

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Vegetationsökologie

Untersuchungen zur Ausbreitung von luftgetragenen Raps- und
Maispollen auf mesoskaliger Ebene für ein Langzeitmonitoring von
gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP)

Martin Kuhlmann

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. L. Trepl

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. J. Pfadenhauer
2. Univ.-Prof. Dr. M. Schilcher

Die Dissertation wurde am 13.08.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 07.12.2009 angenommen.

In Erinnerung an

meine Mutter

† 19.01.2009

Danksagung

Diese Doktorarbeit wäre ohne die Unterstützung von vielen Menschen nicht entstanden. An erster Stelle gilt mein herzlicher Dank meinem Doktorvater Prof. Dr. Jörg Pfadenhauer, der es mir zum einen ermöglichte die Doktorarbeit am Lehrstuhl für Vegetationsökologie anzufertigen, und zum anderen jederzeit durch Rat und Tat zur Seite stand. Für die Übernahme des Zweitgutachtens danke ich Herrn Prof. Dr. Schilcher. Für die langjährige Betreuung – auch nach Ihrem Wechsel von der TU München zum VDI – möchte ich Dr. Heike Beismann besonders herzlich danken. Zudem danke ich Prof. Dr. Jörg Schaller, der den Anstoß zu dieser Arbeit gab, sowie den Kollegen am Lehrstuhl für Vegetationsökologie für anregende Diskussionen, Hilfsbereitschaft und wertvolle Hinweise, insbesondere Dr. Albrecht Roller, Dr. Michael Heidl, Dr. Simon Scheiter und Dr. Harald Albrecht. Dankbar bin ich für die Hilfe von Frau Tork, Ingrid Kapps, Frau Bücherl sowie Frau Heilmeyer bei technischen, organisatorischen und administrativen Fragen.

Für die finanzielle Förderung des Bund-Länder-Modellprojekts gilt mein Dank dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz. Für die fachliche Betreuung möchte ich dem Umweltbundesamt und dem Bundesamt für Naturschutz, insbesondere in Person von Frank Berhorn, danken.

Für die gute Zusammenarbeit im Bund-Länder-Modellprojekt danke ich Frieder Hofmann (Ökologie Büro Hofmann), Volker Dietze, Herrn Heimann, Herrn Scharring und Herrn Dr. Schultz (zur Projektzeit alle Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Medizin-Meteorologie), Herrn Prof. Dr. Rogg (FH Weihenstephan) und Herrn Dr. Zeitler (zur Projektzeit am Bayerischen Landesamt für Umweltschutz).

Für die Unterstützung und Kooperation sowie die Bereitstellung von Daten und Messgeräten möchte ich mich bei Herrn Dr. Müller und Mitarbeitern (Versuchsgut Roggenstein der TU München), Herrn Heiles und Mitarbeitern (Staatliches Versuchsgut Puch), dem Planungsbüro Prof. Dr. Jörg Schaller, Herrn Köhler und Kollegen (Deutscher Wetterdienst, Regionales Gutachtenbüro München) sowie Herrn Dr. Richter (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) bedanken.

Die Durchführung der Feldversuche wäre ohne die Hilfe der (studentischen) Hilfskräfte Andreas Brem, Andrea Helmer, Derya Kilislioglu, Claudia Kimmig, Gergö Kiszela, Fernando Lopes de Souza, Renate Mann, Georg Mayerhofer, Wolfgang Qual, Christian Riessen, Rüdiger Scheffer, Tina Schlossorsch, Manuel Schweiger, Holm Seifert, Dr. Andrea Zellhuber nicht möglich gewesen, vielen Dank. Ebenso gilt mein Dank den vielen Landwirten in der Region Fürstenfeldbruck, die einer Aufstellung der Pollensammler zugestimmt haben.

Hervorheben möchte ich die Unterstützung von Stefan Marzelli (ifuplan, München), der mir ermöglichte kurze Auszeiten vom Berufsleben zu nehmen, um die Arbeit zum Abschluss zu bringen.

Tina Schlossorsch und Anne Pendzich danke ich für Ihre Hilfe während der stressigen Zeit der Feldversuche und der Abgabe des Projektberichts.

Meinen Eltern möchte ich für den immerwährenden Rückhalt und die Förderung und Unterstützung in jedem Lebensabschnitt danken. Dir, liebe Caroline, danke ich für Deine Beharrlichkeit, Deine Unterstützung, Deine Rücksichtnahme und Deine Geduld mit mir in der Endphase der Bearbeitung der Doktorarbeit und dafür, dass wir seit Anfang des Jahres zu Dritt auf dieser Welt sind.

Abschließend sei allen Personen gedankt, die mich in all den Jahren bewusst oder unbewusst motiviert haben, diese Arbeit anzufertigen und zu beenden.

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG	1
1.1	Gentechnik	1
1.2	Gentechnik in der Landwirtschaft	1
1.2.1	Eigenschaften von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP)	1
1.2.2	Risiken von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP)	2
1.2.3	Ökologischer Schaden	2
1.2.4	Gesetzliche Grundlagen für GVP in der EU und Deutschland	4
1.2.5	Anbau von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP) weltweit	5
1.3	Monitoring von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP)	5
1.3.1	Monitoring - allgemein	5
1.3.2	GVP-Monitoring	6
1.3.2.1	Risikountersuchung	6
1.3.2.2	Überwachungsplan (monitoring plan)	7
1.3.2.3	Fallspezifische Überwachung (case-specific monitoring)	7
1.3.2.4	Allgemeine überwachende Beobachtung (general surveillance)	7
1.4	Pollen	8
1.4.1	Geschichte	8
1.4.2	Allergene Wirkung	8
1.4.3	Biologische Funktion	9
1.4.4	Morphologie der Pollen und Aufbau der Pollenwand	10
1.4.5	Pollenproduktion, Größe, Masse, Sinkgeschwindigkeit	12
1.4.6	Pollenentwicklung, Pollenemission und Lebensdauer	13
1.4.7	Pollenmessung	14
1.4.7.1	Depositionsprozesse	14
1.4.7.2	Messgeräte	15
1.4.7.3	Messgrößen	18
1.4.7.4	Messort	18
1.4.8	Pollentransport in der Troposphäre	19
1.4.9	Zusammenhang zwischen luftgetragendem Pollen, Meteorologie und Pollendeposition	21
1.4.10	Untersuchungen zum Pollenflug auf mesoskaliger Ebene	25
1.4.11	Untersuchungen zum Pollenflug der Kulturpflanzen Raps und Mais	26
1.4.12	Biologischer Pollentransport	29
1.4.13	Modelle zur Vorhersage und Ausbreitung von Pollen	30
1.5	Raum- / Zeitskalen	31
2	FRAGESTELLUNG	32
2.1	Hintergrund	32

2.2	Inhaltliche Abgrenzung der Untersuchung.....	33
2.3	Räumliche Abgrenzung der Untersuchung.....	33
2.4	Zeitliche Abgrenzung der Untersuchung	33
2.5	Randbedingungen der Untersuchung.....	33
3	MATERIAL UND METHODE.....	34
3.1	Kulturpflanzen	34
3.1.1	Raps (<i>Brassica napus</i> L.)	34
3.1.1.1	Botanik	34
3.1.1.2	Blüte	35
3.1.1.3	Wind-/Insektenbestäubung	35
3.1.1.4	Pollen.....	36
3.1.1.5	Landwirtschaftliche Praxis	36
3.1.2	Mais (<i>Zea mays</i> L.)	38
3.1.2.1	Botanik	38
3.1.2.2	Blüte	39
3.1.2.3	Wind-/Insektenbestäubung	39
3.1.2.4	Pollen.....	40
3.1.2.5	Landwirtschaftliche Praxis	41
3.2	Technische Pollensammler	42
3.2.1	Bau und Funktion	42
3.2.1.1	Sigma-2	42
3.2.1.2	Pollenmassenfilter (PMF).....	43
3.3	Analytik von Pollenproben.....	44
3.3.1	Nachweisgrenzen der mikroskopischen Pollenanalyse	44
3.3.1.1	Sigma-2	44
3.3.1.2	Pollenmassenfilter (PMF).....	45
3.3.2	Molekulargenetische Pollenanalyse	45
3.4	Untersuchungsgebiet.....	45
3.4.1	Gebietsbeschreibung	45
3.4.1.1	Lage	45
3.4.1.2	Naturraum.....	46
3.4.1.3	Klima.....	47
3.4.1.4	Landnutzung.....	48
3.4.2	Geografisches Informationssystem (GIS) und räumliche Daten	49
3.4.2.1	Meteorologische Messnetze	49
3.4.2.2	Meteorologische Flächendaten	51
3.4.2.3	Sonstige Daten.....	51

3.5	Feldversuche 2003.....	51
3.5.1	Repräsentativität und Raumrepräsentativität	51
3.5.2	Messplanung zur Auswahl repräsentativer Pollensammler-Standorte	53
3.5.2.1	Untersuchung der Punktverteilung der Sammlerstandorte	55
3.5.3	Probenahme	55
3.5.4	Meteorologische Messstationen.....	56
3.5.5	Bewertung der Witterungsverhältnisse für den Pollenflug	57
3.5.6	Kartierung der Raps- und Maisfelder.....	58
3.5.6.1	Felderkartierung	58
3.5.6.2	Fernerkundung	58
3.5.6.3	Abstandsanalyse.....	59
3.6	Räumliche Analysen zur Untersuchung der Pollendeposition (mikroskalig).....	60
3.6.1	Abstand zwischen Pollensammler und nächstem Feld	60
3.6.2	Pollendepositionsindex (PDI) – Berechnung des Einflusses mehrerer Felder	60
3.7	Räumliche Analysen zur Untersuchung der Pollendeposition (Regionalisierung).....	63
3.7.1	Geostatistik	63
3.7.1.1	Theorie der regionalisierten Variablen.....	64
3.7.1.2	Semivariogramm	64
3.7.1.3	Kriging	65
3.7.2	GIS-gestützte Regionalisierung – Entfernung zum nächsten Feld.....	65
3.7.3	GIS-gestützte Regionalisierung – Pollendepositionsindex	66
3.7.4	Ausbreitungsmodell AUSTAL2000.....	66
4	ERGEBNISSE	70
4.1	Feldversuche 2003.....	70
4.1.1	Auswahl repräsentativer Pollensammler-Standorte	70
4.1.1.1	Geschichtete Stichprobe	70
4.1.1.2	Relevanz der Strata für ein Pollenmonitoring	72
4.1.1.3	Alternative Datensätze für die Strata.....	75
4.1.1.4	Untersuchung der räumlichen Verteilung der Sammlerstandorte.....	76
4.1.1.5	Raumrepräsentativität der Sammlerstandorte bezüglich Feldabstand	77
4.1.1.6	Alternatives Stichprobenverfahren – Das Multidimensionale Nachbarschafts- Repräsentanzmaß (MNR).....	78
4.1.2	Kartierung der Raps- und Maisfelder.....	80
4.1.2.1	Felderkartierung	80
4.1.2.2	Fernerkundung	81
4.1.2.3	Abstandsanalyse.....	83
4.1.3	Klimatisch-meteorologische Verhältnisse	84
4.1.3.1	Allgemeine Witterungsverhältnisse.....	84
4.1.3.2	Allgemeine phänologische Beobachtungen zu Raps und Mais	84
4.1.3.3	Windrichtung.....	86
4.1.3.4	Windgeschwindigkeit.....	87

4.1.3.5	Temperatur, Feuchte, Niederschlag und Globalstrahlung	89
4.1.3.6	Bewertung der Witterungsbedingungen für den Pollenflug	91
4.1.4	Analyse der Pollenproben	93
4.1.4.1	Bildanalyse der Sigma-2-Proben	93
4.1.4.2	Bildanalyse der PMF-Proben.....	94
4.1.5	Räumliche und zeitliche Verteilung der Nachweise von Raps- und Maispollen.....	95
4.1.6	Vergleich der Pollensammler Sigma-2 und PMF.....	97
4.1.7	PCR-Analyse der PMF-Proben	98
4.2	Räumliche Analysen zur Pollendeposition (mikroskalig)	100
4.2.1	Abstand zwischen Pollensammler und nächstem Feld.....	100
4.2.2	Flächengröße und Lage der Felder im Umkreis der Pollensammler	104
4.2.3	Einfluss der Flächengröße, Richtung und Entfernung der Felder im Umkreis der Pollensammler auf die Pollendeposition - Berechnungen mit dem Pollendepositionsindex (PDI).....	106
4.2.3.1	Flächengröße und Entfernung der Raps- und Maisfelder	106
4.2.3.2	Flächengröße, Entfernung und Richtung der Raps- und Maisfelder.....	107
4.2.3.3	Flächengröße, Entfernung (inkl. Ausbreitungsfunktion) und Richtung der Raps- und Maisfelder.....	108
4.2.4	Räumliche Analysen zur Pollendeposition (mesoskalig)	113
4.2.5	Geostatistische Interpolation	113
4.2.6	GIS-gestützte Regionalisierung - Entfernung zum nächsten Feld.....	114
4.2.7	GIS-gestützte Regionalisierung - Pollendepositionsindex	115
4.2.8	Ausbreitungsmodell AUSTAL2000.....	116
5	DISKUSSION.....	118
5.1	Pollenmessung auf mesoskaliger Ebene mit GVP-Hintergrund	118
5.2	Analytik der Pollenproben	118
5.2.1	Bildanalyse der Sigma-2- und PMF-Proben.....	118
5.2.1.1	Identifizierung von Raps- und Maispollen	118
5.2.1.2	Auswertungsmethoden und Zählfehler bei Pollenproben	119
5.2.1.3	Auswertungsmethode und Zählfehler der Sigma-2-Proben.....	120
5.2.1.4	Auswertungsvolumina und Zählfehler der PMF-Proben	121
5.2.2	Messunsicherheit der Pollensammler Sigma-2 und PMF.....	121
5.2.3	Raps- und Maispollennachweise mit den Pollensammlern Sigma-2 und PMF	122
5.2.4	Vergleich der Pollensammler Sigma-2 und PMF.....	123
5.2.5	PCR-Analyse der PMF-Proben	124
5.3	Feldversuche 2003	125
5.3.1	Auswahl repräsentativer Pollensammler-Standorte.....	125
5.3.1.1	Geschichtete Stichprobe	125
5.3.2	Kartierung der Raps- und Maisfelder.....	126
5.3.2.1	Felderkartierung	126
5.3.2.2	Satellitenbilddauswertung	127

5.3.2.3	Abstandsanalyse und Koexistenz von GVO- und konventioneller Landwirtschaft	128
5.4	Räumliche Analysen zur Untersuchung der Pollendeposition (mikroskalig)	130
5.4.1	Abstand zwischen Pollensammler und nächstem Feld	130
5.4.2	Einfluss der Flächengröße, Richtung und Entfernung der Felder im Umkreis der Pollensammler auf die Pollendeposition - Berechnungen mit dem Pollendepositionsindex (PDI)	131
5.5	Räumliche Analysen zur Untersuchung der Pollendeposition (Regionalisierung).....	133
5.5.1	Geostatistische Modellierung.....	133
5.5.2	GIS-gestützte Regionalisierung – Entfernung zum nächsten Feld.....	134
5.5.3	GIS-gestützte Regionalisierung – Pollendepositionsindex	135
5.5.4	Ausbreitungsmodell AUSTAL2000.....	135
5.5.5	Vergleich der Modelle zur Regionalisierung der Messwerte der Pollendeposition	136
6	AUSBLICK	139
6.1	GVP-Monitoring	139
6.2	GVP-Pollenmonitoring – Messnetzplanung und Messung	139
7	ZUSAMMENFASSUNG	142
7.1	Zusammenfassung	142
7.2	Summary	145
8	LITERATUR	150
ANHANG	172

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Elektronenmikroskopische Aufnahme von Pollen	11
Abb. 1.2: Einflussfaktoren der Deposition von Pollen windblütiger Pflanzen	24
Abb. 3.1: Blütenstand von Raps und Mais	34
Abb. 3.2: Anteil von Raps und Mais an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern	37
Abb. 3.3: Anordnung der Pollensammler Sigma-2 (Mitte) und PMF (oben und unten, mit Schlauchverbindung)	43
Abb. 3.4: Lage des Untersuchungsgebietes	46
Abb. 3.5: Temperatur- und Niederschlagsdiagramm von Augsburg-Mühlhausen, München-Riem und Freising-Weihenstephan (Müller-Westermeier 1996)	48
Abb. 3.6: Ausbreitungsfunktionen zur Gewichtung der Entfernung zwischen Pollensammler und Raps- bzw. Maisfeld	62
Abb. 3.7: Schematisches Semivariogramm mit Kenngrößen	65
Abb. 4.1: Stratum Orografie - Vergleich der geplanten und realisierten Standorte	71
Abb. 4.2: Stratum landwirtschaftliche Nutzung - Vergleich der geplanten und realisierten Standorte	72
Abb. 4.3: Vergleich der Ökologischen Raumklassen mit den Naturräumlichen Haupteinheiten im Untersuchungsgebiet	75
Abb. 4.4: MNR (RI) der Kartenebene „naturräumlichen Haupteinheiten“ des Untersuchungsgebietes (Nachbarschaftsradius = 100 m, entspricht 7 x 7 Rasterzellen)	78
Abb. 4.5: Vergleich der Kartierung (gelber Umriss) und Klassifizierung (rote Pixel) von Raps: Echtfarbendarstellung, Kanäle 3, 2, 1 (links) und MDC-Klassifizierung (rechts) eines Ausschnitts der IKONOS-Szene	82
Abb. 4.6: Beginn der Blüte (Kalendertag bzw. Temperatursumme) von Raps (a) und Mais (b) in Freising-Weihenstephan im mehrjährigen Mittel	85
Abb. 4.7: Verteilung der Windrichtung (Rapsversuch): (a) DWD-Station Landsberg/Lech, (b) BW-Station Fürstenfeldbruck, (c) DWD-Station Landsberg/Lech (während Versuchszeitraum mit der höchsten Rapspollendeposition (87% der Gesamt-Rapspollen))	86
Abb. 4.8: Verteilung der Windrichtung (Maisversuch): (a) DWD-Station Landsberg/Lech, (b) BW-Station Fürstenfeldbruck, (c) DWD-Station Landsberg/Lech (während Versuchszeitraum mit der höchsten Maispollendeposition (92% der Gesamt-Maispollen))	87
Abb. 4.9: Tagesmittel der Windgeschwindigkeit von Messstationen in und außerhalb des Untersuchungsgebietes während des Rapsversuchs (Unterteilung: Expositionsdauer Sigma-2-Sammler, 17.-20. Woche)	88
Abb. 4.10: Tagesmittel der Windgeschwindigkeit von Messstationen in und außerhalb des Untersuchungsgebietes während des Maisversuch (Unterteilung: Expositionsdauer Sigma-2-Sammler, 27.-30. Woche)	88
Abb. 4.11: Tagesmittel der Lufttemperatur von Messstationen im Untersuchungsgebiet während des Rapsversuchs	91
Abb. 4.12: Tagesmittel der Lufttemperatur von Messstationen im Untersuchungsgebiet während des Maisversuchs	92
Abb. 4.13: Sigma-2: Mittlere Pollendepositionsraten für verschiedene Pollenspezies während der Blühphase (a) des Raps 2003, (b) des Mais 2003	93
Abb. 4.14: Korrelation der Rapspollenanzahl von Sigma-2 mit PMF (95%-Konfidenzintervall; n = 13)	99
Abb. 4.15: Korrelation der Maispollenanzahl von Sigma-2 mit PMF (95%-Konfidenzintervall; n = 25)	99

Abb. 4.16: PMF: Korrelation der Rapspollenzahl mit dem Anteil an den Gesamtpollen (95%-Konfidenzintervall; n = 44)	99
Abb. 4.17: PMF: Korrelation der Maispollenzahl mit dem Anteil an den Gesamtpollen (95%-Konfidenzintervall; n = 49)	99
Abb. 4.18: Rapspollendepositionsrates (Sigma-2) in Abhängigkeit vom nächsten Rapsfeld und vom Zeitpunkt (Standorte = 15, Probenanzahl = 20)	101
Abb. 4.19: Maispollendepositionsrates (Sigma-2) in Abhängigkeit vom nächsten Maisfeld und vom Zeitpunkt (Standorte = 26, Probenanzahl = 52)	102
Abb. 4.20: Rapspollenfluss (PMF) in Abhängigkeit vom nächsten Rapsfeld (n=44).....	102
Abb. 4.21: Maispollenfluss (PMF) in Abhängigkeit vom nächsten Maisfeld (n=49).....	103
Abb. 4.22: Summierte Fläche der Raps- und Maisfelder im Umkreis der Pollensammlerstandorte.....	104
Abb. 4.23: Flächenverteilung der Rapsfelder im Umkreis der Rapspollensammler entsprechend der Himmelsrichtung	105
Abb. 4.24: Flächenverteilung der Maisfelder im Umkreis der Maispollensammler entsprechend der Himmelsrichtung	105
Abb. 4.25: Rangkorrelation der Rapspollendeposition (Sigma-2 bzw. PMF) mit der summierten Fläche der Rapsfelder je 45°-Windrichtungssektor.....	107
Abb. 4.26: Rangkorrelation der Maispollendeposition (Sigma-2 bzw. PMF) mit der summierten Fläche der Maisfelder je 45°-Windrichtungssektor.....	108
Abb. 4.27: Rangkorrelation der gemessenen (Sigma-2) und der berechneten (PDI Formel 1 und 15) Rapspollendeposition im Umkreis der Sammlerstandorte mit Signifikanzschranken nach Zar (1999)	109
Abb. 4.28: Rangkorrelation der gemessenen (PMF) und der berechneten (PDI Formel 1 und 16) Rapspollendeposition im Umkreis der Sammlerstandorte mit Signifikanzschranken nach Zar (1999)	110
Abb. 4.29: Rangkorrelation der gemessenen (Sigma-2) und der berechneten (PDI Formel 1 und 21c) Maispollendeposition im Umkreis der Sammlerstandorte mit Signifikanzschranken nach Zar (1999)	111
Abb. 4.30: Rangkorrelation der gemessenen (PMF) und der berechneten (PDI Formel 1 und 21c) Maispollendeposition im Umkreis der Sammlerstandorte mit Signifikanzschranken nach Zar (1999)	111
Abb. 4.31: Berechnung der Pollendeposition im Untersuchungsgebiet nach der „Entfernung zum nächsten Feld“ (basierend auf den Rapsfeldern 2003).....	114
Abb. 4.32: Berechnung der Pollendeposition im Untersuchungsgebiet nach dem „Pollendepositionsindex PDI“ (basierend auf den Rapsfeldern 2003)	115
Abb. 4.33: Berechnung der Pollendeposition im Untersuchungsgebiet nach „AUSTAL2000“ (basierend auf den Rapsfeldern 2003).....	117
Abb. 5.1: 95%-Vertrauensbereich (VB) für das Zählergebnis der Sigma-2-Proben nach Poisson-Verteilung (VB nach Sachs 1997: 446)	120

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1: Anpassungssyndrom anemophiler und zoophiler Blütenpflanzen nach Leins (2000)	10
Tab. 1.2: Messgeräte zur Erfassung von luftgetragenen Pollen (Auswahl)	17
Tab. 1.3: Abhängigkeit der Pollenkonzentration/Pollendeposition von meteorologischen Messgrößen	22
Tab. 1.4: Übersicht (Auswahl) über Konzentrations- oder Depositionsmessungen von Pollen auf mesoskaliger Ebene mittels technischer Pollensammler	25
Tab. 1.5: Übersicht (Auswahl) über Konzentrations- oder Depositionsmessungen von Raps- und Maispollen mittels technischer Pollensammler	26
Tab. 1.6: Übersicht (Auswahl) über Untersuchungen zur Auskreuzung von Raps und Mais	28
Tab. 3.1: Pollenproduktion von Mais	40
Tab. 3.2: Anteil von Raps und Mais an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland, Bayern und im Landkreis Fürstentfeldbruck	42
Tab. 3.3: Naturräumliche Haupteinheiten im Untersuchungsgebiet	46
Tab. 3.4: Prozentuale Verteilung der Landnutzungstypen im Untersuchungsgebiet	49
Tab. 3.5: Rapsversuch: Expositionsdauer der Sigma-2- und PMF-Proben 2003	55
Tab. 3.6: Maisversuch: Expositionsdauer der Sigma-2- und PMF-Proben 2003	56
Tab. 3.7: Stationsinformationen	57
Tab. 3.8: Bewertungsskala für die einzelnen meteorologischen Messgrößen	57
Tab. 3.9: Gesamtbewertung der Pollenflugbedingungen	58
Tab. 3.10: Vergleich der Eingabeparameter für die Berechnung der Raps- und Maispollenausbreitung auf mesoskaliger Ebene	69
Tab. 4.1: Aufteilung der Pollensammler auf die naturräumlichen Haupteinheiten im Untersuchungsgebiet	70
Tab. 4.2: Geländehöhe im Untersuchungsgebiet und an den Pollensammlerstandorte - Lagemaße der Verteilung und Standardabweichung	71
Tab. 4.3: Rangkorrelation der Orografie (DGM) mit der Meteorologie (Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Sonnenscheindauer) im Untersuchungsgebiet (n = 256)	73
Tab. 4.4: Prozentualer Flächenanteil der Raps- und Maisfelder bezogen auf die Landnutzung	74
Tab. 4.5: Nearest Neighbour Analyse für die Standorte der Raps- und Maispollensammler	77
Tab. 4.6: Lagemaße der Verteilung der Pollensammler-Standorte und eines Rasters bezüglich der „Entfernung zum nächsten Feld“ innerhalb des landwirtschaftlich genutzten Raums	77
Tab. 4.7: Beschreibende Statistik zu den Rapsfeldern bezogen auf die naturräumlichen Haupteinheiten	80
Tab. 4.8: Beschreibende Statistik zu den Maisfeldern bezogen auf die naturräumlichen Haupteinheiten	81
Tab. 4.9: Korrelationskoeffizienten für alle Kanalkombinationen (LANDSAT-7)	82
Tab. 4.10: Korrelationskoeffizienten für alle Kanalkombinationen (IKONOS)	82
Tab. 4.11: Entfernung (m) zum nächsten Raps- bzw. Maisfeld im landwirtschaftlich genutzten Raum des Untersuchungsgebiets im Jahr 2003	83
Tab. 4.12: Vergleich der meteorologischen Monatsmittelwerte 2003 mit dem langjährigen Mittel an den Stationen Augsburg, Freising und Landsberg/Lech	84
Tab. 4.13: Vegetationsentwicklung von Raps und Mais im Jahr 2003 in Freising-Weihenstephan	85
Tab. 4.14: Korrelation der Tagesmittel der Windgeschwindigkeit von Messstationen in und außerhalb des Untersuchungsgebietes	89
Tab. 4.15: Korrelation der meteorologischen Tageswerte (Rapsversuch) von Messstationen im Untersuchungsgebiet (n = 29)	89

Tab. 4.16: Korrelation der meteorologischen Tageswerte (Maisversuch) von Messstationen im Untersuchungsgebiet (n = 28).....	90
Tab. 4.17: Bewertung der Witterungsbedingungen für den Pollenflug (Rapsversuch)	92
Tab. 4.18: Bewertung der Witterungsbedingungen für den Pollenflug (Maisversuch)	93
Tab. 4.19: PMF: Anzahl der Raps-/Maispollen und Gesamtpollen	95
Tab. 4.20: Nachweis von Raps- und Maispollen in den Proben der Pollensammler Sigma-2 und PMF	95
Tab. 4.21: Wöchentliche Deposition (Pollen/200 mm ²) an Raps- und Gesamtpollen (Sigma-2).....	96
Tab. 4.22: Wöchentliche Deposition (Pollen/324 mm ²) an Mais- und Gesamtpollen (Sigma-2).....	96
Tab. 4.23: Sammelleistung von Sigma-2 und PMF (alle Proben >NWG) hinsichtlich Raps- und Maispollen	97
Tab. 4.24: Korrelation von Sigma-2 (Deposition) mit PMF (Anzahl/Probe)	97
Tab. 4.25: Entfernung der Pollensammler-Standorte zum nächsten Raps- bzw. Maisfeld.....	100
Tab. 4.26: Korrelation der Pollenanzahl von Sigma-2 und PMF mit der Entfernung zum nächsten Raps- bzw. Maisfeld.....	103
Tab. 4.27: Rangkorrelation der berechneten (PDI) und der gemessenen (Sigma-2 und PMF) Deposition von Raps- und Maispollen.....	112
Tab. 4.28: Moran's I Statistik für die Raps- und Maispollensammler (Sigma-2 und PMF).....	113
Tab. 4.29: Korrelation der gemessenen und berechneten Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene nach der Methode „Entfernung zum nächsten Feld“.....	115
Tab. 4.30: Korrelation der gemessenen und berechneten Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene nach der Methode „Pollendepositionsindex PDI“	116
Tab. 4.31: Korrelation der gemessenen und berechneten Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene nach der Methode „AUSTAL2000“.....	117
Tab. 5.1: Unsicherheitsparameter nach VDI 4219 (2005) für die Rapspollenmessung mit Pollensammler Sigma-2	122
Tab. 5.2: Korrelation der gemessenen und berechneten Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene – Vergleich von drei Ansätzen zur Regionalisierung.....	137
Tab. 5.3: Vergleich der Modelle zur Regionalisierung der Messwerte der Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene	137

Abkürzungsverzeichnis

*	signifikante Korrelation ($p < 0,05$)	DGM	Digitales Geländemodell
**	signifikante Korrelation ($p < 0,01$)	DIH	Donau-Isar-Hügelland
***	signifikante Korrelation ($p < 0,001$)	DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
AG	Arbeitsgemeinschaft	DNA	Deoxyribonucleic Acid
AI	ArcInfo, GIS-Software (ESRI)	DNS	Desoxyribonukleinsäure
AKTerm	Ausbreitungsklassen-Zeitreihe	DWD	Deutscher Wetterdienst, Offenbach (Zentrale)
ALH	Ammer-Loisach-Hügelland	EFSA	European Food Safety Authority
AML	Arc Macro Language	ESRI	Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, USA
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	EU	Europäische Union
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission & Reflection Radiometer	EUROMAP	Euromap, Satellitendaten-Vertriebsgesellschaft mbH, Neustrelitz
ATCOR	Atmospheric Correction, Fernerkundungssoftware (Leica Geosystems)	F&E	Forschung & Entwicklung
ATKIS©	Amtliches Topographisches Kartographisches Informationssystem	FFB	Fürstfeldbruck
AV	ArcView, GIS-Software (ESRI)	FFBH	Fürstfeldbrucker Hügelland
BfN	Bundesamt für Naturschutz, Bonn	FFH	Flora-Fauna-Habitat
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung, Berlin	GAF	GAF AG, München
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt/M.	GFMM	Geschäftsfeld Medizin-Meteorologie des DWD, Freiburg
BLVA	Bayerisches Landesvermessungsamt, München	GK (9°E)	Gauß-Krüger-Koordinatensystem (Hauptmeridian: 9°E), Bezugselipsoid: Bessel 1841, Datum: Potsdam
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn, Berlin	GK (12°E)	Gauß-Krüger-Koordinatensystem (Hauptmeridian: 12°E), Bezugselipsoid: Bessel 1841, Datum: Potsdam
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, Bonn	GMT	Greenwich Mean Time
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Bonn, Berlin	GPS	Global Positioning System
Bt	<i>Bacillus thuringiensis</i>	GR	Globalstrahlung
BVL	Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, Bonn	GV	gentechnisch verändert
BW	Bundeswehr	GVO	gentechnisch veränderte Organismen
CEN	Comité Européen de Normalisation	GVP	gentechnisch veränderte Pflanzen
CORINE	Coordinated Information on the European Environment	HR	Herbizidresistenz
Ct	Threshold Cycle	IAA	International Association for Aerobiology
		IARA	International Aerosol Research Assembly
		InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
		IRS	Indian Remote Sensing

k.A.	keine Angaben	PDI	Pollendepositionsindex
KRdL	Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN	PK	Pollenkorn
L.	Carl von Linné	PM	Staub allgemein
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising	PMF	Pollenmassenfilter
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg (bis 31.7.2005 Bayerisches Landesamt für Umweltschutz)	PNV	potenziell natürliche Vegetation
LfStaD	Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung, München	r	Korrelationskoeffizient nach Pearson
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität München	r _s	Rang-Korrelationskoeffizient nach Spearman
LW	Blattnässe	RAIN	Niederschlag
max.	maximal	RH	Relative Luftfeuchte
MDC	Mahalanobis Distance Classifier	RI	Repräsentanzindex
ME	Median	S	Süd
ME	Münchener Ebene	S	Summe
MI	Mittelwert	S.	Seite
min.	minimal	SO	Südost
MIR	Mid Infrared / mittleres Infrarot	SPOT	Système Pour l'Observation de la Terre
MNR	Multidimensionales Nachbarschafts-Repräsentanzmaß	SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
MS	Microsoft, Redmond, WA, USA	SRU	Rat von Sachverständigen für Umweltfragen
MS	multispektral	StMLF	Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, München
N	Nord	StMUGV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, München
NASA	National Aeronautics and Space Administration	StMWIVT	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, München
NIR	Near Infrared / nahes Infrarot	StMWVT	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie, München
NN	Normalnull	SW	Südwest
NO	Nordost	T _n	Normtemperatur der Luft
n.s.	nicht signifikant	TA	Lufttemperatur
NW	Nordwest	TA	Technische Anleitung
NWG	Nachweisgrenze	TIF(F)	Tagged Image File Format
O	Ost	TIN	Triangulated Irregular Network (Dreiecksvermaschung)
ÖFS	Ökologische Flächenstichprobe	TIR	Thermal Infrared / thermales Infrarot
P _n	Normdruck der Luft	Tsd.	tausend
PAN	panchromatisch	TUM	Technische Universität München
PAR	Perimeter-Area-Ratio	UBA	Umweltbundesamt, Dessau
PbS	Planungsbüro Prof. Dr. Schaller, Kranzberg		
PCR	Polymerase Chain Reaction		

URP	Umweltrisikoprüfung
USG	Untersuchungsgebiet
USGS	United States Geological Survey
UTC	Koordinierte Weltzeit / Coordinated Universal Time / Temps Universel Coordonné
UTM	Universal Transverse Mercator Projec- tion
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
v_a	Windgeschwindigkeit der Luft
v_s	Windgeschwindigkeit der angesaugten Luft
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIS	visible
W	West
WGS84	World Geodetic System 1984 (Erdel- lipsoid und Datum)
WHO	World Health Organization (Weltge- sundheitsorganisation), Genf
WMO	World Meteorological Organization, Genf
Z	z-Transformation

1 Einführung

1.1 Gentechnik

Unter dem Begriff „Gentechnik“ werden alle Methoden zur Isolierung, Charakterisierung, Veränderung und Übertragung des Erbguts von Lebewesen oder Viren verstanden (Menrad et al. 2003: 11). Organismen mit verändertem Erbgut werden allgemein als gentechnisch veränderte Organismen (GVO) bezeichnet. Bei Pflanzen spricht man von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP).

Neben der so genannten „roten Gentechnik“ (Einsatz von gentechnisch veränderten (GV) Bakterien und GV-Viren zur Synthese von Impfstoffen und Arzneimitteln), der „weißen Gentechnik“ (Einsatz von GV-Mikroorganismen zur Synthese von Enzymen und Vitaminen) und der „grauen Gentechnik“ (Einsatz von GV-Mikroorganismen zur Bodensanierung und Abwasseraufbereitung) wird unter Verwendung der gleichen Metapher von der „grünen Gentechnik“ („Agro-Gentechnik“), also dem Einsatz der Gentechnik in der Landwirtschaft, gesprochen. Die Agro-Gentechnik dient der Herstellung¹ gentechnisch veränderter Pflanzen, die auch als transgene Pflanzen bezeichnet werden. Die Grenzen zwischen den o.g. Anwendungsbereichen der Gentechnik sind teilweise fließend (Reichenbecher et al. 2005: 302, Braun et al. 2006: 9).

1.2 Gentechnik in der Landwirtschaft

1.2.1 Eigenschaften von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP)

Ziele die Entwicklung gentechnisch veränderter Pflanzen (GVP) zuerst auf die Resistenz gegen Herbizide oder Schädlinge ab (GVP der 1. Generation), so richtete sich der Fokus der Forschung später auf die Veränderung der Inhaltsstoffe der Pflanzen (2. Generation) und auf die Toleranz gegen Trockenheit, Schadstoffe oder Versalzung des Bodens (3. Generation). Anstelle der Unterscheidung der GVP in Generationen können GVP auch nach „Traits“ (Merkmale) differenziert werden. GVP mit Input-Traits² (Eingangsmerkmale) dienen der Steigerung oder Stabilisierung des Feldertrags, Output-Traits³ (Ausgabemerkmale) hingegen verändern die Eigenschaften landwirtschaftlicher Produkte (Menrad et al. 2003: 78, Kempken & Kempken 2004: 125-158, Reichenbecher et al. 2005: 303).

¹ Eine ausführliche Darstellung über die Herstellung gentechnisch veränderter Pflanzen findet sich bei Kempken & Kempken (2004: 85-99).

² Zu Input-Traits zählen: Resistenz gegen Schädlinge, Krankheiten und Herbizide sowie Toleranz gegen abiotische Stressfaktoren sowie Veränderung reproduktiver und ertragsbeeinflussender Eigenschaften (Menrad et al. 2003: 78-87).

³ Zu Output-Traits zählen: Veränderung der Nährstoffgehalte, -zusammensetzung und Reifungseigenschaften, Produktion chemischer Rohstoffe und pharmazeutischer Wirkstoffe (Menrad et al. 2003: 78, 88-92).

1.2.2 Risiken von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP)

Als „Risiko“ wird allgemein das Produkt von „Schadensausmaß“ (consequences of a hazard) und „Eintrittswahrscheinlichkeit“ (likelihood of a hazard) eines Ereignisses bezeichnet. Diese Definition ist auch auf die Abschätzung der Risiken anwendbar, die mit der *absichtlichen Freisetzung*⁴ und dem *Inverkehrbringen*⁵ von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP) verbunden sind (UNEP 1996: 5, 20, Potthast 2004: 246), auf die bereits 1989 Tiedje et al. hinwiesen. Als Risiken sind zu nennen: (1) Horizontaler Gentransfer (nicht sexuelle Übertragung von Gensequenzen auf andere Organismen), (2) vertikaler Gentransfer (Auskreuzung innerhalb der Kulturart⁶ oder mit Wildarten), (3) Verwilderung transgener Pflanzen, (4) Auswirkungen transgener Pflanzen auf Nicht-Zielorganismen (z. B. Mikroorganismen, Insekten, Vögel und Säugetiere), (5) ungeklärtes Umweltverhalten transgener Produkte (z. B. Akkumulation transgener Produkte / Toxine im Boden oder im Wasser), (6) Resistenzentwicklung der Zielorganismen (Wirkungslosigkeit transgener Pflanzen), (7) Auswirkungen auf landwirtschaftliche Anbaumethoden, (8) Entstehung neuer Viren aus transgenen virusresistenten Pflanzen (Tiedje et al. 1989: 301, Caplan 2001: 198-201, Menrad et al. 2003: 195-207, Sando et al. 2003: 17-18).

1.2.3 Ökologischer Schaden

Aus der Definition von „Risiko“ (siehe Kap. 1.2.2) ergibt sich die Notwendigkeit den Begriff „Schaden“ in die Ökologie einzuführen und zu definieren. Er schafft die Bewertungsgrundlage⁷ für die Risikountersuchung und das Monitoring von GVP⁸. Ohne den Schadensbegriff ist der Themenkomplex „Wertmaßstäbe, Grenzwerte, Schadschwellen“ nicht zu handhaben, der wiederum für Zulassungs- und Abbruchkriterien beim Inverkehrbringen von GVP notwendig ist (SRU 2004a: 2, 4).

Potthast (2004: 250-252) zeigt zwei divergierende Ansätze (geozentrisch und anthropozentrisch) bei der Definition eines ökologischen Schadens auf. Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU 1988: 460) definiert – aus geozentrischer Sicht – wie folgt: „[...] *Veränderungen [...], die über das natürliche Schwankungsmaß der betroffenen Populationen oder Ökosys-*

⁴ Als absichtliche Freisetzung wird „jede Art von absichtlichem Ausbringen eines GVO oder einer Kombination von GVO in die Umwelt[...]“ bezeichnet (Art. 2, Nr. 3 Richtlinie 2001/18/EG).

⁵ Als Inverkehrbringen wird „die entgeltliche oder unentgeltliche Bereitstellung für Dritte“ bezeichnet (Art. 2, Nr. 4 Richtlinie 2001/18/EG). Im weiteren Verlauf dieses Textes wird „Inverkehrbringen“ anstelle von „absichtliche Freisetzung und Inverkehrbringen“ verwendet.

⁶ Dies betrifft insbesondere die Frage nach der Koexistenz von konventioneller Landwirtschaft, ökologischem Landbau und Landwirtschaft, die GVP einsetzt.

⁷ Genau diese Verbindung von Ökologie und Wertperspektive negiert Hesse (2004: 52), da als „*empirische Wissenschaft [...] die Ökologie indessen nicht darüber entscheiden [kann], welche Organismen, Ökosysteme und natürlichen Prozesse wir als eine Art Gut an sich selbst ansehen sollten, das um seiner selbst willen und nicht im Dienste menschlicher Nutzungsinteressen zu erhalten wäre.*“

⁸ Unterschied zwischen Risikountersuchung und Monitoring siehe Kap. 1.3.2.1.

teme hinausgehen und sich oft nur über größere Zeiträume manifestieren, sowie Veränderungen, die entweder überhaupt nicht oder oft erst Jahrzehnte nach der toxischen Einwirkung und mit hohem Aufwand rückgängig gemacht werden können.“ Wie der SRU selbst einschränkt, ist es schwierig bis unmöglich solche Wirkungen systematisch zu untersuchen. Die Definition von Ammann et al. (2000: 103) erweitert den Schadensbegriff durch Unterscheidung von vier Schadensstufen, abhängig von dem Ausmaß der Veränderung und der Zeitdauer der Reversibilität. Dies führt jedoch nicht zu einer Erhöhung der Praxistauglichkeit. Aus anthropozentrischer Sicht betrachten Barkmann & Marggraf (2004: 65) den „ökologischen Schaden“ als: „*unfreiwillige Einbuße der Versorgung mit ökologischen Gütern, die durch ein Ereignis hervorgerufen wird*“. Als Definition, die beide Ansätze vereint, schlägt Potthast (2004: 252) vor: „*Ecological damage is any impact compromising the integrity of ecological goods to be protected.*“ Ganz ähnlich sehen dies Bartz et al. (2005: 321): „*Ein ökologischer Schaden – verursacht durch GVO oder deren Verwendung im Freiland – liegt vor, wenn ein biotisches Schutzgut [...] oder ein abiotisches Schutzgut [...] erheblich beeinträchtigt ist, und zwar hinsichtlich der Gesamtheit oder von Teilen eines Schutzgutes oder [...] der nachhaltigen Nutzungsfähigkeit eines Schutzgutes oder des mit ihm verbundenen Wirkungsgefüges.*“ Dieser Ansatz zieht alle Schutzgüter in Betracht, beinhaltet geo- und anthropozentrische Elemente und berücksichtigt, dass eine Beeinträchtigung zu einem Schaden führen kann, aber nicht führen muss. Ein Schadensfall hängt vom Grad der Beeinträchtigung und vom Wert des betroffenen Schutzgutes ab. Allerdings ergeben sich aus dieser Definition viele offene Fragen, die einer Klärung bedürfen. Zum einen müssen die Schutzgüter⁹ näher bestimmt, zum anderen Indikatoren zum Nachweis von Veränderungen gefunden sowie Schadschwellen zur Bewertung der Erheblichkeit einer Beeinträchtigung festgelegt werden. Mit dem Umweltschadensgesetz (USchadG) wurde im Jahr 2007 zwar ein rechtlicher Rahmen geschaffen, aber alle offenen Fragen sind durch das Gesetz nicht geklärt. Das USchadG definiert als Schaden oder Schädigung „*eine direkt oder indirekt eintretende feststellbare nachteilige Veränderung einer natürlichen Ressource [...] oder Beeinträchtigung der Funktion einer natürlichen Ressource*“. Ein Umweltschaden ist zu vermeiden, zu begrenzen und zu sanieren, wenn ein ursächlicher Zusammenhang zwischen dem Schaden und der Tätigkeit eines Verantwortlichen festgestellt werden kann. Als Verantwortliche gelten nur natürliche oder juristische Personen, die eine berufliche Tätigkeit ausüben oder bestimmen und dadurch unmittelbar einen Umweltschaden verursachen. Neben dem kausalen Zusammenhang zwischen beruflicher Tätigkeit und Schaden ist die Erheblichkeit der Auswirkungen nachzuweisen, damit aus einem Schaden ein Schaden im Sinne des USchadG wird. In der Anlage 1 zum USchadG sind als berufliche Tätigkeiten ausdrücklich die „*absichtliche Freisetzung gene-*

⁹ Als Schutzgüter eines GVP-Monitorings werden Boden, Wasser, Klima / Luft und Flora / Fauna betrachtet (Sanvido et al. 2003: 29-32, 34, Bartz et al. 2005: 321, VDI 4330 Blatt 1: 9 (in Überarbeitung)).

tisch veränderter Organismen in die Umwelt [...] sowie der Transport und das Inverkehrbringen [...] dieser Organismen“ genannt.

1.2.4 Gesetzliche Grundlagen für GVP in der EU und Deutschland

Der Umgang mit dem durch Anbau von GVP verbundenen Risiko (siehe Kap. 1.2.2) wird in den Nationalstaaten oder Staatengemeinschaften unterschiedlich gehandhabt. Während in Nordamerika das „Prinzip der substanziellen Äquivalenz“ gilt, verfolgt die Europäische Union (EU) das „Vorsorgeprinzip“. Eine GV-Pflanze wird in den USA als unschädlich betrachtet, solange kein Schaden nachgewiesen ist. Umgekehrt in Europa: eine GV-Pflanze wird als schädlich eingestuft, solange ihre Unschädlichkeit nicht bewiesen ist (Sanvido et al. 2003: 35-36, Spök et al. 2005: 32). Aus diesem Grund sowie wegen damals fehlender Rechtsvorschriften (Kennzeichnungspflicht, Schwellenwerte und Rückverfolgbarkeit von GVO sowie Haftung) beschloss der Umweltministerrat der EU 1998 das so genannte de-facto-Moratorium, welches die Zulassung von GVO unterband (Sanvido et al. 2003: 10, Reichenbecher et al. 2005: 302-303). Durch den Erlaß der Richtlinien 2001/18/EG¹⁰ sowie der Verordnung (EG) Nr. 1829/2003¹¹ und der Verordnung (EG) Nr. 1830/2003¹² wurde die Grundlage für den kommerziellen Anbau von GVP in der EU geschaffen¹³. Die Freisetzungsrichtlinie wurde in Deutschland durch die Novellierung des Gentechnik-Gesetzes (GenTG)¹⁴, die im Februar 2005 in Kraft trat¹⁵, größtenteils in nationales Recht umgesetzt (Züghart et al. 2005: 307, Witting & Tappeser 2005: 313). Von einer Neufassung des GenTG muss – aufgrund der veränderten politischen Verhältnisse seit der Bundestagswahl im September 2005 – in dieser Legislaturperiode ausgegangen werden.

Zweck und Verpflichtung der o.g. Rechtsvorschriften besteht darin sicherzustellen, dass *„die absichtliche Freisetzung oder das Inverkehrbringen von GVO keine schädlichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt hat“* (Art. 4, Abs. 1 Richtlinie 2001/18/EG, siehe auch § 1 Nr. 1 GenTG und Art. 4, Abs. 1 Verordnung (EG) Nr. 1829/2003). Allerdings merkt der Rat der Sachverständigen für Umweltfragen (SRU 2004a: 4) in diesem Zusammenhang sehr kritisch an, dass *„weder die Freisetzungsrichtlinie noch die Verordnung [...] konkrete Maßstäbe und*

¹⁰ „Freisetzungsrichtlinie“, rechtsgültig seit April 2001

¹¹ „Genetisch veränderte Lebensmittel und Futtermittel“, rechtsgültig seit April 2004

¹² „Rückverfolgbarkeit und Kennzeichnung von GVO“, rechtsgültig seit April 2004

¹³ Weitere Rechtsvorschriften der EU: *Entscheidung der Kommission 2002/623/EG* (Ergänzung Anhang II der Freisetzungsrichtlinie), *Entscheidung des Rates 2002/811/EG* (Ergänzung Anhang VII der Freisetzungsrichtlinie), *Verordnung (EG) Nr. 1946/2003* (grenzüberschreitende Verbringung von GVO), *Verordnung (EG) Nr. 65/2004* (Erkennungsmarker für GVO), u. a.

¹⁴ Weitere Rechtsvorschrift auf nationaler Ebene: *Gesetz zur Durchführung von Verordnungen der Europäischen Gemeinschaft auf dem Gebiet der Gentechnik und zur Änderung der Neuartige Lebensmittel- und Lebensmittelzutaten-Verordnung* (EGGenTDurchfG) regelt die Durchführung der Verordnungen (EG) Nr. 1829/2003 und Nr. 1830/2003 (Witting & Tappeser 2005: 313).

