUGH, P.A., MCDONNELL. R.A., Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, New York, 1998.
- CARDINA, J., JOHNSON, G.A., SPARROW, D.H., The nature and consequence of weed spatial distribution, *Weed Science*, **45** : 364-373, 1997.
- CHANCELLOR, R.J., Weed changes over 11 years in wrenches, an arable field, In: *Proceedings of the British Crop Protection Conference - Vol. 2: Weeds*, Brighton, England, 681-686, 1976.
- CHILÈS, J.P., DELFINER, P., Geostatistics - Modelling Spatial Uncertainty, In: *Wiley series in probability and mathematical statistics. Applied probability and statistics section*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.
- CLAY, S.A., LEMS, G.J., CLAY, D.E., FORCELLA, F., ELLSBURY, M.M., CARLSON, C.G., Sampling weed spatial variability on a fieldwide scale, *Weed Science*, **47** : 674-681, 1999.

- CHRISTENSEN, S., HEISEL, T., Patch spraying using historical, manual and real time monitoring of weeds in cereals, *Journal of Plant Diseases and Protection*, Special Issue **XVI** : 257-263, 1998.
- COLBACH, N., FORCELLA, F., JOHNSON, G.A., Spatial and temporal stability of weed populations over five years, *Weed Science*, **48** : 366-377, 2000.
- COUSENS, R.D., BROWN, R.W., MCBRATNEY, A.B., WHELEAN, B., MOERKERK, M., Sampling Strategy is important for producing weed maps: a case study using kriging, *Weed Science*, **50** : 542-546, 2002.
- CRESSIE, N.A.C., Statistics for Spatial Data, In: *Wiley series in probability and mathematical statistics. Applied probability and statistics section*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.
- DESSAINT, F., CHADOEF, R., BARRALIS, G., Spatial pattern analysis of weed seeds in cultivated soil seed bank, *Journal of Applied Ecology*, **28** : 721-730, 1991.
- DICKE, D., KROHMANN, P., GERHARDS, R., Spatial and temporal dynamics of weed populations in crop rotations under the influence of site-specific weed control, In: STAFFORD, J., A. WERNER (Ed.), *Precision Agriculture*, Wageningen Academic Publishers, Niederlande, 157-163, 2003.
- DICKE, D., FIRES, A., GERHARDS, R., Determination of weed thresholds for site-specific weed control in malting barley, *Journal of Plant Diseases and Protection*, Special Issue **XIX** : 413-421, 2004.
- DIERCKS, R., HEITEFUSS, R., Integrierter Landbau - Systeme umweltbewußter Pflanzenproduktion, Grundlagen, Praxiserfahrungen, Entwicklungen, BLV Verlagsgesellschaft mbH, München, 1994.
- DIGGLE, P., Statistical Analysis of Spatial Point Patterns, 2. Aufl., Oxford University Press Inc., New York, 2003.
- DILLE, J.A., MILNER, M., GROETEKE, J.J., MORTENSEN, D.A., WILLIAMS II, M.M., How good is your weed map? A comparison of spatial interpolators, *Weed Science*, **51**(1) : 44-55, 2002.
- DÖRSCHLAG, D., BACKES, M., PLÜMER, L., An application to create digital ground truth maps of arable fields, In: *Proceedings of the International Conference on Agricultural Science and Technology (ICAST)*, Houston, USA, 2003.
- DÖRSCHLAG, D., BACKES, M., PLÜMER, L., Improving Sampling Strategies By Improved Cognition, In: *Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture (ICPA)*, Minneapolis, USA, 2004.
- DONALD, W.M., Geostatistics for Mapping Weeds, with a Canada Thistle (*Cirsium arvense*) Patch as a Case Study. *Weed Science*, **42** : 648-657, 1994.

- DU RIETZ, G.E., The fundamental units of vegetation, In: *Proceedings of the International Congress of Plant Science*, Ithaca, **1** : 623-627, 1929.
- DU RIETZ, G.E., Zur methodologischen Grundlage der modernen Pflanzensoziologie, Adolf Holzhausen, Wien, 1921.
- DUTTER, R., Geostatistik - Eine Einführung mit Anwendungen. Verlag B.G. Teubner, Stuttgart, 1985.
- EHLERT, D., HAMMEN, V., ADAMEK, R., On-line Sensor Pendulum-Meter for Determination of Plant Mass, *Precision Agriculture*, **4** : 139-148, 2003.
- EHLERT, D., LANGNER, H.R., Sensoren für die Präzisionslandwirtschaft, *Forschungsreport des BMVEL* (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft), **1** : 8-11, 2004.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE INC. (ESRI), ESRI Shapefile Technical Description <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf> (Status: Oktober 2004), 1998.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION, Mitteilung der Kommission an den Rat, Das Europäische Parlament und den Wirtschafts- und Sozialausschuss - Hin zu einer thematischen Strategie zur nachhaltigen Nutzung von Pestiziden, KOM(2002)349, Brüssel, 2002.
- FELTON, W.L., MCCLOY, K.R., Spot Spraying, *Agricultural Engineering*, **11** : 9-12, 1992.
- FRANZ, E., GEBHARDT, M.R., UNKLESBAY, K.B., The use of local spectral properties of leaves as an aid for identifying weed seedlings in digital images, *Transactions of the ASAE*, **34**(2) : 682-687, 1991.
- GARIBAY, S.V., RICHNER, W., STAMP, P., NAKAMOTO, T., YAMAGISHI, J., ABIVARDI, C., EDWARDS, P.J., Extent and Implications of Weed Spatial Variability in Arable Crop Fields, *Plant Production Science*, **4**(4) : 259-269, 2001.
- GERHARDS, R., CHRISTENSEN, S., Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugarbeet, winter wheat and winter barley, *Weed Research*, **43** : 385-392, 2003.
- GERHARDS, R., SÖKEFELD, M., KNUF, K. KÜHBAUCH, W., Mapping and geostatistical analysis of weed distribution in sugarbeet fields for site-specific weed management, *Journal of Agronomy and Crop Science*, **176** : 259-266, 1996.
- GERHARDS, R., SÖKEFELD, KÜHBAUCH, W., Einsatz der digitalen Bildverarbeitung bei der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle, *Journal of Plant Diseases and Protection*, Special Issue **XVI** : 273-278, 1998.
- GERHARDS, R., SÖKEFELD, M., NABOUT, A., THERBURG, R.D., KÜHBAUCH, W., Online weed control using digital image analysis, *Journal of Plant Diseases and Protection*, Special Issue **XVIII** : 421-427, 2002a.

- GERHARDS, R., SÖKEFELD, M., TIMMERMANN, C., KÜHBAUCH, W., Site-specific weed control in maize sugar beet, winter wheat and winter barley, *Precision Agriculture*, **3**(1) : 25-35, 2002b.
- GERHARDS, R., WYSE-PESTER, D.Y., MORTENSEN, D.A., JOHNSON, G., Characterizing spatial stability of weed populations using interpolated maps, *Weed Science*, **45** : 108-119, 1997.
- GEROWITT, B., HEITEFUSS, R., Weed economic thresholds in the Federal Republic of Germany, *Crop Protection*, **9** : 323-331, 1990.
- GOEL, P.K., PRASHER, S.O., LANDRY, J.A., PATEL, R.M., BONNELL, R.B., VIAU, A.A., MILLER, J.R., Potential of airborne hyperspectral remote sensing to detect nitrogen deficiency and weed infestation in corn, *Computers and Electronics in Agriculture*, **38** : 99-124, 2003.
- GOLD, H.J., BAY, J., WILKERSON, G.G., Scouting for Weeds, Based on the Negative Binomial Distribution, *Weed Science*, **44** : 504-510, 1996.
- GOLDEN SOFTWARE INC., SURFER for Windows Version 8.03. Golden Software Inc., Colorado, 2004.
- GOOVAERTS, P., Geostatistics for Natural Resource Evaluation, In: Journel, A.G. (Ed.), *Applied Geostatistics Series*, Oxford University Press, New York, 1997.
- GOUDY, H.J., BENNETT, K.A., BROWN, R.B., TARDIF, F., Evaluation of site-specific weed management using direct-injection sprayer, *Weed Science*, **49** : 359-366, 2001.
- GRAY, C., Applying multispectral aerial imagery to weed species differentiation, 4th International Weed Science Congress, Durban, Süd Afrika, 2004.
- GRINGARTEN, E., DEUTSCH, C.V., Teacher's Aide - Variogram Interpretation and Modeling, *Mathematical Geology*, **33**(4) : 507-534, 2001.
- GUTSCHE, V., GOLLA, B., GANELMEIER, H., GIS: Neue Ansätze bei der Ausbringung chemischer Pflanzenschutzmittel, *Forschungsreport des BMVEL* (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft), **1** : 4-7, 2004.
- HAKE, G., GRÜNREICH, D., MENG, L., Kartographie, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York, 2002.
- HAMOUIZ, P., SOUKUP, J., HOLEC, J., NOVÁKOVÁ, K., Field-scale variability of weed distribution on arable land, *Journal of Plant Diseases and Protection*, Special Issue **XIX** : 445-452, 2004.
- HANF, M., Farbatlas der Wildkräuter und Unkräuter, Weltbild Verlag GmbH, Augsburg, 1998.
- HÄUSLER, A., NORDMEYER, H., Using aerial photography to detect weed patches for site-specific weed control - perspectives and limitations, In: STAFFORD, J., A. WERNER (Ed.), *Precision Agriculture*, Wageningen Academic Publishers, Niederlande, 271-277, 2003.

- HÄUSLER, A., NORDMEYER, H., NIEMANN, P., WITTMANN, C., HINTZSCHE, E., Möglichkeiten der Unkrauterkenennung mittels Luftbild, In: *Innovative Verfahren zur Unkrauterkenennung*, KTBL Arbeitspapier **236** : 101-112, 1996.
- HEINRICH, U., Zur Methodik der räumlichen Interpolation mit geostatistischen Verfahren, Deutscher Universitäts-Verlag GmbH, Wiesbaden, 1992.
- HEISEL, T., ANDREASEN, C., ERSBØLL, A.K., Annual weed distributions can be mapped with kriging, *Weed Research*, **36** : 325-337, 1996.
- HUBER, U.W., Das Referenz-Geoinformationssystem *Nationalpark Bayerischer Wald*, eine fachübergreifende Forschungsplattform für die Geoinformatik, Technische Universität München, 2002.
- HUBER, U., ROSCHLAUB, R., SCHEUGENPFLUG, S., SCHILCHER, M., TEEGE, G., OMNI-GIS, ein erster Schritt zum Aufbau eines Geo-Data-Warehouse zur Nutzung amtlicher, behördlicher und privatwirtschaftlicher Geo-Daten, In: *Beiträge zur 14th ESRI-European-User-Conference*, München, 1999.
- ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, R.M., An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, New York, 1989.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), ISO/FDIS 19115:2003(E), 2003.
- INDUSTRIEVERBAND AGRAR, Jahresbericht 2002 / 2003, Pressehaus Bintz-Verlag GmbH & Co. KG, Offenbach, 2003.
- JENNESS, J., Nearest Feature, with Distances and Bearings (v. 3.6c), <http://arcscripsts.esri.com> (Status: Oktober 2004).
- JOHNSON, G.A., MORTENSEN, D.A., GOTWAY, C.A., Spatial and Temporal Analysis of Weed Seedling Populations Using Geostatistics, *Weed Science*, **44** : 704-710, 1996.
- JOHNSTON, K., VER HOEF, J.M., KRIVORUCHKO, K., LUCAS, N., Using ArcGIS Geostatistical Analyst, Environmental Systems Research Institute Inc. (*ESRI*), 2001.
- KERRY, R., OLIVER, M.A., Variograms of Ancillary Data to Aid Sampling for Soil Surveys, *Precision Agriculture*, **4** : 261-278, 2003.
- KORDUAN, P., Standardization in Data Management to Increase Interoperability of Spatial Precision Agriculture Data, In: STAFFORD, J., A. WERNER (Ed.), *Precision Agriculture*, Wageningen Academic Publishers, Niederlande, 323-328, 2003.
- KORDUAN, P., BILL, R., BÖLLING, S., An Interoperable Geodata Infrastructure for Precision Agriculture, In: TOPPEN, F., PRASTACOS P., *AGILE 2004, 7th Conference on Geographic Information Science*, Kreta, Crete University Press, 747-751, 2004.

- KROHMANN, P., Effizienz teilschlagspezifischer Unkrautkontrolle und räumlich-zeitliche Dynamik der Unkrautpopulationen in einer Felderfolge und Monokultur, Dissertation, Universität Bonn, 2004.
- KRUEGER, D.W., WILKERSON, G.G., COBLE, H.D., GOLD, H.J., An economic analysis of binomial sampling for weed scouting, *Weed Science*, **48** : 53-60, 2000.
- KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL), Precision Farming im Pflanzenschutz, KTBL-Schrift Nr. **402**, 2001.
- KÜHBAUCH, W., Anwendungsperspektiven der sensorgesteuerten Unkrautkontrolle, In: *Innovative Verfahren zur Unkrauterkenntung*, KTBL Arbeitspapier **236** : 9-21, 1996.
- LAMB, D.W., BROWN, R.B., Remote-Sensing and Mapping of Weeds in Crops, *Journal of Agricultural Engineering Research*, **78**(2) : 117-125, 2001.
- LAMB, D.W., WEEDON, M., Evaluating the accuracy of mapping weeds in fallow fields using airborne digital imaging: *Panicum effusum* in oilseed rape stubble, *Weed Research*, **38** : 443-451, 1998.
- LANGNER, H.R., BÖTTGER, H., Erfahrungsbericht zur bildgestützten Unkrauterkenntung mit einer 3Chip-CCD-Kamera, In: *Bornimer Agrartechnische Berichte*, Heft **34** : 38-48, 2003.
- LUDOWICY, C., SCHWAIBINGER, R., LEITHOLD, P., Precision Farming - Handbuch für die Praxis, DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main, 2002.
- LLOYD, M., Mean crowding, *Journal of Animal Ecology*, **36** : 1-30, 1967.
- MAHN, E.G., Nutzen der Unkräuter, In: ZWERGER, P., AMMON, H.U., Unkraut - Ökologie und Bekämpfung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2002.
- MARSHALL, E.J.P., Distribution patterns of plants associated with arable field edges, *Journal of Applied Ecology*, **26**(1) : 247-257, 1989.
- MATHERON, G., The Theory of Regionalized Variables and its Application. (Cahier Centre Morphologie Math. 5). École des Mines de Paris, Fontainebleau, 1971.
- MEDLIN, C.R., SHAW, D.R., Economic comparison of broadcast and site-specific herbicide applications in nontransgenic and glyphosate-tolerant *Glycine max*, *Weed Science*, **48** : 653-661, 2000.
- MEDLIN, C.R., SHAW, D.R., GERARD, P.D., LAMASTUS, F.E., Using remote sensing to detect weed infestations in *Glycine max*, *Weed Science*, **48** : 393-398, 2000.
- MEYER, G.E., METHA, T., KOCHER, M.F., MORTENSEN, D.A., SAMAL, A., Textural imaging and discriminant analysis for distinguishing weeds for spot spraying, *Transactions of the ASAE*, **41**(4) : 1189-1197, 1998.

- MORTENSEN, D.A., JOHNSON, G.A., YOUNG, L.J., Weed Distribution in Agricultural Fields. In: ROBERT, P.C. *et al. Proceedings: Soil Specific Crop Management: a workshop on research and development issues*, Minneapolis, USA, 113-124, 1993.
- MUELLER-WARRANT, G.W., SCHWEITZER, L.R., COOK, R.L., Monitoring trends in weeds of grass seed crops using GIS tools, In: *Proceedings of the 5th International Herbage Seed Conference*, Gatton, Australia, 2003.
- NORDBO, E., CHRISTENSEN, S., KRISTENSEN, K., WALTER, M., Patch spraying of weed in cereal crops, In: *Aspects of Applied Biology - Arable farming under CAP reform*, **40** : 325-334, 1994.
- NORDMEYER, H., DUNKER, M., Variable weed densities and soil properties in a weed mapping concept for patchy weed control, In: *Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture*, Sheffield Academic Press, 435-462, 1999.
- NTECH INC., WEEDSEEKER, <http://www.ntechindustries.com> (Status: Oktober 2004).
- NYQUIST, H., Certain topics in telegraph transmission theory, *AIEE Transactions*, **47** : 617-644, 1928.
- OEBEL, H., GERHARDS, R., BECKERS, G., DICKE, D., SÖKEFELD, M., LOCK, R., NABOUT, A., THERBURG, R.D., Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline (und Online)-Verfahren (TURBO) - erste Erfahrungen aus der Praxis, *Journal of Plant Diseases and Protection*, Special Issue **XIX** : 459-465, 2004.
- OERKE, E-C., STEINER, U., Ertragsverluste und Pflanzenschutz - Die Anbausituation für die wirtschaftlich wichtigsten Kulturpflanzen, In: *Schriftenreihe der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft*, Band 6, Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, 1996.
- O'FLAHERTY, A., LETHBRIDGE, M., Grid Plus (v. 1.0) <http://arcscripsts.esri.com> (Status: Oktober 2004).
- OLEA, R.A., Geostatistics for Engineers and Earth Scientists. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
- PANAVUE, Québec (Qc), Kanada, Panavue Image Assembler v. 2.12, 2003.
- PIERCE, F.J., ANDERSON, N.W., COLVIN, T.S., SCHUELLER, J.K., HUMBURG, D.S., MCLAUGHLIN, N.B., Yield mapping. In: PIERCE, F.J. UND SADLER, E.J. *The State of Site-specific Management of Agriculture*, Kapitel **11**, Madison USA, 1997.
- PHILIPP, I., RATH, T., Improving plant discrimination in image processing by use of different colour space transformations, *Computers and Electronics in Agriculture*, **35** : 1-15, 2002.
- PHILIPP, I., NORDMEYER, H., RATH, T., Automatische und manuelle Unkrautkartierung in Zuckerrübenbeständen im Vergleich, In: *Bornimer Agrartechnische Berichte*, Heft **34** : 14-19, 2003.

- REW, L.J., COUSENS, R.D., Spatial distribution of weeds in arable crops; are current sampling and analytical methods appropriate? *Weed Research*, **41** : 1-18, 2001.
- REW, L.J., WHELEAN, B., MCBRATNEY, A.B., Does kriging predict weed distributions accurately enough for site-specific weed control? *Weed Research*, **41** : 245-263, 2001.
- ROTH, R., KÜHN, J., Bestandesführung und differenzierte Aussaat, In: WERNER, A., JARFE, A., Precision Agriculture - Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis, KTBL-Sonderveröffentlichung **038** : 225-236, 2002.
- SCHMIDHALTER, U., ZINTEL, A., Schätzung der räumlichen Variabilität des Ton- und Wassergehalts mit elektromagnetischer Induktion, *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, **91** : 831-841, 1999.
- SACHS, L., Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden, 10. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002.
- SCHAEBEN, H., LINDNER, S., Mathematische Geologie II - Statistik regionalisierter Variablen - Geostatistik, *Skriptum*, Freiberg, 2000.
- SHANNON, C. E., Communication in the Presence of Noise, In: *Proceedings of the IRE*, **37**(1) : 10-21, 1949. (Nachdruck 1998 In: *Proceedings of the IEEE*, **86**(2) : 447-457)
- SHAO, J., TU, D., The Jackknife and Bootstrap, In: *Springer series in statistics*, Springer Verlag, New York, 1995.
- SIBSON, R., A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. In: Barnett (Ed.) *Interpreting Multivariate Data*, Wiley, 21-36, 1981.
- SPATIAL INTERPOLATION COMPARISON (SIC), Automatic Mapping, <http://www.ai-geostats.org/events/sic2004.htm> (Status: Oktober 2004).
- SKILJAN, I., IrfanView 3.92, <http://www.irfanview.com> (Status: Oktober 2004).
- SÖKEFELD, M., Automatische Erkennung von Unkrautarten im Keimblattstadium mit digitaler Bildverarbeitung, Shaker Verlag, Aachen, 1997.
- SOMMER, C., Techniken und Verfahren zur ressourcenschonenden Bodennutzung - Rückblick und Perspektiven, *Landbauforschung Fölkenrode*, Sonderheft **256** : 101-109, 2003.
- SPICKERMANN, G., Gebührender Abstand - GIS-gestützt erstellte Abstandskarten zeigen das Drifteintragspotentials von Pflanzenschutzmitteln in Fließgewässer, *Geobit*, **7** : 10-12, 2003.
- SPIES, M., Unsicheres Wissen - Wahrscheinlichkeit, Fuzzy-Logik, neuronale Netze und menschliches Denken, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, 1993.
- STAFFORD, J.V., AMBLER, A., LARK, R.M., CATT, J., Mapping and interpreting yield variation in cereal crops, *Computers and Electronics in Agriculture*, **14** : 101-119, 1996.