¹⁵ Wegen Fristüberschreitung wurde von der EU-Kommission ein Vertragsverletzungsverfahren gegen die Bundesrepublik Deutschland eingeleitet (www.transgen.de).

Kriterien für diesen [...] vagen Schädlichkeitsbegriff vorsehen.“ Damit steht die Bewertung von GVP im Zulassungs- und Kontrollverfahren im Ermessen der zuständigen staatlichen und europäischen Stellen. Für ein EU-weit einheitliches Vorgehen fehlt es an allgemein verbindlichen Schädlichkeitsschwellen, die eine Gleichbehandlung von GVP hinsichtlich Zulassungs- und Abbruchkriterien garantieren (ebd.: 4-5).

1.2.5 Anbau von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP) weltweit

Die Übertragung von bakterieller DNA auf Pflanzen gelang zum ersten Mal 1980 (Kempken & Kempken 2004: 15). Mit dem kommerziellen Anbau gentechnisch veränderter Kulturpflanzen wurde im Jahr 1996 in sechs Ländern begonnen¹⁶. Zehn Jahre später werden in 21 Ländern transgene Pflanzen kommerziell angebaut oder absichtlich freigesetzt. Anbauflächen transgener Pflanzen befinden sich vor allem in den USA (Anteil an weltweiter GVP-Anbaufläche: 49,8%). Weitere Länder mit bedeutendem GVP-Anbau sind Argentinien (17,1%), Brasilien (9,4%), Kanada (5,8%) und China (3,3%)¹⁷. Die weltweite Anbaufläche transgener Pflanzen teilt sich wie folgt auf vier dominierende Kulturpflanzen auf: Sojabohne (60%), Mais (24%), Baumwolle (11%) und Raps (5%) (Stand 2005). Der Diffusionsgrad (Anteil transgener Pflanzen am Gesamtbestand) ist je nach Kulturpflanze sehr unterschiedlich, bei Soja beträgt er weltweit 46%, bei Baumwolle 20%, bei Raps 11% und bei Mais 7% (Stand 2001). Allerdings ist für einzelne Kulturen in einigen Ländern bereits ein deutlich höherer Diffusionsgrad erreicht (98% GV-Soja in Argentinien) (Menrad et al. 2003: 133-135, James 2005: 3-4, 6, www.transgen.de).

1.3 Monitoring von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP)

1.3.1 Monitoring - allgemein

Als *Monitoring* wird die (regelmäßige oder unregelmäßige) Beobachtung bezeichnet, die die Einhaltung eines Standards oder den Grad der Abweichung von einer Norm untersucht (Hellawell 1991: 2). Dem Monitoring wird die Funktion der Kontrolle übertragen, die aus einem vorhandenen Wertesystem abgeleitet wird. Im deutschen Sprachgebrauch¹⁸ wird der Begriff Monitoring häufig abweichend von dieser Bedeutung im Sinne einer (Dauer-)Beobachtung verwendet (Maas 1999: 47-48).

Erfolgt die Beobachtung von Bestandteilen der Umwelt nicht im Hinblick auf ein Wertesystem, das Grenzwerte o.ä. vorgibt, liegt eine Umweltbeobachtung vor. Der Zweck der Um-

¹⁶ Der kommerzielle Anbau von gentechnisch verändertem virus-resistentem Tabak fand laut Nelson (2001: 3) in China bereits in den frühen 1990er Jahren statt.

¹⁷ Mitgliedsstaaten der EU mit GVP-Anbau: Spanien (0,1%), Portugal, Deutschland, Frankreich und Tschechien (alle <0,1%) (James 2005: 6).

¹⁸ Zum Teil auch im englischen Sprachgebrauch, siehe Hellawell (1991: 1) und Brydes (2004: 84).

weltbeobachtung ist es, den aktuellen Zustand und etwaige Umweltveränderungen durch die regelmäßige Erhebungen aufzudecken (SRU 1991: 6-7). Diese Art von Beobachtungen entsprechen dem englischen Terminus „surveillance“¹⁹.

Die anbaubegleitenden Untersuchungen nach dem Inverkehrbringen von GVP werden im Deutschen offiziell als Überwachung (Monitoring) und als Beobachtung (Surveillance) bezeichnet. Allerdings hat sich als übergeordneter Begriff „GVP-Monitoring“ eingebürgert.

1.3.2 GVP-Monitoring

1.3.2.1 Risikountersuchung

Die Risikountersuchung ist nicht integrierender Teil eines GVP-Monitorings, aber eine unabdingbare Voraussetzung für ein GVP-Monitoring. Die Risikountersuchung setzt *vor* dem Inverkehrbringen von GVP an, das Monitoring *nach* dem Inverkehrbringen von GVP (Traxler et al. 2000: 46). Im Antragsverfahren zur Erlangung der Marktzulassung (Genehmigung zum Inverkehrbringen) für eine gentechnisch veränderte Pflanze muss der Antragsteller (in der Regel ein Saatguthersteller) bei der zuständigen nationalen Behörde²⁰ nachweisen, dass die GVP zuvor beim Antragsteller eine zweistufige Risikountersuchung erfolgreich durchlaufen hat (Reichenbecher et al. 2005: 303). Die erste Stufe der Risikountersuchung beschränkt sich auf Labor- und Gewächshausversuche (experimentelle Risikountersuchung). Nach der Erteilung der Freisetzungsgenehmigung beginnt die zweite Stufe der Risikountersuchung (freisetzungsbegleitende Risikountersuchung), die sich auf Freilandversuche konzentriert. Die Risikountersuchung als Ganzes ist räumlich, zeitlich und methodisch begrenzt und kann die komplexen Bedingungen in der Umwelt nicht gänzlich abbilden. Deshalb muss der Antragsteller die Ergebnisse der Risikountersuchung in einer „Umweltrisikoprüfung (URP)“²¹ zusammenfassen, die die „direkten²² oder indirekten²³, sofortigen²⁴ oder späteren²⁵ Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt“ (Art. 2, Nr. 8 Richtlinie 2001/18/EU) bewertet. Zusätzlich ist ein Überwachungsplan (*fallspezifische Überwachung* und *allgemeine überwachende Beobachtung*) zu entwickeln, der den kommerziellen Anbau der GVP begleitet und

¹⁹ Aus dem o.g. Grund unterscheidet der Überwachungsplan nach Richtlinie 2001/18/EG (Anhang VII) auch zwischen „case-specific monitoring“ (fallspezifische Überwachung) und „general surveillance“ (allgemeine überwachende Beobachtung).

²⁰ In Deutschland prüft das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) im Benehmen mit dem Bundesamt für Naturschutz (BfN), dem Robert Koch-Institut (RKI) und dem Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) (Witting & Tappeser 2005: 313).

²¹ Da der Begriff „Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)“ bereits für das Bewilligungsverfahren von technischen Anlagen belegt ist, wird der Begriff „Umweltrisikobewertung (URP)“ verwendet (Sanvido et al. 2003: 6, Züghart et al. 2005: 307).

²² Primäre Auswirkungen durch die GVO selbst (Richtlinie 2001/18/EU, Anhang II)

²³ Auswirkungen durch eine Kausalkette von Ereignissen (Richtlinie 2001/18/EU, Anhang II)

²⁴ Auswirkungen (direkt oder indirekt) während des Zeitraums der Freisetzung (Richtlinie 2001/18/EU, Anhang II)

²⁵ Auswirkungen (direkt oder indirekt) nach Abschluss der Freisetzung (Richtlinie 2001/18/EU, Anhang II)

schädliche Auswirkungen von GVP aufdecken kann (Richtlinie 2001/18/EU, Entscheidung des Rates 2002/811/EG, Sanvido et al. 2003: 5, 16, Züghart et al. 2005: 307).

1.3.2.2 Überwachungsplan (monitoring plan)

In der Richtlinie 2001/18/EG (Anhang VII, ergänzt durch die Entscheidung des Rates 2002/811/EG) und dem Gentechnikgesetz (GenTG) ist ein Überwachungsplan für die anbaubegleitende Untersuchung von GVP verankert. Ziel des Überwachungsplans ist es, die Annahmen aus der Umweltrisikoprüfung zu überprüfen und unvorhergesehene Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu ermitteln. Folglich setzt sich der Überwachungsplan aus zwei Teilen zusammen, zum einen aus der fallspezifischen Überwachung und zum anderen aus der allgemeinen überwachenden Beobachtung.

1.3.2.3 Fallspezifische Überwachung (case-specific monitoring)

Die fallspezifische Überwachung befasst sich gezielt mit der Überprüfung der Ergebnisse und Annahmen der Umweltrisikoprüfung (URP). Die in der URP aufgestellten Hypothesen sollen in zielgerichteten Experimenten durch den Vergleich von Anbausystemen (mit und ohne GVP) überprüft werden. Die fallspezifische Überwachung beschränkt sich dabei auf sofortige und direkte (ggf. auch spätere oder indirekte) Auswirkungen der GVP, die „über einen ausreichend langen Zeitraum hinweg“ (Richtlinie 2001/18/EU, Anhang VII) untersucht werden. Die Überwachung ist nicht dafür vorgesehen die langfristige Entwicklungen der GVP in der Umwelt zu untersuchen (Traxler et al. 2000: 27-28, Sanvido et al. 2003: 20-22, 38).

1.3.2.4 Allgemeine überwachende Beobachtung (general surveillance)

Die allgemeine überwachende Beobachtung soll unerwartete Auswirkungen von GVP auf die Umwelt aufdecken, die nicht von der Umweltrisikoprüfung (URP) erkannt wurden. Dies kann nur durch langfristige Beobachtungen erreicht werden, die sich auf die Schutzgüter (Boden, Wasser, Luft / Klima, Flora / Fauna) konzentrieren. Der Zustand der Schutzgüter vor Inverkehrbringen von GVP muss bekannt sein („baseline“), um mögliche Veränderungen zu erkennen. Ein Kausalzusammenhang zwischen Veränderung und GVP wird sich allerdings nicht mit der allgemein überwachenden Beobachtung herstellen lassen, sondern wird zusätzliche Untersuchungen nach sich ziehen (Traxler et al. 2000: 27, 29, Richtlinie 2001/18/EU, Anhang VII, Sanvido et al. 2003: 20-22, 39, den Nijs & Bartsch 2004: 368-370).

1.4 Pollen

1.4.1 Geschichte

Die Bedeutung des Pollens war bereits den Assyriern in Mesopotamien im 9. Jh. vor Chr. bekannt. Im Metropolitan Museum of Art, New York City, befindet sich eine Steinskulptur mit der Darstellung der Handbestäubung von Dattelpalmen. Herodot beschreibt im 5. Jh. vor Chr. diese Bestäubungspraxis der Assyrer. Das Wissen der Antike um die Vorgänge der generativen Vermehrung der Pflanzen ging im Mittelalter größtenteils verloren (Wodehouse 1990: 23-26).

Das Wort „Pollen“ wurde im 14./15. Jahrhundert in die deutsche Sprache übernommen und geht auf das lateinische Wort „pollen“ (sehr feines Mehl / Mehlstaub, Staub) bzw. das griechische „pále“ (feines Mehl, Staub) zurück (Duden 1989: 539/540). Als botanischer Fachausdruck wurde „Pollen“ erst Jahrhunderte später verwendet.

Im ausgehenden 17. Jahrhundert wurden Pollenkörner unterschiedlicher Pflanzenarten erstmals von Naturwissenschaftlern beschrieben (Malpighi 1675 und Grew 1682) und wenige Jahre später deren Funktion als Befruchter der Samenanlage erkannt (Camerarius 1694). Dass die Bestäubung der Blüte durch Pollen erfolgt, die durch die Luft transportiert werden, wurde im letzten Drittel des 18. Jahrhunderts nachgewiesen (Kölreuter 1766, Sprengel 1793, Knight 1799). Mit dem technischen Fortschritt in der Mikroskopie im 19. Jahrhundert nahm das Wissen über Pollen rasch zu: Sprengel (1812) beschrieb Poren und Falten (Colpi) in der Pollenwand, Fritzsche (ab 1832) erkannte und benannte die beiden Wandschichten der Pollen (Intine und Exine), Mohl (1834) veröffentlichte eine Übersicht der Pollentypen und in den Veröffentlichungen von Engler & Prantl (1895) wurde bereits die Pollenmorphologie für die Pflanzensystematik verwendet (Straka 1975: 3-4, 6).

1943/44 wurde von Hyde und Williams der Begriff „Palynologie“ eingeführt, der sich von griechisch „palýnein“ (ausstreuen) ableitet und die Morphologie, Produktion, Freisetzung und Ausbreitung von Pollen und Sporen der Algen, Moose, Farne und Pilze umfasst (Straka 1975: 2, Fægri & Iversen 1989: 1). Da Pollen neben Viren, Bakterien, Pilzen u.a. zur Gruppe der Bioaerosole gehören, beschäftigt sich neben der Aerobiologie²⁶ auch die Aerosolforschung²⁷ mit ihnen.

1.4.2 Allergene Wirkung

In arabischen Quellen aus dem Mittelalter finden sich erste Hinweise auf die Pollenallergie des Menschen. Als „Sommerkatarrh“ beschrieb 1819 der englische Arzt J. Bostock die Krankheit, an der er selbst litt. Einen kausalen Zusammenhang zwischen Pollen und dem

²⁶ International Association for Aerobiology – IAA (<http://www.isao.bo.cnr.it/aerobio/iaa/>)

²⁷ International Aerosol Research Assembly – IARA (<http://www.iara.org/>)

„Heufieber“ konnte 1873 der schottische Arzt Blackley nachweisen. Zu Beginn des 20. Jh. erkannte der Hygieniker Dunbar, dass die Proteine der Pollenkörner für die Krankheit ursächlich sind und 1903 stufte der Arzt Wolff-Eissner die Krankheit als Allergie ein (Straka 1975: 6-7).

Als luftgetragene allergene Fracht gelten neben intakten Pollenkörnern auch Fragmente von Pollenkörnern ($< 5 \mu\text{m}$), die durch das Aufplatzen von Pollenkörnern bei hoher Luftfeuchte oder Niederschlag entstehen (Ong et al. 1996: 193-194). Aufgrund der Größe der Pollenkörner werden diese nach dem Einatmen nur im Bereich der oberen Atemwege deponiert und können eine allergische Rhinitis (Reizung der Nasenschleimhaut, umgangssprachlich als „Heuschnupfen“ bezeichnet) auslösen. Das allergische Asthma oder Pollenasthma hingegen ist in den tiefen Lungenabschnitten lokalisiert und wird durch die aus Pollen freigesetzten allergenen Komponenten hervorgerufen. Die dritte Form der Pollenkrankheit, das Orale Allergiesyndrom oder Orales Pollensyndrom, ist eine pollenassoziierte Nahrungsmittelallergie. Die ähnlichen Eiweißstrukturen von Pollenallergenen einerseits und Obst, Gemüse und Nüssen andererseits sind die Ursache von Kreuzallergien (häufigste Kreuzallergie: Birkenpollen und Äpfel). Bei den Pollenallergenen handelt es sich zumeist um Proteine und Glykoproteine. Die verschiedenen Allergene unterscheiden sich ihrer Wirkungsintensität erheblich, häufig ist ihre eigentliche biologische Funktion unklar. Die bekannten Allergene sind in der Allergenomenklatur der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zusammengetragen (Huss-Marp 2000: 16-17, Bergmann 2001: 16).

1.4.3 Biologische Funktion

Zur generativen Fortpflanzung der Angiospermae (Bedecktsamer) und Gymnospermae (Nacktsamer) sind Pollen ein unverzichtbarer Bestandteil. Die Pollenkörner werden im männlichen Geschlechtsorgan der Blüte (Staubbeutel oder Anthere) gebildet, sie enthalten jeweils das männliche Erbgut (häufig als haploider Chromosomensatz) und dienen der Übertragung dieses genetischen Materials auf das weibliche Geschlechtsorgan der Blüte (Stempel, bestehend aus Fruchtknoten, Griffel und Narbe). Die Übertragung des Pollens auf den weiblichen Blütenteil wird als Bestäubung, die Verschmelzung der männlichen (im Pollenkorn) mit dem weiblichen Gameten (Eizelle) als Befruchtung bezeichnet.

Bei Blütenpflanzen können die weiblichen und männlichen Geschlechtsorgane in einer Blüte vereint sein (Zwitterblüte) oder getrennt vorliegen (Diklinie). In diesem Fall können die männlichen und weiblichen Blüten auf ein und derselben Pflanze vorkommen (Monözie) oder auf getrennten Individuen (Diözie) (Leins 2000: 146, 149).

Tab. 1.1: Anpassungssyndrom anemophiler und zoophiler Blütenpflanzen nach Leins (2000)

Zoophilie-Syndrom	Anemophilie-Syndrom
Angiospermie	
Zwittrigkeit der Blüte (oder Pseudanthien)	Oft Diklinie (Monözie, Diözie)
Auffällige Blüte (Farbe und/oder Duft)	Unscheinbare Blüte
Nahrungsangebot: Pollen und/oder Nektar oder Täusch-einrichtungen	Kein Nektar
Pollenkornoberfläche skulptiert	Pollenkornoberfläche glatt
Reichlich Pollenkitt	Wenig oder kein Pollenkitt
	Organzahl der Blüten oft reduziert
	Eine oder wenige Samenanlagen pro Blüte
	Oft dichte Infloreszenzen (oft hängend)
	„Pendelantheren“ an dünnen Filamenten
	Narbe oberflächenvergrößert

Blütenpflanzen haben verschiedene Anpassungssyndrome entwickelt, um die Übertragung der Pollen vom Staubbeutel auf die Narbe durch abiotische oder biotische Pollenvermittler sicherzustellen. Neben der Windblütigkeit (Anemophilie) sind dies die Tierblütigkeit²⁸ (Zoophilie) und die Wasserblütigkeit (Hydrophilie). Die Spezialisierung auf einen Pollenvermittler kann so weit gehen, dass nur männliche oder weibliche Exemplare einer Tierart die Bestäubung ausführen können. Die Zuordnung der Pflanzen zu einem Bestäubungssyndrom ist meistens nicht so scharf, d. h. eine zoophile Pflanze kann ggf. außer von Tieren (z.B. Insekten) auch durch Wind bestäubt werden (Crane 1986: 199, Leins 2000: 205-207). Das Anpassungssyndrom von anemophilen und zoophilen Pflanzen zeigt Tab. 1.1.

1.4.4 Morphologie der Pollen und Aufbau der Pollenwand

In ihrer äußeren Erscheinung zeigen sich die Pollen sehr vielgestaltig (Größe, Form, Skulptur, Apertur; siehe Abb. 1.1). Die *Größe* der Pollenkörner variiert zwischen 5 und 300 µm (siehe Kap. 1.4.5). Die *Form* reicht von kugelig, über ellipsoid bis polyedrisch. Pollenkörner (PK) kommen einzeln vor, oder sie sind zu zweit / zu viert vereinigt oder zu mehreren gruppiert (Dyadeae, Tetradeae, Polyadeae). Zudem können PK mit einem oder mehreren Luftsäcken ausgestattet sein. Diese Vielgestaltigkeit setzt sich bei der Skulptur (Relief auf der Pollenoberfläche) und der Apertur (Keimöffnung in der Pollenwand) fort. Typische *Skulpturen* der Pollenkörner sind: glatte Oberfläche, Oberfläche mit Vertiefungen (rund, langgestreckt, netz-

²⁸ Bei den zoophilen Pflanzen unterscheidet man Anpassungen der Blüte an die Bestäubung durch Käfer, Fliegen, Bienen, Wespen, Tagfalter, Nachtfalter, Vögel und Fledermäuse (Leins 2000: 218-219).

artig), zugespitzte Skulpturelemente und netzartige Skulptierung. Die *Aperturen* werden unterschieden nach Art (rund: Poren (porat), länglich: Colpen (colpat), Kombination: Pore in einer Colpe (colporat)), Anzahl (0 bis 70) und Stellung / Lage auf dem Pollenkorn. Ausführliche Beschreibungen und Klassifizierungen finden sich bei Erdtman (1943: 43-49), Straka (1975: 12-29) und Beug (2004: 36-41).

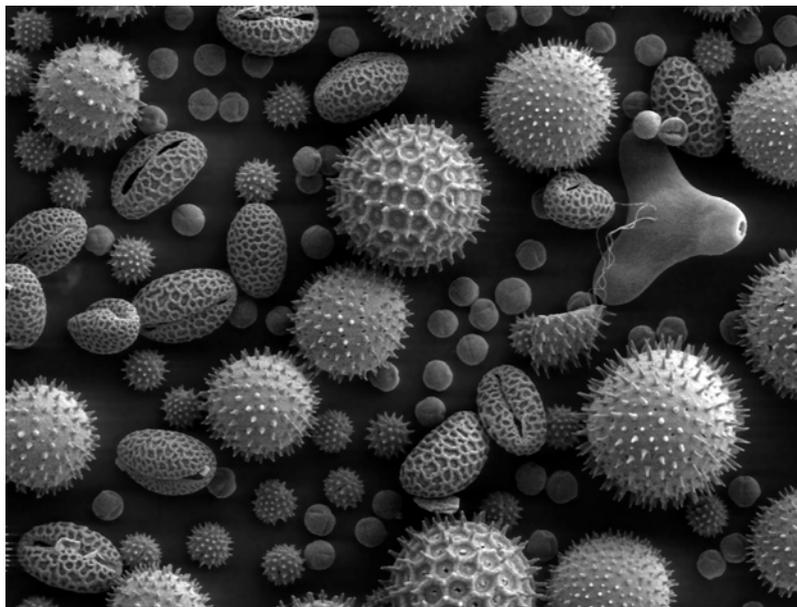


Abb. 1.1: Elektronenmikroskopische Aufnahme von Pollen
(Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Pollen> [12.10.2005])

Aufgrund der morphologischen Eigenschaften lassen sich Pollen zur Taxonomie von Pflanzen nutzen. Allerdings weist Straka (1975: 39) darauf hin, dass der Wert der pollenmorphologischen Merkmale für die Taxonomie je nach Pflanzenfamilie unterschiedlich hoch ist. In einigen Pflanzenfamilien kommt nur ein Pollentyp (Poaceae: monoporate PK, Brassicaceae: tricolpate PK), in anderen kommen viele verschiedenartige Pollentypen vor. Zudem können Anzahl von Poren und Colpen sowie die Skulptur der Exine, laut Stanley & Linskens (1985: 30), durch klimatische Bedingungen beeinflusst werden. Punt (1986: 97-101) nennt vier wichtige Faktoren, die die äußere Erscheinungsform von Pollen grundlegend bestimmen, nämlich die Art der Bestäubung, der Schutz des genetischen Materials, die Prozesse bei der Keimung (u.a. Rehydrierung) sowie die Entwicklungsgeschichte der Pflanze. Die Untersuchungen von Linder (2000) legen den Schluss nahe, dass es einen Zusammenhang zwischen Apertur-Typ und Bestäubungsart gibt. Nach seinen Erkenntnissen treten porate Aperturen vorrangig bei der Wind- und selten bei der Tierbestäubung auf.

Die 1 bis 10 μm dicke Wand des Pollenkorns ist aus zwei unterschiedlichen Schichten aufgebaut. Die innere Intine besteht aus Zellulose und Pektin und umschließt die männlichen Ga-

meten vollständig. Nach der Bestäubung kommt es zur Keimung, bei der sich aus der Intine der Pollenschlauch entwickelt, der die männlichen zu dem weiblichen Gameten führt. Die äußere Exine ist aus Sporopollenin aufgebaut, eine der widerstandsfähigsten organischen Substanzen (hochpolymere Ester von Fettsäuren und Carotinoiden), die den Pollen vor Milieueinflüssen²⁹ schützt. Die komplexe Struktur der Exine wird nochmals in äußere (Ektexine) und innere Schicht (Endexine) unterteilt (Straka 1975: 7-12, Fægri & Iversen 1989: 219-225, Winkler 2001b: 17, Beug 2004: 28-29).

Als Pollenkitt wird eine lipidartige ölige Schicht auf der Exine bezeichnet, die insbesondere bei zoophilen Arten auftritt (Leins 2000: 207) und dazu führen kann, dass Pollen sich aneinander anlagern und größere Verbände bilden (nicht zu verwechseln mit den o.g. Polyadeae). Diese Pollenkonglomerate (9 und mehr Pollenkörner) können bei einigen Arten bis zu 85% aller Pollen betreffen (Stanley & Linskens 1985: 22, 35/36).

1.4.5 Pollenproduktion, Größe, Masse, Sinkgeschwindigkeit

Vergleichende Untersuchungen über die *Pollenproduktion* von Pflanzen liegen von Pohl (1937a) für Mitteleuropa und von Subba Reddi & Reddi (1986) für Indien vor. Für einige krautige Pflanzen gibt Pohl Werte zwischen 2,5 Mio. bis 1,3 Mrd. Pollen/Pflanze an (1937a: 406). Dabei stellte er fest, dass die Blüten anemophiler Pflanzen nicht zwangsläufig mehr Pollen produzieren als die Blüten zoophiler Pflanzen. Wird hingegen die gesamte Pflanze betrachtet, überwiegt die Pollenproduktion der windblütigen gegenüber der tierblütigen Pflanzen. Die jährliche Pollenproduktion mehrjähriger Pflanzen kann von Jahr zu Jahr erheblich schwanken. Insbesondere Bäume zeigen diese periodische Schwankungen, die genetisch, physiologisch und klimatisch begründet sind (Stanley & Linskens 1985: 32-33, Latałowa 2002).

Die Angaben zu Größe, Masse, Dichte und Sinkgeschwindigkeit³⁰ von Pollenkörnern sind in hohem Maß abhängig vom aktuellen Wassergehalt und dem Alter des Pollens (Stanley & Linskens 1985: 28). Fægri & Iversen (1989: 233) sprechen sogar davon, dass ein Pollenkorn weder eine eindeutige Form noch eine festgelegte Größe besitzt, sondern dass Form und Größe ausschließlich von der Luftfeuchte bestimmt werden. Die Gewichtszunahme durch Quellung kann je nach Pflanzenart 12% bis zu 160% gegenüber dem Trockengewicht betragen (Pohl 1937b: 159-166).

²⁹ Die Exine widersteht sogar sehr starken chemischen Säuren wie Fluss- und Schwefelsäure. Unter anaeroben Verhältnissen kann die Exine sehr lange Zeiträume (mehrere Millionen Jahre) unbeschadet überdauern. Die Analyse von fossilen und rezenten Pollenresten (Exine) in Sedimenten und Torfschichten ist daher von großer Bedeutung für die Vegetationsgeschichte (Straka 1975: 74, 78-80).

³⁰ In Ergänzung zur Sinkgeschwindigkeit definiert Chamberlain (1960) die Depositionsgeschwindigkeit (*velocity of deposition*) [m s^{-1}] als Quotient aus Depositionsrate [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] (siehe Kap. 1.4.7.3.2) und volumetrischer Konzentration [m^{-3}] (siehe Kap. 1.4.7.3.1).

Die *Größe* der Pollenkörner (PK) reicht von 5 bis 300 μm , allerdings entfallen die meisten Pollen auf die Größenklasse von 10 bis 50 μm (Stanley & Linskens 1985: 28, Crane 1986: 188, Fægri & Iversen 1989: 1, 233) (siehe Kap. 1.4.4).

Die *Masse* der Pollenkörner bewegt sich im Bereich von $0,9 \cdot 10^{-9}$ bis $1068 \cdot 10^{-9}$ g (Pohl 1937b: 116). Die durchschnittliche *Dichte* liegt bei $0,85 \text{ g/cm}^3$ (Hinds 1999: 396).

Die *Sinkgeschwindigkeit* der Pollenkörner ist abhängig vom Luftwiderstand (hervorgerufen von Größe und Form der Pollenkörner), der der Erdbeschleunigung entgegen wirkt (Chamberlain 1967: 138, Gregory 1973: 19, Hinds 1999: 46). Für Pollenkörner bewegt sich die Sinkgeschwindigkeit im Bereich von 0,3 bis 50 cm/s (Pohl 1937b: 132, Fægri & Iversen 1989: 24).

1.4.6 Pollenentwicklung, Pollenemission und Lebensdauer

Die genetischen Steuerungsmechanismen der Pflanzen sind wichtige (endogene) Faktoren, die die Pollenentwicklung und -emission bestimmen. Zusätzlich wirken jedoch äußere (exogene) Faktoren wie Klima- und Wetterbedingungen und der Tag-/Nachtrhythmus auf die Pflanze ein. So ist der Blühzeitraum einer Pflanze genetisch festgelegt, kann allerdings durch klimatische Einflüsse in Beginn und Länge variieren (Leuschner et al. 2000: 381, Clot 2001: 26, Frenguelli et al. 2002: 225-226, Latałowa 2002: 34-35). Der Zeitpunkt der Freisetzung des Pollens im Tagesverlauf (durch das Aufplatzen der Anthere) ist artspezifisch und wird wiederum durch Umweltfaktoren beeinflusst (z. B. Verzögerung oder Unterbindung bei Niederschlag) (Ogden et al. 1969, Stanley & Linskens 1985: 33, 49-50). Straka (1975: 165) weist darauf hin, dass die Menge des freigesetzten Pollens nicht mit der Menge des produzierten Pollens übereinstimmen muss. Bei einigen Baumarten können entweder die Klima- und Witterungsbedingungen des Vorjahres, oder die Bedingungen des aktuellen Jahres (Clot 2001: 26, Frenguelli et al. 2002: 225-226) Einfluss auf die Pollenemission haben. Bei den Kulturpflanzen sind nur die aktuellen meteorologischen Verhältnisse von Bedeutung (Stanley & Linskens 1985: 32-33).

Im Augenblick der Freisetzung aus der Anthere besitzt das Pollenkorn einen hohen Wassergehalt. Bei Kontakt mit der Luft verringert sich der Wassergehalt durch Verdunstung innerhalb kurzer Zeit (Dehydrierung). Dadurch schrumpft das Pollenkorn und das ursprüngliche Gewicht reduziert sich um 20-35% (Pohl 1937b: 144, Crane 1986: 184). Dieser Prozess ist reversibel. Bei hoher Luftfeuchte oder Niederschlag nehmen Pollenkörner Wasser auf (Rehydrierung). Diese Wasseraufnahme kann unter Umständen zum Aufplatzen der Pollenkörner führen (Ong et al. 1996: 193-194). Die Rehydrierung findet üblicherweise nach der Deposition des Pollens auf der Narbe (Bestäubung) statt. Die dehydrierten Pollen nehmen über die Aperturen und die Exine Flüssigkeit von der Narbe auf, bevor die weiteren Prozesse der Befruchtung einsetzen (Heslop-Harrison 1979: 737, 741, Crane 1986: 195, Punt 1986: 100).

In aller Regel findet die Pollenemission am Tage statt³¹ und tritt nachts nicht auf („diurnal pattern“). Der Zeitraum der Freisetzung ist jedoch je nach Art unterschiedlich und kann sich über den ganzen Tag erstrecken oder auf eine bestimmte Tageszeit (z.B. am Morgen oder am Nachmittag) beschränken (Ogden et al. 1969, Stanley & Linskens 1985: 109). Die Freisetzung von Pollen windblütiger Pflanzen ist kein kontinuierlicher Prozess, sondern erfolgt durch die Einwirkung des Windes schubweise („puff release“) (Fægri & Iversen 1989: 23). In Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Pollenoberfläche (Kohäsion zwischen Pollen und Anthere) und der Windgeschwindigkeit können zwischen dem Aufplatzen der Anthere und der Freisetzung der Pollen einige Stunden verstreichen (Subba Reddi & Reddi 1985).

Die Lebensdauer von Pollen ist ebenfalls artspezifisch und variiert zwischen wenigen Stunden und mehreren Tagen. Großen Einfluss auf die Lebensfähigkeit von Pollen haben Luftfeuchte, Temperatur und UV-Strahlung (Stanley & Linskens 1985: 52, 61).

1.4.7 Pollenmessung

1.4.7.1 Depositionsprozesse

Der Begriff „Deposition“ umfasst alle Prozesse, bei denen luftgetragene Partikel auf eine feste oder flüssige Oberfläche übertragen werden: „*Impaktion*“ (Ablagerung auf Hindernissen, die dem Luftstrom exponiert sind, aufgrund der Massenträgheit des Partikels), „*Sedimentation*“ (Ablagerung unter dem Einfluss der Gravitation) und „*Nass-Deposition/Impingement*“ (Aufnahme von Partikeln durch eine Flüssigkeit). Als Sonderformen sind die „*thermische Abscheidung*“ (Partikelbewegung in Richtung einer kälteren Oberfläche) und die „*elektrostatische Abscheidung*“ (Partikelbewegung in einem elektrischen Feld) zu nennen (Gregory 1973: 88, 115-124, Cadle 1975: 46-133). Als „*Filtration*“ wird die Abscheidung von Partikeln auf den Fasern eines Filters – aufgrund der o.g. Prozesse – bezeichnet. Für Partikel, die deutlich kleiner sind als Pollen ($<0,1 \mu\text{m}$), hat die „*Diffusion*“ (Ausgleich von Konzentrationsunterschieden durch Brownsche Molekularbewegung) als Depositionsmechanismus eine große Bedeutung (Hinds 1999: 150, 182/183, 191-196).

Die Anlagerung eines Partikels auf einer Oberfläche beruht vor allem auf der Adhäsion (Zusammenhangskraft zwischen den Molekülen zweier verschiedener Stoffe). Diese ist abhängig von den Eigenschaften des Partikels (Material, Form, Oberflächenrauigkeit, Größe), den Eigenschaften der Oberfläche (Material, Oberflächenrauigkeit, Verschmutzung), der Luftfeuchte, der Temperatur, der Dauer des Kontaktes und der Kontaktgeschwindigkeit (Hinds 1999: 141).

³¹ Pollenemission in der Nacht kommt in geringem Umfang bei zoophilen Pflanzen vor (Pollenvermittler: Nachtfalter und Fledermäuse).

Unter Resuspension wird der Wiedereintritt von abgelagerten Partikeln in den Luftstrom verstanden. Dies kann das Ergebnis von Luftverwirbelungen, mechanischen Kräften, der Anlagerung anderer Partikel und elektrostatischen Kräften sein. Die Resuspension steigt mit zunehmender Partikelgröße und Windgeschwindigkeit an. Der Anteil resuspendierter Partikel lässt sich bei bekannter Partikelgröße unter Laborbedingungen schätzen. Das einzelne Ereignis lässt sich nicht vorhersagen, da es sich um einen stochastischen Prozess handelt. Die Resuspension von Partikeln $<30\ \mu\text{m}$ durch Windeinfluss tritt nicht ohne weiteres ein (Chamberlain 1967: 161). Denn bei einer turbulenten Luftströmung entsteht immer eine dünne laminare Luftströmung als Grenzschicht zu einer festen oder flüssigen Oberfläche, so dass alle Partikel, die kleiner als diese Grenzschicht sind, vor Resuspension besonders geschützt sind (Hinds 1999: 145-146).

Die Auswaschung von Pollen aus der Luft durch Regentropfen ($10\text{-}5000\ \mu\text{m}$), deren Fallgeschwindigkeit ungefähr um den Faktor 100 höher liegt als die Sinkgeschwindigkeit der Pollen (siehe Kap. 1.4.5), erfolgt durch Impaktion oder durch Adhäsion an Wassertröpfchen ($1\ \text{bis}\ 100\ \mu\text{m}$) in Wolken³² (Tauber 1965: 27, Kraus 2004: 200-201). Die Wahrscheinlichkeit der Auswaschung steigt mit zunehmender Größe der Regentropfen und vor allem mit steigender Größe des Partikels an. Die höchsten Auswaschungsraten (25-90%) von Sporen unterschiedlicher Größe wurden jeweils mit Regentropfen einer Größe von $2000\ \mu\text{m}$ festgestellt (Chamberlain 1967: 155-156, Gregory 1973: 121-123). Zudem hängt die Auswaschungsrate von der Art des Regens, der Häufigkeitsverteilung der Regentropfengröße und der Niederschlagsmenge ab. Es reichen wenige Millimeter Niederschlag aus, um die Konzentration der Pollen in der Luft nahezu auf Null zu reduzieren (Tauber 1965: 28, 40).

1.4.7.2 Messgeräte

Die grundlegende Unterteilung der Pollensammler erfolgt in Aktiv- und Passivgeräte. Während Passivgeräte ausschließlich den natürlichen Luftstrom nutzen, verwenden Aktivgeräte Pumpen, um ein bestimmtes Luftvolumen pro Zeiteinheit anzusaugen und Partikel aus der Luft abzuscheiden. Aktivsammler bieten sich besonders für Untersuchungen an, die eine hohe zeitliche Auflösung der Messwerte (eine Stunde bis ein Tag) benötigen, die zeitlich begrenzt durchgeführt werden und die eine tägliche Wartung der Geräte erlauben. Aufgrund der einfachen, aber effizienten Messtechnik, der geringen Ansprüche an den Messort, der geringen Wartungsintensität und der geringen Betriebs- und Anschaffungskosten eignen sich Passivsammler insbesondere für Langzeituntersuchungen mit einer geringen zeitlichen Auflösung (ein oder mehrere Tage bis Wochen).

³² Pollen sind als Kondensationskerne für die Wolkenbildung zu groß. Die Größe von Kondensationskernen liegt zwischen $0,1$ und $1\ \mu\text{m}$ (Weischet 2002: 196).

Die erste Art von Messgeräten waren ausgelegte Petrischalen, Objektträger u.ä., die – z.T. mit einer klebrigen Substanz versehen – den sedimentierenden Pollen auffingen³³. Diese Art der Depositionsmessung („gravity slide“ oder „horizontal slide“) wird bis heute – trotz der Bemühungen von Durham (1946: 81) zur Standardisierung – in vielerlei Form angewendet. Insbesondere die ungeschützte Exposition der Objektträger erschwert die Vergleichbarkeit der Messungen, da die Nass-Deposition³⁴ die Probenahme beeinflusst (Lewis & Ogden 1965: 619). Regentropfen können bereits sedimentierte Pollen von der Probefläche herausschlagen oder auswaschen sowie im Tropfen gelöste Pollen ablagern. Zudem ergeben sich – wie Durham (1944: 233) feststellte und Gregory & Stedman (1953) systematisch untersuchten – aus der Stellung des Objektträgers zum Luftstrom (sowie aus Form und Stärke des Objektträgers) immense Unterschiede in der Pollenausbeute. Bei hohen Windgeschwindigkeiten fanden sie eine ~50fach höhere Effizienz der vertikalen Flächen (Impaktion) gegenüber den horizontalen Flächen (Sedimentation). Die Belegung mit Pollen ist bei den vertikalen Flächen sehr stark von der Windrichtung und von der Windgeschwindigkeit abhängig (bei geringen Windgeschwindigkeiten ließen sich fast keine Pollen feststellen). Durham (1944: 233) wies auch auf Schwierigkeiten bei der Umrechnung von Pollendeposition in Pollenkonzentration hin, die bis dahin üblich war. Erste volumetrische Geräte wurden Ende der 1930er / Anfang der 1940er Jahre eingesetzt (Durham 1944: 226-227). Aber erst mit der Sporenfalle von Hirst (1952) stand ein Aktivgerät zu Verfügung, das einen mehrtägigen Betrieb erlaubte und einstündige Messintervalle ermöglichte. Die Produktion und der Vertrieb der Pollensammler nach dem Prinzip von Hirst erfolgt durch die Firma Burkard, weswegen auch von der Burkard-Falle gesprochen wird. Dieser Aktivsammler ist bis heute das Standardgerät für die Pollenmessung in Deutschland und anderen Ländern (Winkler 2001a: 9).

Einen kritischen Punkt bei den Aktivgeräten stellt die Ansaugöffnung dar. Um alle Partikel verschiedener Größe zu erfassen, muss der Ansaugvorgang unter isokinetischen Bedingungen erfolgen, d.h. die scharfkantige Ansaugöffnung muss in Windrichtung ausgerichtet und die Windgeschwindigkeit (v_a) muss gleich der Ansauggeschwindigkeit (v_s) sein. Anderenfalls werden überproportional viele kleine Partikel ($v_a < v_s$) oder überproportional viele große Partikel ($v_a > v_s$) angesaugt (May 1967: 66-67, Hinds 1999: 206-213). Dieser Fehler wird bei vielen Aktivgeräten in Kauf genommen. Eine Anpassung der Ansauggeschwindigkeit an die Windgeschwindigkeit ist bei den Geräten nicht vorgesehen. Zudem wird bei den allermeisten Geräten der Volumenstrom nicht gemessen und die Messung kann demzufolge auch nicht auf das Normvolumen³⁵ bezogen werden (Hofmann et al. 2005: 24). Trotz dieser Einschränkung

³³ Einer der ersten Anwender dieser Methode war Blackley 1873 (Gregory & Stedman 1953: 672, Subiza 2001: 59).

³⁴ Der Einfluss der Nass-Deposition auf offen exponierte Proben ist trotz Ansätzen zur Modellierung der Nass-Deposition (z.B. Herbert 1987) unklar.

³⁵ Normvolumen: $T_n = 273,15 \text{ K}$, $P_n = 101325 \text{ Pa}$

gen wird bei den Aktivgeräten die Anzahl der Pollen in die Pollen-Konzentration der Luft (z.B. m^{-3}) umgerechnet.

Tab. 1.2: Messgeräte zur Erfassung von luftgetragenen Pollen (Auswahl)

Aktivgeräte (Ansaugen des Luftstroms)	Quelle	Abscheideprinzip
Andersen (Kaskaden-Impaktor)	Andersen (1958)	Impaktion
Burkard ³⁶ , Lanzoni ³⁷ (volumetrische 7d-Sporenfallen nach Hirst)	www.burkard.co.uk, www.lanzoni.it	Impaktion
Hirst (volumetrische 24h-Sporenfalle)	Hirst (1952)	Impaktion
Impinger	May (1967), Gregory (1973)	Impingement
KleinfILTERgerät / Low-Volume Sampler (LVS)	VDI 2463 Blatt 7 (1982)	Filtration
Zyklon / Zentrifuge	May (1967), Gregory (1973)	Impaktion
Aktivgeräte (Rotation der Messfläche)	Quelle	Abscheideprinzip
Rotorod, Rotobar, Rotoslide	Ogden & Raynor (1967), Ogden et al. (1974)	Impaktion, (Nass-Deposition)
Passivgeräte (natürlicher Luftstrom)	Quelle	Abscheideprinzip
„BifA“	BifA (2004)	?
Cour	Cour (1974)	Filtration, Nass-Deposition
Cundill	Cundill (1986)	Sedimentation, Nass-Deposition
Durham	Durham (1946)	Sedimentation, (Nass-Deposition)
Objektträger (horizontal ausgerichtet)	Gregory & Stedman (1953)	Sedimentation, Nass-Deposition
Objektträger (vertikal ausgerichtet)	Gregory & Stedman (1953)	Impaktion, Nass-Deposition
Pollenmassenfilter (PMF)	Hofmann et al. (2005)	Filtration, Nass-Deposition
Sigma-2	VDI 2119 Blatt 4 (1997)	Sedimentation
Tauber (mit und ohne Dach)	Tauber (1974)	Sedimentation, (Nass-Deposition)

Eine Zusammenstellung und Beschreibung der Messgeräte zur Untersuchung luftgetragener Pollen findet sich u.a. bei May (1967: 74-79), Gregory (1973: 126-145), Ogden et al. (1974: 49-69), Raynor (1979: 161-165), Mullins & Emberlin (1997: 366-368), Subiza (2001: 59-60) und Hofmann et al. (2005: 23-32). Eine Übersicht zeigt Tab. 1.2.

³⁶ Benannt nach dem Hersteller: Burkard Manufacturing Co. Ltd. (<http://www.burkard.co.uk/>)

³⁷ Benannt nach dem Hersteller: Lanzoni s.r.l. (<http://www.lanzoni.it/>)

1.4.7.3 Messgrößen

1.4.7.3.1 Konzentration

Unter der (Stoffmengen-)Konzentration³⁸ wird die Anzahl von Partikeln (Pollen) pro Volumeneinheit (Messeinheit: n Pollen m⁻³) verstanden (Tyldesley 1967: 23). Zur Ermittlung der Pollen-Konzentration werden vor allem volumetrische Messgeräte verwendet, die durch eine Pumpe ein bestimmtes Luftvolumen pro Zeiteinheit ansaugen und Partikel durch Impaktion oder Filtration abscheiden.

1.4.7.3.2 Deposition

Die Anzahl sedimentierter Partikel (Pollen) pro Bezugsfläche (Messeinheit: n Pollen m⁻²) wird als (Stoffmengen-)Deposition bezeichnet. Unter Berücksichtigung der Messdauer kann die *Depositionsrate* als Anzahl sedimentierter Pollen pro Bezugsfläche und Zeit (Messeinheit: n Pollen m⁻² d⁻¹) angegeben werden. Zur Ermittlung der Pollendeposition werden vor allem gravimetrische Messgeräte verwendet, die je nach Bauart auf Impaktion, Filtration, Sedimentation oder Nass-Deposition beruhen.

1.4.7.3.3 Fluss / Flussdichte

Unter (Stoffmengen-)Fluss versteht man die Anzahl von Partikeln (Pollen), die pro Zeiteinheit durch einen gegebenen Querschnitt fließen (Messeinheit: n Pollen m⁻² d⁻¹). Wird der Fluss auf eine Volumeneinheit bezogen spricht man von *Flussdichte* (Messeinheit: n Pollen m⁻³ d⁻¹).

1.4.7.4 Messort

Der Messstandort sollte – im Sinne der Fragestellung der Studie – repräsentativ für das Untersuchungsgebiet sein. Die freie Anströmung der Luft sollte aus allen Himmelsrichtungen und bei allen Windgeschwindigkeiten erfolgen können. Die Beeinträchtigung der Proben durch Kontamination mit Staub- und Rußpartikeln von Industrie und Straßenverkehr sollte minimiert werden. Zudem sollte der Messort für die Probenahme gut zu erreichen sein, ggf. über einen Stromanschluss verfügen und Sicherheit vor Vandalismus und Diebstahl bieten. Von der Messapparatur sollte keine Gefahr für Dritte ausgehen und sie sollte keine optische und akustische Belästigung für die Umgebung darstellen. Die Vergleichbarkeit der Messdaten von mehreren Messstandorten kann nur durch gleiche Messgeräte, standardisierte Messprozedu-

³⁸ Je nach Untersuchungsgegenstand können Konzentrationen auch als Volumen- oder Massenkonzentrationen angegeben werden (Cadle 1975: 11). Bei der Immissionsmessung nach der 22. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (22. BImSchV) ist die Angabe der Massenkonzentration (z.B. in µg/m³ oder mg/m³) üblich: (Eickelpasch & Eickelpasch 2004: 22-23).

ren und gleiche Standortbedingungen (Messhöhe über Grund, Mindestabstand zu aerodynamischen Hindernissen etc.) gewährleistet werden (Ogden et al. 1974: 71-73, Raynor 1979: 166, Lacey & Venette 1995: 424, Eickelpasch & Eickelpasch 2004: 21, Köhler 2004: 205-207).

1.4.8 Pollentransport in der Troposphäre

Die Gashölle, die die Erde umgibt, wird als *Atmosphäre* bezeichnet. Sie gliedert sich in fünf Schichten³⁹, die durch den vertikalen Temperaturverlauf definiert sind. Von Bedeutung für das Wetter ist allerdings nur die unterste Schicht, die *Troposphäre*⁴⁰, die bis 10 km Höhe reicht (Weischet 2002: 39-40, Kraus 2004: 137-142).

Die Ursache von *horizontalen Luftbewegungen* sind Luftdruckunterschiede, die thermisch (Luftdruckgradient infolge von Einstrahlung) oder dynamisch (globale Strömungsfelder der Atmosphäre) verursacht werden. Die horizontalen Luftbewegungen bestimmen Windgeschwindigkeit und Windrichtung in allen Skalen (siehe Kap. 1.5) und rufen weltweit maßgeblich die Luftströmungen hervor (Weischet 2002: 127-137). Die horizontal bewegten Luftmassen werden an der Grenze zur Erdoberfläche durch *Reibung* gebremst. Die Rauigkeit der Erdoberfläche ist von Relief und Zustand (Wasser, Boden, Vegetation) abhängig und mindert je nach Ausprägung die Luftbewegung unterschiedlich stark. Der Reibungseinfluss nimmt stets mit steigender Höhe ab und kann je nach Wetterlage und Schichtung bis 2 km über Grund reichen (Weischet 2002: 141-142).

Vertikale Luftbewegungen sind im Vergleich zu horizontalen Luftbewegungen in der räumlichen Ausdehnung beschränkt und von geringerer Stärke. Vertikale Luftbewegungen spielen sich nur in der unteren Schicht der Troposphäre ab, sind dort allerdings für die Transportprozesse von Partikeln von großer Bedeutung. Dynamische Turbulenz (Luftverwirbelung) und thermische Konvektion (Aufwärtsbewegung von Luftmassen durch thermisch bedingte Luftdruckänderung) sind die Ursachen für vertikale Luftbewegungen (Weischet 2002: 168-172).