- STAFFORD, J.V., BENLLOCH, J.V., Machine-assisted detection of weeds and weed patches, In: STAFFORD, J.V. *Precision Agriculture 97*, Bios Scientific Publishers, Oxford, Vol. **II** : 511-518, 1997.
- STEIN, M.L., Interpolation of Spatial Data - Some Theory for Kriging. Springer Verlag, New York, 1999.
- SUKUMAR, N., A Note on Natural Neighbor Interpolation and the Natural Element Method (NEM), (*unveröff.*) 1997.
- SUKUMAR, N., MORAN, B., SEMENOV, Y.A., BELIKOV, V.V., Natural neighbor Galerkin methods, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **50**(1) : 1-27, 2001.
- SWANTON, C.J., WEAVER, S., COWAN, P., VAN ACKER, R., DEEN, W., SHRESHTA, A., Weed Thresholds: Theory and Applicability, *Journal of Crop Production*, **2**(1) : 9-29, 1999.
- SWINTON, S.M., Site-specific Pest Management, In: HOND, F. GROENWEGEN, P., STRAALLEN, N., *Pesticides: Problems, Improvements and Alternatives*, Kapitel **10**, Iowa State Press, 155-168, 2003.
- TANG, L., TIAN, L.F., STEWARD, B.L., Machine vision-based high-resolution weed mapping and patch-sprayer performance simulation. In: *SAE Transactions-Journal of Commercial Vehicles*, **108**(2) : 317-326, 1999.
- TIMMERMANN, C., Teilflächenspezifische Unkrautkontrolle im präzisen Pflanzenbau unter Berücksichtigung von Ertragsdaten und Bodenparametern, Dissertation, Universität Bonn, 2001.
- TIMMERMANN, C., GERHARDS, R., KÜHBAUCH, W., The economic impact of site-specific weed control, *Precision Agriculture*, **4** : 249-260, 2003.
- TOMCZACK, M., Spatial Interpolation and its Uncertainty using Automated Anisotropic Inverse Distance Weighing (IDW) - Cross-validation / Jackknife Approach, In: DUBOIS, G., *Spatial Interpolation Comparison '97*, 51-62, 1997.
- VON POST, H., Försök till iakttagelser i djur- och växt- statistik, Övers. K., Vet.-Ak. Förhandl., Stockholm, 1867.
- VOSSHENRICH, H.H., Ortsspezifische Bodenbearbeitung und Einsparpotential - die wichtigen Schritte zum Erfolg, *Landbauforschung Fölkenrode*, Sonderheft **256** : 87-95, 2003.
- WACKERNAGEL, H., Multivariate Geostatistics, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998.
- WALTER, A.M., Temporal and spatial stability of weeds, In: *Proceedings of the 2nd International Weed Control Congress*, Kopenhagen, 125-130, 1996.
- WAMELING, A., Räumliche Genauigkeit geostatistischer Interpolationsverfahren in Forst- und Umweltwissenschaften, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2002.

- WARTENBERG, G., DAMMER, K.H., Unkrauterkenung im Echtzeitbetrieb - Möglichkeiten und Probleme, *Journal of Plant Diseases and Protection*, Special Issue **XVII** : 187-194, 2000.
- WEBER, R., Statische und dynamische Evaluation von Prognosen, *ZA-Information*, **43** : 111-123, 1998.
- WEBER, D., ENGLUND, E., Evaluation and Comparison of Spatial Interpolators, *Mathematical Geology*, **24**(4) : 381-391, 1992.
- WELLE, B., Beschreibung, Analyse und Vergleich der Form von Unkrautnestern mit Hilfe von Fourier-Deskriptoren, Institut für Kartographie und Geoinformation, Universität Bonn, unveröff. Diplomarbeit, 2003.
- WILES, L.J., SCHWEIZER, E.E., The cost of counting and identifying weed seeds and seedlings, *Weed Science*, **47** : 667-673, 1999.
- WILKERSON, G.G., WILES, L.J., BENNETT, A.C., Weed management decision models: pitfalls, perceptions, and possibilities of the economic threshold approach, *Weed Science*, **50** : 411-424, 2002.
- WILSON B.J., BRAIN, P., Long-term stability of distribution of *Aleopecurus myosuroides* HUDS. within cereal fields, *Weed Research*, **31** : 367-373, 1991.
- WOEBBECKE, D.M., MEYER, G.M., VON BARGEN, K., MORTENSEN, D.A., Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions, *Transactions of the ASAE*, **38**(1) : 259-269, 1995.
- WORBOYS, M.F., GIS - A Computing Perspective, Taylor & Francis Ltd., London, 1995.
- ZANIN, G., BERTI, A., RIELLO, L., Incorporation of weed spatial variability into the weed control decision-making process, *Weed Research*, **28** : 107-118, 1998.
- ZHANG, N., CHAISATTAPAGON, C., Effective criteria for weed identification in wheat fields using machine vision, *Transactions of the ASAE*, **38**(3) : 965-974, 1995.
- ZWERGER, P., AMMON, H.U., Unkraut - Ökologie und Bekämpfung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2002.
- ZWERGER, P., MALKOMES, H.P., NORDMEYER, H., SÖCHTING, H.P., VERSCHWELLE, A., Weed control: presence and future - the German view, *Journal of Plant Diseases and Protection*, Special Issue **XIX** : 27-38, 2004.

Anhang A

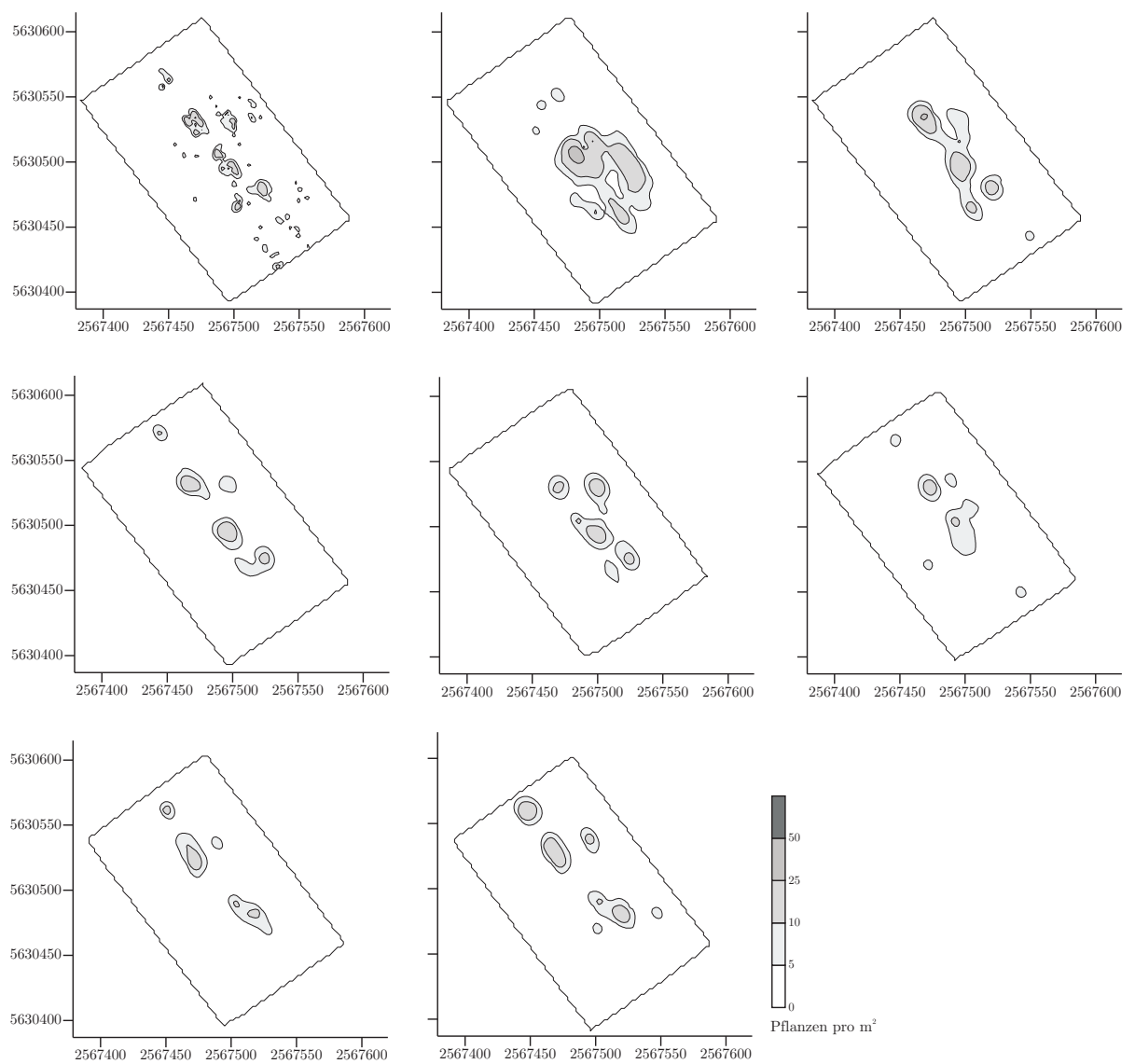


Abb. A.1: Karten der Verteilung von *Fumaria officinalis* L. L. Dargestellt sind die unterschiedlichen Karten in Abhängigkeit vom Startpunkt der Datenerfassung. Die obere linke Karte zeigt die Verteilung nach der Datenerfassung mit digitalen Kameras, daneben die Karte aus der manuellen Datenerfassung und danach die Karten aus den simulierten Startpunkten der Datenerfassung im gleichen Maßraster.

Tab. A.1: Ergebnisse der Kreuzkorrelation zwischen den erstellten Unkrautverteilungskarten für *Fumaria officinalis* L.

	K ¹	V ₀ ²	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	M ³
K	1,00	0,70	0,66	0,64	0,57	0,50	0,56	0,26
V ₀	0,70	1,00	0,83	0,73	0,70	0,62	0,62	0,38
V ₁	0,66	0,83	1,00	0,81	0,67	0,60	0,63	0,33
V ₂	0,64	0,73	0,81	1,00	0,63	0,55	0,55	0,43
V ₃	0,57	0,70	0,67	0,63	1,00	0,58	0,49	0,30
V ₄	0,50	0,62	0,60	0,55	0,58	1,00	0,81	0,20
V ₅	0,56	0,62	0,63	0,55	0,49	0,81	1,00	0,18
M	0,26	0,38	0,33	0,43	0,30	0,20	0,18	1,00

¹ Daten der Kameraüberfahren

² Die Verteilungskarten V₀-V₅ sind aus den Daten der simulierten Erfassungspunkte entstanden

³ Daten der manuellen Datenerfassung

Tab. A.2: Ergebnisse der Kreuzkorrelation zwischen den erstellten Unkrautverteilungskarten für *Stellaria media* L.

	K ¹	V ₀ ²	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	M ³
K	1,00	0,30	0,06	0,00	-0,02	0,32	0,22	0,09
V ₀	0,30	1,00	0,08	0,02	-0,04	0,56	0,73	0,15
V ₁	0,06	0,08	1,00	0,02	-0,01	0,07	-0,02	0,15
V ₂	0,00	0,02	0,02	1,00	0,42	-0,06	-0,05	0,38
V ₃	-0,02	-0,04	-0,01	0,42	1,00	-0,03	-0,04	0,01
V ₄	0,32	0,56	0,07	-0,06	-0,03	1,00	0,57	0,03
V ₅	0,22	0,73	-0,02	-0,05	-0,04	0,57	1,00	0,04
M	0,09	0,15	0,15	0,38	0,01	0,03	0,04	1,00

¹ Daten der Kameraüberfahren

² Die Verteilungskarten V₀-V₅ sind aus den Daten der simulierten Erfassungspunkte entstanden

³ Daten der manuellen Datenerfassung

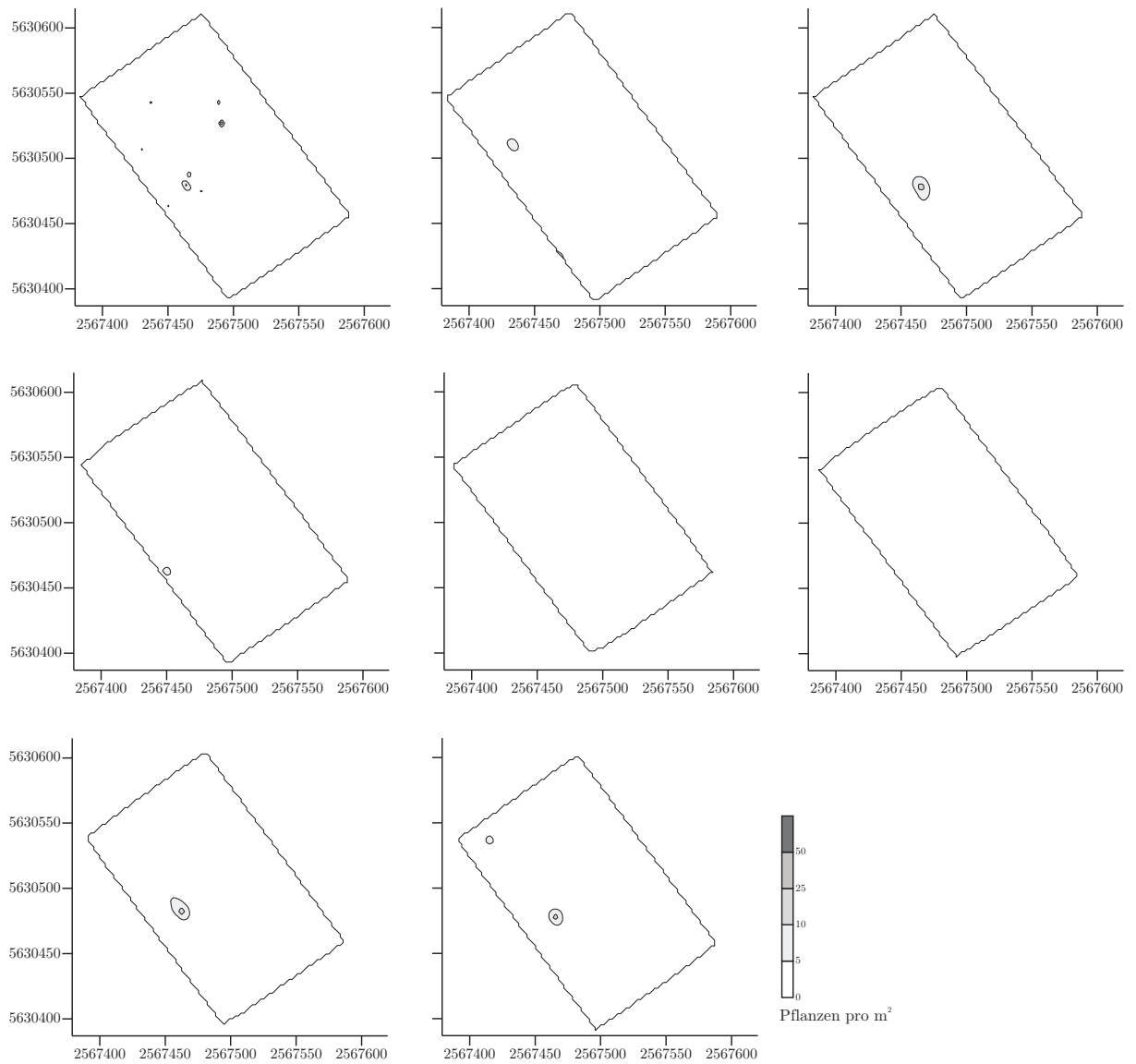


Abb. A.2: Karten der Verteilung von *Stellaria media* L.. Dargestellt sind die unterschiedlichen Karten in Abhängigkeit vom Startpunkt der Datenerfassung. Die obere linke Karte zeigt die Verteilung nach der Datenerfassung mit digitalen Kameras, daneben die Karte aus der manuellen Datenerfassung und danach die Karten aus den simulierten Startpunkten der Datenerfassung im gleichen Meßraster.

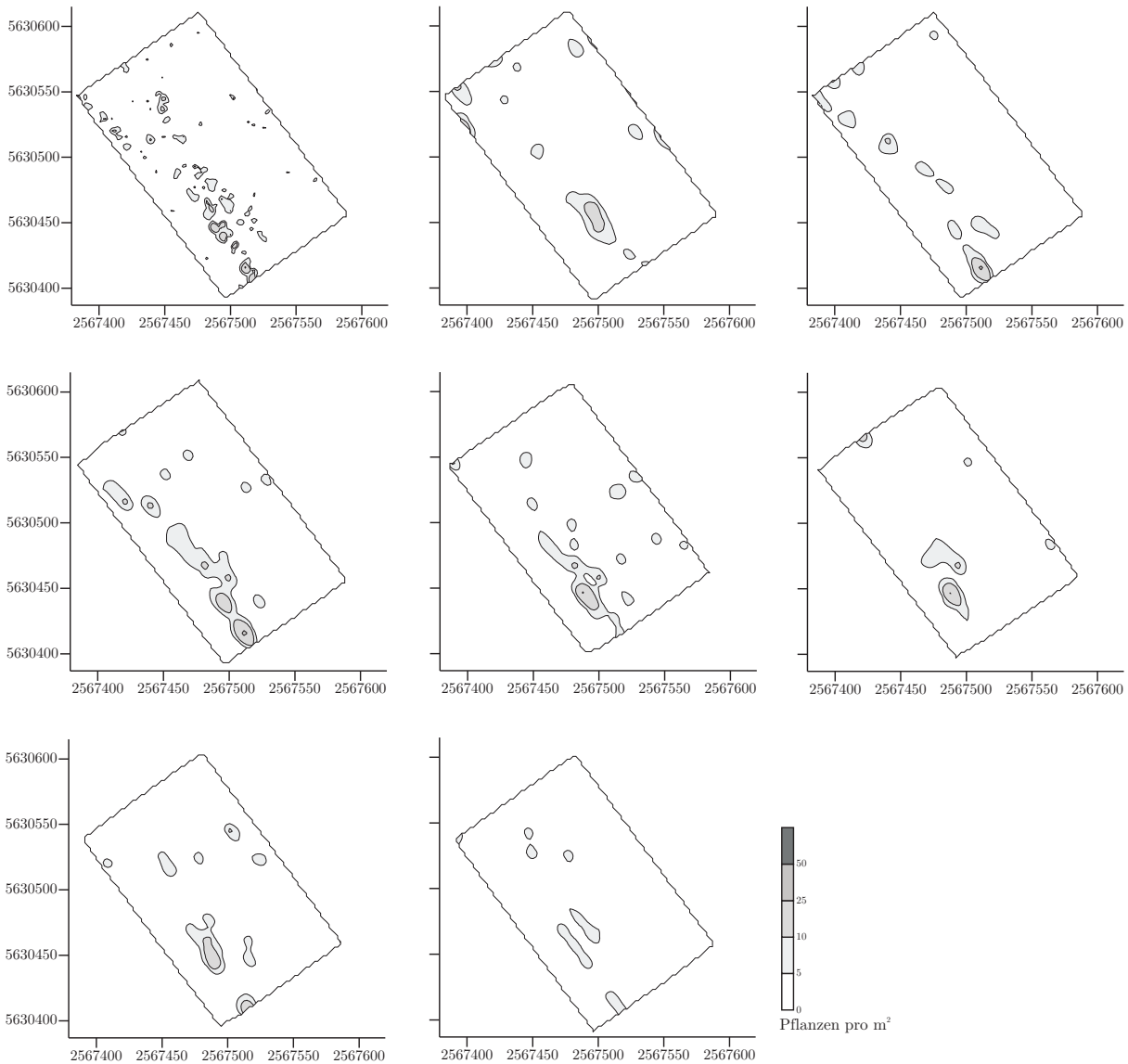


Abb. A.3: Karten der Verteilung von *Gräsern*. Dargestellt sind die unterschiedlichen Karten in Abhängigkeit vom Startpunkt der Datenerfassung. Die obere linke Karte zeigt die Verteilung nach der Datenerfassung mit digitalen Kameras, daneben die Karte aus der manuellen Datenerfassung und danach die Karten aus den simulierten Startpunkten der Datenerfassung im gleichen Meßraster.

Tab. A.3: Ergebnisse der Kreuzkorrelation zwischen den erstellten Unkrautverteilungskarten für *Gräser*.

	K ¹	V ₀ ²	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	M ³
K	1,00	0,49	0,54	0,60	0,42	0,52	0,53	0,36
V ₀	0,49	1,00	0,65	0,40	0,40	0,43	0,42	0,32
V ₁	0,54	0,65	1,00	0,62	0,44	0,45	0,50	0,35
V ₂	0,60	0,40	0,62	1,00	0,64	0,62	0,50	0,39
V ₃	0,42	0,40	0,44	0,64	1,00	0,62	0,51	0,30
V ₄	0,52	0,43	0,45	0,62	0,62	1,00	0,67	0,33
V ₅	0,53	0,42	0,50	0,50	0,51	0,67	1,00	0,32
M	0,36	0,32	0,35	0,39	0,30	0,33	0,32	1,00

¹ Daten der Kameraüberfahren

² Die Verteilungskarten V₀-V₅ sind aus den Daten der simulierten Erfassungspunkte entstanden

³ Daten der manuellen Datenerfassung

Anhang B

Dokumentation des Sampling Simulators

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der Arbeit mit der Software SAMPLING SIMULATOR vorgestellt. Wie bereits beschrieben, kann die Software zu unterschiedlichen Zwecken genutzt werden. Vor allem aber ist sie dazu gedacht, Unkrautdatenerfassungen auf einer Ackerfläche zu simulieren. Diese können auf der Grundlage hochauflösender Daten zur Verteilung von Unkräutern durchgeführt werden.

Datenformate und Input

Generell können mit dem SAMPLING SIMULATOR die Datenformate *.gen (ESRI-ungenerate Format) und *.shp (ESRI-Shapefile¹ Format) geöffnet werden. Nähere Details zu diesen Datenformaten sind auf der Homepage der Firma ESRI zu finden.