Die untere Schicht der Troposphäre (Höhe 1 bis 2 km über Grund) wird als *atmosphärische* oder *planetare Grenzschicht* bezeichnet und kann durchgehend als turbulent angesehen werden. Innerhalb der Schicht kommt es zu Wärme- und Impulsaustausch zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche. Der Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht ist dreigeteilt: Die *viskose Unterschicht* (bis 1 cm), die *Prandtl-Schicht* (bis 100 m) und die *Ekman-Schicht* (bis 1 oder 2 km). Die viskose Unterschicht hat auf die Dynamik der Grenzschicht keinen Einfluss. Die Schicht weist keine turbulente Strömung auf, so dass der Wärme- und Feuchtetransport durch

³⁹ Troposphäre (0-10 km), Stratosphäre (10-50 km), Mesosphäre (50-85 km), Thermosphäre / Ionosphäre (85-800 km), Exosphäre / Magnetosphäre (800-60.000 km)

⁴⁰ In dieser Schicht nimmt die Lufttemperatur und der Luftdruck kontinuierlich ab, im Mittel um 0,65 K bzw. um rund 80 hPa pro 100 m Höhe (Kraus: 2004: 137-138).

molekulare Vorgänge (Diffusion) erfolgt. Die Prandtl-Schicht ist gekennzeichnet durch turbulente, aber höhenkonstante Luftbewegungen. Innerhalb der Schicht nimmt die Windgeschwindigkeit kontinuierlich mit der Höhe zu. Die Ekman-Schicht hat die größte vertikale Ausdehnung der drei Schichten. Mit zunehmender Höhe nehmen turbulente Luftströmungen ab und die Windgeschwindigkeit nur noch geringfügig zu. Oberhalb der Ekman-Schicht treten ausschließlich laminare Luftströmungen auf, die von Reibungseffekten an der Erdoberfläche unbeeinflusst sind (Etling 2002: 283-313).

Der Aufbau und die Prozesse in der Troposphäre zeigen, dass sich der Pollentransport vor allem auf die atmosphärische Grenzschicht, d.h. bis maximal 2 km über Grund, beschränkt. Dieses konnten Rempe (1937: 121-123, 145) und Hirst & Hurst (1967: 318-327) durch Messungen nachweisen. Es ist zwar grundsätzlich möglich, dass luftgetragene Partikel – unabhängig vom Ort ihrer Emission – an jedem beliebigen Ort der Erde abgelagert werden können. Allerdings gelangen Partikel ($>1 \mu\text{m}$) – abgesehen von Extremereignissen wie Eruptionen, Flächenbränden und Explosionen – nicht von der Erdoberfläche in Höhen von über 2 km, d.h. außerhalb der atmosphärischen Grenzschicht und damit in den Bereich der Höhenwinde, die als laminare Strömungen die gesamte Erde umspannen. Die atmosphärische Grenzschicht, Auswaschungseffekte und Gravitationskräfte beschränken den Ferntransport von Partikeln ($>1 \mu\text{m}$) normalerweise auf eine Entfernungen von 1.500 bis 3.000 km (Ludlam 1967: 16, Schütz 1987: 346). Dass Pollen den o.g. Prozessen in der unteren Troposphäre unterliegen und es keiner außergewöhnlichen Wetterereignisse bedarf, um Pollen in großen Mengen über weite Entfernungen zu transportieren, ist seit langer Zeit bekannt und wurde für Baumpollen u.a. von Hesselmann (1919, nach Erdtmann 1943) auf Schiffen in der Ostsee, von Rempe (1937) auf Helgoland, von Tyldesley (1973) auf den Shetland Inseln, von Tampieri et al. (1977) und Mandrioli et al. (1980) in Italien und von Hjelmroos (1991) in Schweden und Finnland festgestellt⁴¹. Eine Übersicht über den Ferntransport von Pollen und Sporen geben Hirst & Hurst (1967: 307-344), Gregory (1973: 263-281) und Fægri & Iversen (1989: 29-31).

Voraussetzung für den Verbleib von Pollenkörner in der Luft sind turbulente Luftströmungen, die gegen die Schwerkraft den Pollen in der Luft halten. Die spezifische Sinkgeschwindigkeit von Pollen ist solange von untergeordneter Bedeutung, wie sich die Pollen innerhalb von beständigen turbulenten Luftströmungen befinden (Hirst & Hurst 1967: 322). Bei bodennahen laminaren Luftströmungen und in der Nacht unter turbulenzarmen und beruhigten Luftbewegungen kommt die Sinkgeschwindigkeit hingegen zum Tragen und eine Fraktionierung entsprechend der Sinkgeschwindigkeit findet statt (Rempe 1937: 145-146, Straka 1975: 171).

⁴¹ Weitere Berichte über Ferntransport von Pollen liegen u.a. von Scott & van Zinderen Bakker Sr. (1985) für eine Insel im Indischen Ozean und von Comtois (1997) sowie Campbell et al. (1999) für die kanadische Arktis vor.

Den Erkenntnissen über die Luftbewegung in der atmosphärischen Grenzschicht trägt als Erster Tauber Mitte der 1960er Jahre Rechnung, indem er den Prozess der Pollendeposition in drei separate Komponenten aufteilt. Er unterscheidet zwischen Pollendeposition aus einer bodennahen und aus einer bodenfernen Luftströmung sowie aus Nass-Deposition. Gleichzeitig weist er darauf hin, dass sich die Pollenspektren der drei Komponenten unterscheiden werden (Tauber 1965: 30-33). Dieses Konzept wurde von Fægri & Iversen (1989: 22-25) weiterentwickelt. In Abhängigkeit vom Einfluss der Luftströmungen und -schichten unterscheiden sie drei Komponenten der Pollenausbreitung: (1) Gravitationskomponente⁴² (Ausbreitung bis ~50 m), (2) lokale Komponente (Ausbreitung bis ~200 m) und (3) regionale Komponente (Ausbreitung >200 m). Die Pollen, die der ersten Komponenten unterliegen, fallen rasch auf die Erdoberfläche, da sie vom Wind wenig beeinflusst sind und vorrangig der Schwerkraft unterliegen. Mit der zweiten Komponenten verläuft die Bewegung der Pollen mehr oder weniger parallel zum Untergrund. Der Verbleib der Pollen in bodennahen turbulenten, aber höhenkonstanten Windströmungen (Prandtl-Schicht) führt zu einer baldigen Deposition der Pollen. Nur die Pollen, die der dritten Komponenten unterliegen, gelten als wirklich luftgetragen („airborne“), da sie durch turbulente Luftströmungen bis in 2 km Höhe aufsteigen und über einen längeren Zeitraum dort verbleiben können (Ekman-Schicht).

1.4.9 Zusammenhang zwischen luftgetragendem Pollen, Meteorologie und Pollendeposition

Pollen verschiedenster Pflanzenarten können in der Luft in großer Anzahl nachgewiesen werden. Trotzdem nimmt der Pollen nur eine untergeordnete Stellung bei den luftgetragenen Partikeln ein. Nach Stix & Große-Brauckmann (1970) beträgt der Anteil der Pollen am Bioaerosol der Größenklasse 3 bis 150 µm im gesamten Jahresverlauf 2% (96% Pilzsporen, 2% übrige Objekte). Stanley & Linskens (1985: 38) geben den Anteil des Pollens am gesamten partikulären Niederschlag mit maximal 5% während der Vegetationsperiode an.

Untersuchungen zur Abhängigkeit der Pollenkonzentration / Pollendeposition von meteorologischen Messgrößen führt je nach Versuchsdesign (Anzahl und Art der Messgeräte, Messintervall, Anzahl und Entfernung der Pollenquellen) zu unterschiedlichen Resultaten (siehe Tab. 1.3). Die große Bedeutung der Meteorologie auf das Vorkommen von Pollen in der Luft ist unbestritten, die Bedeutung der einzelnen meteorologischen Parameter hingegen nicht.

⁴² Da „Windstille“ nach der Beaufort-Skala Windgeschwindigkeiten bis 0,2 m/s umfasst (Kraus 2004: 38-39), können Rapspollen ~30 m verdriftet werden (Blütenstand 1,7 m, Sinkgeschwindigkeit 1,1 cm/s; siehe Kap. 3.1.1.4) und Maispollen ~2 m verdriftet werden (Blütenstand 2,5 m, Sinkgeschwindigkeit 30 cm/s; siehe Kap. 3.1.2.4).

Tab. 1.3: Abhängigkeit der Pollenkonzentration/Pollendeposition von meteorologischen Messgrößen

Nr.	B	BS	D	E	GS	LD	LF	N	SD	T _{min}	T _{mittel}	T _{max}	WD
1	-	-	-	-	-	n.s.	-0,27*	-0,21*	n.s.	-	-	+0,43**	-
2	-	-	-	-	-	-	-0,297***	-0,370***	-	+0,135*	+0,435***	+0,43***	-0,370***
3	-	-	-	-	pos. K.	-	-	n.s.	-	n.s.	-	n.s.	-
4	-	-	-	-	-	-0,230**	-0,068*	+0,081**	+0,239**	-	+0,279**	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-0,451***	-0,398***	+0,325***	n.s.	+0,324***	+0,403***	-
6	-	-	-	-	-	-	-0,877***	-0,693***	+0,692***	+0,678***	+0,616***	+0,641***	-
7	-	-	-	-	-	-	-	n.s.	-	n.s.	+0,70*	+0,73*	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-0,64**	-	+0,66**	+0,82**	+0,76**	-
9	-	-	-	-	-	-	-0,213**	-0,375**	+0,498**	+0,421**	+0,512**	+0,486**	-
10	-	-	signifik. K.	signifik. K.	-	-	-	signifik. K.	-	-	signifik. K.	-	-
11	-	(+/-?) 0,458***	-	-	-	-	(+/-?) 0,520***	(+/-?) 0,520***	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-0,59*** - -0,77***	-0,25* - +0,50**	+0,25* - +0,67***	-	+0,59*** - +0,94***	-	-
13	-0,56**	-	-	-	+0,52**	-	-0,53**	n.s.	-	-	+0,59**	-	-

B = Blattnässe, BS = Blühstadium, D = Datum, E = Entfernung zur Pollenquelle, GS = Globalstrahlung, LD = Luftdruck, LF = Rel. Luftfeuchte, N = Niederschlag, SD = Sonnenscheindauer, T_{min} = min. Tagestemperatur, T_{mittel} = mittlere Tagestemperatur, T_{max} = max. Tagestemperatur, WD = Wolkendeckung, WG = Windgeschwindigkeit, WR = Windrichtung, WRun = Wind Run, WRun(C) = Wind Run (Windstille), WRun(NE) = Wind Run (Nordosten), WRun(NW) = Wind Run (Nordwesten), WRun(SE) = Wind Run (Südosten), WRun(SW) = Wind Run (Südwesten)

Depo. = Pollendeposition (1/m²), K. = Korrekation, Konz. = Pollenkonzentration (1/m³), n.s. = nicht signifikant, pos. = positiv, signifik. = signifikant

Nr.	WG	WR	WRun	Wrun (C)	Wrun (NE)	Wrun (NW)	Wrun (SE)	Wrun (SW)	Quelle	Pollenart	Pollenmessung	Umfang (n)
1	n.s.	-	-	-	-	-	-	-	Smart et al. (1979)	Poaceae	Konz. (24h)	28?
2	n.s.	-	-	-	-	-	-	-	Moseholm et al. (1987)	Poaceae	Konz. (24h)	374
3	-	-	pos. K.	-	-	-	-	-	McCartney & Lacey (1991)	Raps	Konz. (24h)	?
4	+0,055*	-	-	-	-	-	-	-	Moreno-Grau et al. (2000)	Chenopodiaceae-Amaranthaceae	Konz. (24h)	~1.270
5	-	-	-	+0,139***	+0,356***	n.s.	0,239***	-0,285***	Aira et al. (2001)	Cupressaceae	Konz. (24h)	?
6	-	-	-	-	-	-	-	-	Jato et al. (2001b)	<i>Castanea</i>	Konz. (24h)	?
7	-0,73*	-	-	-	-	-	-	-	Latałowa et al. (2002)	Birke	Konz.-Summe (a)	7
8	-	+0,63** bis n.s.	-	-	-	-	-	-	Ribeiro et al. (2003)	Gesamtpollen	Konz. (24h)	?
9	+0,247**	-0,288** bis 0,262**	-	-	-	-	-	-	Rodríguez-Rajo et al. (2003)	9 Baum- und Gräserpollen	Konz. (24h)	?
10	signifik. K.	signifik. K.	-	-	-	-	-	-	Schwarz (2003)	Raps	Depo. (24h)	?
11	(+/-?) 0,436***	-	-	-	-	-	-	-	Lang et al (2004)	Mais	Depo. (24h)	300
12	-	-	-	-	-	-	-	-	Neumeyer & Zimmermann (2005)	8 Baum- und Gräserpollen	Konz. (24h)	?
13	n.s.	-	-	-	-	-	-	-	Beismann & Kuhlmann (2006)	Raps	Depo. (24h)	28

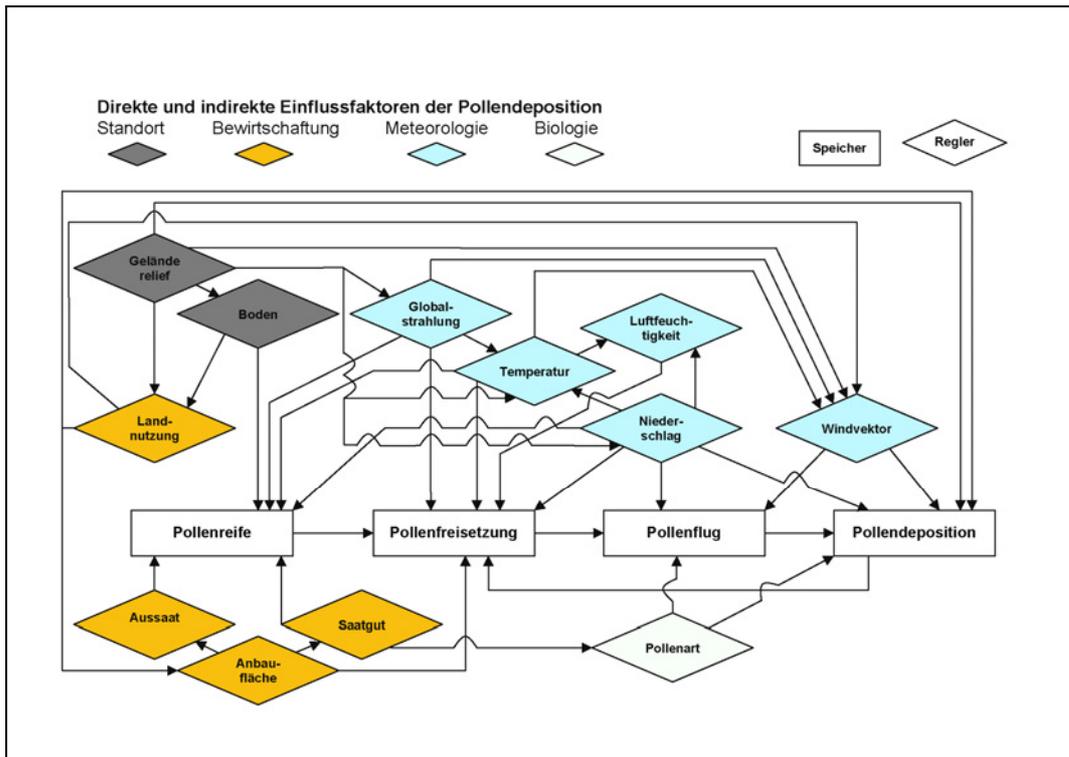


Abb. 1.2: Einflussfaktoren der Deposition von Pollen windblütiger Pflanzen

Abgeleitet aus der Literatur (u.a. Straka 1975, Edmonds 1979, Crane 1986, Fægri & Iversen 1989, McCartney 1994, siehe auch Tab. 1.3), den Erkenntnissen eigener Vorversuche (Beismann & Kuhlmann 2006: 103, 106-108) und theoretischen Überlegungen wurde das in Abb. 1.2 dargestellte Modell der Einflussfaktoren auf die Deposition von Pollen windblütiger Pflanzen erstellt. Es wird deutlich, dass an der Pollendeposition direkt nur wenige Faktoren beteiligt sind⁴³:

- Art und Anzahl der luftgetragenen Pollen (Pollen-Pool),
- Windvektor (Richtung und Stärke in laminaren und turbulenten Strömungen),
- spezifische Polleneigenschaften (Sinkgeschwindigkeit, Pollenkit, etc.),
- Niederschlag (Nassdeposition),
- Geländere relief,
- Landnutzung (Art und Beschaffenheit möglicher Akzeptorflächen).

Da die Pollendeposition den Endpunkt eines längeren zeitlichen und räumlichen Prozesses bildet, wirken eine Vielzahl weiterer Faktoren auf die zeitlich vorgelagerten Stadien der Pollenverbreitung und damit indirekt auf die Pollendeposition. Diese Faktoren sind zum Teil die selben, wie bei der Deposition, zum Teil andere. Sie beeinflussen sich zum Teil unterein-

⁴³ Die genannten Faktoren lassen sich ggf. nach physikalischen Gesichtspunkten weiter untergliedern (siehe Sehmel 1980: 986).

ander oder sind voneinander abhängig. Die Tatsache, dass ein und derselbe Faktor auf unterschiedlichen Ebenen der Pollenverbreitung Einfluss hat, ist bei der Analyse von Pollendepositionsmessungen zu berücksichtigen.

1.4.10 Untersuchungen zum Pollenflug auf mesoskaliger Ebene

Großflächige Untersuchungen (mesoskalige Ebene, siehe Kap. 1.5) über die Pollenkonzentration in der Luft oder die Pollendeposition werden verhältnismäßig selten durchgeführt (eine Auswahl findet sich in Tab. 1.4), da Aufwand und Kosten mit zunehmender Größe des Untersuchungsraumes deutlich ansteigen. Aus diesem Grund werden bei einer größeren Anzahl von Messstellen (>15) häufig die Aktivgeräte (z.B. Burkard) durch Passivgeräte (z.B. Objektträger) ersetzt. Auffällig ist zudem, dass bei vielen der u.g. Untersuchungen die vergleichende Auswertung der Daten nicht oder ausschließlich beschreibend erfolgt und eine Übertragung der Ergebnisse auf den Untersuchungsraum oft unterbleibt. Wegen der geringen Anzahl an Messstellen ist eine Verallgemeinerung der Ergebnisse allerdings auch kritisch zu sehen.

Tab. 1.4: Übersicht (Auswahl) über Konzentrations- oder Depositionsmessungen von Pollen auf mesoskaliger Ebene mittels technischer Pollensammler

Quelle	Untersuchung	Fläche (km ²)	Pollensammler		
			Anzahl	Typ	Sammler / km ²
Schnetter (1964)	Pollendeposition in Mittelhessen	163	6	Durham	27,2
Stix & Ferretti (1974)	Konzentration von Pollen und Sporen in der Luft in Deutschland	248.944	15	Burkard	16.596
Fuckerieder (1976)	Konzentration von Gräserpollen in der Luft in Mitteleuropa	248.944	12	Burkard	20.745
Hall (1990)	Pollendeposition in den südlichen Rocky Mountains und den SW Plains	21.200	37	Tauber	573
Emberlin & Norris-Hill (1991)	Pollendeposition im Norden von London	35	14	Durham	2,5
Thompson et al. (1999)	Deposition und Konzentration von Rapspollen westlich von Dundee	70	52, 5	Objektträger, Burkard	1,3 14
Bricchi et al. (2000)	Deposition von Platanen-Pollen	25	16	Durham	1,6
Jato et al. (2001b)	Konzentration von Eßkastanien-Pollen in der Luft in Galicien	29.574	3	Hirst	9.858
Gabarra et al. (2002)	Konzentration von Platanen-Pollen in der Luft in Katalonien	32.091	7	Burkard / Hirst	4.584
Ramsay et al. (2003)	Deposition von Raps-Pollen	116	52	Objektträger	2,2

1.4.11 Untersuchungen zum Pollenflug der Kulturpflanzen Raps und Mais

Die Verwendung von Pollensammlern zur Untersuchung der Pollenausbreitung beschränkte sich bis vor wenigen Jahren ausschließlich auf Pollen mit allergenem Potenzial und auf das städtische Siedlungsgebiet (Smart & Knox 1979, Leuschner et al. 2000). Da die Pollen der meisten Kulturpflanzen allergen nicht wirksam sind und in der landwirtschaftlichen Praxis Auskreuzungen von größerem Interesse sind als die Messung der Pollendeposition oder Pollenkonzentration, gibt es nicht viele Untersuchungen mit technischen Pollensammlern im landwirtschaftlichen Raum. Erst mit der geplanten Einführung von GVP in die Landwirtschaft wurde der Pollenmessung Beachtung geschenkt, da Pollen von transgenen Pflanzen nachteilige Auswirkungen auf andere Organismen haben können und deshalb die Anzahl und räumliche Verteilung der Pollen von Bedeutung ist (siehe Tab. 1.5).

Um unerwünschte Auskreuzungen bei der Züchtung oder Produktion von Saatgut zu verhindern, sind Isolierabstände für Kulturpflanzen vorgeschrieben. Eine Übersicht beim Mais geben Feil & Schmidt (2001: 24-27). Je nach Land und Zweck schwanken die Isolierabstände zwischen 100 und 5.000 m. Für Raps liegen die Isolierabstände in der EU bei 200 m und in der Schweiz bei 400 m (Barth et al. 2003: 136).

Seit den 1990er Jahren rückte die Thematik der Auskreuzung im Zuge der Diskussion um GVP verstärkt in den Vordergrund. Untersuchungen wurden vor allem an kleinen Versuchspartellen durchgeführt (siehe Tab. 1.6 und vgl. Kap. 2.1). Wie bereits Simpson et al. (1999) anmerken, ist die Vergleichbarkeit der veröffentlichten Studien aufgrund der Unterschiede im Versuchsaufbau (insbesondere Flächengröße der Pollenquellen) eingeschränkt.

Tab. 1.5: Übersicht (Auswahl) über Konzentrations- oder Depositionsmessungen von Raps- und Maispollen mittels technischer Pollensammler

Quelle	Pflanze	Pollenquellen		Pollensammler			
		Anzahl	Fläche (ha)	Aktivsammler		Passivsammler	
				Anzahl	Entfernung zur Pollenquelle	Anzahl	Entfernung zur Pollenquelle
Raynor et al. (1972)	Mais	1	0,03	1	Feldmitte	250	1, 8, 15, 32, 55 m (0 bis 4,6 m Höhe und 10 Windrichtungen)
Williams (1984)	Raps	1	6	1	0 m	1	0 m
Mesquida & Renard (1982)	Raps	1	0,02	-	-	16	1, 6, 15, 32 m

Quelle	Pflanze	Pollenquellen		Pollensammler			
		Anzahl	Fläche (ha)	Aktivsammler		Passivsammler	
				Anzahl	Entfernung zur Pollenquelle	Anzahl	Entfernung zur Pollenquelle
McCartney & Lacey (1991)	Raps	1 je Jahr	0,26-0,84	1, 5	Feldmitte, 0 bis 20 m (0,4 bis 4,2 m Höhe)	-	-
Timmons et al. (1995)	Raps	1 je Jahr	10 und 3	4	0, 100, 360 m, 2.500 bzw. 1.500 m	-	-
Cundill (1998)	Raps	3	7,2 / 9,1 / 12,3	4 (tem- porär)	0, 167, 300, 350 m	10	0, 170, 280, 300, 350, 580 m
Thompson et al. (1999)	Raps	1	55	5	0, 5, 170, 400 m	-	-
Thompson et al. (1999)	Raps	k.A.	k.A.	-	-	52	0 bis 4.000 m
Jarosz et al. (2003)	Mais	1	0,04 ⁴⁴	1, 10	Feldmitte, 3 und 10 m (0,25 bis 4 m Höhe)	24	1, 2, 3, 4, 8, 10 m
Ramsay et al. (2003)	Raps	19	~10 bis ~100	4	k.A.	52	0 bis 4.000 m
Schwarz (2003)	Raps	3	Je 0,16 ⁴⁵	-	-	16	0, 50, 100, 150 m (1, 2, 3, 4 m Höhe)
Lang et al. (2004)	Mais	2	2	-	-	14	-5 m, 0 m, 1, 3, 5, 6, 10 m
Hofmann et al. (2005)	Raps	2	0,2 und 0,317	-	-	37	10 m bis 4.600 m
Hofmann et al. (2005)	Mais	3?	4,2	k.A.	k.A.	14	0 m bis 2.900 m
Aylor et al. (2006)	Mais	1	23	7	Feldmitte (2,5, 3, 6, 9 m Hö- he)	2 oder 4 (unter Tragflä- che)	22 bzw. 15 Flüge in unterschied- lichen Höhen über Feld
Boehm et al. (2008)	Mais	6	?	7	Feldmitte (2,5, 3, 6, 9 m Hö- he)	Mindest- ens 2 (unter Tragflä- che)	74 Flüge in Höhen zwischen 6-259 m über Feld

⁴⁴ Der 20 x 20 m Mais-Plot lag mittig in einer 120 x 122 m großen, ansonsten vegetationslosen Fläche, um die sich eine Mais-Mantelsaat mit einer Breite von 31 bis 70 m anschloss (Jarosz et al. 2003: 38)

⁴⁵ Flächengröße wurde 2002 vor Ort vom Autor mit GPS bestimmt.

Tab. 1.6: Übersicht (Auswahl) über Untersuchungen zur Auskreuzung von Raps und Mais

Quelle	Pflanze	Pollendonator (D)		Abstand D-A	Pollenakzeptor (A)	
		Anzahl	Fläche (ha)		Anzahl	Fläche (ha)
Paterniani & Stort (1974)	Mais	Je 1 Pflanze	-	1 m	4	0,03 bis 0,16
Rakow & Woods (1987)	Raps	5	0,011	0 m	59 Pflanzen je Plot	-
Scheffler et al. (1993)	Raps	1	0,006	0 m	1	1,1
Scheffler et al. (1995)	Raps	1	0,04	200 und 400 m	4	Je 0,04
Downey (1999)	Raps	3	16-64	4, 250, 600 m	3	16-64
Simpson et al. (1999)	Raps	7	0,004	k.A.	D zugleich A	D zugleich A
Simpson et al. (1999)	Raps	1	9	100, 200, 400 m (jeweils im N, O, S, W)	12 Standorte mit je 6 Pflanzen	-
Thompson et al. (1999)	Raps	k.A.	k.A.	0 – 4.000 m	52 Standorte mit je 10 Pflanzen	-
Thompson et al. (1999)	Raps	>1	11 ha	100 – 930 m	5 Standorte mit je 10 Pflanzen	-
Luna et al. (2001)	Mais	1	0,4	100, 200, 300, 400 m	16	Je 0,0013
Rieger et al. (2002)	Raps	k.A.	k.A.	0 – 5.000 m	63	25 - 100
Klein et al. (2003)	Mais	2	Je 0,04	0 m	2	1,4 und 1,6
Loos et al. (2003)	Mais	1	1	2 m	1	5
Dietz-Pfeilstetter & Zwerger (2004)	Raps	5	4 x 0,49 ha, 1 x 7,46 ha	0,5-10 m	D zugleich A	D zugleich A
Ma et al. (2004)	Mais	3	Je 0,073	0 m	3	0,907 bzw. 0,604
Bannert & Stamp (2005b)	Mais	k.A.	k.A.	52-4440 m	13	0,25-1,44
Weber et al. (2005)	Mais	28	0,3 – 23	0 m	28	k.A.

Quelle	Pflanze	Pollendonator (D)		Abstand D-A	Pollenakzeptor (A)	
		Anzahl	Fläche (ha)		Anzahl	Fläche (ha)
Funk et al. (2006)	Raps	7	Je 0,004	1,5 m	7	Je 0,029
Ireland et al. (2006)	Mais	315	4-129	10 – 180 m	315	6,5-248,5
Simpson et al. (2006)	Raps	6	Je 0,84	0 – 92 m	8	Je 0,84

1.4.12 Biologischer Pollentransport

Unter den blütenbestäubenden Insekten nehmen Bienen (Apidae) – hinsichtlich ihres Anteils an der Bestäubung – eine herausragende Stellung ein (weitere Bestäuber: Fliegen, Wespen, Käfer, Tag-/Nachtfalter). Bienen (25.000 Arten weltweit) bestäuben 16% aller Blütenpflanzen weltweit und nahezu 400 Kulturpflanzen (Delaplane & Mayer 2000: 12, 19). Neben dem Nektar (Kohlenhydrate) ist der Pollen die Hauptnahrungsquelle (Proteine und Lipide) für Bienen, die in Kolonien oder einzeln leben. Während und nach dem Blütenbesuch kämmen die Bienen den an den Haaren anhaftenden Pollen ab und packen ihn in das so genannte „Pollenhöschen“ (konkav geformtes drittes Beinglied). Darüber hinaus können je nach Blütenpflanze mehrere zehntausend Pollenkörner an dem Körper einer Biene anhaften und zur Blütenbestäubung führen (Free 1993: 25-26, Ramsay et al. 1999: 214). Bienen nehmen bei Temperaturen oberhalb von 10°C die Sammeltätigkeit auf, deren Intensität mit steigender Temperatur zunimmt⁴⁶ (Stanley & Linskens 1985: 105-106). Je nach Spezies suchen Bienen ausschließlich eine Pflanzenart oder -gattung auf, oder sie fliegen viele verschiedene Blüten an. Wenn möglich bevorzugen Wild- und Honigbienen Nahrungsquellen in der Nähe des Nests/Bienenstocks. Der übliche Sammelbereich der Honigbiene umfasst ein Gebiet mit einem Radius von 1 bis 2 km (3,1 bis 12,6 km²) um den Bienenstock. Allerdings nehmen Honigbienen auch weite Flugdistanzen auf sich, um zu einer bevorzugten Pollenquelle zu gelangen (bis zu 11 km) (Hüsing & Nitschmann 1987: 302, Free 1993: 26, 53, Ramsay et al. 1999: 209, Steffan-Dewenter & Kuhn 2003: 571).

⁴⁶ Des Weiteren bestimmen Volkstärke, Brutzustand, Nahrungsvorräte, Qualität und Quantität des Nektarangebots, Zugang zum Blütennektar, Entfernung zur Trachtquelle, Tageszeit, Windstärke, Witterungsverhältnisse und Lichtintensität die Sammelaktivität (Hüsing & Nitschmann 1987: 302).

1.4.13 Modelle zur Vorhersage und Ausbreitung von Pollen

Das Ziel von Vorhersagemodellen besteht darin, den Zeitpunkt und die Stärke des Auftretens von allergologisch bedeutsamen Pollen mehrere Tage bis einige Wochen im Voraus zu erkennen. Ausbreitungsmodelle hingegen versuchen die Transportprozesse der Pollen in der Luft möglichst exakt zu beschreiben. Vorhersagemodelle sind eher für medizinisch-allergologische Fragestellungen, Ausbreitungsmodelle eher für ökologische Fragestellungen von Interesse. Norris-Hill (1995: 182-183) bezeichnet die Vorhersagemodelle als rezeptor- und die Ausbreitungsmodelle als quellenorientiert.

Vorhersagemodelle nutzen in der Regel ausschließlich meteorologische Parameter der letzten Jahre und des aktuellen Jahres, um Pollenkonzentrationen vorherzusagen. Daten über Pollenquellen werden nicht genutzt. Die Vorhersagen werden meist auf der Grundlage eines Pollensammlers erstellt (Larsson 1993, Norris-Hill 1995, Norris-Hill 1998, Laaidi 2000). Deshalb können die Vorhersagen nicht ohne weiteres für größere Gebiete verallgemeinert werden. In Deutschland wird die Konzentration von allergenen Pollen in der Luft an 55 Messstationen erhoben (Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst 2006) und für einen Prognosezeitraum von zwei Tagen die zu erwartende Pollenbelastung in den einzelnen Bundesländern grob (4 Belastungsklassen: kein, schwach, mäßig, stark) angegeben (DWD 2006). Um die Vorhersagegüte zu verbessern, gibt es Ansätze Pollenquellen zu berücksichtigen (Puppi Branzi & Zanotti 1992).

Für detaillierte Aussagen über die räumliche Verteilung der Pollenkonzentration oder Pollendeposition sind Ausbreitungsmodelle besser geeignet. Klein et al. (2003: 132-133) unterscheiden 2 Modelltypen, empirische und mechanistische Modelle⁴⁷. Erstere werden verwendet, um experimentelle Daten (Auskreuzungsraten oder Pollenmessungen) durch Exponentialfunktionen oder Potenzfunktionen zu beschreiben (Lambert et al. 1980, Okubo & Levin 1989). Mechanistische Modelle simulieren die Prozesse des Partikeltransports und lassen sich mit steigender Komplexität einteilen in (1) Gaußsches Fahnenmodell („Gaussian plum model“), (2) Gauß-Wolken-Modell („Gaussian puff model“), (3) Eulersches Gittermodell („Eulerian grid model“) und (4) Lagrangesches Partikelmodell („Lagrangian particle model“) (VDI 2000: 12-13). Zur Modellierung der Ausbreitung von Pollen und Bioaerosolen auf verschiedenen Skalen (siehe Kap. 1.5) wurden o.g. Modelle u.a. von Kawashima & Takahashi (1995 und 1999), Hidalgo et al. (2002), Loos et al. (2003), Helbig et al. (2004), Hehl et al. (2005) und Schueler & Schlünzen (2006) verwendet.

⁴⁷ Gleichzeitig entwickeln Klein et al. (2003: 133) ein „quasi mechanistisches Ausbreitungsmodell“, das an empirische Daten angepasst und an Lagrangesche Partikelmodelle angelehnt ist.

1.5 Raum- / Zeitskalen

Die Definition von Skalen zur Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Ausdehnung von Prozessen wird in vielen Wissenschaftszweigen verwendet (Geografie, Meteorologie, Hydrologie, Ökologie). Die Skalen werden grob in Makro- (>2.000 km), Meso- (2.000 bis 2 km) und Mikro-Skalen (<2 km) eingeteilt. In der weiteren hierarchischen Gliederung werden die Skalen entsprechend ihrer Ausdehnung in Untergruppen⁴⁸ aufgeteilt (α , β und γ) (Orlanski 1975: 527-530). Je nach Wissenschaftsdisziplin werden die Grenzen der Skalen etwas unterschiedlich gefasst (Kramer 2002: 1278-1280).

Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen (1) dem Maßstab in Raum und Zeit, den ein Prozess oder System besitzt, und (2) dem Maßstab der Betrachtung / Erfassung eines Prozesses / Systems. Dabei ist der Maßstab der Betrachtung / Erfassung immer kleiner zu wählen (d.h. die Auflösung ist höher) als der Maßstab des Gesamtsystems, damit dieses ausreichend charakterisiert werden kann (Kraus 2004: 7-11).

⁴⁸ Makro- α Skala (>10.000 km), Makro- β Skala (10.000 bis 2.000 km), Meso- α Skala (2.000 bis 200 km), Meso- β Skala (200 bis 20 km), Meso- γ Skala (20 bis 2 km), Mikro- α Skala (2 bis 0,2 km), Mikro- β Skala (200 bis 20 m), Mikro- γ Skala (<20 m)

2 Fragestellung

2.1 Hintergrund

Pollen transgener Kulturpflanzen sind ein Agens des möglichen Gentransfers und der möglichen Ausbreitung von gentechnisch veränderten Gensequenzen in die Umwelt. Deshalb kommt der Untersuchung der Exposition der Umwelt mit Pollen im Rahmen eines GVP-Monitorings eine erhebliche Bedeutung zu (Kjellsson & Strandberg 2001: 59-60, Züghart & Breckling 2003a: 50-52). Die Risiken von GVP (siehe Kap. 1.2.2 Punkt (1) bis (5): u.a. Auskreuzung innerhalb der Pflanzenart, Auskreuzung mit Wildarten und (z.B. toxische) Wirkung auf Nicht-Zielorganismen) sind mit der Ausbreitung von Pollen verbunden. Trotzdem wurde im Rahmen der Forschung über GVP der Fragestellung nach dem Verbleib des Pollens von Kulturpflanzen bisher wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Allenfalls in der Nähe von Freisetzungsfeldern – meist geringer Größe – wurden vereinzelt Pollensammler aufgestellt (siehe Tab. 1.5). Diese Versuchsbedingungen werden dem Pollenflug unter realen Anbaubedingungen nicht gerecht. Schon Mitte der 1990er Jahre haben Timmons et al. (1995: 418) darauf hingewiesen, dass die Größe und der Abstand der Felder einen entscheidenden Einfluss auf den Pollentransport hat und dass: *„Such trials [Anm. Autor: small field trials] have done little to remove uncertainty over the scale of pollen emission and dispersal likely to emanate from genetically-modified fields of the crop.“* und weiter *„[...] great care should be exercised before extrapolating information obtained from small-scale release experiments to predict the likely performance of genetically-modified crops under standard agricultural conditions.“* (ebd.: 421). Auf den kumulierten und (mangels adäquater Untersuchungen) oft unterschätzten Einfluss, den mehrere Felder hinsichtlich der Pollenausbreitung in einer Kulturlandschaft ausüben, weisen Squire et al. (1999: 57) hin. Klein et al. (2003: 146) kommen zu dem Schluss: *„Much is known about the physical phenomena that influence particle dispersal at very fine scales, but ecology must often deal with large spatial or temporal scales [...]. In the case of the release of transgenic plants, predictions of gene flow over agricultural landscapes are needed.“* Für Rapspollen gibt es Hinweise auf Ferntransport über mehrere Kilometer wie Rieger et al. (2002) und Ramsay et al. (2003) zeigten. Dem Maispollen wird trotz seiner Größe ein ähnliches Potenzial für den Ferntransport zugeschrieben (Treu & Emberlin 2000: 14, Feil & Schmid 2001: 23-24, 31). Die lückenhaften empirischen Daten über die Beschaffenheit (Größe, Dichte, Lebensfähigkeit etc.), die Emission und Deposition von Pollen vieler Kulturpflanzen erweist sich insbesondere für die Modellierung der Ausbreitung von (GV)-Pollen auf mesoskaliger Ebene als Manko (Helbig et al. 2004: 17, VDI & KRdL 2005: 2).

2.2 Inhaltliche Abgrenzung der Untersuchung

Das Ziel der Untersuchung war die Auswahl repräsentativer Messstandorte innerhalb des Agrarökosystems eines Untersuchungsgebietes (siehe Kap. 2.3) zur Messung der Deposition von luftgetragenen transgenen und nicht transgenen Raps- und Maispollen unter Verwendung technischer Pollensammler vom Typ Sigma-2 und Typ Pollenmassenfilter (PMF) und die Regionalisierung⁴⁹ der so gewonnenen und ausgewerteten Messwerte auf mesoskaliger Ebene.

2.3 Räumliche Abgrenzung der Untersuchung

Die Untersuchung beschränkt sich auf ein 256 km² großes Gebiet (16 x 16 km) in der Region Fürstenfeldbruck, Regierungsbezirk Oberbayern, Bayern (siehe Kap. 3.4.1.1).

2.4 Zeitliche Abgrenzung der Untersuchung

Der Feldversuch fand im Jahr 2003 in den Monaten April/Mai (Rapsversuch) und Juli (Maisversuch) statt (siehe Kap. 3.5.3).

2.5 Randbedingungen der Untersuchung

Die Planung, Durchführung und Auswertung der Messkampagne zielte darauf ab eine Implementierung der Methode als Teil eines bundesweites GVP-Monitoring (siehe Kap. 1.3.2) zu ermöglichen.

Zur Verfügung standen jeweils 50 Pollensammler vom Typ Sigma-2 und PMF die an 50 Messstandorten installiert und betrieben wurden.

⁴⁹ Regionalisierung: Übertragung punktuell oder auf kleiner Fläche gewonnener Messwerte auf eine größere Fläche (Skalenwechsel) unter Verwendung adäquater Modelle (Kleeberg 1999: 4, Wenkel & Schultz 1999: 30).

3 Material und Methode

3.1 Kulturpflanzen

Die hier vorgestellten Untersuchungen zu einem Pollen-Monitoring konzentrierten sich auf transgenen HR-Raps (Herbizid-Resistenz) und transgenen Bt-Mais (Eigenproduktion des Toxins des *Bacillus thuringiensis* zur Vermeidung von Schädlingsbefall). Den Kulturpflanzen Raps (*Brassica napus* L.) und Mais (*Zea mays* L.) wird eine hohe Priorität für ein Monitoring aufgrund des Potenzials für ökologische Wirkungen⁵⁰ und der wirtschaftlichen Bedeutung zugesprochen (Metz et al. 1997, Bund/Länder-AG 2001).



Abb. 3.1: Blütenstand von Raps und Mais

3.1.1 Raps (*Brassica napus* L.)

3.1.1.1 Botanik

Raps⁵¹ (*Brassica napus* L.) tritt als einjährige, einjährig überwinternde oder zweijährige Pflanze auf und wird als Lebensform den Therophyten und Hemikryptophyten zugerechnet (Rothmaler 1999: 229). Die Pflanze erreicht eine Höhe von 1,2 bis 2 m, besitzt herzförmige, stängelumfassende, etwas behaarte Blätter, einen traubigen Blütenstand und Schoten als Früchte. Sie gehört zur Familie der Brassicaceae (oder Cruciferae, Kreuzblütler). Innerhalb der Familie können einige Gattungen nicht scharf abgegrenzt werden. Zwischen den Gattungen *Brassica* (Kohl), *Sinapis* (Senf), *Diplotaxis* (Stinkrauke), *Eruca* (Ruke) und *Raphanus* (Hederich) besteht eine enge genetische Verwandtschaft (Pascher et al. 2000). Zur Gattung *Brassica*, zählen mehr als 30 Kohlarten, deren Entstehung im einzelnen nicht gänzlich geklärt ist. Zu den drei diploiden (doppelter Chromosomensatz) Grundarten gehören *Brassica cam-*

⁵⁰ Siehe u.a. Jørgensen & Andersen (1994), Jørgensen et al. (1996) und Halfhill et al. (2002).

⁵¹ Englische Bezeichnung: „Oilseed rape“ (OSR), „rapeseed“ und insbesondere in Nordamerika auch „Canola“ (lt. Khachatourians et al. (2001: 39) ursprünglich nur eine geschützter Markenname)

pestris (Chromosomensatz $n=10$), *B. oleracea* ($n=9$) und *B. nigra* ($n=8$). Durch Kreuzung entstanden viele polyploide *Brassica*-Arten. Raps (Chromosomensatz $n=19$) ist eine amphidiploide Hybride⁵² aus den Genomen von *B. campestris* (Rübse) und *B. oleracea* (Kohl) (U 1935: 441, 448, Geisler 1988, Diepenbrock et al. 1999: 258/259). Der Ursprung des Kohlanbaus scheint der mediterrane Raum zu sein. In der Antike lieferten Griechen und Römer erste Beschreibungen von Kohlarten. Der früheste Anbau von Raps ist für das 17. Jahrhundert in den Niederlanden belegt (Körber-Grohne 1987: 158, 161).

3.1.1.2 Blüte

Die sattgelben Zwitterblüten stehen am Ende des Haupttriebes und der verzweigten Seitentriebe der Rapspflanze. Je nach Bestandsdichte können sich – trotz Entwicklungsrückstand gegenüber dem Haupttrieb – an 5 bis 10 Verzweigungen die Blüten vollständig entwickeln und befruchtet werden. Die Blühzeit der landwirtschaftlichen Bestände in Deutschland ist im April-Mai (Winkler et al. 2001: 59). Jedoch kann der Raps während der gesamten Vegetationsperiode blühen, fruchten und Samen freisetzen (Winkler et al. 2001: 59, Pascher et al. 2000, Haeupler et al. 2003). Die Gesamtblühdauer eines Bestandes beträgt drei bis fünf Wochen. Die einzelne Rapsblüte blüht für 3 Tage, wobei sie sich nachts leicht schließt und am frühen Morgen öffnet und bis 9 Uhr vollständig geöffnet ist (Diepenbrock et al. 1999: 259, 266, Free 1993: 172). Im Tagesverlauf erfolgt die maximale Freisetzung der Rapspollen um die Mittagszeit. Timmons et al. (1995: 420) verzeichnen ein Maximum um 11 Uhr UTC, McCartney & Lacey (1991: 471) um 14 Uhr UTC und Williams (1984: 355) eins um 11:30 Uhr und eins um 14:30 UTC. Alle drei Quellen sind sich einig, dass zwischen 23 bis 7 Uhr nahezu kein Pollenflug feststellbar ist.

3.1.1.3 Wind-/Insektenbestäubung

Raps ist selbstfertil und die Rate der Selbstbefruchtung (Autogamie) wird durchschnittlich mit 80% (Geisler 1988) bzw. 60-70% (Scarbrick & Daniels 1986) angegeben. Allerdings zeigt sich die Fremdbefruchtungsrate mit 2-90% (Geisler 1988) bzw. 0-90% (Scarbrick & Daniels 1986) als sehr variabel. Als Vektoren der Fremdbefruchtung wirken Insekten und Wind (Mesquida & Renard 1982: 364-365). Das Verhältnis von Insekten- zu Windbestäubung bei der Fremdbefruchtung ist unbeständig. Nach Leins (2000) zeigt die Rapsblüte alle Merkmale der Zoophilie⁵³ (Tierbestäubung). Langridge & Goodman (1982: 125) konnten nachweisen, dass Rapsfelder im Freiland bei Ausschluss von Insekten unverändert hohe Erträge bringen. Dies beruht, wie die Versuche von Williams (1978) nahe legen, auf der Selbst-

⁵² Die genetische Information der Eltern liegt vollständig als vierfacher Chromosomensatz in der Hybride vor.

⁵³ Zoophilie-Syndrom beim Raps: Zwitterblüte, auffällige Blütenfarbe und -duft, Pollen und Nektar (Mesquida et al. 1988b: 307) als Nahrungsangebot, Pollenkornoberfläche stark skulptiert, reichlich Pollenkitt.

und Fremdbefruchtung verursacht durch den Wind. Williams konnte nachweisen, dass ohne Windeinfluss im Gewächshaus der Rapsertag zurückgeht. Durch das Schütteln der Rapspflanzen konnte die Anzahl der Schoten und die Anzahl der Samen pro Schote gesteigert werden (Williams 1978: 348). Durch einen umfangreichen Versuchsaufbau konnte Mesquida et al. (1988a) – im Gegensatz zu anderen Untersuchungen (siehe Free 1993: 174-175) – den „Käfig-Effekt“⁵⁴ (starke Verringerung der Windgeschwindigkeit im Inneren des Käfigs) auf die Untersuchung ausschließen und nachweisen, dass Bienen, Fliegen und Hummeln keinen signifikanten Einfluss auf den Ertrag haben⁵⁵.

3.1.1.4 *Pollen*

Der Rapspollen ist rund-oval und 3-colpat, d.h. es ziehen sich drei langgestreckte Furchen (Colpen) – Meridianen vergleichbar – von Pol zu Pol (Winkler et al. 2001: 27, 59). Der mittlere Durchmesser liegt bei 28 μm ⁵⁶. Die Sinkgeschwindigkeit schätzen McCartney & Lacey (1991) auf 1,7 cm/s (lt. anderer Quelle⁵⁷: 1,2 cm/s). Die Lebensdauer des freigesetzten Pollens geben Treu & Emberlin (2000) mit bis zu 5 Tagen an. Rapspollen kann aufgrund des Pollenkitts Agglomerate von mehreren Pollen bilden, die zusammen durch die Luft befördert werden⁵⁸.

3.1.1.5 *Landwirtschaftliche Praxis*

Beim Raps wird zwischen einer Winter- und Sommerform unterschieden. Der ertragsstärkere Winterraps wird gegenüber dem Sommerraps bevorzugt angebaut. Der Aussaatzeitpunkt für Winterraps liegt um den 20. August. Während der Sommerraps im gleichen Jahr zur Reife kommt, überwintert der Winterraps in einem frühen Entwicklungsstadium (Rosette, 8-12 Blattstadium) und wird im darauffolgenden Jahr geerntet. Die Ertragshöhe wird bestimmt durch Anzahl, Gewicht und Ölgehalt der Samen. Diese Größen sind v.a. von der Bestandsdichte (Anzahl der Pflanzen je Fläche) abhängig. Geisler (1988) gibt den Mindestwert der Bestandsdichte mit 35 Pflanzen/m² und Diepenbrock et al. (1999: 266) die optimale Be-

⁵⁴ Um Insekten (Bienen, Fliegen und Hummeln) aus den Käfigen aus- bzw. in die Käfige einzuschließen, muss eine geringe Maschenweite gewählt werden (2 mm). In Folge dessen reduziert sich die Windgeschwindigkeit im Inneren des Käfigs um bis zu 90% (Mesquida et al. 1988a: 53). Der Anteil der Insektenbestäubung kann folglich nicht durch den Vergleich „Rapsernte im Freiland“ und „Rapsernte im Käfig ohne Insekten“ ermittelt werden. Eine Versuchsanordnung mit Ventilatoren in den Käfigen und Insekten in den Käfigen ergab keine Unterschiede zwischen „künstlicher“ Windbestäubung und der Insektenbestäubung (Mesquida et al. 1988a: 64).

⁵⁵ Die positiven und negativen Effekte der Bienen auf den Ertrag heben sich auf, dass unter dem Strich kein signifikanter Effekt festzustellen ist (Mesquida et al. 1988a: 65-66).

⁵⁶ Beug (2004): 24-32 μm , Mittelwert: 28 μm , Winkler et al. (2001: 27, 59): 27 μm , Treu & Emberlin (2000): 32-33 μm , McCartney & Lacey (1991): 25 μm .