Vor dem Input der Daten müssen zwei Parameter eingestellt werden. Einerseits muß ein Ausgabepfad für die Ergebnisse der durchzuführenden Simulation(en) bestimmt werden, andererseits ist es für bestimmte Analysen notwendig, einen Zeitfaktor zu bestimmen. Dieser Zeitfaktor wird für die Berechnung der Zeit für die jeweilige Datenerfassung benötigt (vgl. Abs. 5.4.2.1.7, Formel 5.35). Anschließend werden die entsprechenden Ausgangsdaten für die Simulation geladen.

Über das Menu **Datei** → **Bonituren simulieren** gelangt man in den Auswahlmodus für die Inputdateien. Zunächst muß die Datei mit den Grenzen des zu untersuchenden Ackers eingeladen werden. Wie bereits erwähnt, sind dabei die entsprechenden Spezifikationen des Datenformats zu beachten. Beide bereits vorgestellten Datenformate können (auch parallel) verwendet werden. Im Anschluß daran werden die Punktdaten (Verteilung der Unkräuter) auf der entsprechenden Ackerfläche ausgewählt und geladen. Die Grenzen werden daraufhin angezeigt. Im SAMPLING SIMULATOR werden Quadrate als Zählrahmen vorgegeben. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Ackerfläche möglichst rechteckig auszurichten. Dies geschieht in diesem Menu. Durch anklicken einer Kante der Ackergrenze wird das gesamte Polygon an der gewählten Kante ausgerichtet.

Simulationsablauf und Datenoutput

Anschließend folgt der eigentliche Simulationsmodus des SAMPLING SIMULATOR. Zwei Optionen stehen hier zur Verfügung. Einerseits kann eine *einmalige* Datenerfassung mit entsprechenden

¹Für die Feldgrenzen **nur** Polygon-Shapefiles, für die Unkrautdaten **nur** Point-Shapefiles (s. auch ESRI 1998).

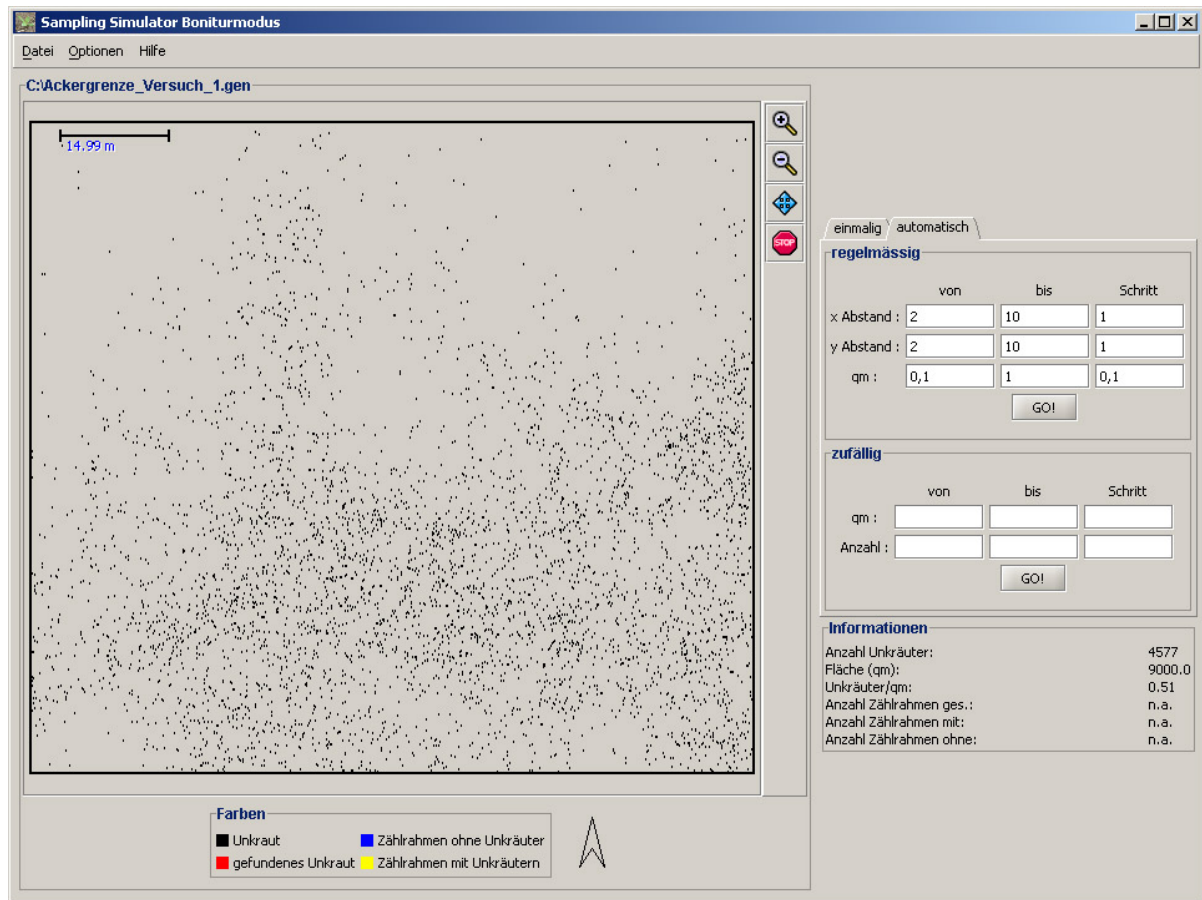


Abb. B.1: Screenshot der Simulationssoftware SAMPLING SIMULATOR im Boniturmodus. Dargestellt sind die Ackergrenzen, die Koordinaten der Unkräuter und die Einstellungen der *Boniturkette* in einem regelmäßigen Meßraster.

Parametern durchgeführt werden, andererseits gibt es die Möglichkeit *automatisch* beliebig viele Erfassungsvarianten zu simulieren. Bei der *einmaligen* Datenerfassung, können die Parameter Meßrasterabstand in x- und y-Richtung, die Versetzung der Erfassung in x- oder y-Richtung, sowie die Größe des verwendeten Zählrahmens eingestellt werden. Neben dieser regelmäßigen Form der Datenerfassung können auch zufällige Datenerfassungen mit unterschiedlichen Zählrahmengrößen und beliebigem Stichprobenumfang simuliert werden. Im *automatischen* Modus werden die unterschiedlichen Einstellungen der *einmaligen* Datenerfassung nacheinander durchgeführt. Dabei wird ein Startpunkt und ein Endpunkt der jeweiligen Parameter definiert und eine Schrittweite angegeben (vgl. Abb. B.1).

Die Output Dateien der simulierten Unkrautdatenerfassungen werden in unterschiedlichen Dateien im zuvor bestimmten Ausgabeordner gespeichert. Hierbei werden entsprechende Dateikonventionen eingehalten. Für regelmäßige Datenerfassungen entsteht eine Datei vom Typ:

[x-Abstand]_[y-Abstand]_[x-Verschiebung]_[y-Verschiebung]_[Zählrahmengröße].csv

Wurde eine zufällige Datenerfassung gewählt entsteht als Output eine Datei vom Typ:

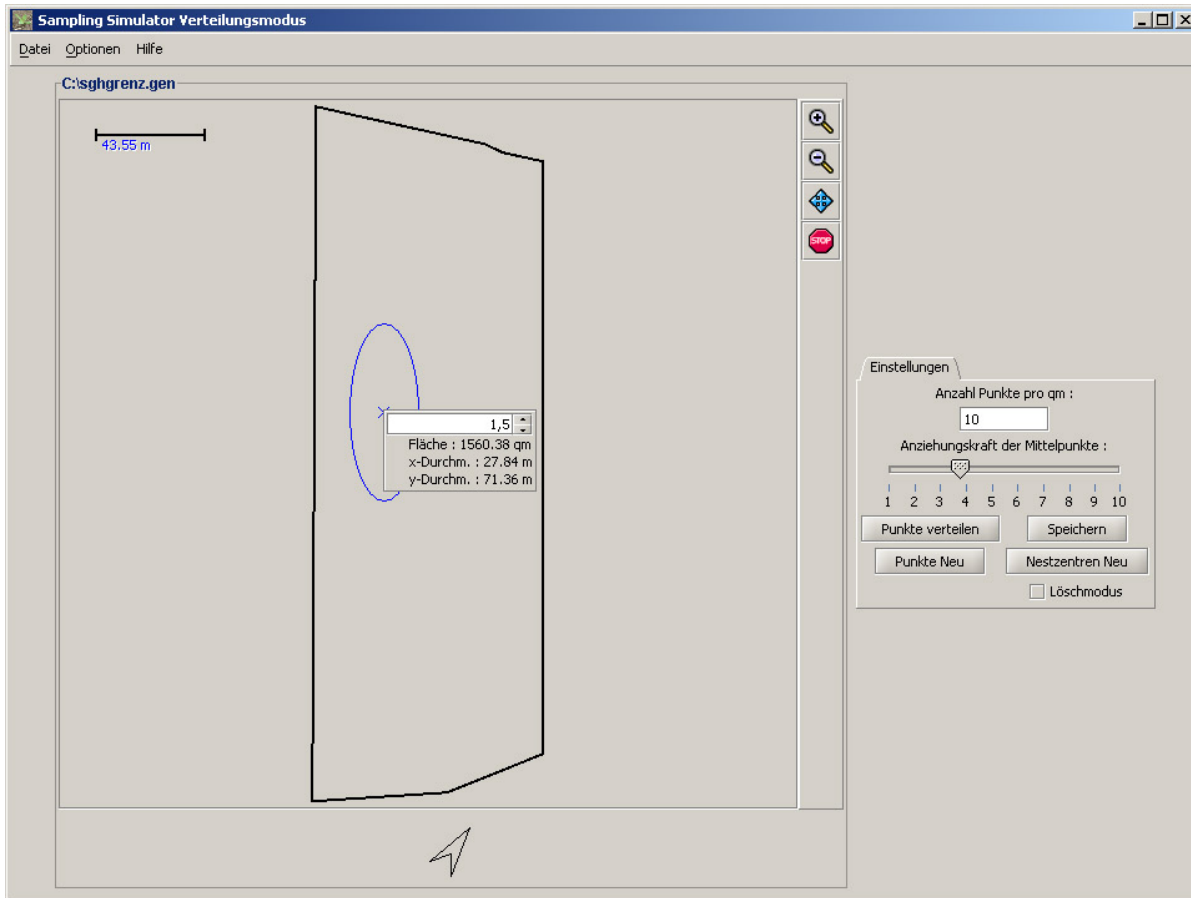


Abb. B.2: Screenshot der Simulationssoftware SAMPLING SIMULATOR im Verteilungsmodus. Innerhalb der Ackergrenzen von Feld GH wird hier beispielhaft ein Unkrautnest mit einer mittleren Unkrautdichte von 1,5 Pflanzen pro Quadratmeter generiert.