⁵⁷ Dietze, V. (Deutscher Wetterdienst - DWD, Freiburg): Telefonische Auskunft vom 21.10.2003.

⁵⁸ Durch die Agglomeration der Pollen erhöht sich die Sinkgeschwindigkeit des Konstrukts im Vergleich zu einem einzelnen Pollen (Ferrandino & Aylor 1984).

standsichte mit 40-60 Pflanzen/m² an. In einer üblichen Fruchtfolge folgt Raps im dritten Jahr nach zweimaligem Getreideanbau. Aus pflanzenhygienischen Gründen sollte Raps im darauffolgenden Jahr nicht wieder an der selben Stelle angebaut werden (ebd.: 267, Cramer 1990: 19, 57).

Nach Erfolgen in der Qualitätszüchtung (ertragreiche Sorten mit veränderten Fettsäuregehalten)⁵⁹ stieg ab Mitte der 1970er Jahre der Rapsanbau in Bayern an (siehe Abb. 3.2). Die gewonnenen Öle werden in der Nahrungsmittel- und der chemischen Industrie (Treibstoff (Rapsmethylester), Spezialöle (Schmier-, Hydraulik-, Sägeketten und Schalungsöle) und Grundstoff für Farben, Lacke und Weichmacher) sowie die Extraktionsrückstände als Futtermittel verwendet (Diepenbrock et al. 1999: 258).

Mit einer Ernte von 3,87 Mio. t Rapssamen (11,9% der Weltproduktion) in 2002/2003 nimmt Deutschland nach China (10,53 Mio. t) und Kanada (3,95), aber noch vor Indien (3,70) und Frankreich (3,32) weltweit den dritten Platz der Raps-Produzenten ein (Gunstone 2004: 12).

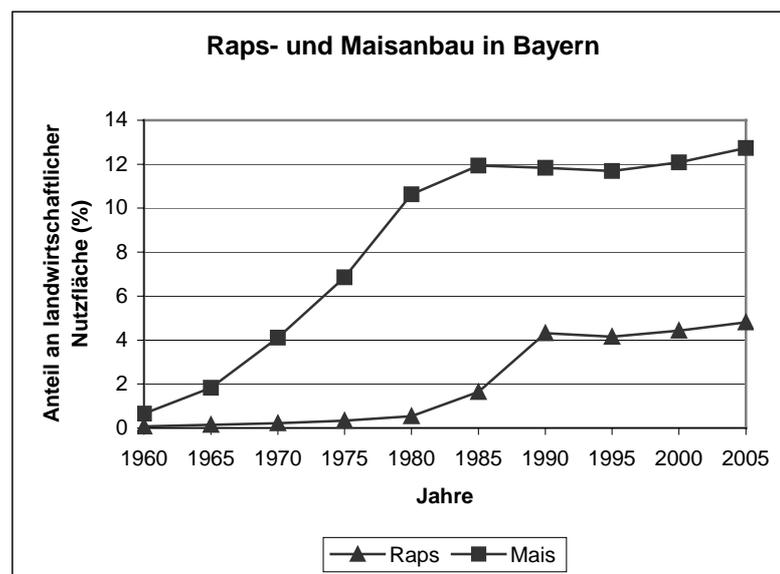


Abb. 3.2: Anteil von Raps und Mais an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern (LfStaD – Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2003, 2007)

⁵⁹ Wichtige Fettsäuren von Raps sind: Gesättigte Fettsäuren, Ölsäure, Linolsäure, Linolensäure und Erucasäure. Die Fettsäurezusammensetzung und der Ölgehalt wurden züchterisch an die Ansprüche der Verbraucher angepasst und sind somit sortenabhängig. Als Konsumraps werden die sog. 00-Sorten verwendet, die erucasäurefrei und glucosinolatarm sind (Diepenbrock et al. 1999: 255, 258).

3.1.2 Mais (*Zea mays* L.)

3.1.2.1 Botanik

Mais⁶⁰ (*Zea mays* L.) gehört – wie alle Getreidearten – der großen Familie der Süßgräser (Poaceae) an und stellt die einzige Art der Gattung *Zea* dar. Innerhalb der Art treten viele Varietäten auf, die sich in Pflanzenlänge, Wachstumszeit, Kornform und Kornfarbe stark unterscheiden, jedoch nicht im Chromosomensatz, der einheitlich $2n = 20$ beträgt. Die Kornarten werden meist als Grundlage zur Aufgliederung der Art verwendet⁶¹ (Zscheischler et al. 1990: 51, Diepenbrock et al. 1999: 147).

Zum morphologischen Aufbau der Maispflanze: Der 1 bis 3 m hohe, markerfüllte, walzenförmige und etwas abgeplattete Stängel erreicht einen Durchmesser von 2-6 cm und besteht aus bis zu 14 Internodien. Das lanzettliche Blatt ist oberseitig behaart und kann 30 bis 150 cm lang und bis 15 cm breit werden (Geisler 1988, Rothmaler 1999: 603).

Als einjährige Pflanze, die ungünstige Jahreszeiten als Samen im Boden überdauert, zählt der Mais zur Lebensform der Therophyten (Rothmaler 1999: 603). Der wärmeliebende und frostempfindliche Mais verfügt über den C4-Metabolismus, welcher die Pflanze bei höherer Temperatur und Lichtintensität zu einer besonders hohen photosynthetischen Leistung befähigt (Diepenbrock et al. 1999). Der Grund für diese Besonderheit liegt in der außereuropäischen Herkunft des Maises. Er stammt aus Mittel-/Südamerika und ist damit einem anderen Florenreich (Neotropis) und einer anderen Klimazone (Tropen) zugehörig.

Der Mais ist weltweit eine der ältesten Kulturpflanzen (Diepenbrock et al. 1999). Über die ursprüngliche Wildform des Mais herrschte lange Unklarheit⁶². Er wurde um 3.000 v. Chr. von den indianischen Hochkulturen Mittel- und Südamerikas in Kultur genommen⁶³ (Körber-Grohne 1987: 92/93) und deckte einen wesentlichen Anteil ihres Nahrungsbedarfs. Schon vor der Entdeckung Amerikas war der Maisanbau fast über den gesamten amerikanischen Kontinent verbreitet. Nach der Entdeckung Amerikas wurde der Mais von den Europäern seit dem Ende des 15. Jahrhunderts in Europa⁶⁴, Asien und Afrika verbreitet. In Europa wurde der Mais zum festen Bestandteil der ackerbaulich genutzten Kulturarten (Geisler 1988). Der An-

⁶⁰ Englische Bezeichnung: „maize“ oder „corn“ (Nordamerika)

⁶¹ Konvarietäten des Mais (*Zea mays* convar.): *indurata* (Hartmais), *amylacea* (Stärke- oder Weichmais), *indentata* (Zahnmais), *evarta* (Puffmais), *saccharata* (Zuckermais), *tunicata* (Spelzmais), *cerotina* (Wachsmais), *amylasaccharata* (Zwischenform von Weich- und Zuckermais), *aorista* (Zwischenform von Zahn- und Hartmais) (Geisler 1988: 44, Zscheischler et al. 1990: 51-52).

⁶² Als nächste Verwandte und Wildform (siehe Galinat 1988: 4-11) gilt die genetisch und morphologisch (Ausnahme: Fruchtstände) ähnliche Teosinte (*Zea mays* ssp. *mexicana*) (Körber-Grohne 1987: 90, Diepenbrock et al. 1999: 147, Baltazar et al. 2004).

⁶³ Matsuoka et al. (2002) gehen aufgrund von genetischen Untersuchungen von einer Kultivierung des Mais im südlichen Mexiko vor 9.000 Jahren aus (statt mehreren Kultivierungen in Mittel- und Südamerika).

⁶⁴ Als Gartenpflanze in klimatisch begünstigten Gebieten Deutschlands im 16./17. Jahrhundert (Körber-Grohne 1987: 88)

bau von Mais breitete sich in Bayern erst zu Beginn der 1960er Jahre aus, nachdem die Sorten an die hiesigen Standortbedingungen angepasst wurden (siehe Abb. 3.2, Körber-Grohne 1987: 88/89).

3.1.2.2 *Blüte*

Die männlichen und weiblichen Blütenorgane sind beim Mais auf einer Pflanze angelegt (einhäusig, monözisch), jedoch räumlich getrennt (getrenntgeschlechtlich, diklin). Darin unterscheidet sich der Mais von allen in Mitteleuropa angebauten Getreide- bzw. Süßgräserarten. Am Gipfel des Stängels bilden die männlichen, zweiblütige Ährchen einen rispenförmigen Blütenstand. Auf kurzen Seitentrieben, die aus den Blattachseln hervortreten und von Hüll- oder Lieschblättern umgeben sind, sitzen die weiblichen Organe. Die einblütigen weiblichen Ährchen sind zu einer Ähre zusammengestellt und bilden einen Kolben. Jedes Ährchen bildet einen 40 bis 50 cm langen fadenförmigen Griffel (Narbenfaden) aus. Die Griffel aller Blüten eines Kolbens (ca. 300 bis 1000) bilden eine Quaste, die zum Zeitpunkt der Blüte aus den Lieschblättern herausragt.

3.1.2.3 *Wind-/Insektenbestäubung*

Um die Selbstbefruchtung (Autogamie) zu vermeiden, reifen die männlichen Blütenorgane (Anthere oder Staubbeutel) vor den weiblichen (Narbe). Dies wird als Vormännlichkeit (Proterandrie oder Protandrie) bezeichnet. Nachdem beim Mais die eigenen Pollen aus den Staubbeuteln entlassen wurden, erscheinen erst zwei bis vier Tage später die Narbenfäden. In der Natur wird der Mais zu 95% fremdbefruchtet (5% Selbstbefruchtung). Die Bestäubung erfolgt durch den Wind (Zscheischler et al. 1990, Eastham & Sweet 2002: 38). Alle Merkmale einer Windbestäubung (Anemophilie) nach Leins (2000) treffen auf den Mais zu⁶⁵. Nach Zander (1997: 22, 90) zählt Mais zu den Pollenblumen, die Pollenkörner als Futterstoff für Insekten anbieten und regelmäßig von Bienen besucht werden. Da nur die männlichen Blütenorgane von den Insekten angefliegen werden und die weiblichen weit von den männlichen Blütenorganen entfernt liegen, ist eine Bestäubung unwahrscheinlich. Trotzdem schließen Treu & Emberlin (2000) eine Insektenbestäubung nicht gänzlich aus.

⁶⁵ Anemophilie-Syndrom beim Mais: Unscheinbare Blüte, Organzahl der Blüten reduziert, Diklinie (Geschlechtertrennung), dichte Infloreszenzen, „Pendelantheren“ an dünnen Filamenten, kein Pollenkitt, Pollenkornoberfläche glatt, Narbe oberflächenvergrößert, eine Samenanlage pro Blüte, kein Nektar.

3.1.2.4 Pollen

Die Pollenproduktion einer Maispflanze kann mit ca. 10 Mio. Pollen angegeben werden (siehe Tab. 3.1). Das Pollenkorn des Mais ist fast kugelförmig und glatt⁶⁶, da die Exine (äußere Schicht) feinkörnig ist und nur eine Keimöffnung aufweist (monoporat). Der mittlere Durch-

Tab. 3.1: Pollenproduktion von Mais⁶⁷

Maispollen pro			Quelle
Staubblatt (in Tsd.)	Blüte (in Tsd.)	Blütenstand / Pflanze (in Mio.)	
-	-	(50) ⁶⁸	Paton (1921: 473)
3,4	10,1	18,4	Pohl (1937: 375, 383, 395, 406)
-	-	25	Kiesselbach (1999 ⁶⁹ : 48)
2	-	14	Wallace et al. (1949: 73)
6 – 7,5	-	-	Goss (1968: 336)
2,5 – 3	15	4 – 10	Zscheischler et al. (1990: 54)
-	-	14	Jarosz et al. (2003: 42)
-	-	(4,5) ⁷⁰	Westgate et al. (2003: 938)
-	-	6,7	Jarosz et al. (2005: 4380)

messer⁷¹ des Kornes beträgt 90 bis 100 µm (Di-Giovanni et al. 1995, Winkler et al. 2001: 27, 56)⁷² und die Masse⁷³ 247,0 ng (Stanley & Linskens 1984). Maispollen sind die größten Gräserpollen und für eine windblütige (anemophile) Art relativ groß. Die Pollengröße windbestäubter Arten liegt meist zwischen 15 – 40 µm⁷⁴. Die Sinkgeschwindigkeit des Maispollens schwankt laut Straka (1975: 170) zwischen 24,0 – 30,0 cm/s, laut Aylor (2002) zwischen 21 –

⁶⁶ Trotzdem treten gelegentlich Pollenagglomerate von 2 und mehr Maispollen auf (Aylor 2002).

⁶⁷ Bezüglich der Pollenproduktion von Mais wird häufig auf Miller (1982) verwiesen, der jedoch seinerseits Paton (1921) und Wallace et al. (1949) zitiert.

⁶⁸ Keine Angabe zur Untersuchungsmethode.

⁶⁹ Nachdruck des Originals von 1949

⁷⁰ „Effektive Pollenproduktion“, lt. Westgate et al. (2003: 938) berechnet aus der Anzahl an Maispollen, die auf Höhe der Quaste mit einer passiven Pollenfalle gefunden wurden.

⁷¹ Stanley und Linskens (1985) weisen auf viele Faktoren hin, die Größe und Volumen von Pollen einer Art beeinflussen. Neben Wassergehalt, Turgeszens und Alter der Körner spielen klimatische Bedingungen wie Temperatur, mineralische Nährstoffe und Wasserhaushalt eine Rolle. Diese klimatischen Faktoren können auch Auswirkungen auf die Anzahl von Poren und Furchen und die Strukturierung der Exine (äußere Schicht des Pollens) haben.

⁷² Die Spannweite der Durchmesser von Maispollen schwankt je nach Autor zwischen 53,1-138,0 µm (Beug 2004), 76-106 µm (Aylor 2002) und 90-125 µm (Treu & Emberlin 2000).

⁷³ Durham (1943) gibt die Masse eines Maispollens mit 187 ng unter sehr trockenen Bedingungen und mit 335 ng unter feuchten Bedingungen an.

⁷⁴ Winkler (2001b: 17): 15-40 µm, Heß (1990): 20-30 µm, Fægri & Iversen (1989): 30-40 µm

32 cm/s und Di-Giovanni et al. (1995) maßen 31 cm/s. Treu & Emberlin (2000) geben die Lebensdauer des Maispollens mit 3 Stunden bis 9 Tage an⁷⁵.

Die Freisetzung der Maispollen findet in Deutschland allgemein zwischen Ende Juli bis Anfang August statt und dauert 5-8 Tage⁷⁶ (Maximum am dritten Tag) (Zscheischler et al. 1990). Vormittags zwischen etwa 9-11 Uhr gibt der Mais den meisten Pollen ab. Zuvor müssen Feuchtigkeit und Tau an der Rispe abgetrocknet sein. Allerdings zeichnet sich der Mais durch eine relativ gleichmäßige Freisetzung des Pollens über die gesamte Tageslänge aus. Während der Nacht wird praktisch kein Pollen freigesetzt (Ogden et al. 1969, Zscheischler et al. 1990, Jarosz et al. 2003). Die Pollenproduktion ist in Tab. 3.1 dargestellt.

3.1.2.5 *Landwirtschaftliche Praxis*

Im Maisanbau wird zwischen den Nutzungsformen Körnermais, Corn-Cob-Mix⁷⁷ (CCM) und Silomais unterschieden. Der Silomais dient ausschließlich der Viehfütterung (Futterpflanze) und ist die dominierende Nutzungsform in Deutschland (siehe Tab. 3.2). Körnermais und CCM zählen zum Futter-/Industriegetreide (Geisler 1988, Statistisches Bundesamt 2004).

Die in Deutschland angebauten Maissorten sind fast ausschließlich Hybride (Kreuzung zweier Inzuchtlinien). Hybridsorten weisen nur im ersten Anbaujahr eine hohe Leistungsfähigkeit auf (Heterosiseffekt⁷⁸), weshalb jährlich neues Saatgut verwendet werden muss. Die Aussaat von Mais erfolgt im späten Frühjahr (Mitte bis Ende April) und kann unter ungünstigen Bedingungen bis zum Ende des ersten Maidrittels verschoben werden. Spezifische Vorfeldansprüche stellt Mais nicht und ist deshalb ohne Schwierigkeiten in Fruchtfolgen einzufügen. Die Bestandsdichte variiert für Körnermais zwischen sechs bis 14 Pflanzen/m² und für Silomais zwischen acht und 18 Pflanzen/m². Eine Monokultur von Mais über mehrere Jahre ist möglich, da Mais als mit sich selbst verträglich gilt (Geisler 1988).

Mit einer Ernte von 4,06 Mio. t Körnermais⁷⁹ (0,64% der Weltproduktion) in 2003/2004 rangiert Deutschland weit hinter den großen Körnermais-Produzenten USA (256,9 Mio. t), China (114,2 Mio. t) und Brasilien (47,8 Mio. t) (LfL 2005).

⁷⁵ Stanley & Linskens (1985: 67): 8 Tage bei niedriger Temperatur und hoher Luftfeuchte, Luna et al. (2001: 1555): 2 Stunden (Feldversuch in Mexiko).

⁷⁶ Die Blühdauer geben Jarosz et al. (2003, 2005) mit 9-14 Tagen an und das Maximum der Pollenfreisetzung wird am 6.-8. Tag beobachtet.

⁷⁷ Bezeichnung (US-amerikanisch) für ein nicht vollständig reifes Erntegut (Mais-Spindel-Gemisch), das mit höherem Wassergehalt siliert wird (bauernhof.net).

⁷⁸ Heterosiseffekt: Aus der Kreuzung von zwei Inzuchtlinien gehen Nachkommen hervor, die in der ersten Generation leistungsfähiger als die Eltern-Generation sind (biosicherheit.de).

⁷⁹ Inkl. Corn-Cob-Mix (CCM)

Tab. 3.2: Anteil von Raps und Mais an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland, Bayern und im Landkreis Fürstfeldbruck

(Statistisches Bundesamt 2004, LfStaD – Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2003)

	Fläche in Deutschland (in 1000 ha)	Anteil (in %)	Fläche in Bayern (in 1000 ha)	Anteil (in %)	Fläche im Lkr. FFB ⁸⁰ (in ha)	Anteil (in %)
Jahr	2002		2002		1999	
Landwirtschaftlich genutzte Fläche	16.974,2	100,0	3.251,9	100,0	23.725	100,0
Ackerland	11.790,9	69,5	2.081,7	64,0	18.695	78,8
Körnermais ⁸¹	398,7	2,3	105,9	3,3	-	-
Silomais ⁸²	1.119,2	6,6	285,1	8,8	2.396	10,1
Raps u. Rübsen	1.296,6	7,6	167,3	5,1	2.099 ⁸³	8,8

3.2 Technische Pollensammler

3.2.1 Bau und Funktion

3.2.1.1 Sigma-2

Der Sigma-2 Sedimentationssammler (siehe Abb. 3.3) ist ein nach VDI/DIN (VDI 2119, Blatt 4, 1997) standardisiertes Messinstrument zur Messung partikelförmiger Luftbeimengungen $>2,5 \mu\text{m}$ und wird vom Deutschen Wetterdienst (DWD) seit 15 Jahren zur Probenahme in Kurorten eingesetzt.

Der Sigma-2 ist ein einfaches und robustes Gerät, das sich aus den Komponenten Fuß, Sammelkammer und Haube/Mantel zusammensetzt (Bauhöhe 31 cm). Die zylindrische Sammelkammer ($\varnothing 10,5 \text{ cm}$) ist durch eine Haube mit Mantel ($\varnothing 15 \text{ cm}$) abgedeckt. Durch vier umlaufend angebrachte Öffnungen ($4 \times 7,5 \text{ cm}$) in Mantel und Zylinder, die als Regenschutz gegeneinander versetzt sind, strömt die Luft in die Sammelkammer des Sigma-2. Im luftberuhigten Inneren sedimentieren die luftgetragenen Partikel auf eine $65 \times 65 \text{ mm}$ große transparente Haftfolie (Stärke: $250 \mu\text{m}$) am Fuß des Geräts. Zur Probeentnahme werden Sammelkammer/Haube angehoben und die Haftfolie mitsamt Halterung ausgetauscht⁸⁴. Nach der

⁸⁰ Landkreis Fürstfeldbruck (Lkr. FFB)

⁸¹ Einschließlich Corn-Cob-Mix (CCM)

⁸² Einschließlich Lieschkolbenschrot

⁸³ Nur Winterraps

⁸⁴ Seit 2004 kann der Sigma-2 auch mit einem oder zwei Objektträgern, die mit dem gleichen Haftmaterial präpariert sind, bestückt werden (Information über die Weiterentwicklung des Sigma-2 siehe www.ssp-europe.com).

Aufbereitung der Probe werden die Pollen unter dem Mikroskop visuell oder automatisch (Ronneberger et al. 2002) bestimmt und ausgezählt. Als Ergebnis wird die Pollendeposition (Pollen pro Flächeneinheit) oder die Pollendepositionsrate (Pollen pro Flächen- und Zeiteinheit) angegeben (siehe Kap. 1.4.7).



Abb. 3.3: Anordnung der Pollensammler Sigma-2 (Mitte) und PMF (oben und unten, mit Schlauchverbindung)

3.2.1.2 Pollenmassenfilter (PMF)

Der Pollenmassenfilter (PMF)⁸⁵ (siehe Abb. 3.3) wurde vom Ökologie Büro Hofmann als passiver Pollensammler speziell für das GVP-Pollenmonitoring entwickelt (Hofmann et al. 2005: 44-48). Wie der Name andeutet, ist der Sammler dazu konzipiert Pollen in großer Menge zu akkumulieren, damit für molekularbiologische Untersuchungen (v.a. PCR) eine ausreichende Anzahl an Pollen zu Verfügung steht. Nach der Extraktion der Pollen kann durch eine mikroskopische Analyse die Art und Anzahl der Pollen (Pollen pro Probe) und damit der horizontale Pollenfluss (Pollen pro Flächen- und Zeiteinheit) bestimmt werden (siehe Kap. 1.4.7). Der PMF besteht aus vier Bauteilen (Gesamthöhe: 20 cm): Dach, Filterkörper, Fuß mit drei Distanzstäben und Sammelflasche mit Schlauch. Das Dach, das nicht als Regenschutz dient, sondern den Ansitz von Vögeln verhindert, ist über die Distanzstangen mit dem Fuß verbunden. Dazwischen befindet sich ein zylindrischer, innen hohler und in acht Lagen unterteilter Filterkörper (Höhe 10 cm, Durchmesser 8 cm), der einen sehr geringen Strömungswiderstand aufweist. Die Polypropylen-Fasern des PMF filtern Partikel $>10 \mu\text{m}$ aus dem Luft-

⁸⁵ Gebrauchsmuster Nr. 201 17 632.7

strom. Die zylindrische Form des Filters ermöglicht die Anströmung von Luft aus allen Himmelsrichtungen. Bei Niederschlag können Pollen aus dem Filter gewaschen werden, diese werden im Filterfuß aufgefangen und über eine Schlauchverbindung in eine Sammelflasche abgeführt, die am Standrohr – auf dem die Messapparatur montiert ist – angebracht ist.

Der PMF wurde für die Installation auf dem Sigma-2 entwickelt. Die kombinierte Aufstellung der Pollensammler Sigma-2 und PMF wurde im Jahr 2001 von Hofmann et al. (2005: 138-140) an acht Standorten in Deutschland getestet.

3.3 Analytik von Pollenproben

Die visuelle und automatische Bildanalyse der Sigma-2-Proben wurden vom Geschäftsfeld Medizin-Meteorologie des Deutschen Wetterdiensts (DWD) in Freiburg vorgenommen. Die mikroskopische Pollenanalyse der PMF-Proben führte das Institut für Bienenkunde Celle durch. Das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) in Augsburg führte molekulargenetische Untersuchungen der PMF-Proben⁸⁶ mittels PCR-Analyse durch (Beismann & Kuhlmann 2006: 39-51).

3.3.1 Nachweisgrenzen der mikroskopischen Pollenanalyse

3.3.1.1 Sigma-2

Da nicht die gesamte Fläche der Haftfolie (4225 mm²) mikroskopisch untersucht wurde, sondern nur 200 mm² (4,7%) bei den Rapsproben und 324 mm² (7,7%) bei den Maisproben, wurde eine Nachweisgrenze (NWG) berechnet, die statistisch absichert, dass das Ergebnis der Auswertefläche auf die gesamte Haftfolie übertragbar ist. Erst wenn vier oder mehr Zielpollen auf der Auswertefläche identifiziert sind, kann mit 95%iger Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, an jeder beliebigen Position der Haftfolie wenigstens einen Zielpollen zu identifizieren⁸⁷. Demzufolge liegt die Nachweisgrenze der Depositionsrate bei 2.857 Raps- bzw. 1.763 Maispollen m⁻² d⁻¹ (bei einer Auswertefläche von 200 bzw. 324 mm² und einer Expositionsdauer von 7 Tagen). Die weiteren Angaben im Text beziehen sich – sofern nicht anders angegeben – nur auf die Proben mit Zielpollen oberhalb der Nachweisgrenze.

⁸⁶ Von den Gesamtproben (4 ml) standen jeweils Unterproben zu 0,5 ml zur Verfügung.

⁸⁷ Es sei darauf hingewiesen, dass das Unterschreiten einer Nachweisgrenze (NWG) nicht das Fehlen von Zielpollen in einer Probe beweist. Durch die Definition der Nachweisgrenze kann mit niedriger Irrtumswahrscheinlichkeit (<5%) ein falsch positiver Pollen-Nachweis ausgeschlossen werden (Fehler 1. Art). Gezählte Zielpollen unterhalb der Nachweisgrenze wurden nicht berücksichtigt, so dass der Fehler 2. Art (falsch negativer Pollen-nachweis) nicht ausgeschlossen werden kann. Das Kapitel 5.2.1 geht näher auf die Nachweisgrenzen und Unsicherheiten beim Nachweis von Pollen ein.

3.3.1.2 *Pollenmassenfilter (PMF)*

Aus einer Unterprobe (0,5 ml) der Gesamtprobe (4 ml) wurden – je nach Pollen- und Partikeldichte – zwei-, drei- oder viermal Volumina von 10, 20, 25 oder 50 µl entnommen und die Pollen unter dem Mikroskop vollständig ausgezählt. Die Anzahl der Pollen je Spezies wurde summiert und auf die Gesamtprobe hochgerechnet (Pollen/Probe)⁸⁸. Die Nachweisgrenze (NWG) ist folglich dann überschritten, wenn ein Pollenkorn in einem Zählpräparat enthalten ist.

3.3.2 **Molekulargenetische Pollenanalyse**

Das Verfahren der Polymerase-Kettenreaktion (PCR) zum Nachweis von DNA wurde Mitte der 1980er Jahre entwickelt. Durch enzymatische Aktivität können bestimmte Abschnitte der DNA (Zielsequenzen), die beispielsweise für eine Tier- oder Pflanzenart spezifisch sind, gezielt kopiert werden. Die Vermehrung der DNA erfolgt in mehreren Zyklen unter exponentiellem Wachstum. Der Nachweis der neu synthetisierten DNA-Abschnitte (und damit der Nachweis der Zielsequenz in der Probe) erfolgt z.B. durch einen Farbstoff, der nach erfolgreichem Synthesevorgang aktiviert wird. Die Fluoreszenz ist detektierbar und ermöglicht neben der qualitativen eine quantitative Aussage über die DNA-Zielsequenz in der Probe (Kempken & Kempken 2004, Zeitler 2003). Für detaillierte Beschreibungen der PCR-Verfahren sei auf Meuer et al. (2001), Edwards et al. (2004), Dorak (2006) und McPherson & Møller (2006) verwiesen.

3.4 **Untersuchungsgebiet**

3.4.1 **Gebietsbeschreibung**

3.4.1.1 *Lage*

Das Untersuchungsgebiet umfasst eine Fläche von 256 km² (16 x 16 km)⁸⁹ und liegt westlich der Landeshauptstadt München im Regierungsbezirk Oberbayern des Freistaates Bayern. Es deckt die Hälfte des Landkreises Fürstentum München ab (51,5%). Der größte Teil des Untersuchungsgebiets gehört zum Landkreis Fürstentum München (87,5%). Der Rest des Gebiets entfällt auf die Landkreise Dachau (8,9%) und Starnberg (2,5%) sowie die Stadt München (1,1%).

⁸⁸ Auszählungs- und Auswertungsmethode des Instituts für Bienenkunde Celle.

⁸⁹ Bezogen auf die Landeskoordinaten (Koordinatensystem: Gauß-Krüger (Zone 4), Datum: Potsdam, Ellipsoid: Bessel 1841)

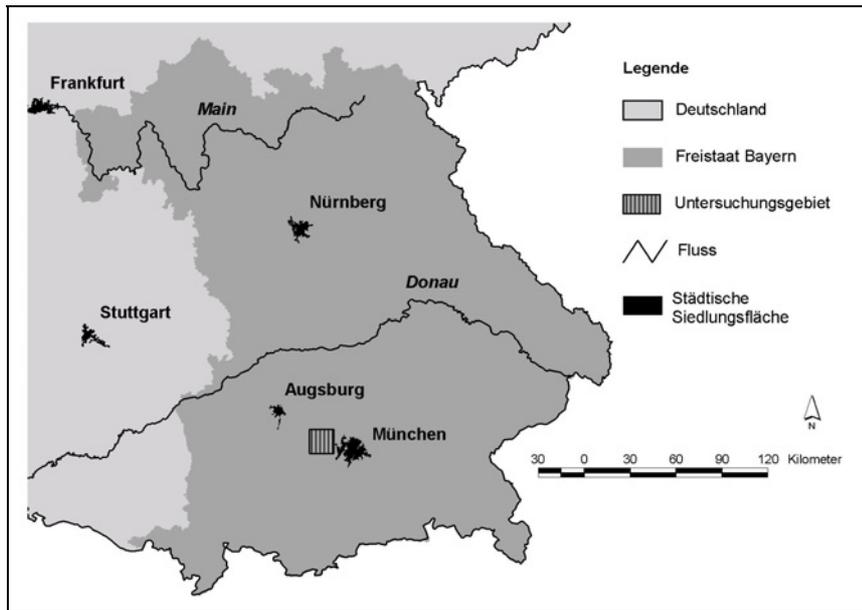


Abb. 3.4: Lage des Untersuchungsgebietes

3.4.1.2 Naturraum

Die naturräumliche Region „Nordseitiges Alpenvorland“ (Kodierung nach Meynen et al. 1962) gliedert sich im Untersuchungsgebiet in vier naturräumliche Haupteinheiten. Im Südwesten befindet sich das Ammer-Loisach-Hügelland (037), im Südosten und Osten die Münchener Ebene (051), die nach Westen in das Fürstenfeldbrucker Hügelland (050) übergeht und im Norden das Donau-Isar-Hügelland (062).

Tab. 3.3: Naturräumliche Haupteinheiten im Untersuchungsgebiet

Naturräumliche Haupteinheit (nach Meynen et al. 1962)	Flächenanteil [%]	Fläche [km ²]
Ammer-Loisach-Hügelland (037)	5,1	12,97
Fürstenfeldbrucker Hügelland (050)	33,7	86,22
Münchener Ebene (051)	42,6	108,98
Donau-Isar-Hügelland (062)	18,7	47,83
Summe	100,1	256,00

Das Ammer-Loisach-Hügelland gehört zum subalpinen Jungmoränenland (03) und ist geprägt von den Gletschern der letzten Eiszeit (Würm-Kaltzeit). Das stark profilierte Relief der Endmoränen kennzeichnet diesen Naturraum. Zwischen bewaldeten Hügelreihen und Wällen (bis

630 m NN⁹⁰) liegen kleine Schotterfelder und vereinzelte Moorsenken. Im Norden schließen sich die gering reliefierten „Isar-Inn-Schotterplatten“ (05) an. Dieser Naturraum (050 und 051) macht mit einem Anteil von 76% den größten Teil des Untersuchungsgebietes aus (siehe Tab. 3.3). In der Münchener Ebene fallen die fluvioglazialen Schotterfelder gleichmäßig von Süden nach Nordosten ab (von 580 auf 490 m) und bilden eine ebene Landschaft aus Niedermooren und ackerbaulich genutzten ehemaligem Heideflächen. Aus leicht gewellten Altmoränenplatten besteht das Fürstenfeldbrucker Hügelland (510 – 630 m), das im Untersuchungsgebiet vom Tal der Amper von Südwesten nach Nordosten durchschnitten wird. Ackerbau herrscht auf den trockenen grundwasserfernen Platten im Westen vor. Ausgedehnte Waldflächen finden sich im Ampertal und an den Talhängen. Das Unterbayerische Hügelland (06) ist tertiären Ursprungs und nicht glazial überformt. Im Untersuchungsgebiet ist das Hügelland stark zertalt und von vielen Kuppen dominiert (500 – 590 m). Die jungtertiären Sande und Mergel werden ackerbaulich genutzt, größere Waldflächen fehlen.

3.4.1.3 *Klima*

Das ozeanisch geprägte Klima des Alpenvorlandes weist wegen der großen Distanz zum Atlantischen Ozean bereits kontinentale Züge auf⁹¹ (Grottenthaler 1980: 60). Die klimatischen Verhältnisse variieren in dem Naturraum nur geringfügig. Dies beruht auf der orografischen Abriegelung des Alpenvorlands durch die Schwäbische Alb im Westen, die Fränkische Alb im Norden, den Bayerischen Wald im Osten und die Alpen im Süden sowie die geringe Reliefenergie der ebenen Schotterfluren und der sanft gewellten Hügelländer. Ausgenommen davon ist der Niederschlag, der – verursacht durch die Alpen – von Norden nach Süden stetig zunimmt (Liedtke & Marcinek 1995). Im Untersuchungsgebiet liegen die durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen zwischen 800 und 900 mm.

Die Klimadaten (Mittelwerte von 1961 - 1990) von drei Stationen des Deutschen Wetterdienstes (siehe Abb. 3.5), die sich in der Nähe des Untersuchungsgebietes befinden, geben die o.g. klimatischen Bedingungen wieder (Müller-Westermeier 1996). Vom Mittelpunkt des Untersuchungsgebietes liegt die Station Augsburg-Mühlhausen 36,1 km in nordwestlicher Richtung, die Station München-Riem 32,9 km in südöstlicher Richtung und die Station Freising-Weihenstephan 39,6 km in nordöstlicher Richtung.

⁹⁰ NN: Normalnull, auf die Mittelwasserhöhe des Meeresspiegels am Pegel Amsterdam bezogene Basis für Höhenangaben in Deutschland (Bill & Zehner 2001: 191). Im weiteren Text beziehen sich alle angegebenen Geländehöhen auf NN und deshalb wird auf diese Angabe verzichtet.

⁹¹ Ausgeprägte Jahres-Amplitude der Lufttemperatur mit kaltem Winter und warmem Sommer.

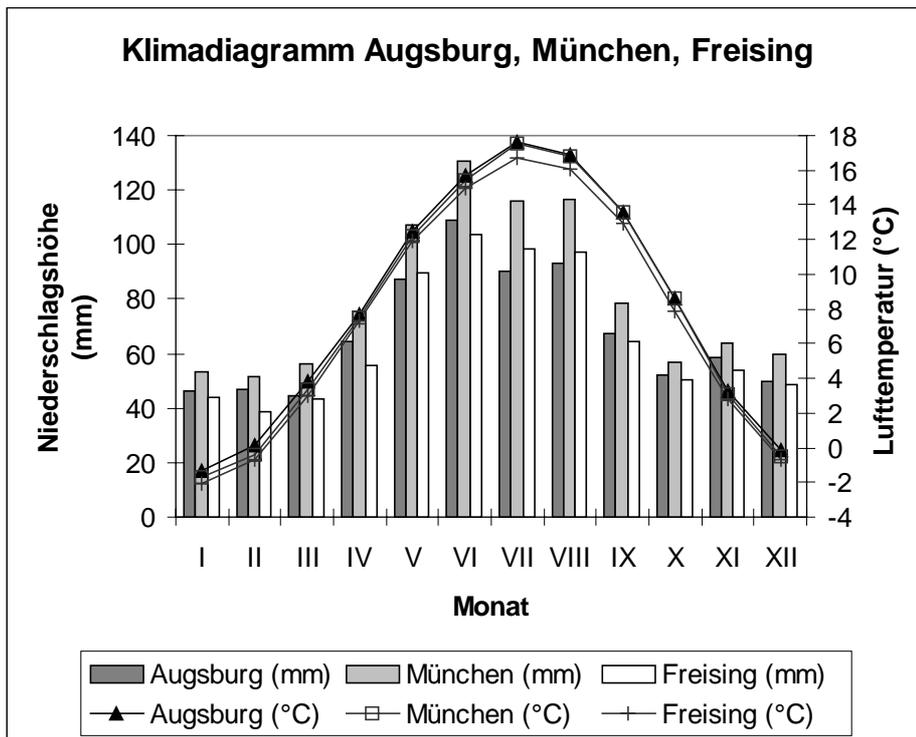


Abb. 3.5: Temperatur- und Niederschlagsdiagramm von Augsburg-Mühlhausen, München-Riem und Freising-Weihenstephan (Müller-Westermeier 1996)

Der Jahresgang der mittleren Temperatur der nächstgelegenen Station München-Riem (527 m, Naturraum: Münchner Ebene) reicht von $-1,7^{\circ}\text{C}$ im Januar zu $17,5^{\circ}\text{C}$ im Juli (Jahresdurchschnitt: $8,0^{\circ}\text{C}$). Die jährliche Sonnenscheindauer beträgt 1709 Stunden und die mittlere Jahresniederschlagsmenge von 967 mm verteilt sich über 133 Tage (Müller-Westermeier 1996). Der Temperaturverlauf der weiter nördlich gelegenen Stationen Augsburg und Freising ist sehr ähnlich, die Jahresniederschlagsmengen liegen jedoch deutlich niedriger (811 mm bzw. 788 mm).

3.4.1.4 Landnutzung

Der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Untersuchungsgebiet liegt bei 80% im Donau-Isar-Hügelland (Tertiärhügelland), bei 60% in der Münchener Ebene (glaziale Schotterfelder) und dem Fürstenfeldbrucker Hügelland (flachwellige Altmoränenplatten) sowie bei 40% im Ammer-Loisach-Hügelland (subalpines Jungmoränenland) (siehe Tab. 3.4).

Tab. 3.4: Prozentuale Verteilung der Landnutzungstypen im Untersuchungsgebiet
(Quelle: LfU, PbS, eigene Berechnung)

Name	Münchener Ebene	Fürstenfeldbrucker Hügelland	Donau-Isar-Hügelland	Ammer-Loisach-Hügelland	Untersuchungsgebiet
Ackerfläche (%)	40,23	49,86	69,50	23,56	48,10
Sonstige landwirtschaftl. Nutzfläche (%)	21,60	10,95	12,61	16,39	16,07
Wald (%)	7,06	27,51	10,61	57,27	17,15
Siedlung (%)	25,93	10,45	5,24	2,78	15,68
Sonstiges (%)	5,18	1,24	2,04	-	3,00
Summe (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

3.4.2 Geografisches Informationssystem (GIS) und räumliche Daten

Die Problemstellung und die Zielsetzung des Projekts verlangten in hohem Maße den Einsatz von Geografischen Informationssystemen (GIS). Nahezu alle Daten, die in dem Projekt erhoben, verarbeitet und analysiert wurden, haben einen räumlichen Bezug. Wie Bill und Fritsch schon 1991 feststellen (Bill & Fritsch 1991: VII), können raumbezogene Daten ohne den Einsatz von EDV nicht mehr gehandhabt werden.

Die raumbezogenen Daten des Projekts wurden mit der GIS-Software ArcView, ArcGIS und ArcInfo der Fa. ESRI (ESRI a, b, c) verarbeitet. Die Daten werden – wie in der bundesdeutschen Landesvermessung noch üblich⁹² – in der Gauß-Krüger-Projektion (Bezugsellipsoid: Bessel 1841, Datum: Potsdam) abgebildet. In Bayern wird das rechtwinklig in die Gauß-Krüger-Projektion gelegte Koordinatensystem auf den Hauptmeridian 12°E (Nullmeridian von Greenwich) bezogen (Bill 1996: 201-204).

3.4.2.1 Meteorologische Messnetze

Die Erfassung der meteorologischen Bedingungen während der Feldversuche ist eine Voraussetzung für die Auswertung von Pollenproben. Die Recherche über Betreiber meteorologischer Messnetze im Untersuchungsgebiet ergab folgendes Bild:

Die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) baute zwischen 1989 und 1991 landesweit ein agrarmeteorologisches Messnetz auf (122 Stationen). Die Stunden- oder Tagesmittel der Messgrößen sind frei verfügbar und online über das Internet abrufbar. Eine Quali-

⁹² Die deutsche Landesvermessung hat beschlossen die Gauß-Krüger- auf die UTM-Projektion (Zone 32, Bezugsellipsoid: GRS80, Datum: ETRS89) umzustellen (BKG 2004). Zur Zeit werden sowohl Gauß-Krüger- als auch UTM-Projektion verwendet. Beide Projektionen sind einander ähnlich, da beide konforme (winkeltreue), transversale, zylindrische Abbildungen eines Ellipsoids sind (Bill 1996: 201-204).

tätskontrolle der Messdaten erfolgt nur bedingt⁹³. Die Instrumente zur Windmessung entsprechen in Positionierung und Aufbau nicht dem meteorologischen Standard⁹⁴ (WMO 1996: I.5-6).

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) unterhält bundesweit eine Vielzahl von Messstationen und fasst diese je nach erhobener Messgröße in verschiedene Messnetze (Datenkollektive)⁹⁵ zusammen. Eine Messstation kann folglich Daten für ein oder mehrere Datenkollektive liefern. Die Daten müssen größtenteils über die DWD-Zentrale in Offenbach bestellt werden (z.T. über das Regionalen Gutachtenbüro München, DWD) und nicht alle Daten sind für wissenschaftliche Zwecke kostenfrei.

Obwohl seit Juli 1997 kein fliegender Verband mehr am (Militär-)Flugplatz Fürstenfeldbruck stationiert ist⁹⁶, betreibt die Bundeswehr (BW) dort eine meteorologische Messstation. Aufgrund der geringen Distanz zu umliegenden Gebäuden erfüllt diese Station ebenfalls nicht die meteorologischen Standard-Anforderungen (WMO 1996: I.5-6). Die Weitergabe der Bundeswehr-Daten an eine zivile Einrichtung (TU München) wurde durch eine Anfrage seitens des DWD möglich.

Die meteorologischen Stationen der Universität München werden im Untersuchungsgebiet nicht kontinuierlich betrieben⁹⁷ und konnten nicht verwendet werden.

Vom Regionalen Gutachtenbüro München des DWD wurden zwei Wölfle-Anemometer zur Messung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung zur Verfügung gestellt. Ein Gerät wurde zwischen den Ortschaften Unterschweinbach und Waltershofen (Gem. Egenhofen, nordwestlicher Quadrant des Untersuchungsgebiets), das andere am Versuchsgut Puch (Gem. Fürstenfeldbruck) aufgestellt. Hard- und Softwareprobleme mit den Wölfle-Anemometern und den Speicherkarten ließen eine fortlaufende Messung nicht zu.

Trotz der scheinbar großen Anzahl von Messnetzen und -stationen lagen für das Untersuchungsgebiet und den Zeitraum der Feldversuche in 2003 nur von drei LfL-Stationen meteorologische Daten vor. Daten über die Windrichtung konnte ausschließlich der BW-Standort Fürstenfeldbruck liefern, da der DWD (FF-Datenkollektiv) und die LfL zu dieser Zeit keine derart ausgestattete Station⁹⁸ betrieben und die eigenen Messgeräte wegen technischer Prob-

⁹³ Eine Plausibilitätsprüfung der Messwerte erfolgt durch Grenzwerte, innerhalb derer die Messwerte verteilt sein müssen (Kerscher, W. (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft - LfL, Freising): Telefonische Auskunft vom 18.11.2002).

⁹⁴ Messung von Bodenwind: Messinstrumente 10 m über Geländehöhe und Mindestabstand von 10facher Hindernishöhe zwischen Messstation und nächstgelegenen Hindernis (WMO 1996: I.5-6).

⁹⁵ Datenkollektive: AE (aerologische Aufstiege), EB (Erdbodentemperatur), FF (Windgeschwindigkeit, Windrichtung), KL (Klimastationen), MI (automatische Stationen), RR (Niederschlag), SO (Sonnenscheindauer), SY (synoptische Stationen), TU (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit)

⁹⁶ http://www.luftwaffe.de/C1256C770036BB94/FrameDocname/OSLw_Home

⁹⁷ Lösslein, H. (Meteorologisches Institut, Ludwig-Maximilians-Universität - LMU, München): Auskunft per E-Mail vom 24.11.2004 und Schmedes, E. (Sektion Geophysik, Ludwig-Maximilians-Universität - LMU, München): Auskunft per E-Mail vom 25.10.2002).

⁹⁸ Bis zum 31.12.1991 betrieb der DWD eine Messstation in Fürstenfeldbruck (FF-Datenkollektiv).

leme ausfielen. Um aussagekräftige Daten über die Windrichtung – ergänzend zu den BW-Daten – zu erhalten, untersuchte die DWD-Zentrale in Offenbach das FF-Datenkollektiv auf repräsentative Daten für den Raum Fürstfeldbruck. Die Station Landsberg, die vom Zentrum des Untersuchungsgebiets 31,1 km in südwestlicher Richtung liegt (Naturraum: Fürstfeldbrucker Hügelland, Höhe: 621 m), erfüllt diese Ansprüche.

3.4.2.2 *Meteorologische Flächendaten*

Für die Auswahl der Pollensammlerstandorte (Stratifizierung, siehe Kap. 3.5.2) waren meteorologische Flächendaten mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung von Interesse. Das Vorhandensein adäquater Daten ließ der Bayerische Wind- und Solaratlas (StMWVT 2001) vermuten. Die Daten des Atlases (Globalstrahlung, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit) konnten entweder wegen der groben zeitlichen Auflösung (Jahresmittelwerte) oder der Uniformität der Daten (geringe räumliche Auflösung und Klassifizierung der Messwerte) nicht verwendet werden. Nach umfangreichen Recherchen beim DWD konnten – nach den Feldversuchen 2003 – für einige meteorologische Messgrößen (Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer) Rasterdaten durch den DWD bereitgestellt werden (Auflösung: 1 x 1 km, Monatsmittelwerte der Zeitreihe 1961-1990).

3.4.2.3 *Sonstige Daten*

Weitere räumliche Daten wurden vom Bayerischen Landesvermessungsamt (Digitales Geländemodell DGM25 [50 x 50 m], Orthofotos und Flurkarten 1:5.000), vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (Naturräumliche Haupteinheiten Bayerns), vom Planungsbüro Prof. Dr. Schaller (Landnutzungskartierung), vom Umweltbundesamt (Ökologische Raumklassen Deutschlands) und von GAF/EUROMAP (Satellitenbilder: LANDSAT-7 [01.04.2003] und IKONOS [10.06.2003]) bezogen.

3.5 **Feldversuche 2003**

3.5.1 **Repräsentativität und Raumrepräsentativität**

Im Allgemeinen bezeichnen die beiden Begriffe „Repräsentanz“ oder „Repräsentativität“⁹⁹ das „Repräsentativsein“, d.h. die Eigenart einer Gesamtheit wird entweder durch einen Einzelnen oder durch eine Gruppe charakterisiert (Duden 1997: 701). Mit dieser semantischen Erklärung ist bereits der Kernpunkt der Repräsentativität umrissen: Die Ableitung einer diskreten Zahl von Elementen (Stichprobe), die als Stellvertreter („representatio identitatis“, Schröder 1994: 21) einer Grundgesamtheit (oder Population) gelten, welche als endliche oder

⁹⁹ Im weiteren Text wird zu Vereinfachung nur der Begriff „Repräsentativität“ verwendet.

unendliche Menge an Elementen verstanden wird (Bortz 1993: 84). Sachs (2004: 99) drückt diesen Zustand folgendermaßen aus: *„Eine Stichprobe ist repräsentativ für die Grundgesamtheit, wenn sie den Schluß auf bestimmte Merkmale ermöglicht: d.h. ... ist repräsentativ für ... hinsichtlich der Merkmale...“*. Eine Stichprobe kann folglich als häufigkeitsstatistische Abbildung (Variabilität und Variationsbreite) einer Grundgesamtheit angesehen werden.

Nach Vetter (1989: 35) müssen sich die Elemente der Stichprobe nach ihren Merkmalen so gruppieren lassen, dass die Elemente innerhalb der Gruppen intrastrukturell homogen sind, zwischen den Elementen verschiedener Gruppen interstrukturelle Unterschiede bestehen, in denen sich die Variabilität der Merkmalsausprägungen der Grundgesamtheit manifestiert. Bortz und Döring (2002: 401) unterscheiden diesbezüglich zwischen (merkmals-)spezifischer und globaler Repräsentativität. Der Unterschied besteht darin, dass die Elemente der Stichprobe in „allen“ Merkmalen der Grundgesamtheit entsprechen (globale Repräsentativität) oder nur hinsichtlich einiger relevanter Merkmale.

Wissenschaftliche Untersuchungen lassen sich normalerweise nicht an der Grundgesamtheit durchführen, da (1) die Grundgesamtheit unendlich sein kann, (2) nur teilweise bekannt sein kann, (3) die Grundgesamtheit durch die Untersuchung beeinträchtigt oder zerstört werden kann oder (4) die Untersuchung der Grundgesamtheit technisch, zeitlich oder finanziell zu aufwändig wäre (Bortz & Döring 2002: 399). Ist aus einem der Gründe eine Vollerhebung nicht möglich, kann nur ein Teil der Grundgesamtheit, die Stichprobe, untersucht werden.

Eine repräsentative Stichprobe der Grundgesamtheit ist notwendig, um *„die Verteilungsfunktion des entsprechenden Merkmals in der Grundgesamtheit mit allen davon ableitbaren statistischen Kenngrößen zu schätzen“* (Schmotz 1996: 15). Die Genauigkeit der Aussagen über die Grundgesamtheit erhöht sich, je besser die Merkmale der Stichprobe die Merkmale der Grundgesamtheit abbilden, und steigt mit dem Umfang der Stichprobe an (Bortz 1993: 84). Der schwindende Unterschied zwischen Grundgesamtheit und Stichprobe bei wachsendem Stichprobenumfang wird als Gesetz der großen Zahlen bezeichnet (vgl. Sachs 2004: 99). Stichprobe und „repräsentativ“ sind synonym, wenn das Prinzip der Zufallsauswahl verwendet wird. Nur dann ist der „Repräsentationsschluss“ bezüglich der Verteilung der Merkmale von einer Stichprobe auf eine Grundgesamtheit möglich (Schnell et al. 1993: 314). Eine Zufallsstichprobe bietet sich dann an, wenn keine Informationen über die untersuchungsrelevanten Merkmale vorliegen (Bortz 1993: 84), allerdings darf die Stichprobe nicht zu klein sein (s.o. Gesetz der großen Zahlen). Ist hingegen bekannt *„[...] welche Determinanten die Verteilung des untersuchungsrelevanten Merkmals beeinflussen, empfiehlt es sich, eine Stichprobe zusammenzustellen, die in bezug auf diese Determinanten für die Grundgesamtheit repräsentativ ist“* (Bortz 1993: 86). Diese Schichtung oder Stratifizierung der Grundgesamtheit anhand von Vorwissen, das von Relevanz für die Merkmalsverteilung

der Grundgesamtheit ist, kann zu besseren Schätzwerten der Kenngrößen der Grundgesamtheit führen als eine reine Zufallsstichprobe¹⁰⁰. Innerhalb der einzelnen Strata (Schichten) ist eine Zufallsauswahl allerdings von Vorteil (Bortz 1993: 86). Methodisch ist zwischen einer proportional und einer disproportional geschichteten Stichprobe zu unterscheiden. Dies bedeutet, dass der Stichprobenumfang im proportionalen oder nicht proportionalen Verhältnis zur jeweiligen Teilpopulation steht (Bortz & Döring 2002: 429). Die Repräsentativität einer Stichprobe zu prüfen ist nur möglich, falls die Verhältnisse in der Grundgesamtheit bekannt sind (Schnell et al. 1993: 315), was meistens nicht der Fall ist (Kruskal & Mosteller 1979: 258).

Der Begriff „Raumrepräsentativität“ impliziert, dass die (repräsentative) Stichprobe ebenso wie alle Elemente der zu Grunde liegenden Grundgesamtheit zusätzlich zu ihren Merkmal(en) durch eine Position im Raum charakterisiert sind. Um diese Merkmalsausprägung im Raum zu erfassen, stehen verschiedene Methoden der Stichproben-Ziehung zu Verfügung. Schmotz (1996: 18-24) nennt Zufalls-, Rastermessnetze (rechtwinkelig, hexagonal, radial), eine Kombination aus Zufalls- und Rastermessnetz, expertengestützte und geschichtete Messnetze (zufällig, nicht zufällig).

3.5.2 Messplanung zur Auswahl repräsentativer Pollensammler-Standorte

Um mit der begrenzten Zahl an Messgeräten (je 50 Pollensammler) die mögliche Häufigkeitsverteilung der Pollendeposition abzudecken, wurde das Prinzip der proportional geschichteten Stichprobe gewählt und eine Stratifizierung (Schichtung) des Untersuchungsgebiets vorgenommen. Die Stratifizierung bietet die Möglichkeit, Gebiete mit (voraussichtlich) unterschiedlicher Pollendeposition abzugrenzen, d.h. die zu erwartende Verteilung der Messwerte der Pollendeposition abzuschätzen. Als Strata (Schichten) eignen sich Parameter, die die Pollendeposition im Untersuchungsgebiet beeinflussen. Die Parameter können auf verschiedenen Ebenen der Pollenausbreitung wirken (Quelle, Freisetzung, Verteilung und Deposition). Je stärker die Beziehung zwischen den gewählten Parametern und der Pollendeposition ausgeprägt ist, desto „repräsentativer“ für das Untersuchungsgebiet können die Standorte gewählt werden. Die Bandbreite an Standorten, die mittels Stratifizierung zielgerichtet ausgewiesen werden kann, könnte mit einer Zufalls- oder Rasterstichprobe nur dann in ähnlicher Weise erreicht werden, wenn der Stichprobenumfang deutlich erhöht wird.

Die Strata für das 256 km² große Untersuchungsgebiet wurden nach ihrer inhaltlichen Eignung (Bedeutung für die Pollendeposition), technischen Eignung (hochaufgelöste Flächendaten) und Verfügbarkeit (zeitlich und finanziell) ausgewählt. Diese Anforderungen erfüllten

¹⁰⁰ Die Wahrscheinlichkeit aus der Population der Neu-Wähler bei einer Zufallsstichprobe mit einem Umfang von 30 Personen das Geschlechterverhältnis der Grundgesamtheit (50% Frauen und 50% Männer) abzubilden beträgt beispielsweise nur 14,4%.

die naturräumlichen Haupteinheiten (LfU), die orografische Höhe (BLVA a, aggregiert zu Höhenstufenklassen mit 10m-Intervallen) und die landwirtschaftliche Landnutzung (PbS, Nutzungstypen: Ackerland, Grünland, Mischnutzung von Ackerland/Grünland)¹⁰¹. Die naturräumlichen Haupteinheiten und die landwirtschaftliche Landnutzung beeinflussen die Pollendeposition, indem sie auf der Ebene der Pollenquelle Einfluss haben. So wird über die Anzahl und Größe der Felder (siehe Tab. 3.4 und Tab. 4.7) die potenzielle Größe der Pollenemission bestimmt. Die Geländehöhe beeinflusst Meteorologie und Klima (siehe Tab. 4.3) und wirkt sich indirekt auf die Pollendeposition aus. Andere, insbesondere meteorologische Daten entsprachen nicht den o.g. Anforderungen und wurden daher nicht verwendet (vgl. Kap. 3.4.2.2). Das Untersuchungsgebiet wurde demzufolge in drei Strata (Schichten) untergliedert und die 50 Pollensammler (flächen-)proportional in jedes Stratum aufgeteilt. Anhand einer Liste mit Ausschlusskriterien wurde das Untersuchungsgebiet räumlich eingegrenzt. Die Kriterien leiten sich aus der Zielsetzung ab und sollten vergleichbare Probenahmebedingungen an den Messstandorten gewährleisten (Ogden et al 1974: 71, Köhler 2004: 205-206). Ausgeschlossen wurde zunächst die nicht landwirtschaftlich bewirtschaftete Fläche. Weiterhin sollten folgende Bedingungen eingehalten sein: (1) Mehr als 200 m Abstand zu Haupt-Naturraumgrenzen zur Gewährleistung einer eindeutigen Naturraum-Zuordnung, (2) mehr als 200 m Abstand zur regionalen und überregionalen Verkehrsinfrastruktur zur Vermeidung eines verstärkten Eintrags resuspendierter Partikel, (3) mehr als 100 m Abstand zu großflächigen Landnutzungstypen, die eine freie Anströmung verhindern (z. B. Siedlungen und Wälder).

In einem GIS (ESRI a) wurden auf Grundlage der Stratifizierung und der Ausschlusskriterien kleinräumige Vorranggebiete abgegrenzt. In diesen wurden vorläufige Standorte – möglichst gleichmäßig über das Untersuchungsgebiet verteilt – für die 50 Pollensammler festgelegt. Diese vorläufigen Standorte wurden ohne Kenntnis der Lage der Raps- und Maisfelder gewählt und orientierten sich am Straßennetz des Untersuchungsgebiets (v. a. Flurwege). Damit sollte die Standortwahl nicht direkt von den Pollenquellen beeinflusst, die Erreichbarkeit der Standorte gewährleistet und eine Zustimmung der Landwirte zur Aufstellung der Pollensammler erreicht werden. Bevor die vorläufigen Standorte als endgültige Standorte angenommen werden konnten, wurden sie vor Ort auf lokale Barrieren im Luftstrom überprüft und die Genehmigung der Eigentümer / Pächter eingeholt. Da die Strata durch Wechsel von Jahreszeit oder Kulturart keiner Veränderung unterworfen sind, wurden für Raps- und Maisversuch die gleichen Standorte verwendet.

¹⁰¹ Verwendung einer Landnutzungskarte im Maßstab 1:25.000 (Interpretation aus Luftbildern der Jahre 1999/2000) anstelle von kostenpflichtigen ATKIS©-Daten des Bayerischen Landesvermessungsamtes

3.5.2.1 Untersuchung der Punktverteilung der Sammlerstandorte

Um eine räumliche Konzentrierung der Sammlerstandorte zu erkennen und zu vermeiden, wurde die Punktverteilung mit dem Nearest Neighbour Index nach Clark & Evans (1954) untersucht (siehe auch Cressie 1993 und Levine 2002). Dazu wird der Quotient aus der durchschnittlichen Nächste-Nachbar-Distanz der zu testenden Punktverteilung mit einer mittleren Nächste-Nachbar-Distanz gebildet, die aus Flächengröße und Anzahl der Punkte berechnet wird und als räumliche Zufallsverteilung gilt (complete spatial randomness, CSR). Die Abweichung des Index von der räumlichen Zufallsverteilung wird auf Signifikanz getestet. Zur Berechnung wurde das Software-Programm CrimeStat II eingesetzt (Levine 2002).

3.5.3 Probenahme

Im Untersuchungsgebiet wurden die technischen Pollensammler an den 50 Standorten aufgestellt. Dazu wurde ein 2 m langes Standrohr lotrecht ~50 cm tief im Boden verankert. Der PMF wurde auf dem Dach des Sigma-2 mit einer Schraube fixiert und die Sammlerkombination auf das Standrohr aufgesetzt. Somit befanden sich die Einlassöffnungen des Sigma-2 ~1,7 m und der PMF ~1,9 m über Grund. Abschließend wurde die Einrichtung zum Auffangen des Niederschlagwassers (Schlauch und PET-Flache), das aus dem PMF sickert, angebracht (siehe Abb. 3.3).

Zur Erfassung der Rapspollen wurden in der Zeit vom 25.4. bis 23.5.2003 (28 Tage) Proben genommen, zur Erfassung der Maispollen vom 4.7. bis 31.7.2003 (27 Tage). Die Expositionsdauer der Haftfolien im Sigma-2-Sammler betrug jeweils eine Woche (siehe Tab. 3.5 und Tab. 3.6). Der Pollenmassenfilter (PMF) verblieb jeweils über die gesamte Blühperiode von Raps und Mais am Messstandort (siehe Tab. 3.5 und Tab. 3.6).

Tab. 3.5: Rapsversuch: Expositionsdauer der Sigma-2- und PMF-Proben 2003

	Sigma-2				PMF
Probenreihe	1.	2.	3.	4.	1.
Datum	25.4.-2.5. ¹⁰²	2.5.-9.5.	9.5.-16.5.	16.5.-23.5.	25.4.-23.5.
Durchschnittliche Expositionszeit [d]	6,83	7,01	6,84	7,08	27,76
Bezeichnung	17. Woche	18. Woche	19. Woche	20. Woche	17.-20. Woche

¹⁰² An den Standorten 49 und 50 wurden die Pollensammler erst am 28.4. aufgestellt.

Tab. 3.6: Maisversuch: Expositionsdauer der Sigma-2- und PMF-Proben 2003

Probenreihe	Sigma-2				PMF
	1.	2.	3.	4.	1.
Datum	4.7.-11.7.	11.7.-18.7.	18.7.-25.7. ¹⁰³	25.7.-31.7.	4.7.-31.7.
Durchschnittliche Expositionszeit [d]	7,11	6,81	6,99	6,07	26,86
Bezeichnung	27. Woche	28. Woche	29. Woche	30. Woche	27.-30. Woche

Am Tag der Probeentnahme (jeweils freitags) wurden die Haftfolien der Sigma-2-Geräte ausgetauscht. Die exponierten Proben wurden in Plastikschaalen verstaut, in Versandtaschen des DWD verpackt (jeweils neun Proben pro Tasche) und am selben bzw. nächsten Tag per Post an den DWD nach Freiburg zur bildanalytische Auswertung verschickt. Die PMF-Proben wurden am letzten Tag des Versuchszeitraums entnommen, die Filter in WECK-Gläser überführt und die PET-Flaschen verschraubt, beides in Pakete verpackt und am selben bzw. nächsten Tag per Post an das Ökologie Büro Hofmann versandt. Nach Aufbereitung durch das Ökologie Büro Hofmann (Hofmann et al. 2005: 50) wurden die PMF-Proben zur mikroskopischen Pollenanalyse an das Institut für Bienenkunde¹⁰⁴, Celle und zur molekulargenetischen Analyse an das Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg weitergeleitet.

3.5.4 Meteorologische Messstationen

Wie bereits in Kapitel 3.4.2.1 beschrieben standen die Daten (Stunden- und Tagesmittel) der agrarmeteorologischen Stationen Dürabuch (Stationsnummer 4), Puch (Nr. 5) und Roggenstein (Nr. 6) des LfL zeitnah und kostenfrei zu Verfügung. Dieser Datensatz wurde durch Winddaten (Stundenwerte) der Station Fürstenfeldbruck (FFB) der Bundeswehr ergänzt. Als Referenz bezüglich der meteorologischen Messgröße „Wind“ diente allerdings die DWD-Station Landsberg (Stundenwerte), die die Anforderungen an einen meteorologischen Messstandort erfüllt. Die vier erstgenannten Stationen befinden sich alle innerhalb des Untersuchungsgebiets und liegen 4,3 bis 11,7 km auseinander. Die DWD Station befindet sich vom Zentrum des Untersuchungsgebietes 31 km in südwestlicher Richtung (siehe Tab. 3.7).

¹⁰³ Pollensammler am Standort 46 wurden am 25.7. abgebaut.

¹⁰⁴ Niedersächsisches Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit

Tab. 3.7: Stationsinformationen

Station	Betreiber	Nr.	Höhe (m)	Naturraum	Entfernung und Richtung ¹⁰⁵
Dürabuch	LfL	4	535	Donau-Isar-Hügelland	8,6 km; NW
Puch	LfL	5	555	Fürstenfeldbrucker Hügelland	4,6 km; W
Roggenstein	LfL	6	520	Münchener Ebene / Fürstenfeldbrucker Hügelland	3,7 km; SO
Fürstenfeldbruck	BW	-	519	Münchener Ebene	0,9 km; NW
Landsberg (Flugplatz)	DWD	2829	621	Fürstenfeldbrucker Hügelland	31,1 km; SW

3.5.5 Bewertung der Witterungsverhältnisse für den Pollenflug

Das Zusammenspiel von mehreren meteorologischen Faktoren bedingt die Witterung während des 7-tägigen Expositionszeitraums der Sigma-2-Proben. Um den Einfluss der Witterung auf den Pollenflug (und letztendlich die Pollendeposition) zu erfassen und zu vergleichen, wurde ein Bewertungsverfahren erarbeitet. Aus der Einzel-Bewertung der wichtigsten meteorologischen Messgrößen¹⁰⁶ (dreistufige Skala, siehe Tab. 3.8) wird durch Mittelwertbildung eine Gesamtbewertung der Pollenflugverhältnisse (fünfstufige Skala, siehe Tab. 3.9) für jeden Probenahme-Zeitraum abgeleitet. Die Einzel-Bewertung der meteorologischen Messgrößen basiert auf den Erkenntnissen, die in Kapitel 1.4.9 dargelegt sind¹⁰⁷.

Tab. 3.8: Bewertungsskala für die einzelnen meteorologischen Messgrößen

Symbol	Beschreibung	Wert
+	Gute Bedingungen für Pollenflug	1
o	Mittlere Bedingungen für Pollenflug	3
-	Schlechte Bedingungen für Pollenflug	5

¹⁰⁵ Vom Mittelpunkt des Untersuchungsgebiets aus betrachtet.

¹⁰⁶ Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlag, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit

¹⁰⁷ Als gute Bedingungen für den Pollenflug gelten: Hohe Lufttemperatur, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit, sowie niedrige Luftfeuchte und kein / wenig Niederschlag. Als Bewertungsgrundlage dienen die Mittelwerte der meteorologischen Messgrößen bezogen auf den Expositionszeitraum.

Tab. 3.9: Gesamtbewertung der Pollenflugbedingungen

Symbol	Beschreibung	Klassenbreite
++	Sehr gute Bedingungen für Pollenflug	1,0 bis 1,4
+	Gute Bedingungen für Pollenflug	1,5 bis 2,4
o	Mittlere Bedingungen für Pollenflug	2,5 bis 3,4
-	Schlechte Bedingungen für Pollenflug	3,5 bis 4,4
--	Sehr schlechte Bedingungen für Pollenflug	4,5 bis 5,0

3.5.6 Kartierung der Raps- und Maisfelder

3.5.6.1 Felderkartierung

Zur Dokumentation der Pollenquellen wurden im Jahr 2003 im gesamten Untersuchungsgebiet die Raps- und Maisfelder im Maßstab 1:5.000 kartiert und digitalisiert¹⁰⁸. In der Zeit von Mai bis Juli wurden Straßen und insbesondere Feldwege des 256 km² großen Gebiets abgefahren und die Felder der Zielarten in Karten aus Luftbildern (BLVA c) abgegrenzt. Die kartierten Felder wurden anschließend anhand der digitalen Luftbilder (BLVA c) und digitalen Flurkarten (BLVA b) in einem Geographischen Informationssystem (GIS) digitalisiert (ESRI a).

3.5.6.2 Fernerkundung

Zur Kontrolle der Felderkartierung 2003 und im Hinblick auf die Anforderungen eines Langzeitmonitorings wurde eine Klassifizierung der Rapsfelder im Untersuchungsgebiet aus Satellitenbildern unternommen. Sowohl die Recherche von GAF/Euromap als auch die eigene Recherche nach geeigneten Satellitenbildern (multispektraler Sensor mit hoher Auflösung¹⁰⁹, wolkenfreie Szene, vollständige Abdeckung des Untersuchungsgebiets, Zeitraum des Rapsfeldversuchs) ergab keinen Erfolg¹¹⁰. Lediglich zu einem sehr frühen Zeitpunkt (1. April 2003, vier Wochen vor der Hauptblüte des Rapses) lag eine LANDSAT-7-Szene vor und zu einem sehr späten Zeitpunkt (10. Juni 2003, vier Wochen nach der Hauptblüte des Rapses) eine IKONOS-Szene. Die Sensoren der beiden Satelliten unterscheiden sich v. a. in der An-

¹⁰⁸ Die ergänzende Kartierung eines 1 km breiten Streifens außerhalb des Untersuchungsgebietes – zur Vermeidung von Randeffekten – konnte aufgrund personeller Engpässe nicht vollständig abgeschlossen werden.

¹⁰⁹ Zum Beispiel: LANDSAT-7, IRS (Indian Remote Sensing, Auflösung: 5,8 m PAN, 23 m MS), SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre, Auflösung: 2,5 m PAN, 10 m MS), ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission & Reflection Radiometer, Auflösung: 15/30 m MS)

¹¹⁰ Zur Kartierung der Maisfelder gibt es wolkenfreie Aufnahmen des IRS vom 13. Juli und 6. August 2003 (letztere ist zu bevorzugen, da die fortgeschrittene Getreideernte die Auswertung erleichtert), die das Untersuchungsgebiet vollständig abdecken. Die Auswertung der IRS-Szene musste aus finanziellen Gründen unterbleiben.

zahl der Kanäle und der Auflösung (LANDSAT-7: 30 m MS, IKONOS: 4 m MS). Beide Satelliten besitzen 3 Kanäle im sichtbaren Bereich (blau, grün, rot) und einen im nahen Infrarot (NIR). Über 3 weitere Kanäle im Infrarot (2x MIR, TIR) verfügt nur LANDSAT-7.

Zur Auswertung der beiden o.g. Satellitenbilder wurde das Programm ENVI verwendet. Zudem wurde der störende Einfluss von Dunst durch einen Korrekturalgorithmus (Richter 1996) reduziert (Software ATCOR-2¹¹¹). Nach einer unüberwachten Klassifizierung zur Überprüfung der Trennung landwirtschaftlicher Objektklassen folgte eine überwachte Klassifizierung (Albertz 2001). Die überwachte Klassifizierung wurde mit dem Mahalanobis Distance Classifier (MDC) durchgeführt, der eine Klassifizierung mit nur einer Objektklasse ermöglicht (Laue 2004). Als Testflächen dienten Rapsfelder, deren Lage und Ausdehnung bekannt waren (z. B. an den Versuchsgütern Roggenstein und Puch).

3.5.6.3 *Abstandsanalyse*

In der Diskussion um die Koexistenz von transgener, konventioneller und ökologischer Landwirtschaft wird als Lösung zur Vermeidung unerwünschter Auskreuzungen sehr häufig eine Abstandsregelung vorgeschlagen¹¹².

Die Daten der Felderkartierung 2003 bildeten die Grundlage der Abstandsanalyse. Unter den realen landwirtschaftlichen Verhältnissen des Jahres 2003 wird – innerhalb der landwirtschaftlichen Nutzfläche und getrennt für die Naturräume – für jede Rasterzelle die Entfernung zum nächsten Raps- bzw. Maisfeld berechnet. Dazu wurden die Vektordaten¹¹³ in einheitliche Rasterdaten mit einer Auflösung von 10 x 10 m überführt. Für jede Rasterzelle, die der landwirtschaftlichen Nutzfläche zugehört, wurde die nächstgelegene Rasterzelle, die als Mais oder Raps codiert war, bestimmt. Zugleich wurde die Distanz zwischen den Rasterzellen berechnet (beruhend auf den Mittelpunkten der Rasterzellen) (vgl. Kap. 3.7.2). Das resultierende Raster (jede Rasterzelle enthält als Wert die Entfernung zum nächsten Raps- bzw. Maisfeld) wurde anschließend anhand der Naturraumgrenzen unterteilt (ESRI c), um die Ergebnisse für jeden Naturraum einzeln auswerten zu können.

¹¹¹ Die Korrektur wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Wessling, unter Anleitung von Herrn Richter durchgeführt (Richter 2005).

¹¹² Barth et al. (2003) geben eine Übersicht.

¹¹³ „Kartierte Raps- und Maisfelder“, „landwirtschaftliche Landnutzungstypen“ und „naturräumliche Haupteinheiten“

3.6 Räumliche Analysen zur Untersuchung der Pollendeposition (mikroskalig)

3.6.1 Abstand zwischen Pollensammler und nächstem Feld

Der Einfluss des jeweils nächsten Feldes auf die Pollendeposition an einem Standort wird zur Analyse von Feldversuchen häufig verwendet (z.B. Rieger et al. 2002, Jarosz et al. 2003, Devaux et al. 2005) und soll deshalb auch hier betrachtet werden. Je Pollensammlerstandort wird die Entfernung zum nächsten Feld mit der am Standort ermittelten Pollendeposition in Bezug gesetzt.

3.6.2 Pollendepositionsindex (PDI) – Berechnung des Einflusses mehrerer Felder

Da sich in der landwirtschaftlichen Praxis nicht nur ein Feld in der näheren und weiteren Umgebung eines Standortes innerhalb des Agrarökosystems befindet, sondern durchaus mehrere (siehe Karte 3 und 4 im Anhang), wurden unter dem Oberbegriff „Pollendepositionsindex“ (PDI) in einem GIS mehrere Formeln entwickelt und umgesetzt¹¹⁴, die diesen Einfluss der umliegenden Felder auf die Pollendeposition in einem Punkt erfassen sollen (Kuhlmann & Beismann 2004).

Der PDI, der in der elementaren Form (Formel 1) für beliebige Punkte die Fläche aller umliegenden Felder aufsummiert, wurde sukzessiv erweitert und berücksichtigt über Abstandsfunktionen die Entfernung der Felder und durch Gewichtung (1) die Windrichtung, (2) die Windgeschwindigkeit und (3) den Niederschlag. Grundsätzlich erfolgt die Berechnung des PDI einzeln für jeden der zehn konzentrischen Kreise¹¹⁵, die unterschiedlich große Nachbarschaftsräume um die Berechnungspunkte definieren.

In Formel 1 drückt der PDI die Flächensumme aller Raps- oder Maisfelder aus, die sich innerhalb des jeweiligen Nachbarschaftsraumes befinden. Eine Gewichtung der Felder in Abhängigkeit von ihrer Himmelsrichtung oder Entfernung unterbleibt.

¹¹⁴ Als ArcInfo AML Script, das bei programmkonformen Eingangsdaten (Nomenklatur der Dateien und Attributtabelle sowie Rasterauflösung) auf jährlich wechselnde Anbauverhältnisse anwendbar und andere Untersuchungsgebiete übertragbar ist.

¹¹⁵ Radius entspricht jeweils einem Vielfachen von 100 m

$$PDI_{i,n} = \sum_{f=1}^F A_{i,n,f} \quad \text{PDI Formel (1)}$$

A = Feldfläche in Radius n Meter um i
 F = Felder in Radius n Meter um i
 i = Standort Pollensammler (1, 2, ..., 50)
 n = 100, 200, ..., 1000 (Radius in Meter um i)

Um die Flächensumme der Felder in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung zu berechnen, wurde ein rasterbasierter Ansatz verwendet (siehe PDI Formel 15, 16, 17). Dazu wurden die Daten (Pollensammlerstandorte, Felderkartierung) in ein einheitliches Raster (identischer Ursprung und gleiche Auflösung) überführt und auf Grundlage der Nachbarschaftsräume die Windrichtungssektoren für die Pollensammlerstandorte berechnet. Somit konnte die Flächensumme der Felder von einzelnen, mehreren oder allen Windrichtungssektoren (Himmelsrichtungen) gewichtet und berechnet werden.

$$PDI_{i,n,S_z} = \sum_{\{(x,y):D_{x,y}<n \wedge (x,y) \in S_z\}} R_{x,y} \cdot \delta_{S_z} \quad \text{PDI Formel (15, 16, 17)}^{116}$$

δ_{S_z} = Gewichtung der 8 Kreissektoren
 $D_{x,y}$ = Distanz zwischen Zelle (x,y) und Pollensammler i
 i = Standort Pollensammler (1, 2, ..., 50)
 n = 100, 200, ..., 1000 (Radius in Meter um i)
 $R_{x,y} \in \{1,0\}$, 1 = Feld, 0 = kein Feld
 S_z = Kreissektor(en) mit Mittelpunkt i, Radius n = 1000 Meter und Mittelpunktswinkel = 45°
 x = x-Koordinate einer Rasterzelle (Mittelpunkt)
 y = y-Koordinate einer Rasterzelle (Mittelpunkt)
 z = 1, 2, ..., 8 (Windrichtung: N, NO, ..., NW)

Unter Verwendung von einfachen Funktionen, die die Pollenausbreitung im zweidimensionalen Raum abbilden (siehe Lambert et al. 1980, Okubo & Levin 1989: 329/330 zu Depositionsgradienten), ergibt sich Formel 2. Die Gewichtung der Entfernung (Begünstigung sammelner Felder) fällt je nach Funktion unterschiedlich stark aus (siehe Abb. 3.6). Die logarithmische Funktion führt zu einer sehr schwachen, die inversen Potenzfunktionen zu einer zunehmenden Gewichtung der Entfernung. Wiederum wird ein rasterbasierter Ansatz verwendet, in diesem Fall um die Entfernung zwischen den Rasterzellen (Pollensammler und Feld) zu berechnen.

¹¹⁶ Formel 15, 16 und 17: Verwendung von 1, 2 und >2 Windrichtungssektor(en) für die Berechnung.

$$PDI_{i,n} = \sum_{\{(x,y):D_{x,y}<n\}} R_{x,y} \cdot \zeta_{x,y} \quad \text{PDI Formel (2a-2d)}$$

$\zeta_{x,y}$ = Ausbreitungsfunktion ((a) $(\log D_{x,y})^{-1}$, (b) $(D_{x,y})^{-1}$, (c) $(D_{x,y})^{-2}$, (d) $(D_{x,y})^{-0,5}$)
 $D_{x,y}$ = Distanz zwischen Zelle (x,y) und Pollensammler i
i = Standort Pollensammler (1, 2, ..., 50)
n = 100, 200, ..., 1000 (Radius in Meter um i)
 $R_{x,y} \in \{1,0\}$, 1 = Feld, 0 = kein Feld
x = x-Koordinate einer Rasterzelle (Mittelpunkt)
y = y-Koordinate einer Rasterzelle (Mittelpunkt)

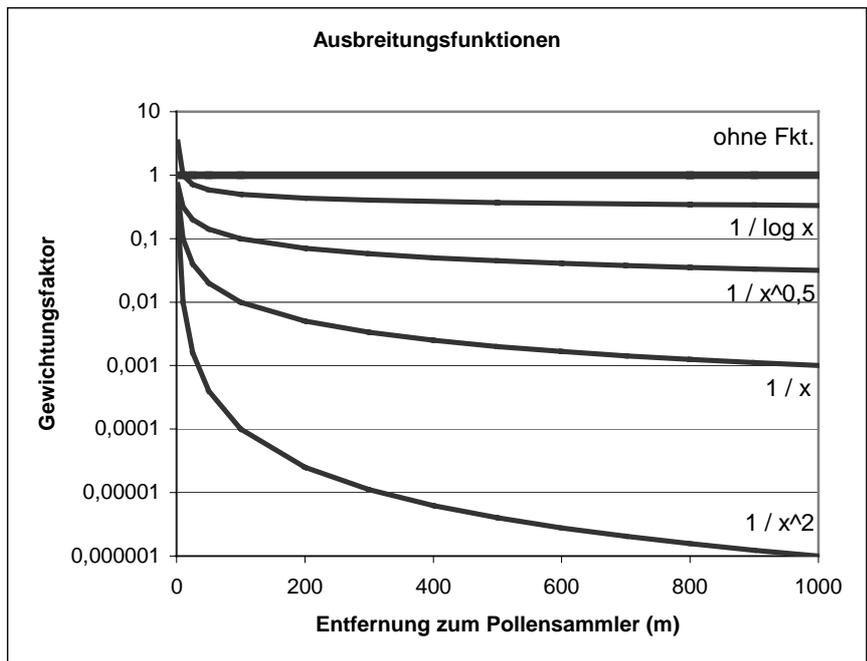


Abb. 3.6: Ausbreitungsfunktionen zur Gewichtung der Entfernung zwischen Pollensammler und Raps- bzw. Maisfeld

Zusätzlich zu der Gewichtung durch die Entfernung können die Rasterzellen (Feld) durch die Himmelsrichtung zum Pollensammler gewichtet werden. Die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen (oder das Produkt aus Windrichtungshäufigkeit und Windgeschwindigkeit) während der gesamten Versuchszeit (Tag- und Nachtwerte oder nur Tagwerte) wurde verwendet sowie die Gewichtung nur eines oder mehrerer der acht Windsektoren (Hauptwindrichtung(en)). Durch Ausschluss der Winddaten, die während Niederschlagsereignissen aufgezeichnet wurden, kann der starke Einfluss von Regen auf die Pollendeposition (siehe Kap. 1.4.7.1, S. 15 und Tab. 1.3) indirekt berücksichtigt werden.

$$PDI_{i, n, S_z} = \sum_{\{(x,y): D_{x,y} < n \wedge (x,y) \in S_z\}} R_{x,y} \cdot \zeta_{x,y} \cdot \delta_{S_z} \quad \text{PDI Formel (3a)}^{117}, \text{(6a)}^{118}, \text{(20c, 21c)}^{119}$$

δ_{S_z} = Gewichtung der 8 Kreissektoren

$\zeta_{x,y}$ = Ausbreitungsfunktion ((a) $(\log D_{x,y})^{-1}$, (c) $(D_{x,y})^{-2}$)

$D_{x,y}$ = Distanz zwischen Zelle (x,y) und Pollensammler i

i = Standort Pollensammler (1, 2, ..., 50)

n = 100, 200, ..., 1000 (Radius in Meter um i)

$R_{x,y} \in \{1,0\}$, 1 = Feld, 0 = kein Feld

S_z = Kreissektor(en) mit Mittelpunkt i, Radius n = 1000 Meter und Mittelpunktswinkel = 45°

x = x-Koordinate einer Rasterzelle (Mittelpunkt)

y = y-Koordinate einer Rasterzelle (Mittelpunkt)

z = 1, 2, ..., 8 (Windrichtung: N, NO, ..., NW)

3.7 Räumliche Analysen zur Untersuchung der Pollendeposition (Regionalisierung)

Der Begriff „Regionalisierung“ wurde vor allem in der Physischen Geographie und der Hydrologie verwendet. Bis zu Beginn der 1990er Jahre wurde darunter die „Ausweisung von Flächen mit gleichen Eigenschaften“ verstanden (Kleeberg & Cemus 1992: 1, Güßefeldt 1997: 1). Heutzutage bezeichnet „Regionalisierung“ vorrangig – und so wird es auch hier verstanden – die Übertragung punktuell oder auf kleiner Fläche gewonnener Messwerte auf eine größere Fläche (Skalenwechsel) unter Verwendung adäquater Modelle (Wenkel & Schultz 1999, Kleeberg 1999).

Um die Punktmessungen der Pollendeposition in die Fläche zu übertragen (zu regionalisieren), wurden die folgenden Verfahren angewendet.

3.7.1 Geostatistik

Die Geowissenschaften beschäftigen sich mit der Erde als Ganzes oder Teilen davon und untersuchen Phänomene, die in Raum und/ oder Zeit variieren (Leser 1997: 266, Goovaerts 1997: 3). Die Geostatistik¹²⁰, die in den 1950er von D. G. Krige empirisch und in den 1960er Jahren v.a. von G. Matheron theoretisch entwickelt wurde (Heinrich 1994: 146, Cressie 1993:

¹¹⁷ Gewichtung: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung je 45°-Kreissektor (Datenbasis: Tag- und Nachtwerte (24h) über die gesamte Versuchsdauer).

¹¹⁸ Gewichtung: Produkt aus Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit je 45°-Kreissektor (Datenbasis: Tagwerte (15h) über die gesamte Versuchsdauer).

¹¹⁹ Formel 20 und 21: Verwendung von 2 und >2 Windrichtungssektoren für die Berechnung.

¹²⁰ Eine sehr allgemeine Definition stammt von Olea (1991: 31) „*The study of phenomena that fluctuate in space.*“

106) und auch als räumliche Statistik bezeichnet wird, dient dazu die räumliche Variabilität dieser Phänomene zu erfassen und zu modellieren (Deutsch & Journel 1998: 9).

3.7.1.1 Theorie der regionalisierten Variablen

Die besondere Eigenart von erdgebundenen dynamischen Prozessen hat Tobler (1970: 236) in folgendem Postulat beschrieben: „...*the first law of geography: everything is related to everything else, but near things are more related than distant things.*“ Dies wird als räumliche Autokorrelation¹²¹ bezeichnet, weshalb in der Geostatistik das *probalistische Modell* (Zufallsvariable) der nicht-räumlichen Statistik um eine *deterministische Komponente* ergänzt wird. Die daraus resultierende *Zufallsfunktion* oder *regionalisierte Variable* kombiniert beide Aspekte (Zufälligkeit und Strukturabhängigkeit) für eine ortsabhängige Variable (Heinrich 1994: 145-149). Die Veränderung der Variablen kann in einem dreidimensionalen Raum unstetig oder kontinuierlich sein, ist also lokal zufällig, beruht global jedoch (meist) auf einer Struktur.

3.7.1.2 Semivariogramm

Voraussetzung für Anwendung geostatistischer Interpolationsverfahren (z. B. Kriging-Verfahren¹²²) ist das Vorhandensein von räumlicher Autokorrelation, die mit Hilfe des Semivariogramms¹²³ untersucht wird (siehe Abb. 3.7). Dafür werden aus den Messwerten Wertepaare gebildet und auf ihre Ähnlichkeit und räumliche Entfernung untersucht. Die Varianz der Messwerte wird in einem kartesischen Koordinatensystem in Beziehung zu den räumlichen Abstandsvektoren (sog. „Lag“) der Messpunkte gesetzt. An dieses experimentelle Variogramm kann eine Funktion (Variogrammmodell) angepasst werden, die Aufschluss gibt über (1) die Stärke der räumlichen Autokorrelation (Differenz von *Schwellenwert* [*sill*] und *Nuggeteffekt* [*nugget effect*]), (2) die Distanz der räumlichen Autokorrelation (*Aussageweite* [*range*]) und (3) die Restvarianz (*Nuggeteffekt* [*nugget effect*]), die als Messfehler bzw. als Mikrovariabilität der Messwerte zu interpretieren ist (*white noise*). Mit der Variogrammodellierung¹²⁴ beschäftigen sich intensiv Isaaks & Srivastava (1989: 369-391), Cressie (1993: 69-83), Heinrich (1994: 152-156) sowie Wackernagel (2003: 45-65).

¹²¹ Ergänzend die Definition nach Upton & Fingleton (1985: 151): „*Spatial autocorrelation is a property that mapped data possesses whenever it exhibits an organized pattern or, [...] whenever there is 'systematic spatial variation' in the values across a map.*“

¹²² Ein von Matheron geprägter Begriff zu Ehren von D. G. Krige (Cressie 1993: 106).

¹²³ Im weiteren Text kurz als Variogramm bezeichnet.

¹²⁴ Einschließlich der Identifizierung von Drift/Trend (Überlagerung der Merkmalsausprägung durch einen globalen deterministischen Prozess) und von Anisotropie (lokale, zufällige und gerichtete Beeinflussung der Merkmalsausprägung).

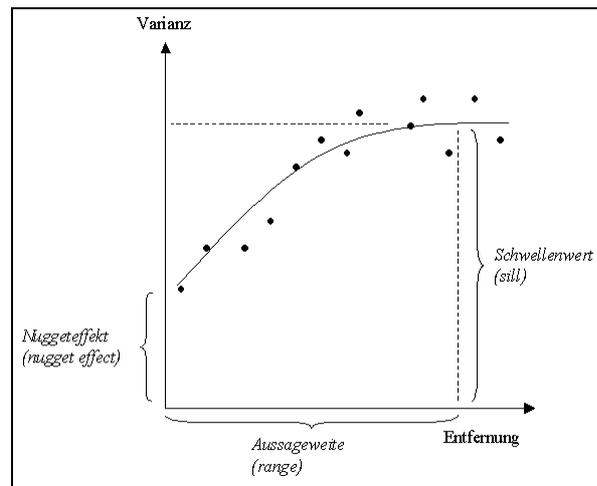


Abb. 3.7: Schematisches Semivariogramm mit Kenngrößen

3.7.1.3 Kriging

Als wichtiges geostatistisches Interpolationsverfahren gilt das Kriging, das ein Oberbegriff für eine Vielzahl von Schätzverfahren ist¹²⁵, deren Gemeinsamkeit auf der gewichteten räumlichen Mittelwertbildung beruht. Die Kriging-Verfahren verwenden bei der Interpolation (Schätzung) die im Prozess der Variogrammmodellierung gewonnenen Informationen über die räumliche Abhängigkeit (range, sill, nugget effect, Modell-Funktion, Trend/ Anisotropie) und optimieren die Schätzung derart, dass die Varianz minimal ist und im Mittel die Abweichung zwischen wahren und geschätzten Werten Null ist (Olea 1991: 41, Heinrich 1994: 156). Dies ist der besondere Vorteil der Kriging-Verfahren und der Unterschied zu einfachen Interpolationsverfahren¹²⁶, die nur die Distanz zu einem oder mehreren benachbarten Messwert(en) bei der Interpolation berücksichtigen (Isaaks & Srivastava 1989: 250-259, Johnston et al. 2001: 53).

3.7.2 GIS-gestützte Regionalisierung – Entfernung zum nächsten Feld

Eine einfache Methode zur Regionalisierung der Pollendeposition kann auf Grundlage der Beziehung zwischen Pollendeposition und Feldabstand (siehe Kap. 3.6.1) durch eine simple rasterbasierte Abstandsberechnung (*distance surface*) erfolgen, die auf der Felderkartierung (*source*) beruht. Dazu wird für jede Zelle (genauer: Mittelpunkt der Zelle) eines (vordefinierten) Rasters die euklidische Distanz zum Mittelpunkt der nächstgelegenen *source*-Zelle berechnet (Bill 1996: 16-18, Mitchell 1999: 123, 132) (vgl. Kap. 3.5.6.3).

¹²⁵ Eine Übersicht gibt Goovaerts (1997): 125-174

¹²⁶ Polygonale Declustering, Triangulation, Inverse Distance Weighted (IDW) und Local Sample Mean (Isaaks & Srivastava (1989: 250-259)).

3.7.3 GIS-gestützte Regionalisierung – Pollendepositionsindex

Neben der mikroskaligen Analyse der Pollendeposition kann der Pollendepositionsindex (PDI) zur flächenhaften Darstellung der Pollendeposition auf einer höheren Skala (in diesem Fall das gesamte Untersuchungsgebiet) genutzt werden¹²⁷ (vgl. Kuhlmann & Beismann 2005). Dazu wurden im GRID-Modul des GIS-Systems ArcInfo rasterbasierte Berechnungen mit *focal funtions*¹²⁸ (v.a. FocalSum) durchgeführt. Mit *focal funtions* lässt sich für jede Rasterzelle ein neuer Zellwert aus den Werten seiner benachbarten Zellen berechnen. Die Berechnung wird Zelle für Zelle für das gesamte Raster durchgeführt (*moving window transformation*). Als Nachbarschaft wird ein Raum (z.B. Gruppe von Zellen) bezeichnet, der in einem bestimmten Abstand und / oder Richtung um einen bestimmten Punkt angeordnet ist. Dieser Raum kann von beliebiger Größe sein und die Form eines Kreises, Kreissektors, Rings, Quadrats, Rechtecks oder einer Spirale annehmen (Tomlin 1990: 22-23, 96-97).

Im konkreten Fall wurden die kartierten Raps- und Maisfelder in ein Raster der Auflösung 5 x 5 m überführt und der PDI flächig für das gesamte Untersuchungsgebiet (10,3 Mio. Rasterzellen) berechnet: Durch eine geringfügige Modifizierung der PDI-Formeln (vgl. Kap. 3.6.2) erfolgte die Berechnung des PDI nicht nur für die 50 Pollensammler, sondern für jede einzelne Rasterzelle des Untersuchungsgebietes¹²⁹. Auch bei dieser Anwendung des PDI wurde – wie bereits in Kap. 3.6.2 dargelegt – die Größe (100 bis 1000 m) und die Form (Kreis, Kreissektoren) des Nachbarschaftsraums variiert, um die beste Anpassung der berechneten an die gemessene Pollendeposition zu erreichen¹³⁰. Durch eine Klassifizierung der berechneten PDI-Rasterdaten ließen sich Gebiete unterschiedlicher Pollendeposition räumlich abgrenzen.

3.7.4 Ausbreitungsmodell AUSTAL2000

Die Kombination von punktuellen Pollenmessungen eines Monitoring-Messnetzes mit einem Ausbreitungsmodell dient zum einen zur flächenhaften Darstellung der Pollendeposition und zum anderen zur Kalibrierung und Verifizierung des Ausbreitungsmodells durch die empirischen Daten. Aus dem Ausbreitungsmodell lassen sich durch Klassifizierung Gradienten der Pollendeposition ableiten und räumlich abgrenzen (Clench-Aas et al. 1999: 313). Zudem sind

¹²⁷ Diese flächenhafte Darstellung der relativen Pollendeposition kann z.B. als Planungsgrundlage für ein GVP-Monitoring dienen (z.B. Stratum zur Standortauswahl), da die Berechnung vor dem Blühzeitpunkt der Kulturpflanzen möglich ist, falls die Lage der Felder bekannt ist.

¹²⁸ Davon zu unterscheiden sind *local* und *zonal funtions*. Im ersten Fall wird eine bestimmte Funktion auf jede einzelne Rasterzelle angewendet, um ein neues Raster zu berechnen. Im zweiten Fall werden die neuen Zellwerte wie bei den *focal funtions* aus mehreren Zellen berechnet, die allerdings nicht durch einen geometrischen nachbarschaftlichen Raum definiert sein müssen (Tomlin 1990: 64-65, 154-155).

¹²⁹ i = Rasterzelle des 16x16km-Untersuchungsgebietes mit $i_x = 5, 10, \dots, 16.050$ und $i_y = 5, 10, \dots, 16.050$

¹³⁰ Für diesen Vergleich wurden die (Werte der) Rasterzellen ausgelesen, innerhalb derer sich die 50 Sammlerstandorte befanden.

die Voraussetzungen gegeben, auf der Grundlage häufigkeitsstatistischer Untersuchungen der Pollendeposition für das Untersuchungsgebiet repräsentative Messorte zu bestimmen.

Ausbreitungsmodelle speziell für Pollen liegen unter anderem von Kawashima & Takahashi (1995), Kawashima & Takahashi (1999), Hidalgo et al. (2002), Loos et al. (2003), Helbig et al. (2004), Jarosz et al. (2004), Richter et al. (2004), Walklate et al. (2004), Yamamura (2004) und Schueler & Schlünzen (2006) vor. Diese Modelle wurden jedoch für andere Maßstabsebenen entwickelt (v.a. mikroskalig), beinhalten weitere Modelle (z.B. zur Insektenaktivität), zielen auf andere Zielvariablen ab (z.B. Auskreuzungswahrscheinlichkeit), beruhen nicht auf einem flächendeckenden Berechnungsraster (stattdessen vertikale Konzentrationsprofile) und sind damit nicht für die Fragestellung oder das Untersuchungsgebiet geeignet.

Zur Abschätzung und Vorhersage der Pollendeposition wurde das Programm AUSTAL2000 (Janicke, GRS) getestet, eine beispielhafte Umsetzung der VDI 3945 durch das Ingenieurbüro Janicke im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA)¹³¹. Die VDI Richtlinie 3945 wurde durch die neue TA Luft (2002, Anhang 3) als Ausbreitungsrechnung zur Ermittlung der Konzentration und der Deposition gasförmiger Stoffe und Stäube, die von technischen Anlagen emittiert werden, vorgeschrieben. Der Ausbreitungsrechnung von AUSTAL2000 liegt ein Partikelausbreitungsmodell (Lagrange-Modell, Teilchensimulationsmodell) zu Grunde, das die Prozesse in der atmosphärischen Grenzschicht (siehe Kap. 1.4.8) simuliert (VDI 2000: 12-13). Bei der Anwendung des Ausbreitungsmodells auf Pollen konnte auf Erfahrungen von Hofmann et al. (2005) aufgebaut werden, die ein Gaußmodell nach der alten TA Luft (1986) verwendet hatten, um die Pollenausbreitung eines GV-Rapsfeld zu modellieren. Ferner verwendeten Hehl et al. (2005) zur Abschätzung der Bioaerosol-Exposition (Staub, Keime, Pilze, Endotoxin) von Anwohnern in den Landkreisen Cloppenburg, Emsland und Vechta das Ausbreitungsmodell LASAT¹³², das als Grundlage für die Entwicklung von AUSTAL2000 diente (Janicke 2005). Getestet wurde AUSTAL2000 an den im Jahr 2002 durchgeführten Vorversuchen auf mikroskaliger Ebene (siehe Beismann & Kuhlmann 2006: 145) und zur Modellierung der Raps- und Maispollendeposition im gesamten Untersuchungsgebiet während des Feldversuchs 2003.

Wichtige Eingabeparameter von AUSTAL2000 zur Beschreibung der Ausbreitungssituation sind:

- Meteorologie: Repräsentative Ausbreitungsklassen-Zeitreihe (AKTerm) des DWD (Stundenwerte),
- Geländeprofil: Digitales Geländemodell im ArcInfo ASCII-Grid-Format,

¹³¹ UFOPLAN 200 43 256 „Entwicklung eines modellgestützten Beurteilungssystems für den anlagenbezogenen Immissionsschutz“

¹³² Lagrange-Simulation von Aerosol-Transport (LASAT)

- Qualitätsstufe: Freisetzungsrate von Simulationspartikeln¹³³,
- Rechengitter (relative Koordinaten): Ursprung, Maschenweite, Ausdehnung und Verschachtelung von Rechengittern,
- Rauigkeitslänge: Abhängig von der Landnutzung (9 Klassen: 0,01 – 2 m),
- Quelle: Definition von Art (Stäube, Gase), Geometrie (Punkt- oder Flächenquelle), Anzahl, Lage (relative Koordinaten, Ausdehnung und Drehwinkel), Höhe und Stärke jeder einzelnen Quelle.