`zufallsbonitur_[Anzahl Bonitурpunkte]_[Zählrahmengröße].csv2`

Ist eine *automatische* Datenerfassung simuliert worden, so wird außer den jeweiligen regelmäßigen bzw. zufälligen Datenerfassungsdateien von bereits genannten Typ eine Datei namens

`Gesamtergebnis.csv`

generiert, die die Kenngrößen und Fehlermaße aus Abs. 5.4.2.1 beinhaltet.

Generierung von Verteilungen

Neben dem beschriebenen Modus zur Simulation von Datenerfassungen können mit der Software SAMPLING SIMULATOR auch bei fehlender Datengrundlage Simulationen durchgeführt werden. Dies kann nach Einladen einer Ackergrenze in Form der bereits beschriebenen Dateien durch die Generierung von Populationen erzielt werden.

²Eine Bonitur ist eine Datenerfassung im Sinne der Zählung auftretender Unkräuter in einem Zählrahmen.

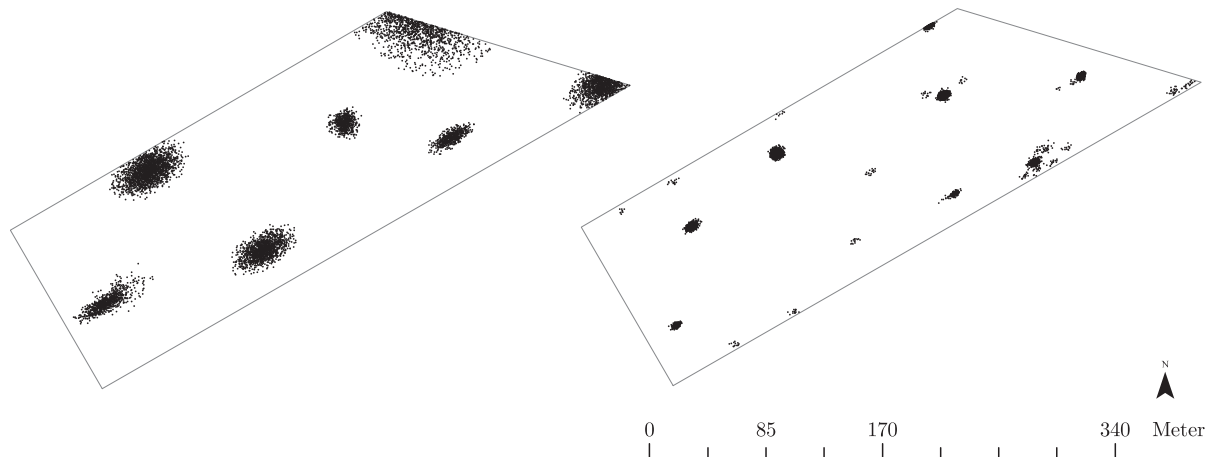


Abb. B.3: Simulierte Populationen innerhalb der Grenzen von Feld 6 des Versuchsgutes Dikopshof (vgl. Abb. 2.2) Links: Population mit Nestern $> 15 \text{ m}^2$, rechts: Population mit Nestern $< 15 \text{ m}^2$.

Auf der Grundlage von Expertenwissen zur möglichen Verteilung von Unkräutern, können verschiedene Unkrautdichten für die Gesamtfläche oder für abgegrenzte Bereiche (Unkrautnester) erzeugt werden, die dann der Simulation der Datenerfassung dienen können (Abb. B.3). Die Fläche von Nestern und die Stärke der Aggregation können hierbei eingestellt werden.

Es muß sich natürlich bei der erstellten Punkteverteilung nicht zwangsläufig um Unkräuter handeln. Vielmehr ist jedes diskret auftretende Phänomen auf diese Weise visualisierbar. Aus landwirtschaftlicher Sicht könnten daher also z.B. auch die Verteilung von Nematoden, Pflanzenkrankheiten oder Insekten repräsentiert werden. Daraus ergibt sich eine Vielzahl von potentiellen Anwendungsgebieten für den SAMPLING SIMULATOR.

Integration in kommerzielle GI-Systeme

Die Software wird zukünftig in Form eines *Plugins* für die GIS-Software ARCGIS 8.x verfügbar sein und in einer weiterentwickelten Version als der hier vorgestellten Version 1.1 auch direkt auf die im GIS befindlichen Datensätze zugreifen können. Ziel dabei ist es, bereits in der Planungsphase einer Datenerfassung im GIS, Informationen zur Repräsentativität der Daten zu erhalten. Bei der Meßnetzoptimierung, der Wahl der adäquaten Zählrahmen und bei der Einschätzung des Arbeitszeitbedarfs ist diese Software dann von Bedeutung.

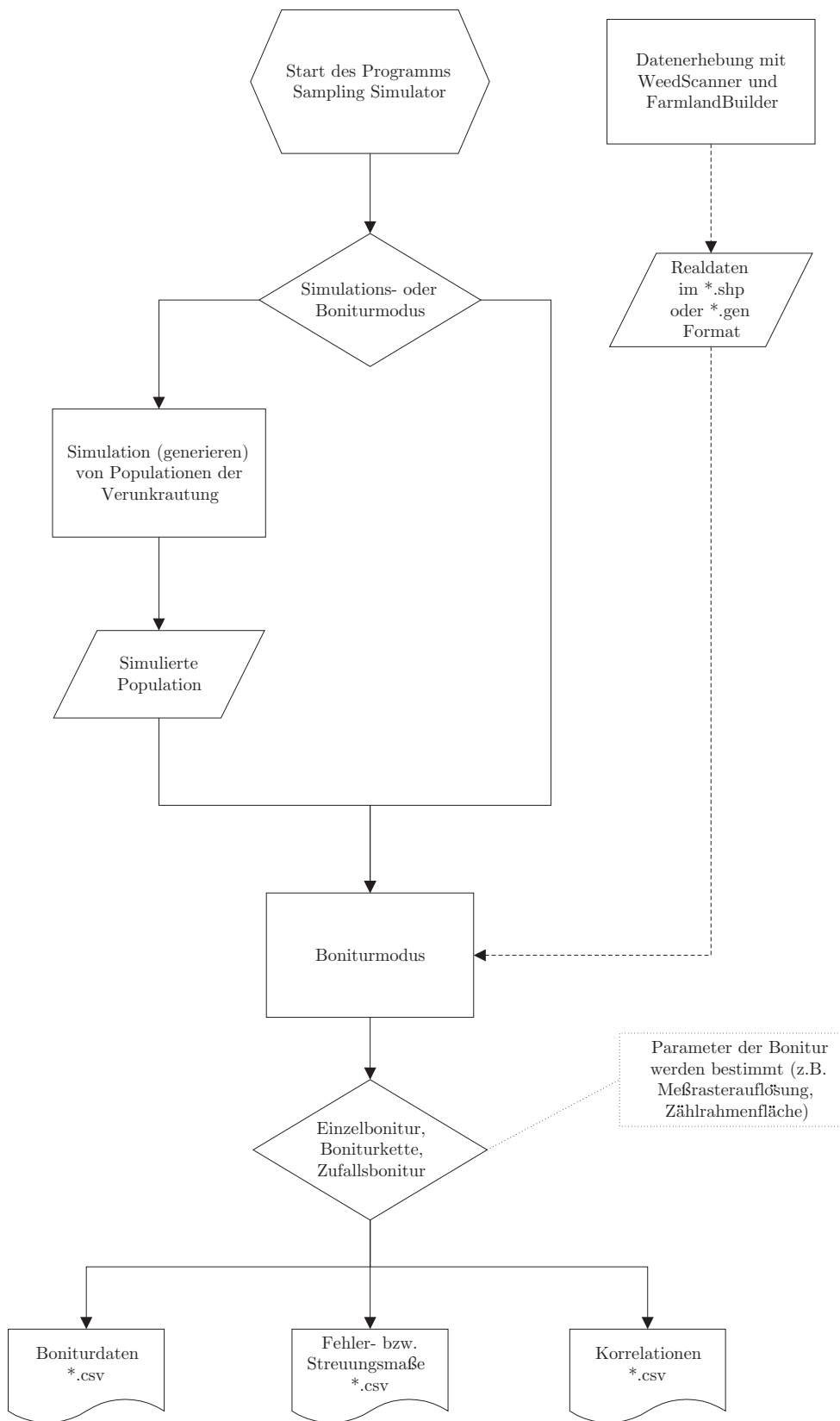


Abb. B.4: Arbeitsablauf im SAMPLING SIMULATOR.

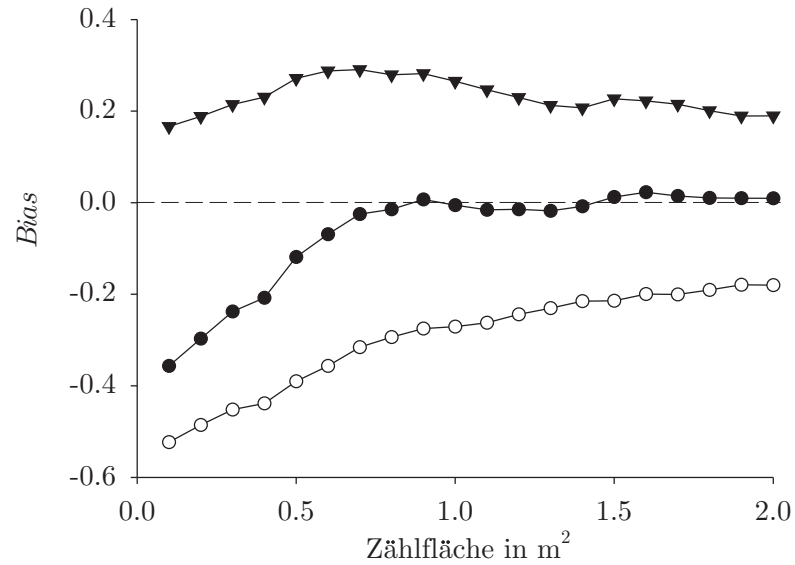


Abb. B.5: Aufteilung des *Bias* in positive und negative Abweichungen, hier am Beispiel von *Cirsium arvense* L. in einem Meßraster von 7x7 m. (Weiße Kreise: *Bias_{neg}*, schwarze Kreise: *Bias*, schwarze Dreiecke: *Bias_{pos}*).