Die Rechenzeit ist – abgesehen von der Leistungsfähigkeit des Computers – v.a. von der Anzahl der Quellen, der Quellengeometrie (Punkt/Fläche), der Qualitätsstufe (Anzahl der Simulationspartikel) und der Verwendung eines Geländemodells (DGM) abhängig. Falls ein Geländemodell definiert ist, kann AUSTAL2000 nicht auf Windfelder der Windfeldbibliothek zurückgreifen, sondern es werden 3-dimensionale Wind- und Turbulenzfelder für das DGM neu berechnet (Janicke 2003, 28/29, VDI 3945 Blatt 3, 22). Zur Berechnung der Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene konnte nicht auf das Geländemodell¹³⁴ verzichtet werden, weil sich das Untersuchungsgebiet geomorphologisch deutlich unterscheidet. Um trotzdem eine akzeptable Rechendauer zu erreichen, mussten einige Eingabeparametern generalisiert werden. Die Raps- und Maisfelder wurden als Punktquellen definiert (Flächenschwerpunkt), die Maschenweite des Rechengitters wurde auf 100 x 100 m festgesetzt (172 x 172 Rasterzellen) und die Qualitätsstufe blieb auf Standardniveau (0). Aufgrund der großen Anzahl an Raps- und Maisfeldern wurden mehrere getrennte Rechengänge für das Untersuchungsgebiet notwendig. Die einzelnen Berechnungen wurden in ArcInfo bzw. ArcGIS als ASCII-Datensatz in das ESRI-Grid-Format überführt und anschließend zusammengefasst. In Tab. 3.10 sind die Eingabeparameter für die Berechnung der Pollenausbreitung mit AUSTAL2000 für Raps und Mais aufgeführt.

¹³³ Durch Erhöhung der Anzahl simulierter Partikel reduziert sich die statistische Unsicherheit des Ergebnisses (Janicke 2003: 11).

¹³⁴ Für die Berechnung mit AUSTAL2000 wurde in das Geländemodell die Höhe der Landnutzungen (v. a. Wald und Siedlungsfläche) einberechnet und korrekterweise müsste man von einem digitalen Oberflächenmodell sprechen. Der Einfachheit halber wird der Begriff „Geländemodell“ weiter verwendet.

Tab. 3.10: Vergleich der Eingabeparameter für die Berechnung der Raps- und Maispollenausbreitung auf mesoskaliger Ebene

Eingabeparameter ¹³⁵	RAPS	MAIS
Meteorologie	AKTerm Station Landberg (25.4.-23.5.2003)	AKTerm Station Landberg (4.7.-18.7.2003)
Geländeprofil ¹³⁶ , Maschenweite	100 x 100 m	100 x 100 m
Qualitätsstufe ¹³⁷	0	0
Rechengitter, Maschenweite	100 x 100 m	100 x 100 m
Rechengitter, Ausdehnung	172 x 172 Zellen	172 x 172 Zellen
Rauigkeitslänge ¹³⁸	0,2 m	0,2 m
Quellenart	PM 2 ¹³⁹	PM 4 ¹⁴⁰
Quellenanzahl	381 (20 Quellen / Rechengang ¹⁴¹)	873 (30 Quellen / Rechengang)
Quellengeometrie	Punktquellen (Schwerpunkte der Rapsfelder)	Punktquellen (Schwerpunkte der Maisfelder)
Quellhöhe	2 m	3 m
Quellstärke ¹⁴²	3,856 g s ⁻¹ ha ⁻¹	0,2668 g s ⁻¹ ha ⁻¹
Rechendauer	Qualität 0: ~8,5h ¹⁴³	Qualität 0: ~2,5h ¹⁴⁴

¹³⁵ Die Berechnungen mit AUSTAL2000 wurden mit den Versionen 2.1.14 (Raps) und 2.3.2 (Mais) durchgeführt.

¹³⁶ Geländeprofil angepasst an die Auflösung des Rechengitters und berechnet aus der Geländehöhe (BLVA a) plus der durchschnittlichen Höhe der Landnutzung (Wald, Siedlung etc.).

¹³⁷ Freisetzungsrate von Simulationspartikeln: 63 Mio. Partikel bei Qualitätsstufe 0

¹³⁸ Eine Rauigkeitslänge von 0,2 m gilt u.a. für die CORINE-Landnutzungsklassen Straße/Eisenbahn, städtische Grünflächen und Landwirtschaft/natürliche Bodenbedeckung.

¹³⁹ Staub der Korngrößenklasse 2 (Korngröße: 2,5-10 µm), Depositionsgeschwindigkeit $v_d = 0,01$ m/s

¹⁴⁰ Staub der Korngrößenklasse 4 (Korngröße: >50 µm), Depositionsgeschwindigkeit $v_d = 0,2$ m/s

¹⁴¹ Mehr als 20 Quellen (Mais: 30 Quellen) führten zum Absturz des Programms oder des Computers.

¹⁴² Berechnung / Abschätzung der Quellstärke aus Pollengewicht, Pollenproduktion pro Pflanze, Bestandsdichte, Blühdauer und Feldfläche.

¹⁴³ Computer: Pentium IV, 1,6 GHz, 256 MB RAM

¹⁴⁴ Computer: AMD Turion, 1,8 GHz, 896 MB RAM

4 Ergebnisse

4.1 Feldversuche 2003

4.1.1 Auswahl repräsentativer Pollensammler-Standorte

4.1.1.1 Geschichtete Stichprobe

Als Schichten (Strata) der geschichteten Stichprobe wurden verwendet (siehe Kap. 3.5.2):

- (1) Naturräumliche Haupteinheiten (4 Klassen),
- (2) orografische Höhe (13 Klassen) und
- (3) landwirtschaftliche Landnutzung (3 Klassen).

Die endgültige Lage der Standorte der Pollensammler zeigen die Karten 3 und 4 (Anhang).

Ein grundsätzliches Problem bei der proportionalen Aufteilung der Sammler in einem Stratum stellen unterschiedliche Datenniveaus dar. Beispielsweise werden (stetige) Flächenanteile auf eine (diskrete) Anzahl von Pollensammlern übertragen (Stratum „naturräumliche Haupteinheiten“). Die identische prozentuale Aufteilung von Fläche und Pollensammler ist nicht möglich (siehe Tab. 4.1, Spalte 3 und 5). Eine annähernde Übereinstimmung wird mit 21 Sammlern in der Münchener Ebene, 17 Sammlern im Fürstfeldbrucker Hügelland, 9 Sammlern im Donau-Isar-Hügelland und 3 Sammlern im Ammer-Loisach-Hügelland erzielt.

Tab. 4.1: Aufteilung der Pollensammler auf die naturräumlichen Haupteinheiten im Untersuchungsgebiet

Naturraum	Fläche (ha)	Anteil (%) [Soll]	Anzahl Pollen- sammler	Anteil (%) [Ist]
Münchener Ebene	10.898	42,6	21	42,0
Fürstfeldbrucker Hügelland	8.622	33,7	17	34,0
Donau-Isar-Hügelland	4.783	18,7	9	18,0
Ammer-Loisach-Hügelland	1.297	5,1	3	6,0
Summe	25.600	100	50	100

In gleicher Weise erfolgte die Aufteilung der Sammler auf die Strata „orografische Höhe“ und „landwirtschaftliche Landnutzung“. Das Stratum Orografie setzte sich aus 13 Klassen (Höhenintervall 10 m) zusammen. Die höchste und niedrigste Klasse sollten aufgrund der geringen Klassenbelegung nicht mit Sammlern besetzt werden und die meisten Sammler sollten auf die Klasse 520 (511 – 520 m) entfallen.

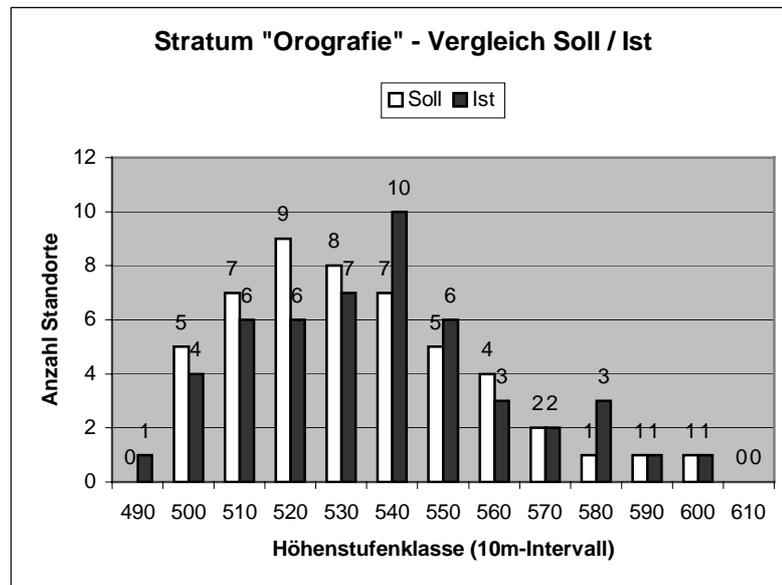


Abb. 4.1: Stratum Orografie - Vergleich der geplanten und realisierten Standorte

Die Abweichungen zwischen der geplanten Klassenbelegung der Höhenstufenklassen der Pollensammler-Standorten und der Klassenbelegung durch die realisierten Standorte zeigen sich in Abb. 4.1. Diese Abweichungen sind zu vernachlässigen, wenn man die Breite der Geländehöhen-Klassen (10 m-Intervalle) berücksichtigt und bei genauerer Betrachtung (Variabilität und Verteilung der zugrundeliegenden Werte) die hohe Übereinstimmung zwischen Untersuchungsgebiet und Pollensammler-Standorten erkennt (siehe Tab. 4.2).

Tab. 4.2: Geländehöhe im Untersuchungsgebiet und an den Pollensammlerstandorten - Lagemaße der Verteilung und Standardabweichung

Lagemaße der Verteilung der Geländehöhe /	Untersuchungsgebiet (n = 412.164)	Pollensammler-Standorte (n = 50)
	Geländehöhe (m)	Geländehöhe (m)
10%-Perzentil	501	500
25%-Quartil	511	512
Median	526	533
75%-Quartil	543	543
90%-Perzentil	561	563
Standardabweichung	23,0	24,7

Beim Stratum (Schicht) landwirtschaftliche Nutzung sollte die Mehrheit der Sammler auf das Ackerland (36 Sammler) entfallen, gefolgt von Grünland (10 Sammler) und Mischnutzung (4 Sammler). Die realisierte Verteilung der Standorte zeigt Abb. 4.2. Da die Daten zur Landnut-

zung auf einer Luftbildinterpretation im Maßstab 1:25.000 beruhen, ist der Verlauf der Grenze zwischen zwei Nutzungen mit einer Unsicherheit von wenigstens 25 m behaftet. Die vermeintlich sichere Zuordnung der Standorte zu einem Nutzungstyp beruht folglich auf einer nicht „scharfen“ Grenze. Es ist anzumerken, dass acht Sammler jeweils sehr nah (<30 m) an der Grenze zwischen zwei Nutzungstypen standen. Dadurch könnte sich die Zuordnung der Sammlerstandorte zu den Nutzungsklassen folgendermaßen verändern: Ackerland (+4 bis -3 Standorte), Mischnutzung (+1 bis -2) und Grünland (+3 bis -3).

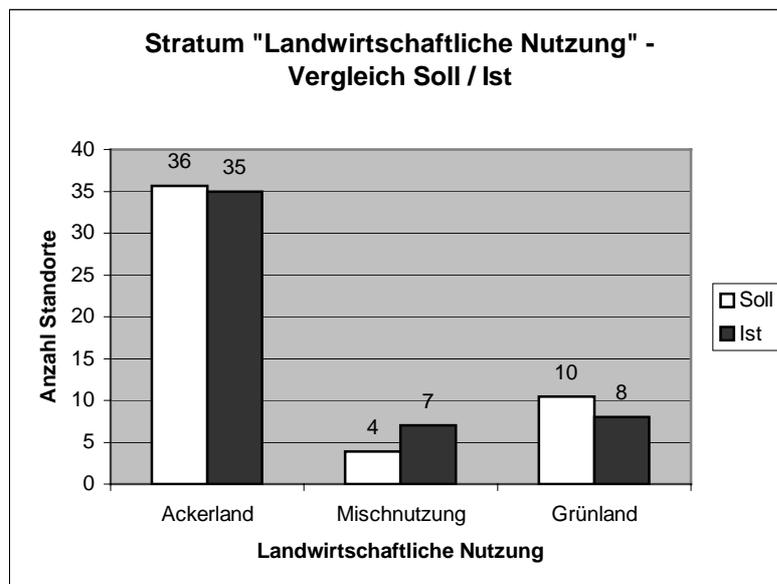


Abb. 4.2: Stratum landwirtschaftliche Nutzung - Vergleich der geplanten und realisierten Standorte

Ergänzend ist anzumerken, dass einige Messstandorte auf Wunsch oder aufgrund von einzelnen Verboten der Eigentümer oder Pächter aufgegeben wurden und um wenige bis einige hundert Meter von der ursprünglich vorgesehenen Position versetzt wurden¹⁴⁵.

4.1.1.2 Relevanz der Strata für ein Pollenmonitoring

Der große Einfluss der Meteorologie auf die Pollendeposition wurde bereits in Abb. 1.2 dargestellt. Die meteorologischen Parameter werden wiederum von Geländere relief und Gelände-

¹⁴⁵ Grundsätzlich war die Akzeptanz der Grundeigentümer und Pächter für Aufstellung und Betrieb der Messapparaturen sehr hoch, weil Standorte zwischen Feldrand und Flurweg gewählt wurden. Diese Standorte zeichneten sich zudem durch eine gute Erreichbarkeit aus.

höhe beeinflusst¹⁴⁶. Da bei der Messplanung keine geeigneten meteorologischen Flächendaten für die Stratifizierung zur Verfügung standen (siehe Kap. 3.4.2.2), wurde als Alternative die Geländehöhe als Stratum gewählt. Nach Abschluss der Feldversuche konnte diese Abhängigkeit im Untersuchungsgebiet mit den im Nachgang erhaltenen meteorologischen Daten (1x1 km-Rasterdaten) nachgewiesen werden. Wie in Tab. 4.3 abzulesen ist, tritt – wie zu erwarten – eine negative Korrelation von Geländehöhe mit Temperatur sowie eine positive Korrelation von Geländehöhe mit Niederschlag auf. Die Korrelation von Geländehöhe mit Sonnenscheindauer und mit Globalstrahlung ist niedriger und zum Teil nicht signifikant. Die

Tab. 4.3: Rangkorrelation der Orografie (DGM) mit der Meteorologie (Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Sonnenscheindauer) im Untersuchungsgebiet ($n = 256$)

Rangkorrelationskoeffizient (r_s)	DGM	Temperatur (April)	Temperatur (Mai)	Temperatur (Juli)
DGM	1			
Temperatur (April)	-0,588**	1		
Temperatur (Mai)	-0,598**	0,991**	1	
Temperatur (Juli)	-0,428**	0,938**	0,939**	1
Rangkorrelationskoeffizient (r_s)	DGM	Niederschlag (April)	Niederschlag (Mai)	Niederschlag (Juli)
DGM	1			
Niederschlag (April)	0,664**	1		
Niederschlag (Mai)	0,680**	0,968**	1	
Niederschlag (Juli)	0,594**	0,902**	0,938**	1
Rangkorrelationskoeffizient (r_s)	DGM	Globalstrahlung (April)	Globalstrahlung (Mai)	Globalstrahlung (Juli)
DGM	1			
Globalstrahlung (April)	0,085	1		
Globalstrahlung (Mai)	-0,167**	0,887**	1	
Globalstrahlung (Juli)	-0,100	0,650**	0,692**	1
Rangkorrelationskoeffizient (r_s)	DGM	Sonnenscheindauer (April)	Sonnenscheindauer (Mai)	Sonnenscheindauer (Juli)
DGM	1			
Sonnenscheindauer (April)	0,466**	1		
Sonnenscheindauer (Mai)	-0,297**	0,332**	1	
Sonnenscheindauer (Juli)	-0,191**	0,451**	0,805**	1

¹⁴⁶ Dies betrifft beispielsweise die Windgeschwindigkeit (Kraus 2004: 252-253, Häckel 2005: 342-349), den Luftdruck (Kraus 2004: 26-27), die Lufttemperatur (Weischet 2002: 115, 172-175, Häckel 2005: 336-342), den Niederschlag (Leser 1997: 827, Häckel 2005: 350-351) und die Globalstrahlung (Leser 1997: 838, Häckel 2005: 326-336).

Monatswerte von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung zeigen zudem eine höhere räumliche Varianz als Temperatur und Niederschlag. Die relative räumliche Verteilung der Temperatur- und Niederschlagswerte weicht von Monat zu Monat nur gering voneinander ab ($r_s > 0,9$).

Der Einfluss der naturräumlichen Haupteinheiten auf die Pollendeposition wird in Kap. 4.1.2.1 deutlich (siehe auch Anhang, Karte 3 und Karte 4). Dieses Stratum wirkt sich direkt auf die „Pollenquellen“, die Felder aus. Je nach Naturraum unterscheiden sich die durchschnittliche Feldfläche und die Geometrie der Felder signifikant (siehe S. 80).

Tab. 4.4: *Prozentualer Flächenanteil der Raps- und Maisfelder bezogen auf die Landnutzung*

	Fläche der Rapsfelder (%)	Anteil Rapsfelder innerhalb der Nutzungsklasse (%)	Fläche der Maisfelder (%)	Anteil Maisfelder innerhalb der Nutzungsklasse (%)
Acker	87,9	8,7	78,7	15,4
Mischnutzung (Acker / Grünland)	3,5	3,2	7,6	13,7
Grünland	7,4	2,5	12,7	8,5
Sonstige Flächen	1,2	0,2	1,1	0,3
Summe	100,0	-	100,0	-

Im Stratum „landwirtschaftliche Nutzung“ schlägt sich die räumliche Verteilung der Raps- und Maisfelder nieder (siehe Tab. 4.4). Wie zu erwarten war, befinden sich die Raps- und Maisfelder überwiegend in der Landnutzungsklasse „Acker“ (88% bzw 79%). Nur ein geringer Prozentsatz fällt in die Klasse „Mischnutzung“ (da absolute Fläche der „Mischnutzung“ gering) und ein deutlich höherer Anteil aller Raps- und Maisfelder befindet sich in den als „Grünland“ klassifizierten Gebieten. Auf die sonstige Nutzung entfallen gut 1% der Feldfläche von Raps und Mais. Es beruht auf der Erhebungsmethode und dem Maßstab der Landnutzungsdaten, dass nicht alle Felder in der Klasse „Acker“ oder „Mischnutzung“ vertreten sind (sowie auf der Tatsache das Grünlandstandorte ackerbaulich genutzt werden). Die Landnutzungsdaten beruhen auf der Auswertung von Luftbildern. Bei der Luftinterpretation sind Generalisierungen unumgänglich, zudem ist der Erhebungsmaßstab der Landnutzungsdaten (1:25.000) kleiner als der der Kartierung (1:5.000), weshalb Nutzungsgrenzen und Feldgrenzen nicht gänzlich deckungsgleich sind.

Der Anteil der Raps- und Maisfelder an der Gesamtfläche der jeweiligen Landnutzungsklasse zeigt eine Abfolge wie erwartet: Vom „Acker“ über „Mischnutzung“ und „Grünland“ bis zu „sonstige Flächen“ nimmt der Anteil der Raps- und Maisfelder ab.

4.1.1.3 Alternative Datensätze für die Strata

Naturraum:

Als Alternative zur naturräumlichen Gliederung nach Meynen et al. (1962) wurden die Ökologischen Raumklassen nach Schröder et al. (2001) bzw. Schmidt (2002) untersucht. Die Ökologischen Raumklassen wurden mit einer Auflösung von 2 x 2 km für das gesamte Bundesgebiet erstellt. Die Zielvariable der Klassifizierung ist die potenziell natürliche Vegetation (PNV). Zur Klassifizierung der als „UBA PNV IX“ bezeichneten finalen Variante¹⁴⁷ wurden Bodenart, Orografie und Klimadaten (Lufttemperatur, Niederschlagssumme, Verdunstungsrate und Globalstrahlung) verwendet. Für die Bundesrepublik Deutschland liegen zwei Klassifizierungen mit 21 bzw. 73 Klassen vor. Im Untersuchungsgebiet unterscheiden sich die beiden Klassifizierungen nur geringfügig (Klassenanzahl: vier bzw. fünf). Die Gesamtmissklassifikation der Variante UBA PNV IX (21 Klassen) beträgt 0,5984. Die Fehlklassifikationen der Klassen im Untersuchungsgebiet (55, 56, 57, 119) liegen zwischen 0,3767 und 0,6669.

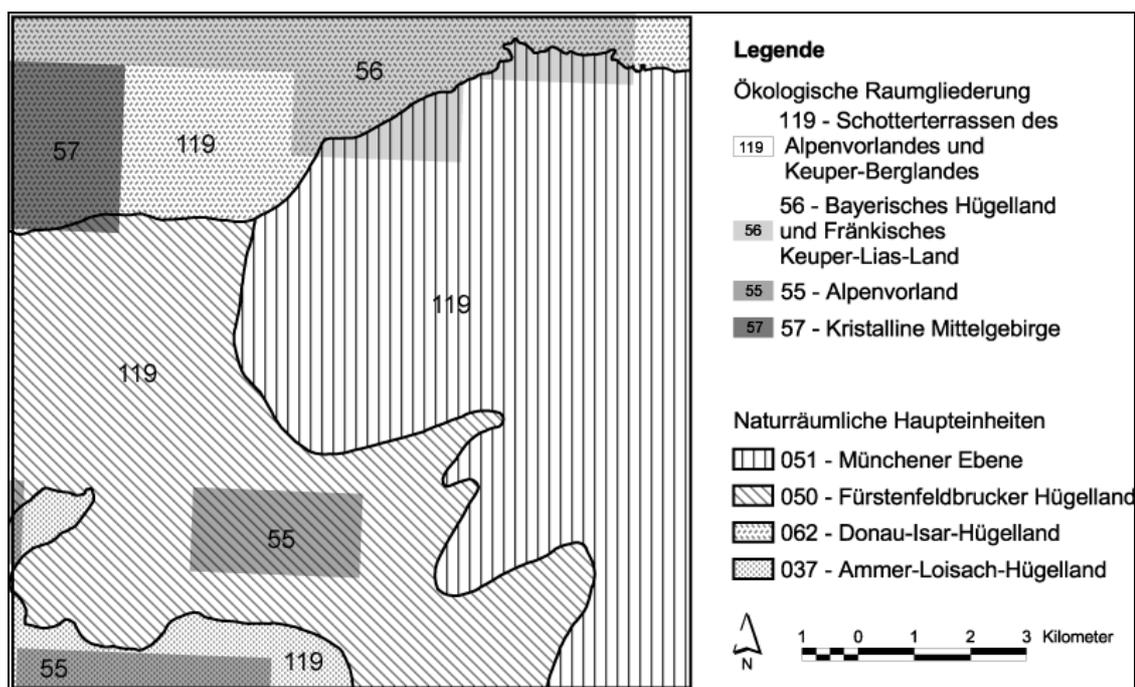


Abb. 4.3: Vergleich der Ökologischen Raumklassen mit den Naturräumlichen Haupteinheiten im Untersuchungsgebiet

Ökologische Raumklassen: Schröder et al. (2001) (Variante UBA PNV IX, 21 Klassen),
Naturräumliche Haupteinheiten: Meynen et al. (1962) und LfU

Im Gegensatz zum Raster der Ökologischen Raumklassen sind die Naturräumlichen Haupteinheiten polygonal abgegrenzt. Die Gebietseinteilung erfolgt v.a. nach geologischen, orogra-

¹⁴⁷ Es wurden mehrere Varianten (I bis IX) mit verschiedenen Parameterkombinationen berechnet.

fischen und klimatischen Kriterien (Meynen et al. 1962: 5, 6, 17, 45) und ist hierarchisch gegliedert. Für das Untersuchungsgebiet bietet die dritte (naturräumliche Haupteinheiten) von sechs Ordnungen einen ausreichenden Detaillierungsgrad. Als Vektordaten können die naturräumlichen Haupteinheiten die Übergänge in der Landschaft besser abbilden als die groben Rasterdaten der Ökologischen Raumklassen (siehe Abb. 4.3).

Orographie:

Eine Alternative zu den Daten der Landesvermessung bestand zum Zeitpunkt des Feldversuchs nicht. In der Zwischenzeit ist der kostenfreie SRTM-Datensatz (Auflösung ~90 x 90 m) im Internet verfügbar¹⁴⁸. Diese Daten wurden im Februar 2000 während einer Shuttle-Mission erhoben. Hinsichtlich Aktualität und Qualität (Auflösung, Höhengenaugigkeit) sind Laser-Scanning-Daten der Landesvermessung zu bevorzugen.

Landwirtschaftliche Nutzung:

Im Jahr 2003 wurde aus Kostengründen eine aktuelle Luftbildklassifikation anstelle der offiziellen Daten der Landesvermessung zur Landnutzung (ATKIS) verwendet. Im Normalfall sind die ATKIS-Daten als Referenzdaten anzusehen.

4.1.1.4 Untersuchung der räumlichen Verteilung der Sammlerstandorte

Die Punktverteilung der Sammlerstandorte wurde mit dem Nearest Neighbour Index (NNI)¹⁴⁹ untersucht (siehe Kap. 3.5.2.1) und es wurde nachgewiesen, dass die Pollensammler im Untersuchungsgebiet zufällig und nicht geklumpt oder gleichmäßig verteilt sind (siehe Tab. 4.5). Der NNI-Wert¹⁵⁰ (Raps: 1,13; Mais: 1,15) weicht nur geringfügig vom NNI-Wert einer räumlich zufälligen Punktverteilung (1,0) ab. Diese Abweichung ist nicht signifikant bei Prüfung auf dem 1%-Niveau (einseitig). Bei Berechnung des NNI höherer Ordnung (Distanzen zum zweitnächsten und drittnächsten Nachbarn) nähern sich die Indizes immer stärker dem Wert 1,0 an.

¹⁴⁸ <http://srtm.usgs.gov/>

¹⁴⁹ Berechnung mit „Rectangular Edge Correction“.

¹⁵⁰ Beträgt der Nearest Neighbour Index 1,0 entspricht die Punktverteilung einer Zufallsverteilung (complete spatial randomness - CSR). Werte kleiner 1,0 deuten auf eine räumlich konzentrierte Verteilung und Werte größer 1,0 auf eine räumlich gleichmäßige Verteilung hin.

Tab. 4.5: Nearest Neighbour Analyse für die Standorte der Raps- und Maispollensammler

Feldversuch	RAPS	MAIS
Sample size	50	50
Mean Nearest Neighbour Distance	1.284 m	1.296 m
Standard Deviation of Nearest Neighbour Distance	334 m	334 m
Minimum Distance	885 m	885 m
Maximum Distance	19.181 m	19.181 m
Based on Bounding Rectangle (Area)	256.000.000 m ²	256.000.000 m ²
Mean Random Distance	1.131 m	1.131 m
Mean Dispersed Distance	2.431 m	2.431 m
Nearest Neighbour Index (NNI): 1. / 2. / 3. Order	1,135 / 1,058 / 1,040	1,146 / 1,061 / 1,037
Standard Error	83,64 m	83,64 m
Test Statistic (Z)	1,825	1,968

4.1.1.5 Raumrepräsentativität der Sammlerstandorte bezüglich Feldabstand

Zur Raumrepräsentativität der Sammlerstandorte wurde untersucht, inwieweit die Entfernung der Pollensammler zum nächsten Raps- oder Maisfeld den allgemeinen Verhältnissen im Untersuchungsgebiet (Bezugsfläche: landwirtschaftlich genutzte Fläche) bezüglich der Entfernung zum nächsten Raps- oder Maisfeld entspricht. Dazu wurde eine rasterbasierte Abstandsanalyse (siehe Kap. 3.5.6.3) durchgeführt. Für die Rapsstandorte ist eine hohe, für die Maisstandorte nur eine mäßige Übereinstimmung festzustellen. Wie die Tab. 4.6 zeigt, liegt das

Tab. 4.6: Lagemaße der Verteilung der Pollensammler-Standorte und eines Rasters bezüglich der „Entfernung zum nächsten Feld“ innerhalb des landwirtschaftlich genutzten Raums

Lagemaße der Verteilung der „Entfernung zum nächsten Feld“	RAPS		MAIS	
	Pollensammlerstandorte (n = 50)	Raster (n = 1,53 Mio.)	Pollensammlerstandorte (n = 50)	Raster (n = 1,42 Mio.)
	Entfernung (m)	Entfernung (m)	Entfernung (m)	Entfernung (m)
10%-Perzentil	62	60	2	30
25%-Quartil	120	140	4	73
Median	256	280	55	160
75%-Quartil	465	511	141	291
90%-Perzentil	674	849	322	474

nächste Rapsfeld für ~1,5 Mio. Rasterpunkten, die sich innerhalb der landwirtschaftlich genutzten Fläche befinden, im Durchschnitt 280 m entfernt. Betrachtet man den Median der 50 Pollensammlerstandorte, beträgt der Wert 256 m. Die Perzentile und Quartile zeigen, dass beim Raps die Verteilung der Rasterpunkte durch die Verteilungen der Pollensammlerstandorte gut abgedeckt wird. Dies ist bei den Pollensammlerstandorten des Maisversuchs nicht der Fall. Die Standorte der Sammler befinden sich im Vergleich mit den ~1,4 Mio. Rasterpunkten zu nah an den Maisfeldern. Der Median der Verteilung liegt bei den Rasterpunkten bei 160 m, bei den Sammlerstandorten bei 55 m.

BOX

4.1.1.6 Alternatives Stichprobenverfahren – Das Multidimensionale Nachbarschafts-Repräsentanzmaß (MNR)

Zur Auswahl repräsentativer Standorte wurde als Alternative zur geschichteten Stichprobennahme das Multidimensionale Nachbarschafts-Repräsentanzmaß (MNR) nach Vetter (1989) und Vetter & Maass (1994) – anschauliche Darstellungen in Schmotz (1996: 94-99) und Szibalski (2000: 42-46) – in Erwägung gezogen. Aus den u.g. Gründen wurde das Verfahren nicht angewendet.

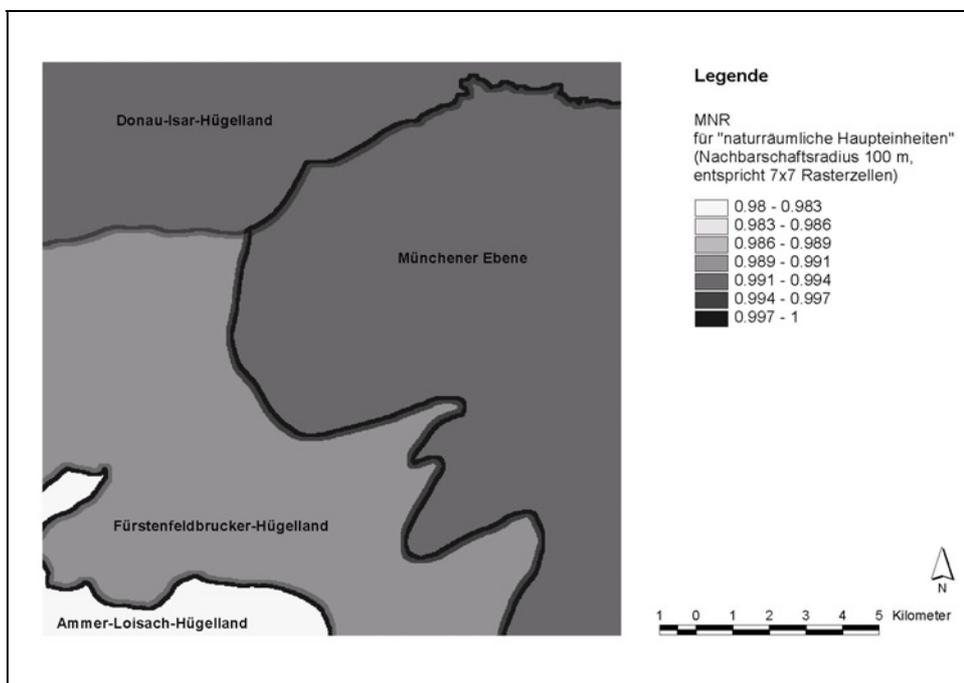


Abb. 4.4: MNR (RI) der Kartenebene „naturräumlichen Haupteinheiten“ des Untersuchungsgebietes (Nachbarschaftsradius = 100 m, entspricht 7 x 7 Rasterzellen)

Das MNR beruht auf der speziellen Nachbarschaftsanalyse von Renk (1977) und Fränzle (1978, vgl. Kuhnt 1994) und bewertet einen Standort als repräsentativ, in dessen Nachbarschaftsraum sich die Flächenanteile aller Merkmalsausprägungen der betrachteten Variablen bezogen auf den gesamten Untersuchungsraum proportional widerspiegeln. Das heißt, es wird nach einem Standort (+ Umgebung) gesucht, der über die gleiche Flächenverteilung wie das Untersuchungsgebiet verfügt, quasi ein miniaturisiertes Untersuchungsgebiet. Diese Eigenschaft trifft insbesondere für die Grenzbereiche von Merkmalsausprägungen einer Variablen zu (siehe Schröder 2001, Anhang A: 25). Zum besseren Verständnis des Verfahrens werden in Abb. 4.4 die Ergebnisse der Berechnung eines MNR für die Variable „naturräumlichen Haupteinheiten“ des Untersuchungsgebietes gezeigt. Diese Berechnungen wurden mit STABO, der Umsetzung des MNR in einem GIS¹⁵¹ durchgeführt.

Das MNR kann für eine oder mehreren Variablen (Kartenebenen), die als Raster vorliegen, berechnet werden. Für jede Rasterzelle einer Variablen wird ein Repräsentanzindex (RI) berechnet, dessen Wert zwischen 0 (=Rasterzelle + Nachbarschaft nicht repräsentativ für die Kartenebene) und 1 (=Rasterzelle + Nachbarschaft höchst repräsentativ für die Kartenebene) liegen kann. Im Fall mehrerer Variablen setzt sich das MNR aus der Summe der RI geteilt durch die Anzahl der Variablen zusammen. Auch in diesem Fall (siehe Abb. 4.4) liegen die höchsten RI an der Grenze der Merkmalsausprägungen (hier Naturräume), da in diesem Bereich eine Rasterzelle (mit ihren nachbarschaftlichen Rasterzellen; hier insgesamt 7 x 7 Rasterzellen) die Flächenverhältnisse des gesamten Untersuchungsgebietes am besten widerspiegelt. Diese Eigenschaft der Rasterzelle, das Große im Kleinen widerzuspiegeln, ist jedoch kein Kennzeichen für Repräsentativität. Im Gegenteil, die Eigenart der Grenzlage macht die Standorte nicht repräsentativ, sondern speziell. Insgesamt haben ~99% aller Rasterzellen als Nachbarn ausschließlich Rasterzellen mit der gleichen Merkmalsausprägung. Beispielsweise sind 97% aller Rasterzellen, die zum Naturraum Ammer-Loisach-Hügelland zählen, nur von Nachbar-Rasterzellen umgeben, die ebenfalls zum Naturraum Ammer-Loisach-Hügelland gehören. Damit lässt sich aus den Standorten mit hohem RI nicht zwangsläufig ein hohes Maß an Raumrepräsentativität ableiten. Das Verfahren des Multidimensionalen Nachbarschafts-Repräsentanzmaßes (MNR) entspricht nicht der (Raum-)Repräsentativität, wie in Kapitel 3.5.1 dargelegt.

¹⁵¹ Ursprünglich in ArcInfo (Recher & Schmotz 1993), später in verbesserter Form in ArcView 3.x (Behrens & Schneider 2004).

4.1.2 Kartierung der Raps- und Maisfelder

4.1.2.1 Felderkartierung

Der Rapsanbau in den Naturräumen des Untersuchungsgebiets schwankt zwischen 6,2 und 7,8% und liegt damit geringfügig unter dem Durchschnitt des Landkreises Fürstentfeldbruck (8,8%), jedoch deutlich über dem Landesdurchschnitt von 5,1% (siehe Tab. 4.7 und Tab. 3.2). Zwischen den einzelnen Naturräumen (bezogen auf das Untersuchungsgebiet) schwankt die Größe und Form der Rapsfelder erheblich (siehe Tab. 4.7 und Karte 3, Anhang). In der Münchener Ebene sind die Felder durchschnittlich am kleinsten (1,75 ha), jedoch weist die Feldgröße eine hohe Varianz und Spannweite auf. Es kommen viele rechteckige und langgestreckte Felder vor (PAR¹⁵² relativ hoch). Im Fürstentfeldbrucker und im Donau-Isar-Hügelland sind die Felder im Mittel gleich groß (~2,8 ha) und in ihrer Form kompakt (PAR ~0,028). Der erstgenannte Naturraum unterscheidet sich bezüglich Varianz und Spannweite nicht von der Münchener Ebene. Einheitliche Felder (geringe Varianz und Spannweite) prägen das Donau-Isar-Hügelland. Im Ammer-Loisach-Hügelland kommen nur fünf Rapsfelder vor. Signifikante Unterschiede zwischen den Naturräumen (ohne Ammer-Loisach-Hügelland) wurden für die Feldfläche und die Feldgeometrie (PAR) nachgewiesen¹⁵³.

Tab. 4.7: Beschreibende Statistik zu den Rapsfeldern bezogen auf die naturräumlichen Haupteinheiten¹⁵⁴

Name	Münchener Ebene	Fürstentfeldbrucker Hügelland	Donau-Isar-Hügelland	Ammer-Loisach-Hügelland
Anzahl der Felder	148	116	83	5
Feldfläche, Median (ha)	1,75	2,81	2,83	5,37
Variationsbreite (ha)	21,90	20,38	11,70	7,83
Standardabweichung (ha)	3,08	2,91	2,49	2,92
Perimeter-Area-Ratio, Median (1/m)	0,0368	0,0281	0,0274	0,0208
Anteil an Agrarfläche (%)	6,16	7,72	7,76	7,03

¹⁵² Perimeter-Area-Ratio (PAR, in der Einheit 1/m) steht für die Kompaktheit eines geometrischen Gebildes. Hohe Werte deuten auf ein Element mit geringem Flächeninhalt und großem Umfang, niedrige Werte entsprechend auf das Gegenteil.

¹⁵³ Kruskal & Wallis H-Test (1%-Signifikanzschranke)

¹⁵⁴ Alle Felder, die vollständig innerhalb des Untersuchungsgebietes und der jeweiligen naturräumlichen Haupteinheit lagen, wurden berücksichtigt.

Tab. 4.8: Beschreibende Statistik zu den Maisfeldern bezogen auf die naturräumlichen Haupteinheiten¹⁵⁵

Name	Münchener Ebene	Fürstenfeldbrucker Hügelland	Donau-Isar-Hügelland	Ammer-Loisach-Hügelland
Anzahl der Felder	318	271	195	16
Feldfläche, Median (ha)	1,55	2,12	2,97	2,29
Variationsbreite (ha)	19,13	17,38	18,94	14,69
Standardabweichung (ha)	1,83	2,59	2,65	3,64
Perimeter-Area-Ratio, Median (1/m)	0,0411	0,0305	0,0276	0,0278
Anteil an Agrarfläche (%)	9,85	15,69	18,33	13,78

Auch beim Maisanbau zeigen sich zwischen den einzelnen Naturräumen hinsichtlich Fläche und Form der Felder signifikante Unterschiede¹⁵⁶ (siehe Tab. 4.8 und Karte 4, Anhang). Der Maisanbau im Untersuchungsgebiet liegt – mit Ausnahme der Münchener Ebene – sowohl über dem Durchschnitt des Landkreises Fürstenfeldbruck (10,1%) als auch des Bundeslandes (12,1%) (siehe Tab. 4.8 und Tab. 3.2). Die Münchener Ebene zeichnet sich erneut durch die durchschnittlich kleinsten Felder (1,55 ha) und durch einen relativ hohen PAR-Wert aus (viele rechteckige langgestreckte Felder). Die Spannweite zwischen dem kleinsten und größten Feld ist enorm, die geringe Standardabweichung deutet jedoch überwiegend einheitliche Feldergrößen an. Im Fürstenfeldbrucker Hügelland und im Donau-Isar-Hügelland sind die Felder mit 2,1 ha bzw. 3,0 ha deutlich größer als in der Münchener Ebene. In der Spannweite unterscheiden sich die Naturräume hingegen nicht. Die Felder des Fürstenfeldbrucker und des Donau-Isar-Hügellands besitzen hinsichtlich ihrer Größe eine höhere Varianz als die Felder der Münchener Ebene. Die Kompaktheit der Felder (PAR) nimmt von der Münchener Ebene über das Fürstenfeldbrucker Hügelland bis zum Donau-Isar-Hügelland zu. Im Ammer-Loisach-Hügelland kommen nur 15 Maisfelder vor.

4.1.2.2 Fernerkundung

In Ermangelung anderer Satellitendaten wurde die LANDSAT-Szene trotz der schlechten Voraussetzungen (Aufnahmezeitpunkt zu früh) zur Abgrenzung von Rapsfelder verwendet und eine überwachte Klassifizierung (supervised classification) mit dem Mahalanobis Distance Classifier (MDC) durchgeführt. Aufgrund der Interkorrelation der Kanäle (siehe Tab. 4.9) wurde das beste Klassifikationsergebnis mit einer reduzierten Anzahl an Kanälen erreicht (3, 4, 5).

¹⁵⁵ Alle Felder, die vollständig innerhalb des Untersuchungsgebietes und der jeweiligen naturräumlichen Haupteinheit lagen, wurden berücksichtigt.

¹⁵⁶ Kruskal & Wallis H-Test (1%-Signifikanzschranke)

Tab. 4.9: Korrelationskoeffizienten für alle Kanalkombinationen (LANDSAT-7)

973.182 Pixel						
Spektrum	VIS			NIR	MIR	
Kanal	1 (blau)	2 (grün)	3 (rot)	4	5	7
1	1					
2	0,94	1				
3	0,89	0,97	1			
4	0,56	0,63	0,53	1		
5	0,78	0,85	0,85	0,70	1	
7	0,81	0,88	0,91	0,48	0,93	1

Pixel der Objektklasse „Raps“ konnten auf 44% der kartierten Rapsfelder klassifiziert werden. Zur Abgrenzung von Feldern war das Ergebnis der Klassifizierung nicht zu verwenden, da die Pixelhaufen zu unsymmetrisch waren und keinen Rückschluss auf die Feldgeometrie zuließen.

Tab. 4.10: Korrelationskoeffizienten für alle Kanalkombinationen (IKONOS)

8.699.544 Pixel				
Spektrum	VIS			NIR
Kanal	1 (blau)	2 (grün)	3 (rot)	4
1	1			
2	0,97	1		
3	0,95	0,96	1	
4	0,04	0,17	0,04	1

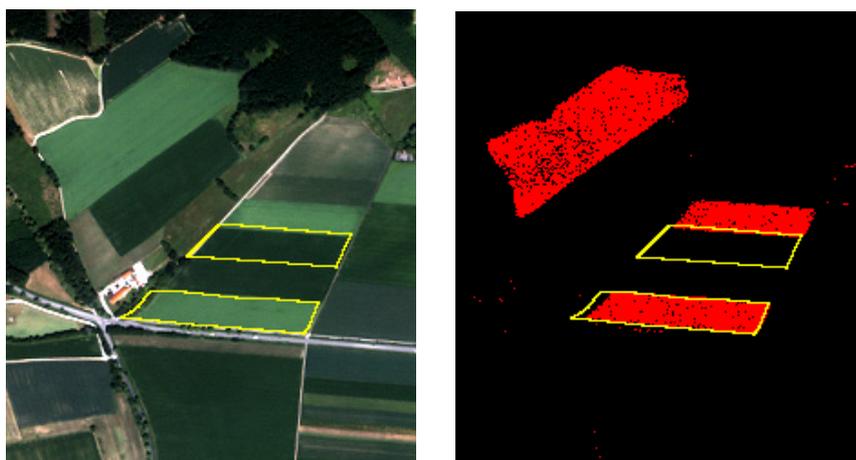


Abb. 4.5: Vergleich der Kartierung (gelber Umriss) und Klassifizierung (rote Pixel) von Raps: Echtfarbandarstellung, Kanäle 3, 2, 1 (links) und MDC-Klassifizierung (rechts) eines Ausschnitts der IKONOS-Szene

Die IKONOS-Szene vom 10. Juni 2003 ist vom Aufnahmezeitpunkt besser geeignet als die LANDSAT-Szene. Der Raps weist geschlossene Bestände auf und befindet sich in der Reifung. Zudem zeichnet sich die IKONOS-Szene durch ihre hohe Auflösung von 4 m aus. Allerdings deckt die Szene nur 54% des Untersuchungsgebietes ab (Mitte und südwestlicher Quadrant mit ~200 Rapsfeldern) und es fehlt ein für die Klassifizierung der Vegetation wichtiger Kanal im Bereich der mittleren infraroten Wellenlänge (MIR). Nach einer unüberwachten wurde wiederum die überwachte Klassifizierung (MDC) – unter Verwendung aller Kanäle – durchgeführt. Pixel der Objektklasse „Raps“ konnten auf 78% der kartierten Rapsfelder klassifiziert werden. Es wurden 2 Felder entdeckt, die nicht durch die Feldkartierung erfasst worden waren (siehe ein Beispiel in Abb. 4.5). Ferner befanden sich 3 Rapsfelder an einer anderen Position als kartiert (siehe ein Beispiel in Abb. 4.5), und 22 Rapsfelder wiesen eine von der Kartierung abweichende Geometrie auf. Allerdings konnte aus der Klassifizierung nicht die Geometrie aller Rapsfelder abgeleitet werden.

Die Ergebnisse der Auswertung der LANDSAT-7- und IKONOS-Szene wurden aus methodischen Gründen nicht zur Modifizierung der Feldkartierung verwendet, da inkonsistente Daten die Folge gewesen wären.

4.1.2.3 Abstandsanalyse

Auf der Grundlage der Felderkartierung 2003 und bezogen auf die landwirtschaftliche Nutzfläche wurde eine GIS-basierte Abstandsberechnung für das Untersuchungsgebiet durchgeführt (ESRI c). Anzahl, Lage, Größe und Form der Felder spiegeln sich in den Abstandswerten der Tab. 4.11 wider. Im Durchschnitt beträgt der Abstand zum nächsten Rapsfeld – innerhalb der landwirtschaftlichen Nutzfläche – im Fürstenfeldbrucker Hügelland 260 m und im Ammer-Loisach-Hügelland 630 m. Der durchschnittliche Abstand zum nächsten Maisfeld im Donau-Isar-Hügelland 140 m und im Ammer-Loisach-Hügelland 300 m.

Tab. 4.11: Entfernung (m) zum nächsten Raps- bzw. Maisfeld im landwirtschaftlich genutzten Raum des Untersuchungsgebiets im Jahr 2003

Kulturart	Untersuchungsgebiet		Münchener Ebene		Fürstenfeldbrucker Hügelland		Donau-Isar-Hügelland		Ammer-Loisach-Hügelland	
	Raps	Mais	Raps	Mais	Raps	Mais	Raps	Mais	Raps	Mais
n (in Tsd.)	1.529	1.418	633	608	485	443	362	321	49	46
25% Quartil	140	80	150	90	130	80	140	70	200	120
Median	280	160	300	180	260	150	280	140	630	300
75% Quartil	520	300	520	330	450	270	560	250	1360	880
Maximum	2310	1830	1900	1460	1690	1720	2130	650	2310	1830

4.1.3 Klimatisch-meteorologische Verhältnisse

4.1.3.1 Allgemeine Witterungsverhältnisse

In der Region Augsburg – Landsberg/Lech – Freising, in dessen Mitte das Untersuchungsgebiet liegt, waren die Monate März bis Juli 2003 wärmer, sonnenscheinreicher und trockener als das langjährige Mittel (siehe Tab. 4.12). Insbesondere die Monate März und April waren sehr trocken (~30% des langjährigen Mittels) und sonnenscheinreich (~140% der durchschnittlichen Monatssumme), sowie der Juni extrem heiß (5°C über Normalwert) und sonnenscheinreich ($\geq 150\%$ des Durchschnittswertes) (DWD 2003a-e).

Tab. 4.12: Vergleich der meteorologischen Monatsmittelwerte 2003 mit dem langjährigen Mittel an den Stationen Augsburg, Freising und Landsberg/Lech

(Quelle: DWD 2003a-e)

Monat	Temperatur (Abweichung vom langjährigen Mittel)	Sonnenschein (Prozent des langjährigen Mittels)	Niederschlag (Prozent des langjährigen Mittels)
März	+0,6 bis +1,2°C	139 bis 150%	23 bis 35%
April	+0,2 bis +0,9°C	130 bis 140%	28 bis 35%
Mai	+1,5 bis +2,2°C	92 bis 126%	73 bis 124%
Juni	+4,8 bis +5,2°C	147 bis 206%	44 bis 63%
Juli	+0,5 bis +1,5°C	113 bis 141%	71 bis 116%

4.1.3.2 Allgemeine phänologische Beobachtungen zu Raps und Mais

Die phänologischen Beobachtungen des DWD in Freising-Weihenstephan zeigen, dass die Entwicklung von Raps und Mais aufgrund der o.g. überdurchschnittlich warmen und sonnenscheinreichen Monate früher einsetzte als im mehrjährigen Mittel (siehe Tab. 4.13). Die vorzeitige Vegetationsentwicklung zeigte sich bereits im März und April und setzte sich im Sommer weiter fort.

Im Mittel (Median) beginnt die Rapsblüte in Freising-Weihenstephan am 119. Kalendertag und bei einer Temperatursumme¹⁵⁷ (TSUM) von 141 °C (siehe Abb. 4.6a). Im Jahr 2003 wurde das Vegetationsstadium bereits am 112. Kalendertag und einer Temperatursumme von 116 °C erreicht (DWD 1991-2005a).

Im Mittel (Median) beginnt die Maisblüte in Freising-Weihenstephan am 197. Kalendertag und bei einer Temperatursumme (TSUM) von 936 °C (siehe Abb. 4.6b). Im Jahr 2003 wurde

¹⁵⁷ Temperatursumme (TSUM): Aufsummieren der Tagesmittelwerte $>5^{\circ}\text{C}$ (Berechnung: Tagesmittelwert($>5^{\circ}\text{C}$) - 5°C); TSUM am Jahresanfang = 0

das Vegetationsstadium bereits am 182. Kalendertag und einer Temperatursumme von 947 °C erreicht (DWD 1991-2005b).

Tab. 4.13: Vegetationsentwicklung von Raps und Mais im Jahr 2003 in Freising-Weihenstephan

(Quelle: DWD 2003a-e)

Datum	Kalendertag	Vegetationsstadium	Abweichung vom Mittel (lt. DWD)
29. März	88	Winterraps Schossen	7 Tage früher
22. April	112	Winterraps Blüte	11 Tage früher
4. Mai	124	Mais Aufgang	8 Tage früher
29. Mai	149	Mais Schossen	5 Tage früher
28. Juni	179	Mais Ährenschieben	17 Tage früher
29. Juni	180	Winterraps Vollreife	17 Tage früher
1. Juli	182	Mais Beginn der Blüte	18 Tage früher
8. Juli	189	Winterraps Erntebeginn	12 Tage früher
30. Juli	211	Mais Milchreife	22 Tage früher

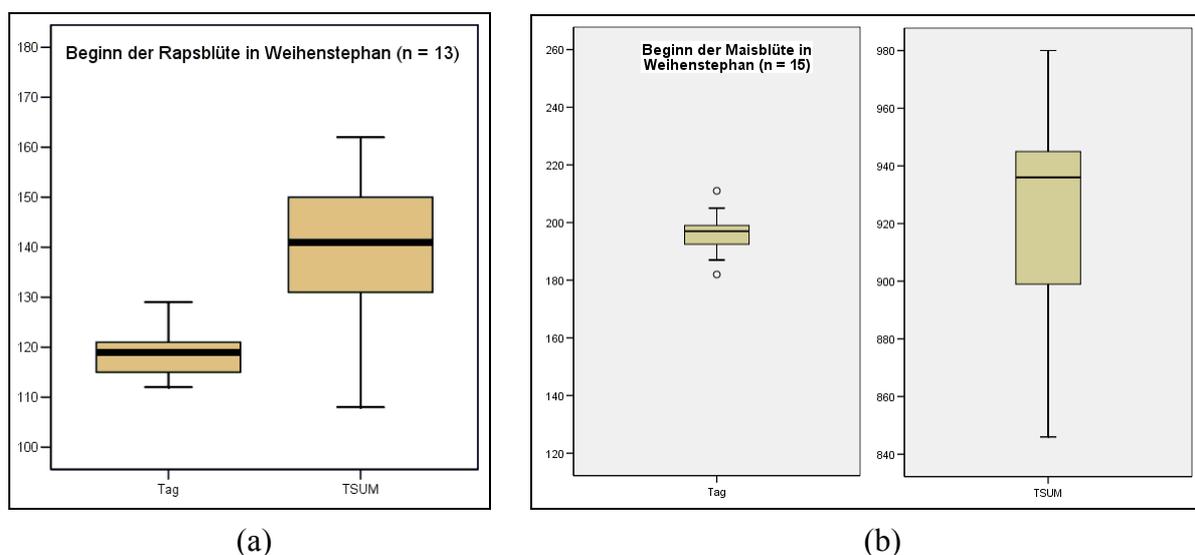


Abb. 4.6: Beginn der Blüte (Kalendertag bzw. Temperatursumme) von Raps (a) und Mais¹⁵⁸ (b) in Freising-Weihenstephan im mehrjährigen Mittel
(Quelle: DWD 1991-2005a, DWD 1991-2005b)

¹⁵⁸ Fehlende Daten über den „Beginn der Maisblüte“ wurden aus Daten über den „Beginn Ährenschieben“ berechnet (Korrelation zwischen Ährenschieben und Maisblüte (n=8): $r_S = 0,970^{**}$ (Kalendertag) und $r_S = 0,994^{**}$ (TSUM)).

4.1.3.3 Windrichtung

Vollständige und abgesicherte Winddaten liegen nur für die Station Landsberg (DWD) vor. Die Station liegt jedoch ca. 20 km außerhalb des Untersuchungsgebietes. Laut Untersuchung der DWD-Zentrale in Offenbach liefert diese Station für das Untersuchungsgebiet repräsentative Winddaten. Diese Aussage wird durch Vergleiche mit den Winddaten aus dem Untersuchungsgebiet gestützt, die teilweise vorhanden sind, aber nicht entsprechend dem meteorologischen Messstandard erhoben wurden (siehe Kap. 3.4.2.1).

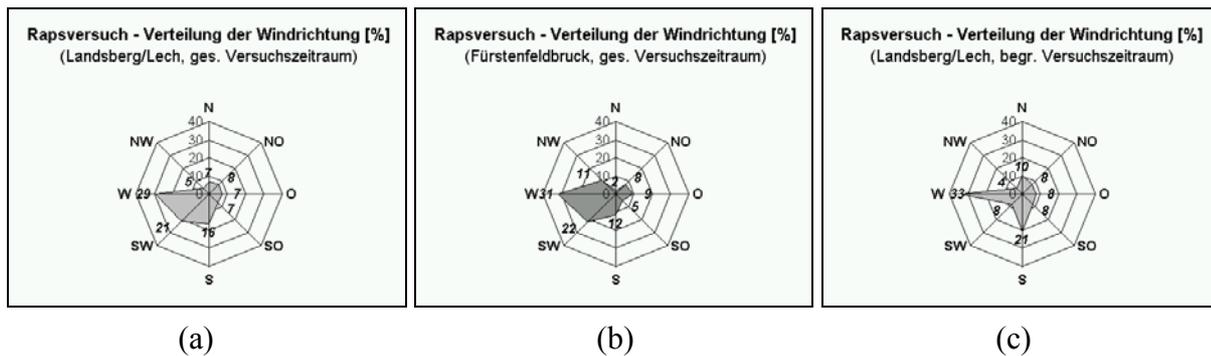


Abb. 4.7: Verteilung der Windrichtung (Rapsversuch): (a) DWD-Station Landsberg/Lech, (b) BW-Station Fürstenfeldbruck, (c) DWD-Station Landsberg/Lech (während Versuchszeitraum mit der höchsten Rapspollendeposition (87% der Gesamt-Rapspollen))

Vergleicht man die Windrichtungsdaten der DWD-Station (Abb. 4.7a und Abb. 4.8a) mit dem BW-Standort, zeigt sich, dass am BW-Standort sowohl beim Raps- (Abb. 4.7b) als auch beim Maisversuch (Abb. 4.8b) die Windrichtungen Süd und Nord unter- und die Windrichtung Nordwesten und Südwesten (nur Maisversuch) überrepräsentiert sind. Der Barriereeffekt umliegender Gebäude in Fürstenfeldbruck tritt bei vorherrschendem Westwind (Rapsversuch) weniger zu Tage als bei einer gleichmäßigen Windverteilung (Maisversuch). Ein signifikanter Unterschied zwischen der Häufigkeitsverteilung der Windrichtung in Landsberg (DWD) und in Fürstenfeldbruck (BW) konnte weder für den gesamten Versuchszeitraum von Raps bzw. Mais, noch während der wöchentlichen Zeiträume (Sigma-2-Probenexposition) nachgewiesen werden¹⁵⁹. Somit unterstützen die im Untersuchungsgebiet ermittelten Winddaten die Aussage des DWD, dass die weiter entfernt gelegene DWD-Station Landsberg repräsentative Daten (Windgeschwindigkeit und Windrichtung) für das Untersuchungsgebiet liefert und zu Recht als Referenzstation für das Untersuchungsgebiet dient.

¹⁵⁹ Wilcoxon-Test mit Monte-Carlo-Signifikanztest: 95%-Konfidenzintervall, 10.000 Stichprobentabellen

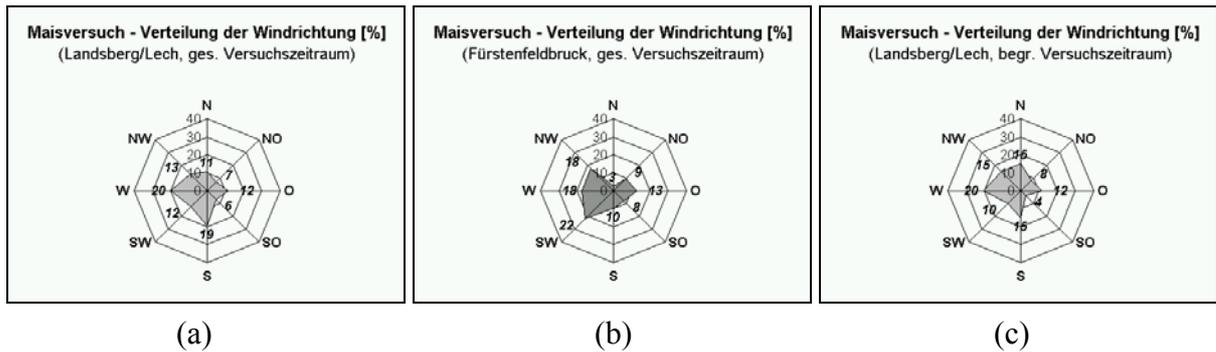


Abb. 4.8: Verteilung der Windrichtung (Maisversuch): (a) DWD-Station Landsberg/Lech, (b) BW-Station Fürstentfeldbruck, (c) DWD-Station Landsberg/Lech (während Versuchszeitraum mit der höchsten Maispollendeposition (92% der Gesamt-Maispollen))

Hinzuweisen ist auf eine Besonderheit während des Rapsversuchs: Betrachtet man ausschließlich den Zeitraum mit der höchsten Rapspollendeposition (17. + 18. Woche), verändert sich die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung (vergleiche Abb. 4.7a und Abb. 4.7c). Der Wind aus Südwesten nimmt stark ab und die Süd- und Westwinde zu. Eine vergleichbare Veränderung tritt beim Maisversuch (höchsten Maispollendeposition 27. + 28. Woche) nicht auf (vergleiche Abb. 4.8a und Abb. 4.8c).

4.1.3.4 Windgeschwindigkeit

Vergleicht man die Windgeschwindigkeiten an den Stationen innerhalb (LfL) und außerhalb (DWD) des Untersuchungsgebiets während des Raps- und Maisversuchs, zeigen sich große Gemeinsamkeiten (Abb. 4.9 und Abb. 4.10). Die höheren Windgeschwindigkeiten am DWD-Standort erklären sich durch den Aufbau der Messstationen. Der DWD misst die Windgeschwindigkeit 10 m über Grund, die LfL in 2,5 m.

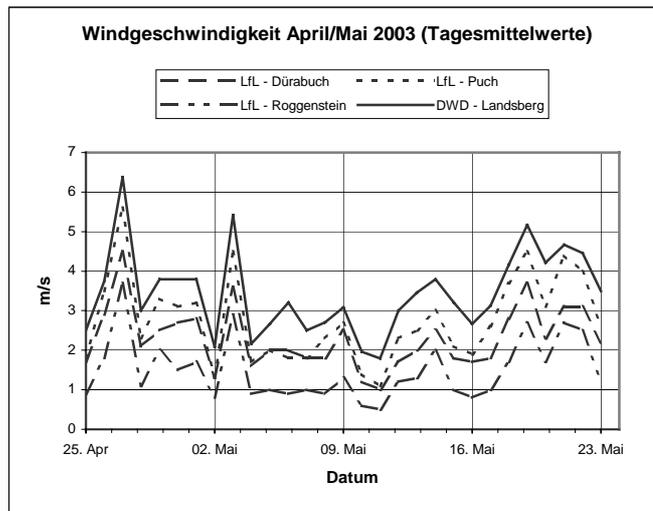


Abb. 4.9: Tagesmittel der Windgeschwindigkeit von Messstationen in und außerhalb des Untersuchungsgebietes während des Rapsversuchs (Unterteilung: Expositionsdauer Sigma-2-Sammler, 17.-20. Woche)

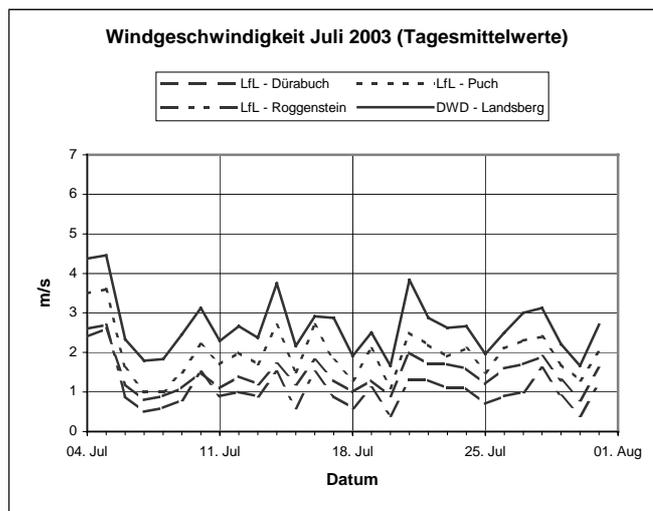


Abb. 4.10: Tagesmittel der Windgeschwindigkeit von Messstationen in und außerhalb des Untersuchungsgebietes während des Maisversuch (Unterteilung: Expositionsdauer Sigma-2-Sammler, 27.-30. Woche)

Die Ähnlichkeit der Kurvenverläufe schlagen sich statistisch in hohen Korrelationen (bis zu $r = 0,97$) nieder (siehe Tab. 4.14). Es fällt auf, dass die Windgeschwindigkeiten der DWD-Station besser mit den LfL-Stationen als der BW-Station korrelieren. Mit $r > 0,93$ werden beim Maisversuch hohe Korrelationen zwischen LfL- und DWD-Station erreicht (siehe auch Abb. 4.10), während die Korrelation mit der BW-Station auf Korrelationskoeffizienten zwi-

schen 0,79 – 0,82 absinkt. Als Ursache kommt die Barrierewirkung umliegender Gebäude in Fürstenfeldbruck in Frage.

Tab. 4.14: Korrelation der Tagesmittel der Windgeschwindigkeit von Messstationen in und außerhalb des Untersuchungsgebietes

Korrelationskoeffizient (r)	RAPS (n = 29)			MAIS (n = 28)		
	Dürabuch (Lfl 4)	Puch (Lfl 5)	FFB (BW)	Dürabuch (Lfl 4)	Puch (Lfl 5)	FFB (BW)
Landsberg (DWD)	0,960**	0,972**	0,932**	0,931**	0,948**	0,823**
Dürabuch (Lfl 4)	1	0,971**	0,919**	1	0,958**	0,810**
Puch (Lfl 5)	0,971**	1	0,951**	0,958**	1	0,788**

4.1.3.5 Temperatur, Feuchte, Niederschlag und Globalstrahlung

RAPSVERSUCH

Wie die Abb. 4.11 exemplarisch für die Lufttemperatur zeigt, verhalten sich die meteorologischen Messgrößen (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlag und Globalstrahlung) an allen vier Stationen im Untersuchungsgebiet sehr ähnlich. Die Tagesmittelwerte der einzelnen Parameter korrelieren zwischen allen vier Stationen signifikant (siehe Tab. 4.15). Abgesehen

Tab. 4.15: Korrelation der meteorologischen Tageswerte (Rapsversuch) von Messstationen im Untersuchungsgebiet (n = 29)

Korrelationskoeffizient r		Dürabuch (4)	Puch (5)	Roggenstein (6)
Lufttemperatur	FFB, BW	0,995**	0,993**	0,997**
	Dürabuch (4)	1	0,997**	0,996**
	Puch (5)	0,997**	1	0,993**
Luftfeuchte	FFB, BW	0,968**	0,969**	0,990**
	Dürabuch (4)	1	0,989**	0,982**
	Puch (5)	0,989**	1	0,976**
Globalstrahlung	Dürabuch (4)	1	0,987**	0,989**
	Puch (5)	0,987**	1	0,990**
Rangkorrelationskoeffizient r _s		Dürabuch (4)	Puch (5)	Roggenstein (6)
Niederschlag	FFB, BW	0,840**	0,962**	0,879**
	Dürabuch (4)	1	0,876**	0,787**
	Puch (5)	0,876**	1	0,913**

vom Niederschlag treten Korrelationskoeffizienten $r > 0,97$ auf. Über die Zeitdauer eines Tages oder die Expositionsdauer der Pollensammler betrachtet, sind die Unterschiede zwischen

den Stationen, die 4,3 bis 11,7 km auseinander liegen, sehr gering (regionale Variabilität der Messwerte gering). Viel deutlicher treten die Schwankungen über die Zeit hervor (zeitliche Variabilität der Messwerte hoch).

Die meteorologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet können räumlich als homogen angenommen werden, da vier Messstationen, die sich in unterschiedlichen Naturräumen und Höhenlagen befinden (siehe Tab. 3.7), über den Versuchszeitraum miteinander hoch korrelierte Messwerte geliefert haben.

MAISVERSUCH

Wie die Tab. 4.16 und die Abb. 4.12 – exemplarisch für die Lufttemperatur – zeigen, verhalten sich die meteorologischen Messgrößen (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlag und Globalstrahlung) an allen vier Stationen im Untersuchungsgebiet sehr ähnlich. Die Tagesmittelwerte der einzelnen Parameter korrelieren zwischen allen vier Stationen signifikant (siehe Tab. 4.16). Abgesehen vom Niederschlag treten Korrelationskoeffizienten $r > 0,95$ auf. Über die Zeitdauer eines Tages oder die Expositionsdauer der Pollensammler betrachtet sind die Unterschiede zwischen den Stationen, die 4,3 bis 11,7 km auseinander liegen, sehr gering (regionale Variabilität der Messwerte gering). Viel deutlicher treten die Schwankungen über die Zeit hervor (zeitliche Variabilität der Messwerte hoch). Die meteorologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet können räumlich als homogen angenommen werden, da vier Messstationen, die sich in unterschiedlichen Naturräumen und Höhenlagen befinden (siehe Tab. 3.7), über den Versuchszeitraum miteinander hoch korrelierte Messwerte geliefert haben.

Tab. 4.16: Korrelation der meteorologischen Tageswerte (Maisversuch) von Messstationen im Untersuchungsgebiet ($n = 28$)

Korrelationskoeffizient r		Dürabuch (4)	Puch (5)	Roggenstein (6)
Lufttemperatur	FFB, BW	0,991**	0,995**	0,994**
	Dürabuch (4)	1	0,995**	0,986**
	Puch (5)	0,995**	1	0,991**
Luftfeuchte	FFB, BW	0,960**	0,950**	0,979**
	Dürabuch (4)	1	0,988**	0,971**
	Puch (5)	0,988**	1	0,959**
Globalstrahlung	Dürabuch (4)	1	0,963**	0,951**
	Puch (5)	0,963**	1	0,983**
Rangkorrelationskoeffizient r_s		Dürabuch (4)	Puch (5)	Roggenstein (6)
Niederschlag	FFB, BW	0,894**	0,939**	0,850**
	Dürabuch (4)	1	0,957**	0,851**
	Puch (5)	0,957**	1	0,901**

4.1.3.6 Bewertung der Witterungsbedingungen für den Pollenflug

RAPSVERSUCH

Die Abb. 4.11 zeigt den Verlauf der Lufttemperatur im Tagesmittel in den vier Wochen des Rapsversuchs. Die starken Schwankungen dieser und weiterer meteorologischer Messgrößen zeigen die sehr unterschiedlichen Witterungsbedingungen während des Versuchszeitraums an.

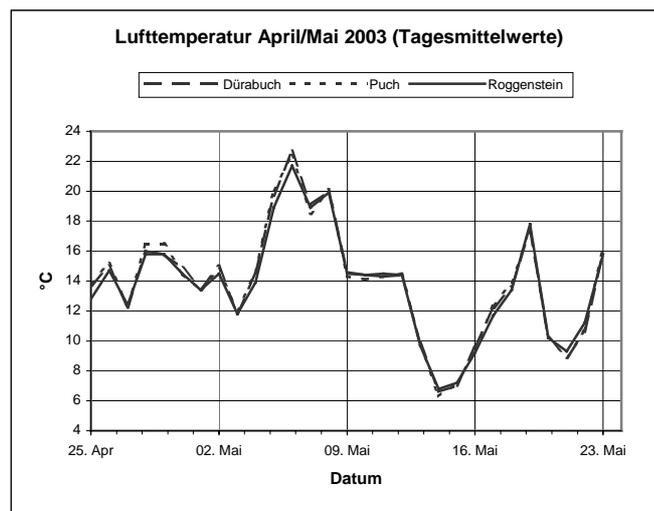


Abb. 4.11: Tagesmittel der Lufttemperatur von Messstationen im Untersuchungsgebiet während des Rapsversuchs

(Unterteilung Abszisse: 7-tägige Expositionsdauer Sigma-2-Sammler, 17.-20. Woche)

Im Folgenden werden für jeden der vier Probenahme-Zeiträume des Sigma-2-Sammlers die meteorologischen Messgrößen einzeln bewertet und zu einer Gesamtbewertung der Pollenflugverhältnisse zusammengeführt (Methode siehe Kap. 3.5.5, Ergebnis siehe Tab. 4.17):

- 17. Woche: SEHR GUTE Bedingungen für Pollenflug,
- 18. Woche: GUTE Bedingungen für Pollenflug,
- 19. Woche: SEHR SCHLECHTE Bedingungen für Pollenflug und
- 20. Woche: SCHLECHTE Bedingungen für Pollenflug.

Tab. 4.17: Bewertung der Witterungsbedingungen für den Pollenflug (Rapsversuch)

Woche	Temperatur ¹⁶⁰	Luftfeuchte	Niederschlag	Globalstrahlung	Windgeschwindigkeit	Gesamtbewertung ¹⁶¹
17.	+	+	+	o	+	++
18.	+	+	-	+	o	+
19.	-	-	-	-	-	--
20.	-	-	-	o	+	-

MAISVERSUCH

Die Abb. 4.12 zeigt den Verlauf der Lufttemperatur im Tagesmittel in den vier Wochen des Maisversuchs. Die Schwankungen dieser und weiterer meteorologischer Messgrößen haben zu leicht unterschiedlichen Witterungsbedingungen während des Versuchszeitraums geführt.

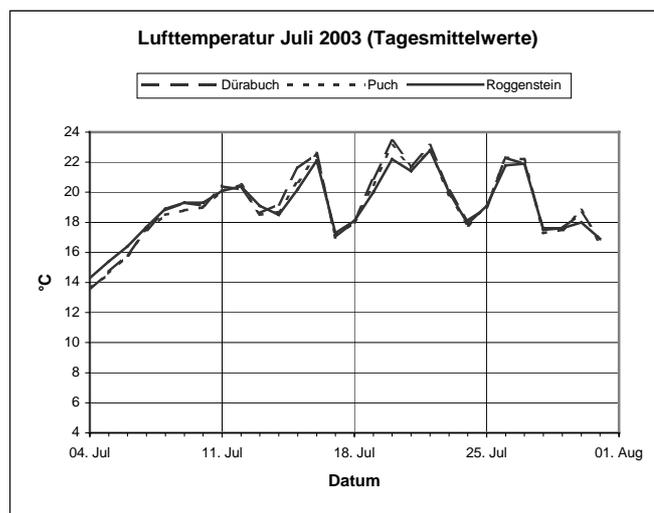


Abb. 4.12: Tagesmittel der Lufttemperatur von Messstationen im Untersuchungsgebiet während des Maisversuchs

Unterteilung Abszisse: 7-tägige Expositionsdauer Sigma-2-Sammler, 27.-30. Woche

Im Folgenden werden für jeden der vier Probenahme-Zeiträume des Sigma-2-Sammlers die meteorologischen Messgrößen einzeln bewertet und zu einer Gesamtbewertung der Pollenflugverhältnisse zusammengeführt (Methode siehe Kap. 3.5.5, Ergebnis siehe Tab. 4.18):

27. Woche: GUTE Bedingungen für Pollenflug,

28. Woche: MITTLERE Bedingungen für Pollenflug,

¹⁶⁰ Einzelbewertung meteorologische Messgröße: + (Wert: 1), o (3) und - (5)

¹⁶¹ Gesamtbewertung: ++ (Wertebereich: 1,0-1,4), + (1,5-2,4), o (2,5-3,4), - (3,5-4,4) und -- (4,5-5,0)

29. Woche: MITTLERE Bedingungen für Pollenflug und

30. Woche: SCHLECHTE Bedingungen für Pollenflug.

Tab. 4.18: Bewertung der Witterungsbedingungen für den Pollenflug (Maisversuch)

Woche	Temperatur ¹⁶²	Luftfeuchte	Niederschlag	Globalstrahlung	Windgeschwindigkeit	Gesamtbewertung ¹⁶³
27.	o	o	+	+	o	+
28.	o	o	-	o	o	o
29.	+	o	-	o	o	o
30.	o	o	-	-	o	-

4.1.4 Analyse der Pollenproben

4.1.4.1 Bildanalyse der Sigma-2-Proben

4.1.4.1.1 Qualitative Analyse

Mit der halbautomatischen Bildanalyse der Sigma-2-Pollenproben wurden beim Rapsversuch sechs Klassen unterschieden: Raps (*Brassica*), Tanne/Fichte (*Abies/Picea*), Kiefer (*Pinus*), Varia Pollen (v.a. Birke, Eiche, Buche und Süßgräser), Pollenagglomerate und keine Pollen.

Ebenfalls sechs Klassen wurden beim Maisversuch bestimmt: Mais (*Zea mays*), Brennnessel (*Urtica*), Süßgräser (Poaceae), Varia Pollen, Pollenagglomerate und keine Pollen.

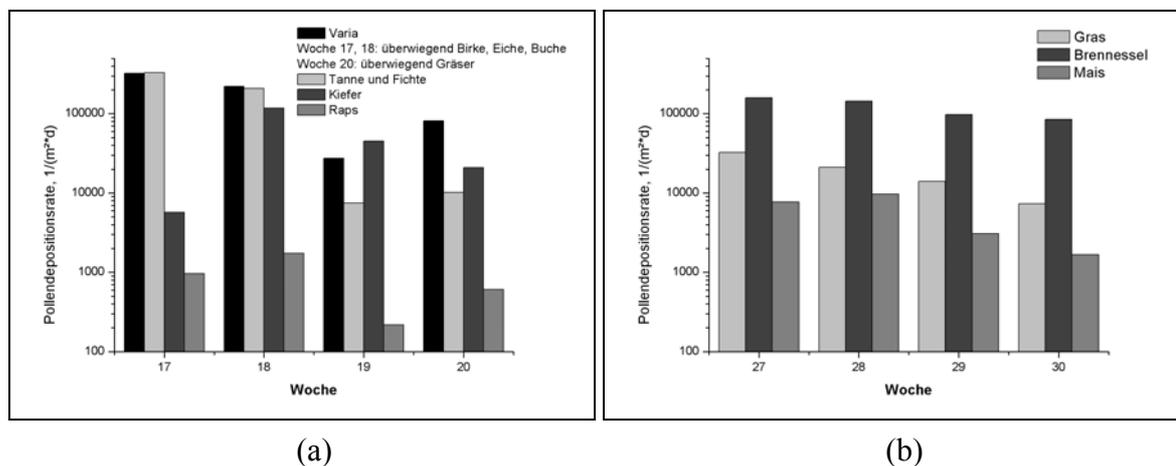


Abb. 4.13: Sigma-2: Mittlere Pollendepositionsraten für verschiedene Pollenspezies während der Blühphase (a) des Raps 2003, (b) des Mais 2003

¹⁶² Einzelbewertung meteorologische Messgröße: + (Wert: 1), o (3) und - (5)

¹⁶³ Gesamtbewertung: ++ (Wertebereich: 1,0-1,4), + (1,5-2,4), o (2,5-3,4), - (3,5-4,4) und - - (4,5-5,0)

4.1.4.1.2 Quantitative Analyse

In 20 der 198 Sigma-2-Proben (10,1%) wurden Rapspollen gefunden (>NWG, siehe Kap. 3.3.1.1) und in 52 von 199 (26,1%) Sigma-2-Proben Maispollen (>NWG). Die Raps- bzw. Maispollenanzahl bewegte sich im Mittel bei 127 bzw. 170 Pollen/Probe (siehe Tab. 4.23). Der Anteil der Raps- bzw. Maispollen an den Gesamtpollen betrug im Durchschnitt (Median) 0,6% (maximal 3,8%) bzw. 4,0% (maximal 52,2%).

Die quantitative Auswertung zeigt, dass während des Rapsversuchs der Großteil der Pollen auf die Klassen Varia Pollen (36%), Tanne/Fichte (*Picea*, 32%) und Kiefer (*Pinus*, 11%) entfällt. Beim Maisversuch dominiert mit 49% die Klasse Brennessel (daneben noch Varia Pollen mit 17% und Süßgräser (Poaceae) mit 13%).

4.1.4.2 Bildanalyse der PMF-Proben

4.1.4.2.1 Qualitative Analyse

Das mit dem PMF erfasste Pollenspektrum umfasst beim Rapsversuch 34 Spezies¹⁶⁴ (9 Spezies nur an einem Standort vorkommend) und beim Maisversuch 50 Spezies¹⁶⁵ (16 Spezies nur an einem Standort vorkommend). Durchschnittlich wurden an den Rapsstandorten 11 Spezies und an den Maisstandorten 10 Spezies nachgewiesen.

4.1.4.2.2 Quantitative Analyse

In 44 der 50 PMF-Proben (88%) wurden Rapspollen gefunden und in allen auswertbaren PMF-Proben (49, Verlust einer Probe) Maispollen. Die Raps- bzw. Maispollenanzahl der PMF-Proben in 2003 bewegte sich im Mittel bei 3.200 bzw. 5.400 Pollen/Probe. Der Anteil der Raps- bzw. Maispollen an den Gesamtpollen betrug im Durchschnitt 1,1% (maximal 6,2%) bzw. 27,8% (maximal 88,1%). Die Tab. 4.19 zeigt, dass die Anzahl der Gesamtpollen im Frühjahr (Rapsversuch) ungefähr zehnmal so hoch lag wie im Sommer (Maisversuch). In den PMF-Proben steigt mit der Anzahl der Zielpollen auch der Anteil der Zielpollen an den Gesamtpollen an (Abb. 4.16 und Abb. 4.17). Dieser Anstieg ist bei den Rapsproben gering, bei den Maisproben stark ausgeprägt.

Die quantitative Auswertung zeigt, dass während des Rapsversuchs mit 60% die Fichtenpollen (*Picea*) dominieren (daneben noch Kiefer (*Pinus*) mit 10% und Buche (*Fagus*) mit 5%). Während des Maisversuchs hingegen treten mit 34% die Süßgräserpollen (Poaceae) und der Mais (28%) am häufigsten auf.

¹⁶⁴ Am häufigsten (Nachweise an mehr als 40 Standorten) traten folgende Familien / Gattungen auf: *Betula* (50 Standorte), Poaceae (50), *Fagus* (49), *Picea* (49), *Pinus* (48), *Quercus* (47), *Salix* (45) und *Brassica* (44).

¹⁶⁵ Am häufigsten (Nachweise an mehr als 40 Standorten) traten folgende Familien / Gattungen auf: *Zea* (49 Standorte), *Picea* (48), Poaceae (48), Chenopodiaceae (45), *Pinus* (43) und Urticaceae (41).

Tab. 4.19: PMF: Anzahl der Raps-/Maispollen und Gesamtpollen

Quantitative Analyse PMF	RAPS (Pollen / Probe), n = 44			Mais (Pollen / Probe), n = 49		
	Minimum	Median	Maximum	Minimum	Median	Maximum
Zielpollen (Raps bzw. Mais), in Tsd.	0,2	3,2	33,8	1,1	5,4	99,8
Gesamtpollen, in Tsd.	310,0	910,9	2.899,6	15,2	41,8	354,0

4.1.5 Räumliche und zeitliche Verteilung der Nachweise von Raps- und Maispollen

Aus dem Raps-Feldversuch konnten 198 Proben mit dem Sigma-2-Sammler und 50 Proben mit dem PMF erstellt und ausgewertet werden. Der Mais-Feldversuch lieferte 199 Proben (Sigma-2) bzw. 49 Proben (PMF). Insgesamt konnten drei Sigma-2-Proben und eine PMF-Probe wegen Zerstörung oder Probleme bei der Analyse nicht ausgewertet werden (siehe Tab. 4.20).

Nur auf 10% (Rapsversuch) bzw. 26% (Maisversuch) der Sigma-2 Proben konnten die Zielpollen mit ausreichender Sicherheit (siehe Kap. 3.3.1.1) nachgewiesen werden. Besser sehen die Ergebnisse beim PMF aus: 88% bzw. 100% der Proben enthielten Raps- bzw. Maispollen.

Tab. 4.20: Nachweis von Raps- und Maispollen in den Proben der Pollensammler Sigma-2 und PMF

Kulturart	RAPS		MAIS	
	Sigma-2 (n = 198)	PMF (n = 50)	Sigma-2 (n = 199)	PMF (n = 49)
Pollennachweis	20	44	52	49
NWG ¹⁶⁶ unterschritten	178	6	147	-

Die räumliche Verteilung der Pollennachweise zeigt, dass sich die 20 positiven Rapspollenproben (Sigma-2) auf 15 Standorten verteilen (siehe Karte 3 im Anhang). Fünf der 15 Standorte wiesen sogar zwei positive (von jeweils vier) Sigma-2-Proben auf. An 13 dieser 15 Standorte wurden mit dem PMF ebenfalls Rapspollen identifiziert. Das heißt an 2 Standorten wurden ausschließlich mit dem Sigma-2 und an 31 Standorten ausschließlich mit dem PMF Rapspollen nachgewiesen. In Karte 4 im Anhang ist die räumliche Verteilung der Maispollen-Nachweise dargestellt. An 26 Standorten wurden Maispollen mit dem Sigma-2 nachgewiesen (ein Nachweis an 10 Standorten, zwei Nachweise an 7 Standorten, drei Nachweise an 8 Standorten und vier Nachweise an einem Standort). Mit dem Pollensammler PMF wurden an jedem

¹⁶⁶ Zur Definition der Nachweisgrenze (NWG) siehe Kap. 3.3.1.1.

Sammlerstandort Maispollen gefunden, folglich wurden an 24 Standorten ausschließlich mit dem PMF Maispollen nachgewiesen.

Die zeitliche Verteilung der Deposition der Zielpollen, die mit dem Sigma-2 ermittelt wurden, ähnelt einer Optimumkurve. Die maximale Deposition lag sowohl beim Raps als auch beim Mais in der 2. Woche des jeweiligen Versuchszeitraums (siehe Tab. 4.21 und Tab. 4.22). Der Anteil der Zielpollen an den Gesamtpollen betrug in diesem Expositionszeitraum 0,2% (Raps) bzw. 3,5% (Mais). Beim Mais wurde bereits in der ersten Woche eine Maispollendeposition verzeichnet, die dem Maximum nahe kommt¹⁶⁷. Nach dem Maximum geht die Maispollendeposition deutlich zurück. Beim Raps folgte auf das Maximum ein totaler Einbruch (Starkregen an drei Tagen), in der letzten Woche ist noch mal eine deutliche Deposition von Rapspollen feststellbar (höchster Anteil der Raps- an den Gesamtpollen). Die Deposition der Gesamtpollen unterscheidet sich von der Deposition der Zielpollen dahingehend, dass die Anzahl aller Pollen sowohl bei Raps (Ausnahme: 20. Woche) als auch Mais über den Versuchszeitraum kontinuierlich abnimmt. In der Anzahl der Gesamtpollen spiegeln sich somit die in Kap. 4.1.3.6 aus den meteorologischen Daten abgeleiteten Flugbedingungen für Pollen wider.

Tab. 4.21: Wöchentliche Deposition (Pollen/200 mm²) an Raps- und Gesamtpollen (Sigma-2)

	17. Woche	18. Woche	19. Woche	20. Woche
Anzahl Sammlerstandorte mit Rapspollen-nachweis	5	12	0	3
Summe Rapspollen	36	96	0	20
Summe Gesamtpollen	62.443	55.213	8.115	10.701
Anteil Raps- an Gesamtpollen (%)	0,06	0,17	0	0,19

Tab. 4.22: Wöchentliche Deposition (Pollen/324 mm²) an Mais- und Gesamtpollen (Sigma-2)

	27. Woche	28. Woche	29. Woche	30. Woche
Anzahl Sammlerstandorte mit Maispollen-nachweis	14	24	13	1
Summe Maispollen	954	992	164	5
Summe Gesamtpollen	31.062	28.230	19.082	14.847
Anteil Mais- an Gesamtpollen (%)	3,07	3,51	0,86	0,03

¹⁶⁷ Aufgrund der klimatischen Verhältnisse im Jahr 2003 begann die Blüte des Mais ungefähr 18 Tage früher als normal (siehe Kap. 4.1.3.2).

4.1.6 Vergleich der Pollensammler Sigma-2 und PMF

Wie Tab. 4.23 verdeutlicht, variiert die absolute Anzahl an detektierten Zielpollen je nach Sammlertyp und Kulturpflanze erheblich. Grundsätzlich liegt die Sammelleistung des PMF – wie erwartet und beabsichtigt – deutlich (ein bis zwei Zehnerpotenzen) über der des Sigma-2. Im Verhältnis zeigen die Sammlertypen jedoch Übereinstimmungen bei der Sammelleistung von Raps- und Maispollen. Sigma-2 und PMF sammeln doppelt bis zehnmal so viele Maispollen wie Rapspollen.

Tab. 4.23: Sammelleistung von Sigma-2 und PMF (alle Proben >NWG) hinsichtlich Raps- und Maispollen

Kulturart	RAPS				MAIS			
	Sigma-2 (n = 20)		PMF (n = 44)		Sigma-2 (n = 52)		PMF (n = 49)	
Pollensammler-Typ	Pollen / 200 mm ²	Pollen / Probe ¹⁶⁸	Pollen / 20 µl	Pollen / Probe ¹⁶⁹	Pollen / 324 mm ²	Pollen / Probe	Pollen / 50 µl	Pollen / Probe
10%-Perzentil	4	85	4	800	4	52	21	1.712
33%-Perzentil	5	106	10	2.076	8	104	52	4.150
Median	6	127	16	3.200	13	170	68	5.440
67%-Perzentil	8	169	25	4.962	33	430	122	9.795
90%-Perzentil	11	232	105	20.960	122	1.591	610	48.832

Tab. 4.24: Korrelation von Sigma-2 (Deposition) mit PMF (Anzahl/Probe)

Korrelation der Sammelleistung von Sigma-2 mit PMF	Probenumfang (n)	Spearman-Rangkorrelationskoeffizient (r _s)
RAPSVERSUCH		
Rapspollen	13	0,586*
Kieferpollen	50	0,074 (n.s.)
Gesamtpollen	50	0,053 (n.s.)
MAISVERSUCH		
Maispollen	25	0,862**
Gräserpollen	49	0,564**
Gesamtpollen	49	0,399**

Der direkte Vergleich von PMF und Sigma-2 bezüglich der Sammelmenge einzelner Pollenarten an den 50 Standorten offenbart, dass die beiden Sammlertypen nicht für jede Pollenart ähnliche Ergebnisse liefern. Die Tab. 4.24 zeigt die Korrelation zwischen Sigma-2 und PMF

¹⁶⁸ Gesamtfläche der Probe: 4225 mm² (65 x 65 mm)

¹⁶⁹ Gesamtvolumen der Probe 4 ml

bezogen auf die Zielpollen, die erfassten Nicht-Zielpollen und die Gesamtpollen. Beim Raps- und Maisversuch wird die höchste Korrelation zwischen Sigma-2 und PMF mit dem jeweiligen Zielpollen erreicht: $r_s = 0,586^*$ (Rapspollen) und $r_s = 0,862^{**}$ (Maispollen). Die Abb. 4.14 und Abb. 4.15 zeigen die geringe Abhängigkeit zwischen Sigma-2 und PMF beim Rapspollen und die hohe Abhängigkeit beim Maispollen. Der Korrelation der Nichtzielpollenart und der Gesamtpollen ist deutlich niedriger und zudem beim Rapsversuch nicht signifikant.

4.1.7 PCR-Analyse der PMF-Proben

Der Nachweis artspezifischer DNA von Raps und Mais in den PMF-Proben konnte nicht reproduzierbar geführt werden. Nur in 5 von 44 Raps- und in 5 von 49 Maisproben wurde die entsprechende DNA der Zielpollen identifiziert. Ein qualitativer und quantitativer Nachweis transgener Raps- und Maispollen gelang nicht (Beismann & Kuhlmann 2006: 79-92).

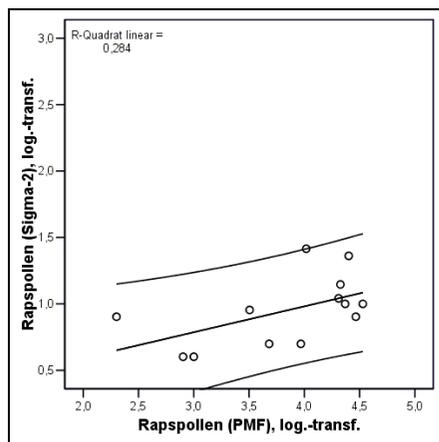


Abb. 4.14: Korrelation der Rapspollenanzahl von Sigma-2 mit PMF (95%-Konfidenzintervall; $n = 13$)

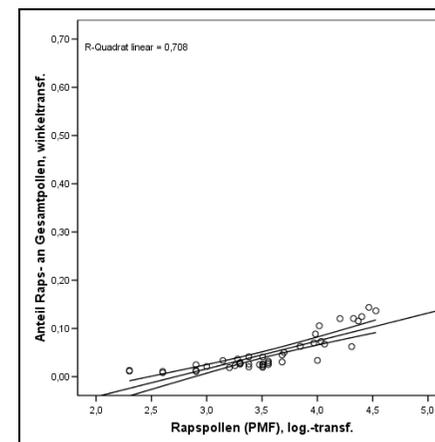


Abb. 4.16: PMF: Korrelation der Rapspollenanzahl mit dem Anteil an den Gesamtpollen (95%-Konfidenzintervall; $n = 44$)

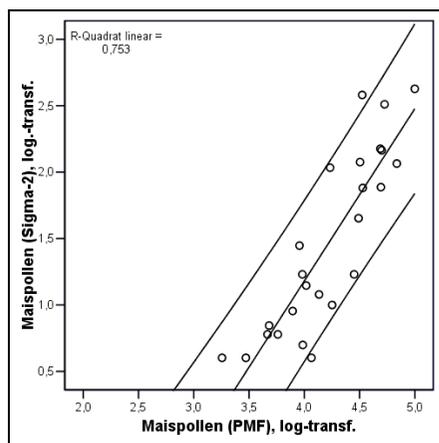


Abb. 4.15: Korrelation der Maispollenanzahl von Sigma-2 mit PMF (95%-Konfidenzintervall; $n = 25$)

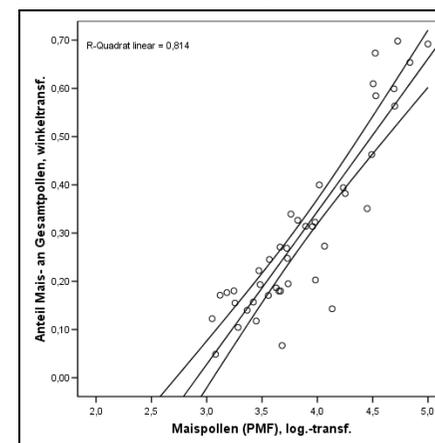


Abb. 4.17: PMF: Korrelation der Maispollenanzahl mit dem Anteil an den Gesamtpollen (95%-Konfidenzintervall; $n = 49$)

4.2 Räumliche Analysen zur Pollendeposition (mikroskalig¹⁷⁰)

4.2.1 Abstand zwischen Pollensammler und nächstem Feld

Der Abstandsanalyse zwischen Pollensammler und nächstem Feld liegt die Annahme zugrunde, dass die Pollendeposition ab dem Feldrand mit steigender Entfernung abnimmt.

Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Abbildungen ist in Tab. 4.25 die durchschnittliche Entfernung der Pollensammler zum jeweils nächsten Feld angegeben. Unterschieden wird hierbei zwischen allen Raps- und Mais-Sammlerstandorten ($n = 50$) sowie den Standorten mit positivem Nachweis (siehe Kap. 3.3.1) von Zielpollen ($n < 50$).

Tab. 4.25: Entfernung der Pollensammler-Standorte zum nächsten Raps- bzw. Maisfeld

Kulturart	RAPS			MAIS		
	Sigma-2 (n = 15)	PMF (n = 44)	Alle Standorte (n = 50)	Sigma-2 (n = 26)	PMF (n = 49)	Alle Standorte (n = 50)
Minimum (m)	1	1	1	0	0	0
25%-Quartil (m)	80	88	120	2	4	4
Median (m)	133	220	256	5	50	55
75%-Quartil (m)	258	453	465	55	145	141
Maximum (m)	475	1510	1510	170	1190	1190

Grundsätzlich standen die Maispollensammler näher an den Feldern als die Rapspollensammler. Vergleicht man die 50 Sammlerstandorte von Raps- und Maisversuch, ist der Abstand zum nächsten Maisfeld im Durchschnitt um den Faktor fünf geringer als zum nächsten Rapsfeld (256 m zu 55 m). Da die Nachweise von Zielpollen eher an feldnahen als an feldfernen Standorten erreicht wurden, verschiebt sich die Verteilung für die Sigma-2- und PMF-Standorte (mit Pollennachweis) in Richtung des Feldrandes. Da mit dem PMF an fast allen Standorten Raps- und Maispollen gefunden wurden, fallen die Veränderungen gegenüber der Gesamtzahl der Standorte nicht so stark aus. Anders die Situation beim Sigma-2: Beim Rapsversuch halbiert sich die durchschnittliche Entfernung zwischen Sammler und Feld (256 m auf 133 m), beim Maisversuch kommt es zu einer Reduzierung um den Faktor elf (55 m auf 5 m).

¹⁷⁰ Untersuchungen im Umfeld der Pollensammlerstandorte (Radius ~1km)

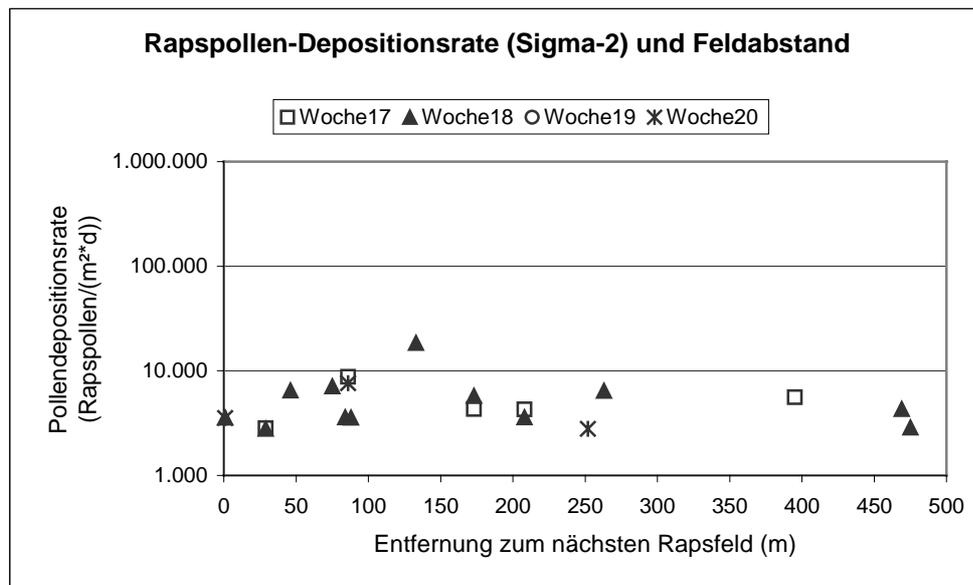


Abb. 4.18: Rapspollendepositionsrates (Sigma-2) in Abhängigkeit vom nächsten Rapsfeld und vom Zeitpunkt (Standorte = 15, Probenanzahl = 20)

Die Abb. 4.18 und Abb. 4.19 zeigen im Vergleich, dass höhere Depositionsrates beim Maisversuch (maximal 117.500 Maispollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) als beim Rapsversuch (max. 18.500 Rapspollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) auftraten. Abgesehen vom Maximalwert bewegt sich die Pollendepositionsrates beim Raps unter 10.000 Rapspollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Median: 4.300 Rapspollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Die Depositionsrates nehmen nicht mit steigender Entfernung zum nächsten Feld ab. In 475 m Entfernung werden die gleichen Werte wie bei 0 m Entfernung zum Feldrand gemessen. Die Rapspollendeposition kann demzufolge als niedrig, aber räumlich gleichmäßig verteilt und als scheinbar unabhängig von der Entfernung zur Pollenquelle beschrieben werden. Hohe Depositionsrates (>20.000 Maispollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) treten beim Maisversuch nur bei Feldabständen <50 m auf. In größeren Entfernungen liegt die Depositionsrates wie beim Raps unter 10.000 Pollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Median: 5.700 Maispollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Standorte mit positivem Maispollennachweis und einem Abstand >170 m treten nicht auf. Die Maispollendeposition lässt sich somit charakterisieren als sehr stark in unmittelbarer Nähe zur Quelle, jedoch mit rascher Abnahme bei zunehmender Entfernung.