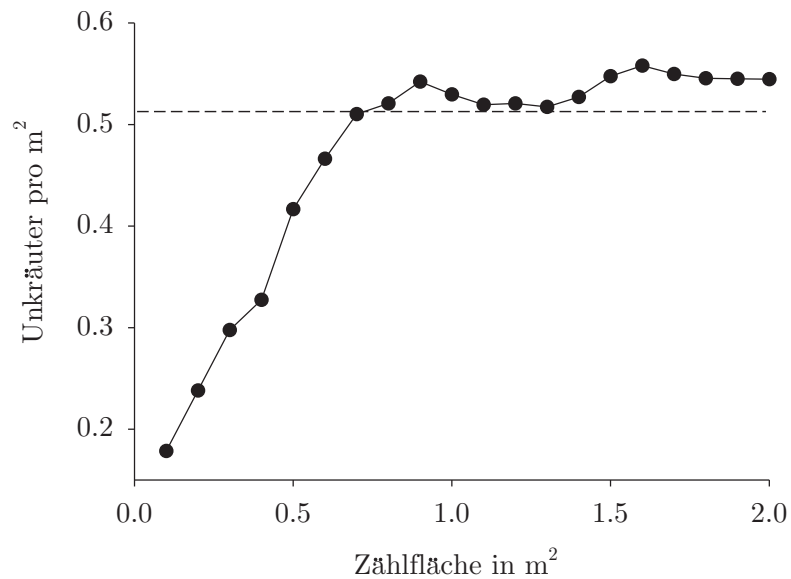


Abb. B.6: Schätzung der mittleren Verunkrautung der Gruppe der *Gräser* mit unterschiedlichen Zählflächen in einem Meßraster von 7x7 m. Die gestrichelte Linie zeigt die mittlere Verunkrautung (0,52 Pfl./m²) an.

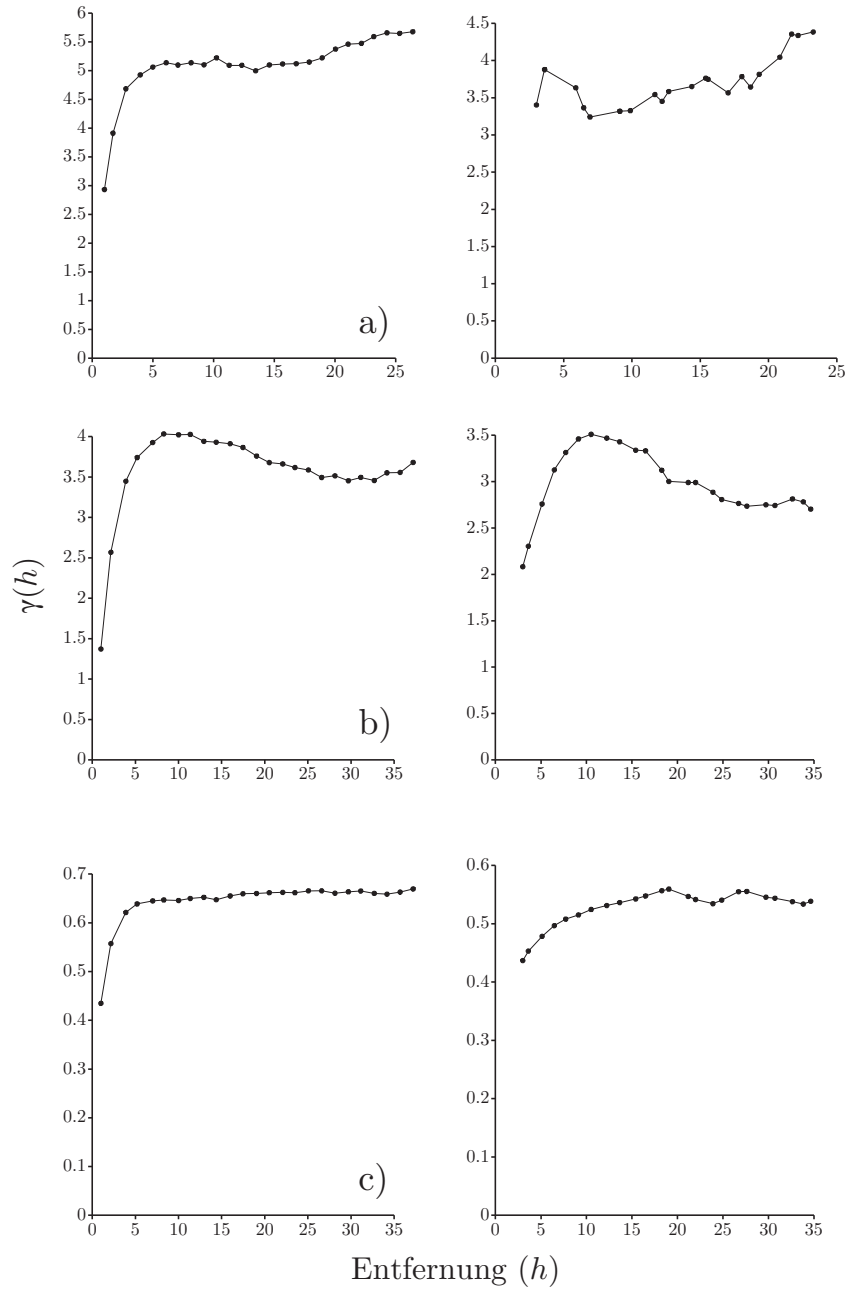


Abb. B.7: Semivariogramme der Unkrautarten: a) *Galium aparine* L. b) *Cirsium arvense* L. c) *Chenopodium album* L. Auf der linken Seite ist ein Meßraster von 1x1 m, auf der rechten Seite von 3x3 m verwendet worden. Der Zählrahmen hatte eine Größe von 1 m².

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei Herrn Prof. Plümer für die Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit bedanken.

Herrn Prof. Morgenstern und Herrn Prof. Kühbauch danke ich für die Übernahme des Ko-referats.

Ich danke allen Mitarbeitern des Instituts für Kartographie und Geoinformation der Universität Bonn, die mir im Verlauf der letzten Jahre stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben. Ganz besonders bedanke ich mich an dieser Stelle bei Dirk Dörschlag für seine Hilfe und Zusammenarbeit in vielen Projekten. Daniel Schumacher möchte ich besonders herzlich für die erfolgreiche Teamarbeit danken.

Dem Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau der Universität Bonn danke ich herzlich für die Bereitstellung von Boniturdaten vergangener Jahre. Ganz besonderer Dank gilt dabei meinen Kollegen Dominik Dicke, Jan Jacobi und Peter Krohmann. Herrn Prof. Gerhards möchte ich vielmals für die Unterstützung während der Suche nach einer Promotionsstelle danken.

Meiner Familie möchte ich für die vielfältige Unterstützung während der Zeit des Schreibens danken.

Meiner Freundin Martina gilt besonderer Dank dafür, daß Sie meine Launen während der Schreibarbeit geduldig ertragen hat.

Für die selbstlose Hilfe bei der Korrektur meiner Arbeit möchte ich mich außerdem bei allen Freunden und Bekannten, insbesondere aber bei Felix Jansen und Uta Friedrich bedanken.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG danke ich für die Finanzierung meiner Arbeit im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs 722 *Information Techniques for Precision Plant Protection in Agriculture and Horticulture*.

Index

Symbols

*.bmp	75
*.csv	77
*.gen	80, 120
*.shp	80, 120

A

Abschattung	99
Abtasttheorem	35
Acker-Fuchsschwanz	26
Acker-Kratzdistel	26
Ackergrenze	120, 122
Aggregation	26, 32, 123
Aggregationsindex	96
Algorithmus	25, 102
Allgemeiner Pflanzenbau	27, 61
Alopecurus myosuroides Huds.	26
Anisotropie	61
Applikation	19 ff., 26, 37 f., 100
Applikationsentscheidung	17, 21, 26, 66
Applikationskarte	17, 21, 26, 37 f., 101
Applikationstechnik	44, 102
Arbeitsaufwand	23
Arbeitszeitbedarf	123
ArcCatalog	37
ArcGIS	123
Artenzusammensetzung	24
Auflösung	32
Ausgabepfad	120
Ausgangsdaten	120
Aussageweite	55

B

Betriebsmitteleinsatz	16
Bewirtschaftungssektor	44
Bewirtschaftungszone	60, 66
Bias-Anteil	88
Bias-Fehler	84
Bildanalyse	98
bildanalytisches Verfahren	21, 23, 25, 27, 29 – 33, 97
Bildbearbeitungssoftware	30
Bildinformation	25
Bildkoordinate	76
Bildverarbeitung, digitale	25
Binomialverteilung	61
Blattfläche	26
Bodenart	16
Bodenerosion	15
Bodenvariabilität	17
Bonitur	120, 122

C

Camcorder	72
CCD-Kamera	26
Chenopodium album L.	31
Cirsium arvense L.	67
Comité Européen de Normalisation (CEN)	38
conditional element	40
Content Standard for Digital Geospatial Metadata (CSDGM)	37

D

Darstellungsoption	36
--------------------	----

- Dateikonvention 121
 Daten 120
 Datenaustausch 37
 Datenbank 29 f.
 Datenbestand 30
 Datenerfassung . 21, 23 f., 29, 31, 37, 39, 43,
 97 f., 100, 115, 117, 120 – 123
 Datenerfassung, automatische 122
 Datenerfassung 17
 Datenformat 36, 120
 Datengrundlage 27
 Datenhaltung 21
 Definitionsmenge 44
 Delaunay Triangulation 46
 DetectSpray[©] Verfahren 20
 Detektion 26
 Dienstleistungsunternehmen 38
 Dikopshof 27
 Diskriminierung 25
 Dokumentation 16 f., 21, 36 ff., 101
 Dreiecksvermaschung 46
 Dublin Core 38
- E
- Eingabemaske 37
 Einsparungspotential 15
 Einzelbild 26
 Element 39
 Endpunkt 121
 Entwicklungszyklus 15
 Erfassungsgenauigkeit 68
 Erfassungsmethodik 31, 97
 Erfassungspunkt 97, 100, 116
 Erfassungsstrategie 79
 Erfassungsvariante 121
 Erfassungsverfahren 98
 Erkennungsalgorithmus 30, 102
 Ernterückstände 61
 Ernteverlust 15
 Erstellungsdatum 39
 Erwartungswert 54
 ESRI 37, 120
- Europäische Kommission 16
 Experteninformation 39
 Expertenwissen 17, 20 f., 66, 100, 123
 exponentielles Modell 56
- F
- Farbinformation 26
 Farbparameter 26
 Farbraum 25
 FarmlandBuilder 71, 75, 98
 Federal Geographic Data Committee (FG-
 DC) 37
 Fehlapplikation 92
 Fehlentscheidung 97
 Fehlermaß 79 f., 122
 Fehlermaß, bereinigt 85
 Fehlermaß, kumulativ 89
 Fehlerquelle 97
 Fehlerquote 30
 Felderfolge 15
 Fernerkundung 26, 98
 Formparameter 26, 69
 Fourier Deskriptor 26, 69
 Frequenz 35
Fumaria officinalis 115
- G
- Göttinger Schätzrahmen 25, 29
 Gütemaß 46
Galium aparine L. 30, 67
 Gauss-Krüger Koordinate 76
 Geodaten 36 f., 40, 101
 Geoinformationssystem (GIS) . 16, 19 ff., 27,
 30, 36 f., 40, 43 ff., 67, 70, 77 ff., 97,
 123
 Geokoordinate 75
 Georeferenzierung 16
 Gesundheit 16
 Gewichtungsfaktor 45, 50, 52, 62 f.
 GIS-Software 123
 GPS 17 ff., 29, 66, 74
 Gräser 30

- Ground Truth Daten.....98
Grundgesamtheit 63
- H
- Harmonisierung.....39
Herbizid .. 15, 19 ff., 25 f., 34, 44, 62, 66, 70,
103
Herbizidapplikation 97
Herbizideinsparung 25
heterogen 15, 19
Histogramm.....31, 61
hochauflösend.....97
Hydro-N-Sensor.....17
- I
- Information.....37
Information, administrativ 38
Information, datenbezogen 39
Information, deduktive.....36
Information, raumbezogen 39
Infrarot26
Input 120
Inputdatei 120
Insekt 123
Integrierter Pflanzenschutz .. 25, 66, 98, 100
Interpolation 26 f., 44, 54, 102 f.
Interpolationsverfahren 21 f., 25, 30, 44, 52,
99 f., 102
Interpolationsverfahren, deterministisch 45,
100
Interpolationsverfahren, geostatistisch .. 45,
54, 100
Interpolationsvorschrift 43
Intrinsische Hypothese 55
Invarianz29, 97
Inventarisierung.....36
Inverse Distance Weighting.....46, 52
IrfanView 30
ISO 19115.....37 f., 101
ISO Standard.....39
Isolinie.....67
- K
- Kante 120
Karte 32, 49
Kartierung 20 f., 24, 46, 102 f.
Katalogsystem 36 f.
Kenngröße.....122
Kernelement 39 f.
Klassifizierung.....26, 36, 66
Klein-Altendorf 70
Kletten-Labkraut 30
Klumpeneffekt 56
Kontaktinformation 38
Konturlinie 26
Koordinate.....17, 29
Koordinatensystem 39
Korrelation 33
Korrelationskoeffizient 30, 92
Korrelationsmatrix.....34
Kreuzkorrelation 30, 116, 119
Kreuzungspunkt 29
Kreuzvalidierung 52, 61
Kriging.....54, 57, 99
Kulturpflanze.....15, 25, 99
- L
- Löß.....27
Landwirtschaft.....15
Leitunkraut 15, 19
Lineare Triangulation.....46
Linearkombination.....58
Luftbild.....26
- M
- MAD-Fehler 82
MAE-Fehler 84
Managementzone 19
mandatory element 40
manuelles Verfahren 23
MARE-Fehler.....85
Maximum.....86
Meßfehler 30, 56

Meßnetzoptimierung 123
 Meßraster 23 f., 27, 29, 46, 70, 97 f., 100
 Meßrasterabstand 79, 121
 Meßrasterauflösung 25
 Menu 120
 Metadaten 21, 36 ff., 40, 43, 101
 Metadatenelement 39, 101
 Metadatenhaltung 101
 Metadatenprofil 22, 40, 42
 Metadatenatz 38, 40
 Metadatenstandard 38 f.
 Mißdeutung 102
 Minimalanforderungen 40
 Minimalareal 25
 Minimum 86
 Modellierbarkeit 100
 Modellierbarkeit, mangelhafte 99
 Modellierung 45, 54 f., 100
 Modellierungsanweisung 102
 monokotyle Pflanzen 30
 MRE-Fehler 85
 MSE-Fehler 61
 Multispektrale Information 26
 Multispektrale Kameras 99

N

Nährstoffgehalt 16
 Nützlich 15, 66
 Nachbarschaftsbeziehung 45
 Nachbarschaftsumgebung 46
 Natural Neighbor Interpolation 30, 46
 Natural Neighbors Interpolation 50
 Nearest Feature Script 30
 Nematode 18 f., 123
 Nest 15, 32, 34, 102
 Niederschlagsmenge 70
 Normalverteilung 60
 Nugget 100
 Nuggeteffekt 56, 62
 Nutzergruppe 39
 Nutzfläche 44

O

offline-Verfahren 17, 20
 online-Applikation 26
 online-Verfahren 17, 20
 optional element 40
 Ordinary Point Kriging 58
 Ortsbezug 44, 54
 Ortsstabilität 19, 103
 Output 121

P

Panicum effusum 26
 Parabraunerde 70
 Parameter 51, 121
 Patchiness Index 91
 Pendelsensor 18
 Pestizid 16, 66
 Pflanzenassoziation 25
 Pflanzenkrankheit 15 f., 18, 99, 123
 Pflanzenproduktion 15
 Pflanzenschutz 18 f., 103
 Pflanzenschutzentscheidung 67
 Pflanzenschutzmittel 16 – 19, 66, 102
 Pflanzensoziologie 24, 98
 Pflichtelement 38, 40, 42
 Pflichtfeld 40
 Phänomen 97
 Poisson Verteilung 61
 Politik 37, 101
 Polygon 120
 Population 79
 populationsdynamisches Modell 98
 Präziser Pflanzenbau ... 16 – 21, 37, 40, 102
 Präziser Pflanzenschutz 21, 100
 Präzisionslandwirtschaft 23, 38, 40, 44
 Precision Farming 16
 Produktionsprozeß 17
 Profil 38 ff., 43
 Prognosegüte 92
 Progressive Scan Modus 73
 Projektion 39

- Prozess, räumlich-stochastisch.....55
 Punktdaten.....120
- Q
- Qualität.....36
- R
- räumliche Auflösung.....97
 räumliche Variabilität.....24
 Rückstandshöchstmengen.....16
 range.....55
 Rasterdaten.....30
 Raumbezug.....36
 recherchieren.....36
 Referenzfläche.....80
 Referenzpunkt.....74, 76
 Reflexionseigenschaft.....26
 regionalisierte Variable.....54
 Relief.....17
 Repräsentativität.....27, 97, 123
 RMSE-Fehler.....52, 61, 84, 97
 RMSRE-Fehler.....85
- S
- Sampling Simulator.....78, 97 f.
 Satellitenbild.....98
 Schädling.....15, 99
 Schätzfunktion.....59
 Schätzrahmen.....23
 Schätzvarianz.....57
 Schaden.....15
 Schadensabwehr.....16
 Schadenschwelle.....24 ff., 66 f., 100, 102 f.
 Schaderreger.....66
 Schadfaktor.....19, 62, 103
 Schadpotential.....15
 Schlüsselrolle.....97
 Schnittmenge.....39
 Schrittweite.....121
 Schwellenwert.....17, 21, 25, 55, 63, 67, 100
 Segmentierung.....26
 SelectSpray-Verfahren.....20
- Semivariogramm.....54 ff., 99 f.
 Semivariogrammanalyse.....54
 Sensor.....39
 Sensorinformation.....27
 Shapefile.....120
 Sicherheitsinformation.....39
 Signal.....35
 Signalverarbeitung.....35
 Signatur.....44
 sill.....55
 Simulation.....97, 120, 122 f.
 Simulationsmodus.....120
 Software.....122 f.
 Spektrometer.....18
 Spezialsoftware.....39
 sphärisches Modell.....56
 Spritzentscheidung.....60
 Stützpunkt.....24, 27, 45, 50, 55 f.
 Stützpunktauswahl.....32
 Stützstelle.....31
 Stabilität.....24
 Standard.....37 – 40
 Standardabweichung.....83
 Standardabweichungsanteil.....88
 Startpunkt.....34, 117, 121
 Stellaria media L.....116 f.
 stiching.....75 f.
 Stichprobe.....27, 29, 34, 66, 97 f., 103
 Stichprobenumfang.....121
 Stickstoffversorgung.....18
 Streuungsmaß.....80
 Struktur.....36
 Suchradius.....52, 63
 System, vernetztes.....37
- T
- Teilfläche.....16, 25, 62, 70
 teilflächenspezifisch.....97
 Totalherbizid.....20
 Trägerfahrzeug.....21, 26, 71
 Triangulation.....46

U

- Umweltfaktor 16
 Ungras 26
 Unified Modelling Language (UML) 40
 Unkraut . 15, 19 f., 25, 30, 62, 70, 97 ff., 102,
 120, 123
 Unkrautart 30, 102
 Unkrautdaten 51
 Unkrautdatenerfassungen 120
 Unkrautdetektion, bildanalytische 97
 Unkrautdichte 49, 51, 67, 100, 123
 Unkrautdichteklasse 49 – 52, 59
 Unkrauterfassung, georeferenziert 74
 Unkrauterfassung, simulierte 121
 Unkrauterfassungsdaten 38, 43
 Unkrautforschung 23
 Unkrautkarte 27
 Unkrautklasse 21
 Unkrautkontrolle 16, 20 f., 100, 103
 Unkrautkontrolle, teilflächenspezifisch 19 ff.,
 23 f., 26, 29, 37, 40, 45, 59, 62, 70,
 78, 100
 Unkrautnest 35, 59, 68, 96, 102 f., 123
 Unkrautnest, begriffliche Definition 102
 Unkrautpopulation 24, 78
 Unkrautverteilung 23, 120
 Unkrautverteilungskarte 16, 20 – 23,
 25 – 28, 30, 32, 34 f., 37 f., 43 f., 46,
 50, 52, 60 f., 97, 99 f., 102, 116, 119
 Unkrautvorkommen 26, 44
 Untersuchungsbereich 24
 Untersuchungsgebiet 45

V

- Variabilität 56, 62
 Variabilität, kleinräumige 100
 Varianz 55
 Varianzanteil 88
 Varianzfunktion 55
 Vegetationseinheit 24
 Vegetationsstandort 24

- Verknüpfungsmatrix 76
 Veronica-Arten 30
 Verschiebung 97
 Verschiebungsinvarianz 97
 Verteilung 122
 Verteilungskarte 17
 Verunkrautung ... 19, 23, 25, 31, 44, 54, 70,
 100
 Verunkrautung, mittlere 98
 Verunkrautungssituation . 23, 25, 27, 32, 50,
 97
 Verwendungszusammenhang 36
 Verwendungszweck 38
 Videosequenz 99
 Viola Arvensis L. 31
 Viola-Arten 30
 Virosen 15
 Visualisierung 44
 Vollerhebung 71, 74, 78
 Voronoi Region 46
 Vorschrift 44

W

- Wachstumsfaktor 15
 Wachstumsregler 18
 Wahrscheinlichkeit 54
 WeedScanner 71, 98 f.
 WeedSeeker[©] Verfahren 20
 Weißer Gänsefuß 30
 Winterweizen 70
 Wirtspflanzen 15
 Wissensbasis 26

Z

- Zählfläche 24
 Zählrahmen 21, 23, 80, 97 f., 120 f., 123
 Zählrahmengröße 78, 121
 Zeitfaktor 120
 Zuckerrübe 70
 Zufallsfunktion 55
 Zufallsvariable 54 f.
 Zusammenhang, räumlicher 100