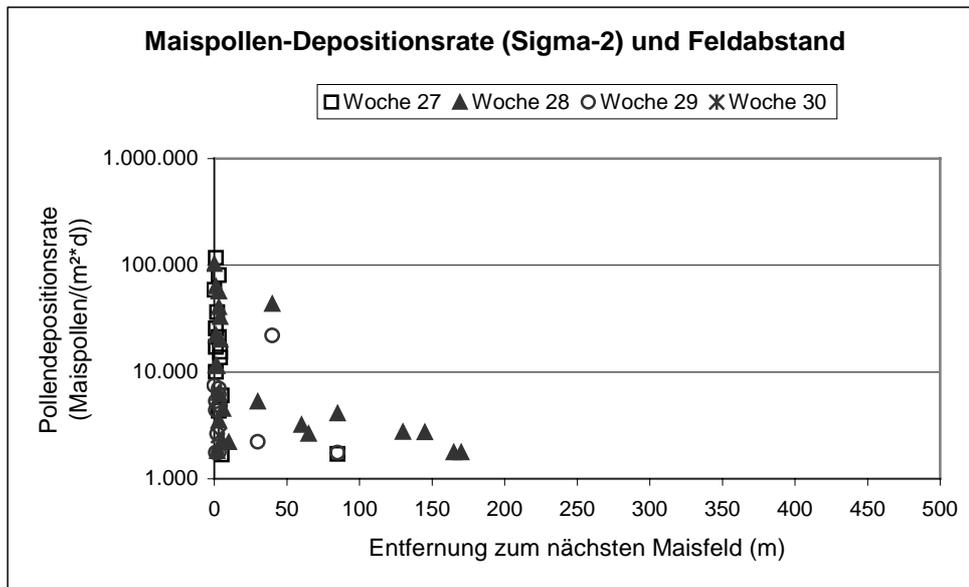


Abb. 4.19: Maispollendepositionsrates (Sigma-2) in Abhängigkeit vom nächsten Maisfeld und vom Zeitpunkt (Standorte = 26, Probenanzahl = 52)

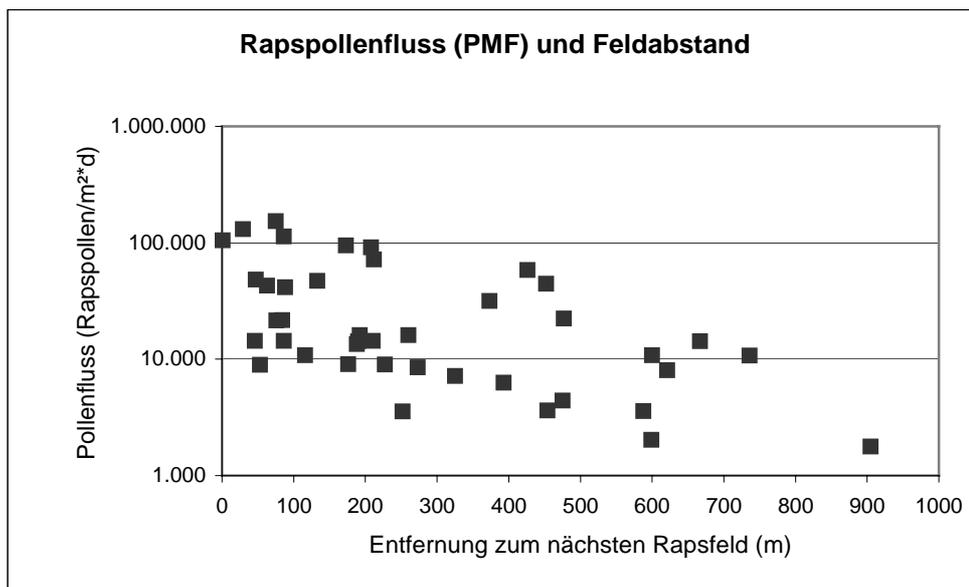


Abb. 4.20: Rapspollenfluss (PMF) in Abhängigkeit vom nächsten Rapsfeld (n=44)

Die Beschreibung der Pollendepositionsrates für Raps und Mais, die mit dem Sigma-2-Sammler ermittelt wurden, treffen in ähnlicher Form auch für den Pollenfluss (horizontaler Pollentransport) zu, der durch den PMF gemessen wurde. Die Abb. 4.20 und Abb. 4.21 zeigen im Vergleich zur Pollendepositionsrates (siehe Abb. 4.18 und Abb. 4.19), dass höhere Werte (hier Pollenfluss) wiederum beim Maisversuch (max. 460.500 Maispollen $m^{-2} d^{-1}$, Me-

dian: 25.200 Maispollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) als beim Rapsversuch (max. 152.900 Rapspollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$, Median: 14.300 Rapspollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) auftraten. Im Gegensatz zur Pollendeposition (Sigma-2) nimmt der Pollenfluss (PMF) beim Raps mit zunehmender Entfernung zum Feld ab, wenn auch deutlich geringer als beim Mais. Werte ausschließlich <50.000 Pollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ liegen beim Raps ab einer Entfernung von ~ 450 m vor, beim Mais bereits ab ~ 175 m. An den beiden Standorten, die am weitesten von einem Raps- oder Maisfeld entfernt waren (900 m bzw. 624 m), wurde ein Pollenfluss von 1.800 Rapspollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ bzw. 5.200 Maispollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ festgestellt¹⁷¹.

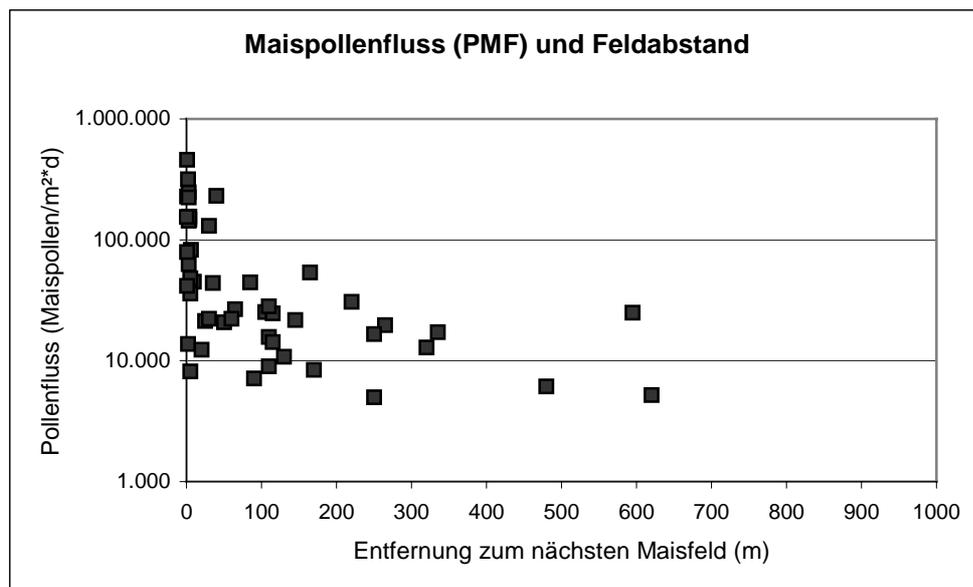


Abb. 4.21: Maispollenfluss (PMF) in Abhängigkeit vom nächsten Maisfeld ($n=49$)

Die Pollenanzahl an den Standorten korreliert signifikant (Rangkorrelation nach Spearman) mit der Entfernung zum nächsten Raps- bzw. Maisfeld (einzige Ausnahme die Sigma-2-Rapssammler). Die Korrelationskoeffizienten bewegen sich auf einem mittleren Niveau.

Tab. 4.26: Korrelation der Pollenanzahl von Sigma-2 und PMF mit der Entfernung zum nächsten Raps- bzw. Maisfeld

Kulturart	RAPS		MAIS	
	Sigma-2 (n = 15)	PMF (n = 44)	Sigma-2 (n = 26)	PMF (n = 49)
Spearman Rangkorrelationskoeffizient r_s	-0,344 (n.s.)	-0,552***	-0,655***	-0,687***

¹⁷¹ An den zwei Standorten, die die größte Distanz zum nächsten Raps- bzw. Maisfeld aufwiesen (1510 m bzw. 1190 m) wurden Raps- und Maispollen mit dem PMF nachgewiesen (16.100 Rapspollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ bzw. 5.500 Maispollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Zur Absicherung dieser Entfernungsangaben war eine Überprüfung der Felderkartierung mittels Fernerkundung geplant (siehe Kap. 3.5.6.2), die jedoch nicht erfolgreich durchgeführt werden konnte (siehe Kap. 4.1.2.2).

4.2.2 Flächengröße und Lage der Felder im Umkreis der Pollensammler

Der Pollendepositionsindex PDI (siehe Kap. 3.6.2) kann unter anderem dafür verwendet werden, die räumliche Anordnung der Raps- und Maisfelder in der Umgebung der Pollensammler zu beschreiben. Die Umgebung der Sammler wurde bis zu einer Entfernung von 1 km durch eine Abfolge von 10 konzentrischen Kreisen um die Sammler erfasst. Das Ergebnis der PDI-Berechnung nach Formel 1 (siehe Kap. 3.6.2, S. 60) zeigt, dass die Fläche der umgebenden Raps- bzw. Maisfelder (Mittelwert) mit größerer Entfernung zum Sammler gleichmäßig ansteigt (siehe Abb. 4.22). Die Spannweite der Werte wächst im Vergleich zum Mittelwert schrittweise jedoch stärker an, besonders bei den Maisfeldern. Trotzdem treten keine abrupten Sprünge bei der Betrachtung der nächstgrößeren Kreisfläche auf. Es tritt nicht der Fall auf, dass in einer bestimmten Entfernung die Fläche umliegender Felder extrem stark zunimmt oder stagniert. Der Vergleich der beiden Box-Plots zeigt, dass die Fläche der Maisfelder in der Umgebung der Pollensammler generell höher ist als beim Raps (vgl. Kennwerte in Abb. 4.22: Maximum, Median, Quartile). Je nach Kreisradius besteht im Mittel zwischen 0 bis 5% der Kreisfläche aus Rapsfeldern und 9-13% der Kreisfläche aus Maisfeldern. Im Extremfall kann der Anteil der Rapsfelder 17-46% und der Anteil der Maisfelder 29-73% betragen.

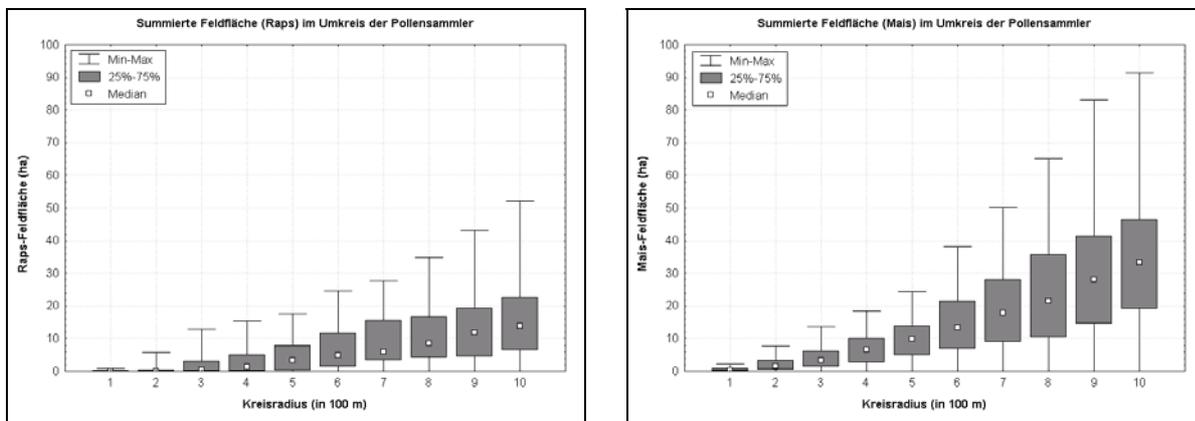


Abb. 4.22: Summierte Fläche der Raps- und Maisfelder im Umkreis der Pollensammlerstandorte

Untersucht man die Lage der Felder, die sich im Umkreis der Pollensammler befinden, bezüglich der Himmelsrichtung (vom Pollensammler aus gesehen), zeichnen sich in der näheren Umgebung der Rapspollensammler deutliche Unterschiede zwischen den Himmelsrichtungen ab, die sich mit steigender Entfernung nivellieren. Liegen im 100m-Nachbarschaftsraum noch fast 55% der Rapsfelder im S und SW, sind es im 200m-Nachbarschaftsraum nur noch 37% und in Umkreis von 1 km 27% (siehe Abb. 4.23). Abgesehen von einem leichten Übergewicht der südlichen Felder in den Pufferkreisen 500 m bis 700 m sind die Anteile der Himmelsrichtungen ab dem 300m-Pufferkreis recht ausgeglichen (Spannweite der

melsrichtungen ab dem 300m-Pufferkreis recht ausgeglichen (Spannweite der Flächenanteile: 9% bis 17%). Noch einheitlicher ist die Situation beim Mais: Vom 100m- bis zum 300m-Umkreis haben die Flächenanteile der einzelnen Himmelsrichtungen eine Spannweite von 8-17%, ab dem 400m-Pufferkreis liegen die Anteile sogar nur zwischen 10-15% (siehe

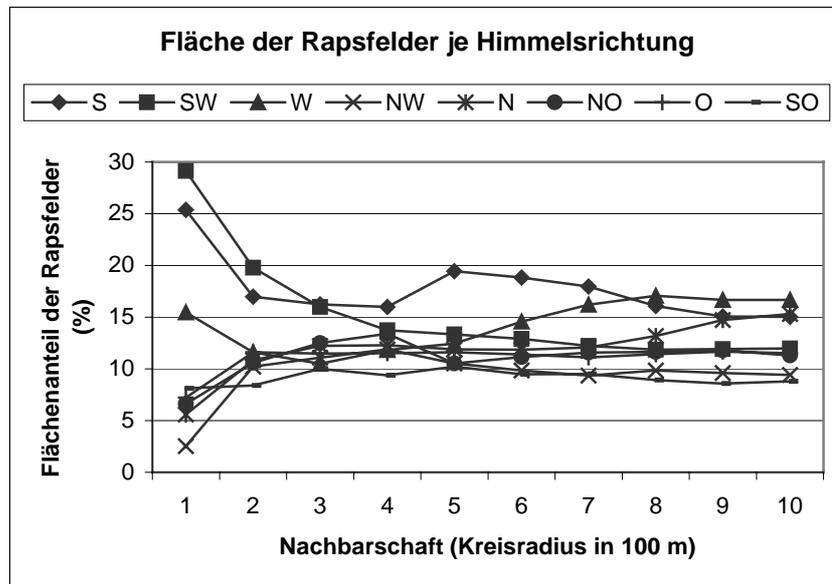


Abb. 4.23: Flächenverteilung der Rapsfelder im Umkreis der Rapspollensammler entsprechend der Himmelsrichtung

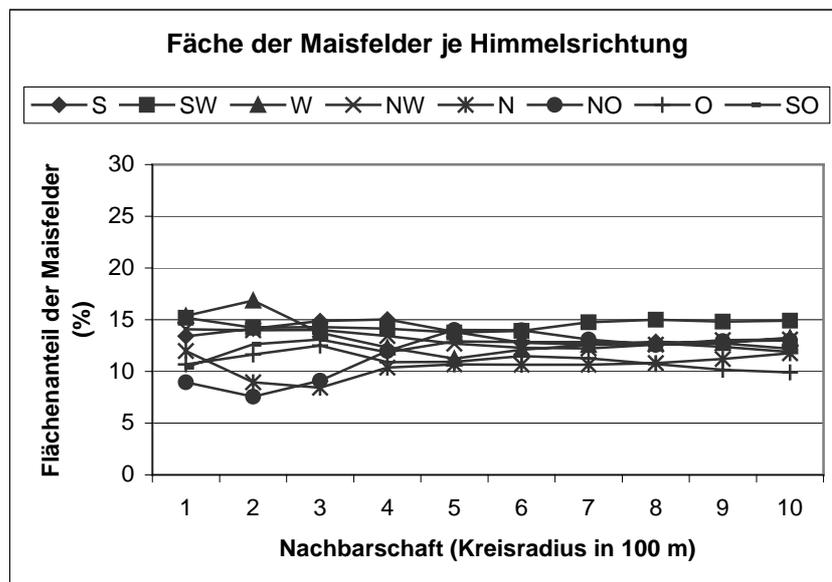


Abb. 4.24: Flächenverteilung der Maisfelder im Umkreis der Maispollensammler entsprechend der Himmelsrichtung

Abb. 4.24). Bis auf den 100m-Nahbereich (Rapsversuch) um die Sammlerstandorte sind die Raps- und Maisfelder im Durchschnitt recht gleichmäßig in alle Himmelsrichtungen um die Pollensammlerstandorte verteilt.

4.2.3 Einfluss der Flächengröße, Richtung und Entfernung der Felder im Umkreis der Pollensammler auf die Pollendeposition - Berechnungen mit dem Pollendepositionsindex (PDI)

4.2.3.1 Flächengröße und Entfernung der Raps- und Maisfelder

Wie in Kapitel 4.2.2 dargestellt, steigt die Flächensumme – der die Pollensammler umgebenden Felder – kontinuierlich mit der Entfernung vom Pollensammler an. Korreliert man die Flächensummen der einzelnen Nachbarschaftsräume / Pufferkreise (Pollendepositionsindex PDI) mit den Messwerten der Pollendeposition, findet sich dieser gleichmäßige Anstieg nicht wieder, sondern je nach Sammlertyp und Kulturart zeigen sich Kurvenverläufe mit einem mehr oder weniger ausgeprägtem Maximum (siehe Abb. 4.27 bis Abb. 4.30). Daraus ist zu schlussfolgern, dass alle Felder in der Umgebung der Pollensammlerstandorte bis zu einer bestimmten Entfernung maßgeblich zu der gemessenen Pollendeposition beitragen. Wird der Radius (und folglich die Fläche) der Nachbarschaftsräume zu klein oder zu groß gewählt, sind keine signifikanten Korrelationen oder zumindest eine Abnahme der Korrelationskoeffizienten festzustellen. Das bedeutet, es werden entweder Felder ausgeschlossen, die einen Einfluss auf die Messung am Standort haben, oder es werden zu viele Felder berücksichtigt, die keinen Einfluss auf die Messung haben, da sie zu weit entfernt liegen.

Die Darstellung der Korrelationskoeffizienten der Korrelation von gemessener Pollendeposition mit berechneter Pollendeposition nach PDI erfolgt in den Abb. 4.27 bis Abb. 4.30 getrennt für Raps- und Maisversuch sowie für die Pollensammlertypen Sigma-2 und PMF. In jeder Abbildung sind die Korrelationskoeffizienten nach Nachbarschaftsräumen (Pufferkreise um die Pollensammler) differenziert (Abszisse) und für zwei PDI-Berechnungen (Formel 1 und Formel mit der besten Anpassung) angegeben (Ordinate). Die Signifikanzschranken (5%, 1%, 0,1%) sind als Linien dargestellt und zeigen die signifikanten Korrelationen an. Die Formel 1 berücksichtigt zur Berechnung des PDI ausschließlich die summierte Feldfläche des gesamten Nachbarschaftsraumes (Pufferkreises). Bei dieser Berechnungsgrundlage des PDI (Darstellung als hellgrauen Säulen in den Abb. 4.27 bis Abb. 4.30) treten die höchsten Korrelationskoeffizienten beim Rapsversuch im Nachbarschaftsraum von 300 m mit 0,28 n.s. (Sigma-2) bzw. von 400 m mit 0,59*** (PMF) auf. Beim Maisversuch liegen die Werte bei 0,67*** (100m-Umkreis, Sigma-2) bzw. 0,69*** (100m-Umkreis, PMF).

4.2.3.2 Flächengröße, Entfernung und Richtung der Raps- und Maisfelder

Da während des Rapsversuchs eine westliche und südliche und während des Maisversuchs eine südliche bis nördliche Windströmung vorherrschte (siehe Kap. 4.1.3.3), ist anzunehmen, dass Felder im Luvbereich stärker zur Pollendeposition am Messstandort beigetragen haben. Ob diese Annahme zutrifft, wurde anhand der Korrelation der Pollendeposition mit der summierten Feldfläche (Raps bzw. Mais) je 45°-Windrichtungssektor¹⁷² für beide Sammlertypen untersucht. Das heißt, es wurde jeweils der Einzelfall betrachtet, dass die Pollendeposition ausschließlich durch die Felder einer Himmelsrichtung determiniert ist. Befinden sich keine oder wenige Felder im Windrichtungssektor, der jeweils als Luvbereich aufgefasst wird, müsste die gemessene Pollendeposition niedrig sein, befinden sich großflächige Felder im Kreissektor müsste die gemessene Pollendeposition hoch sein.

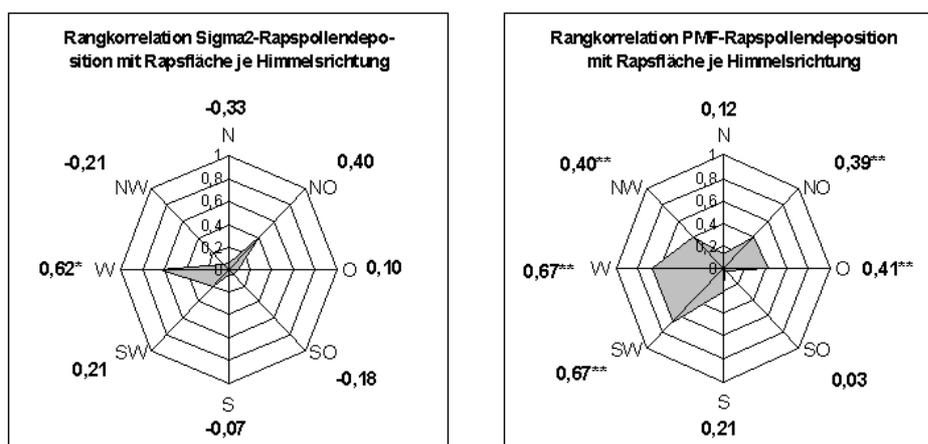


Abb. 4.25: Rangkorrelation der Rapspollendeposition (Sigma-2 bzw. PMF) mit der summierten Fläche der Rapsfelder je 45°-Windrichtungssektor

Zugrundeliegender Nachbarschaftsraum / Stichprobe: Sigma-2 (600 m / $n = 15$), PMF (500 m / $n = 44$)

Das Ergebnis für Raps zeigt die Abb. 4.25. Die höchsten Korrelationskoeffizienten traten auf, wenn die Felder im 600m-Umkreis (Sigma-2) bzw. im 500m-Umkreis (PMF) berücksichtigt wurden. Für den Sammlertyp Sigma-2 ist eine signifikante Korrelation ($r_s = 0,624^*$) mit den Feldflächen des westlichen Sektors festzustellen, dies entspricht der Hauptwindrichtung (vgl. Abb. 4.7). Der PMF-Sammler hat zusätzlich einen Maximalwert im Südwesten, der nicht durch die Windverteilung zu erklären ist. Im Fall des PMF ergibt sich nach Kombination der Windrichtungssektoren W und SW (90°-Kreissektor) ein Korrelationskoeffizient von $r_s = 0,740^{**}$. Im Vergleich zum vorangegangenen Kapitel (Kap. 4.2.3.1) ist eine deutliche

¹⁷² N, NO, O, SO, S, SW, W und NW

Steigerung der Korrelationskoeffizienten bei gleichzeitiger Vergrößerung der Nachbarschaftsräume / Pufferkreise um jeweils 100 m festzustellen, d.h. die Windrichtung hat einen großen Einfluss auf den Messwert der Rapspollendeposition am Sammlerstandort.

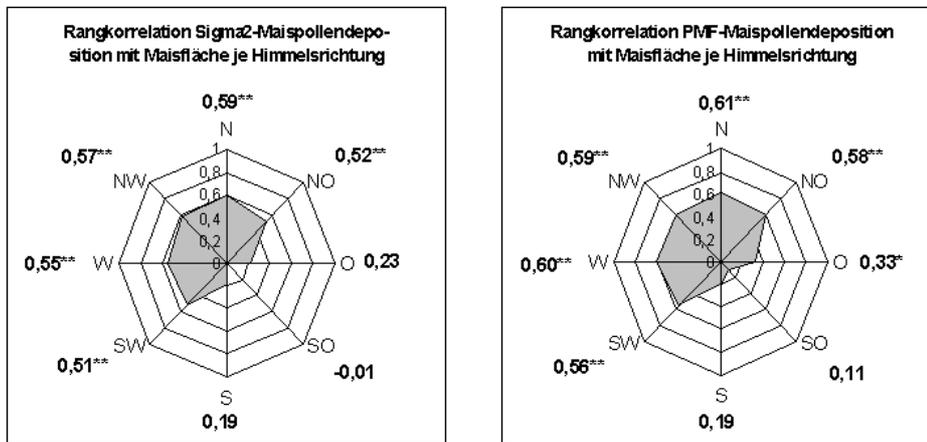


Abb. 4.26: Rangkorrelation der Maispollendeposition (Sigma-2 bzw. PMF) mit der summierten Fläche der Maisfelder je 45°-Windrichtungssektor

Zugrundeliegender Nachbarschaftsraum / Stichprobe: Sigma-2 (100 m / n = 26), PMF (100 m / n = 49)

Eine bessere Übereinstimmung zwischen Sigma-2 und PMF liegt beim Mais vor (siehe Abb. 4.26). Den Feldflächen im 100m-Umkreis um die Sammlerstandorte in den Himmelsrichtungen Südwest, West, Nordwest, Nord und Nordost kommt die höchste Bedeutung an der Pollendeposition zu (r_s von 0,51** bis 0,61**). Diese Himmelsrichtungen entsprechen – mit einer Abweichung (NO statt S) – den Hauptwindrichtungen (W, SW, NW, N, S) während des Versuchszeitraums (siehe Abb. 4.8). Die Kombination der fünf zu Anfang genannten Windrichtungen (225°-Kreissektor) führt zu einer Erhöhung des Rang-Korrelationskoeffizienten (r_s) auf: 0,689** (Sigma-2) bzw. 0,735** (PMF). Im Vergleich zum vorangegangenen Kapitel (Kap. 4.2.3.1) ist eine geringfügige Steigerung der Korrelationskoeffizienten bei unveränderter Größe der Nachbarschaftsräume / Pufferkreise festzustellen, d.h. die Windrichtung hat einen geringen Einfluss auf den Messwert der Maispollendeposition am Sammlerstandort.

4.2.3.3 Flächengröße, Entfernung (inkl. Ausbreitungsfunktion) und Richtung der Raps- und Maisfelder

Um die aerodynamischen Eigenschaften der Raps- und Maispollen bei der Berechnung des Pollendepositionsindex (PDI) zu berücksichtigen und möglicherweise eine stärkere Korrelation zwischen Messung und Berechnung der Pollendeposition zu erreichen, wurden zusätzlich

zu den Windrichtungssektoren des vorangegangenen Kapitels Ausbreitungsfunktionen (siehe Abb. 3.6) in den PDI integriert.

Wie bereits in Kap. 4.2.3.1 beschrieben, zeigen die Abb. 4.27 bis Abb. 4.30 die Korrelation (Korrelationskoeffizienten) der gemessenen Pollendeposition mit der berechneten Pollendeposition nach PDI. Die Darstellung erfolgt getrennt für Raps- und Maisversuch sowie für die Pollensammlertypen Sigma-2 und PMF. In jeder Abbildung ist die Korrelation für zwei PDI-Berechnungen (Formel 1 und Formel mit der besten Anpassung) angegeben und nach Nachbarschaftsräumen (Pufferkreise um die Pollensammler) differenziert. Die Signifikanzschranken (5%, 1%, 0,1%) sind als Linien dargestellt und zeigen die signifikanten Korrelationen an.

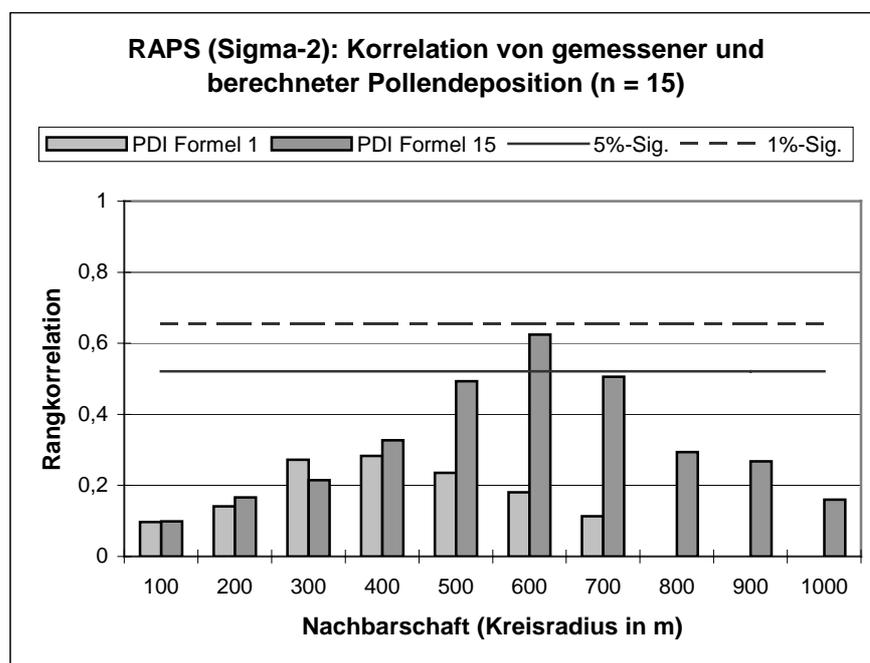


Abb. 4.27: Rangkorrelation der gemessenen (Sigma-2) und der berechneten (PDI Formel 1 und 15) Rapspollendeposition im Umkreis der Sammlerstandorte mit Signifikanzschranken nach Zar (1999)

Für die Rapspollen konnte keine Verbesserung der Korrelationskoeffizienten unabhängig von der untersuchten Ausbreitungsfunktion erreicht werden. Wie schon die Abb. 4.18 und Abb. 4.20 zeigen, unterliegen die Rapspollen aufgrund ihrer geringen Größe und Masse (siehe Kap. 3.1.1.4) nicht so stark der Sedimentation wie vergleichsweise die Maispollen. Damit bleibt es bei den Korrelationskoeffizienten wie sie schon in Kap. 4.2.3.2 angegeben sind. Die höchsten Rang-Korrelationskoeffizienten zwischen den empirischen Daten und den berechneten PDI-Werten treten im 600m-Umkreis (Sigma-2; Windrichtungssektor: Westen; PDI Formel 15) bzw. im 500m-Umkreis (PMF; Windrichtungssektor: Westen + Südwesten; PDI Formel 16) auf und sie betragen $r_s = 0,624^*$ bzw. $r_s = 0,740^{***}$ (siehe Abb. 4.27 und Abb. 4.28). Wie

schon im vorangegangenen Kapitel dargestellt (Kap. 4.2.3.2), erweist sich die westliche und südwestliche Himmelsrichtung als besonders bedeutend für die Pollendeposition. Im Gegensatz zur PDI-Formel 1, die die Felder aller Himmelsrichtungen verwendet, reduzieren die PDI-Formeln 15 und 16 die Anzahl der Windrichtungssektoren von acht auf einen (in diesem Fall: Westen) bzw. zwei (in diesem Fall: Westen, Südwesten). Erst durch den Ausschluss der meisten Himmelsrichtungen treten signifikante (Sigma-2, siehe Abb. 4.27) oder höhere Korrelationen (PMF, siehe Abb. 4.28) auf. Aus den Ergebnissen der PDI-Berechnung ist zu schließen, dass beide Sammlertypen somit vor allem Pollen von Rapsfeldern im Bereich von 0 bis 500 m bzw. 600 m aus westlicher und südwestlicher Richtung sammelten. Dies stimmt in etwa mit den Winddaten überein (Hauptwindrichtung war Westen, zweithäufigste Windrichtung: Süden; siehe Abb. 4.7).

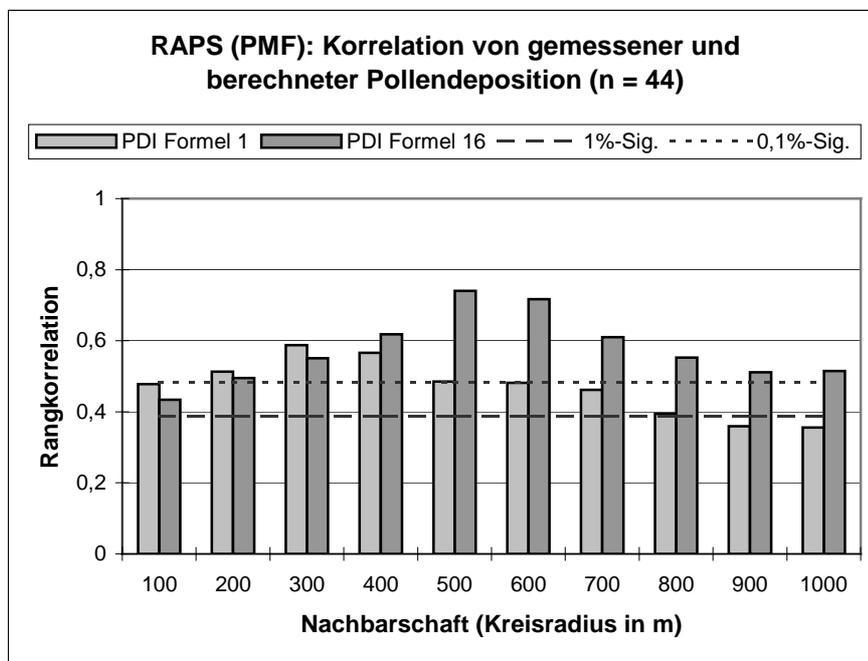


Abb. 4.28: Rangkorrelation der gemessenen (PMF) und der berechneten (PDI Formel 1 und 16) Rapspollendeposition im Umkreis der Sammlerstandorte mit Signifikanzschranken nach Zar (1999)

Bei der Maispollendeposition deutet die PDI-Formel 1 (Berücksichtigung aller Felder im Umkreis) bei beiden Sammlertypen auf die große Bedeutung des 100m-Umkreises hin (siehe Abb. 4.29 und Abb. 4.30). In beiden Fällen handelt es sich um den Maximalwert der Korrelationskoeffizienten. Dabei kommt die Nähe der Pollensammlerstandorte zu den Maisfeldern

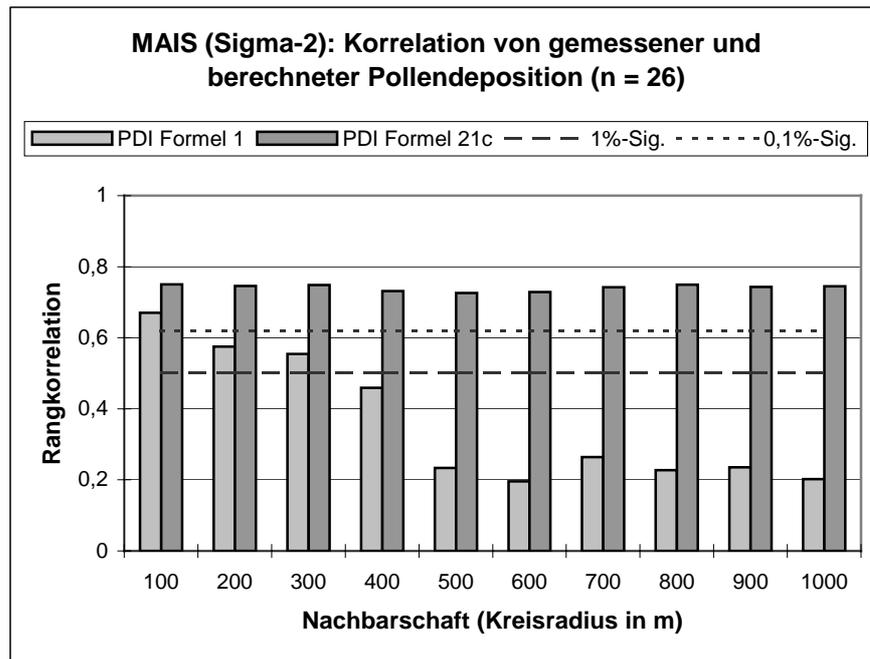


Abb. 4.29: Rangkorrelation der gemessenen (Sigma-2) und der berechneten (PDI Formel 1 und 21c) Maispollendeposition im Umkreis der Sammlerstandorte mit Signifikanzschranken nach Zar (1999)

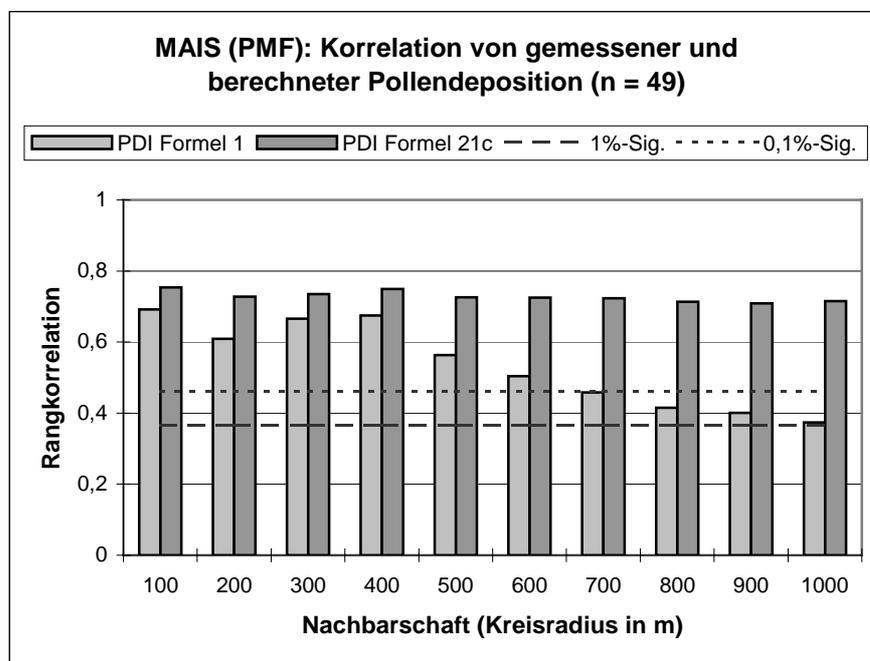


Abb. 4.30: Rangkorrelation der gemessenen (PMF) und der berechneten (PDI Formel 1 und 21c) Maispollendeposition im Umkreis der Sammlerstandorte mit Signifikanzschranken nach Zar (1999)

(siehe Tab. 4.25) und die aerodynamischen Eigenschaften des Maispollens (siehe Kap. 3.1.2.4) zum Tragen. Die Korrelationskoeffizienten nehmen tendenziell mit der Größe des Nachbarschaftsraumes ab. Eine Ausnahme stellt das lokale Maximum im 400m-Nachbarschaftsraum beim PMF dar.

Im Gegensatz zu den Rapspollen kann durch die Verwendung der Ausbreitungsfunktionen die starke Abnahme der Maispollendeposition mit steigender Entfernung zur Pollenquelle abgebildet werden. Dadurch wird eine Verbesserung der Korrelationskoeffizienten gegenüber dem vorangegangenen Kapitel (Berücksichtigung der Windrichtungssektoren) erzielt. Der höchste Korrelationskoeffizient tritt beim Sigma-2 und beim PMF mit der selben PDI-Formel (21c) im 100m-Umkreis auf (Sigma-2: $r_s = 0,750^{***}$, PMF: $r_s = 0,754^{***}$). Die PDI-Formel berücksichtigt nur die Maisfelder der Windrichtungen SW, W, NW, N und NO (dies entspricht nahezu den Hauptwindrichtungen; siehe Kap. 4.1.3.3) und gewichtet mit der Potenzfunktion ($y = x^{-2}$) besonders stark die dem Pollensammler naheliegenden Felder. Durch diese extreme Gewichtung leisten entfernt liegende Felder nahezu keinen Beitrag mehr zum PDI. Daher reduziert sich der Korrelationskoeffizient mit anwachsendem Nachbarschaftsraum kaum.

Eine Übersicht über die Ergebnisse der Korrelation der gemessenen mit der nach PDI berechneten Pollendeposition gibt die Tab. 4.27.

Tab. 4.27: Rangkorrelation der berechneten (PDI) und der gemessenen (Sigma-2 und PMF) Deposition von Raps- und Maispollen

Kulturpflanze	Pollensammler	n	Rangkorrelation der Pollendeposition (Messwerte mit PDI)	PDI-Formel Nr. ¹⁷³	PDI Pufferkreis (Radius in m)
Raps	Sigma-2	15	0,624*	15 ¹⁷⁴	600
Raps	PMF	44	0,740***	16 ¹⁷⁵	500
Mais	Sigma-2	26	0,750***	21c ¹⁷⁶	100
Mais	PMF	49	0,754***	21c ¹⁷⁷	100

¹⁷³ Beschreibung der PDI-Formeln siehe Kapitel 3.6.2

¹⁷⁴ Windrichtung: W

¹⁷⁵ Windrichtungen: W, SW

¹⁷⁶ Windrichtungen: SW, W, NW, N und NO

¹⁷⁷ Windrichtungen: SW, W, NW, N und NO

4.2.4 Räumliche Analysen zur Pollendeposition (mesoskalig¹⁷⁸)

Um Aussagen über die räumliche Verteilung der Pollendeposition im Untersuchungsgebiet zu erhalten wurden vier verschiedene Methoden verwendet und die Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Pollendeposition untersucht. Je nach Methode wurden die Messwerte der Pollensammler (Kap. 4.2.5) oder die Felderkartierung/Pollenquellen (Kap. 4.2.6, 4.2.7 und 4.2.8) als Datengrundlage verwendet.

4.2.5 Geostatistische Interpolation

Die Voraussetzung zur Anwendung geostatistischer Interpolationsverfahren, nämlich die Autokorrelation der Messwerte (siehe Kap. 3.7.1.2), ist weder für die Raps- noch für die Maispollendeposition gegeben. Dies ergab die Berechnung¹⁷⁹ der Morans I Statistik und der Gearys c Statistik (Upton & Fingleton 1985: 170-171, Levine 2002: 153-164) für die Sigma-2- und PMF-Messwerte mit anschließendem Signifikanztest (Z-Teststatistik). Es zeigt sich, dass weder eine positive noch eine negative räumliche Autokorrelation besteht, sondern eine räumliche Unabhängigkeit der Messwerte vorliegt (siehe Tab. 4.28). Damit liegt der statistisch abgesicherte Nachweis vor, dass die Messwerte der Pollendeposition zwischen beliebigen Sammlerstandorten keine Beziehung aufweisen. Diese Aussage gilt sowohl für den Raps- als auch den Maisversuch sowie für die Pollensammlertypen Sigma-2 und PMF.

Tab. 4.28: Moran's I Statistik für die Raps- und Maispollensammler (Sigma-2 und PMF)

Kulturart	RAPS		MAIS	
	Sigma-2	PMF	Sigma-2	PMF
Pollensammlertyp				
Sample size	50	50	50	50
Moran's "I"	0,0053	-0,0063	0,0248	0,0268
Spatially random (expected) "I"	-0,0204	-0,0204	-0,0204	-0,0204
Standard deviation of "I"	0,0305	0,0305	0,0305	0,0305
Normality significance (Z)	0,8410	0,4628	1,4840	1,5488
Randomization significance (Z)	0,8949	0,4699	1,5571	1,5953
p-value (two tail)	0,001	0,001	0,001	0,001

Wie aufgrund der Voruntersuchung (Morans I Statistik, Gearys c Statistik) zu erwarten war, ergaben die Modelle der Kriging-Verfahren (z.B. *Ordinary Kriging*) sehr hohe und nicht tole-

¹⁷⁸ Untersuchungen bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet.

¹⁷⁹ Software: CrimeStat II (Levine 2002)

rierbare Fehler, wie der hohe Nugget-Effekt und die Kreuzvalidierungen¹⁸⁰ belegen. Eine räumliche Darstellung der interpolierten Pollendeposition war nicht möglich.

4.2.6 GIS-gestützte Regionalisierung - Entfernung zum nächsten Feld

Die im Vergleich einfachste Methode zur räumlichen Betrachtung der Pollendeposition stellt die rasterbasierte Abstandsberechnung – in diesem Fall die „Entfernung zum nächsten Feld“ – dar, eine Standardfunktion von GIS-Programmen (*distance surface*). Die Berechnung ist die zweidimensionale Umsetzung des Zusammenhangs zwischen Immission und Entfernung zum Emittenten, der häufig nur entlang einer Achse betrachtet wird (z.B. Rieger et al. 2002, Jarosz et al. 2003, Devaux et al. 2005). Außer der euklidischen Distanz werden keine weiteren Faktoren berücksichtigt. Als Eingangsdaten und Objekte der Abstandsberechnung (*source*) fungieren die Raps- bzw. Maisfelder.

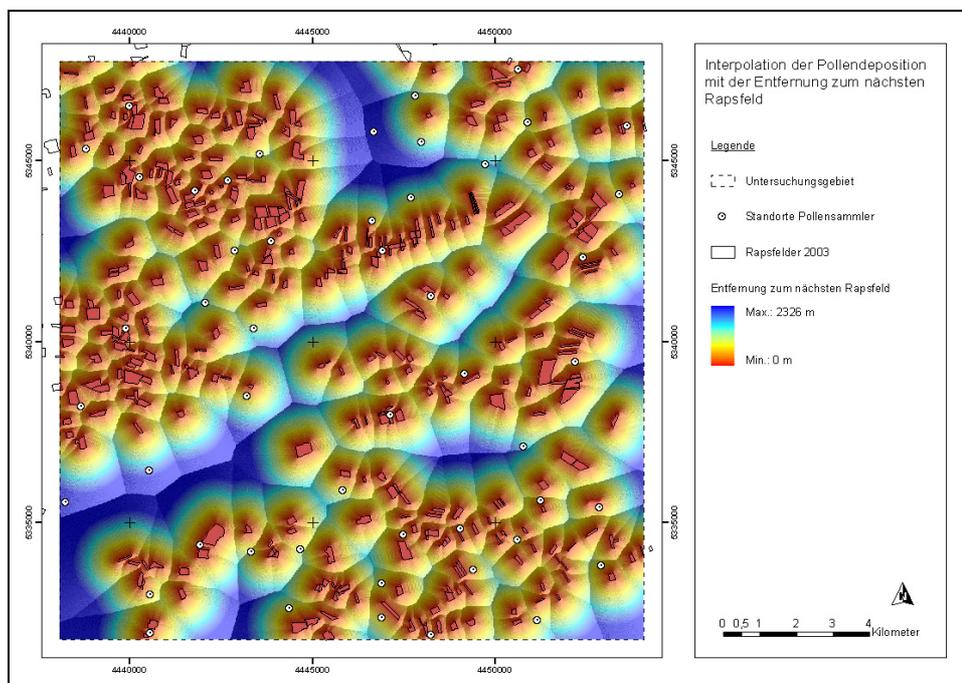


Abb. 4.31: Berechnung der Pollendeposition im Untersuchungsgebiet nach der „Entfernung zum nächsten Feld“ (basierend auf den Rapsfeldern 2003)

Die Genauigkeit der Berechnung wird durch die Auflösung des Rasters (in diesem Fall: 1 x 1 m) und den verwendeten Maßstab bei der Digitalisierung der Felder (hier 1:5.000) bestimmt. Das Ergebnis der Berechnung¹⁸¹ (die Entfernungsangaben; siehe Abb. 4.31) kann –

¹⁸⁰ Zum Test der Modellgüte wird für jeden Messpunkt der gemessene und der durch das Modell vorhergesagte Wert (berechnet auf der Grundlage der restlichen Messwerte) verglichen.

¹⁸¹ Rechendauer ~ 5 min.

unter Voraussetzung eines signifikanten Zusammenhangs (siehe Tab. 4.29) – durch die Pollensammler (gemessene Pollendeposition bei bekannter Entfernung zum nächsten Feld) mit einer Pollendeposition in Bezug gesetzt werden.

Tab. 4.29: Korrelation der gemessenen und berechneten Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene nach der Methode „Entfernung zum nächsten Feld“

Spearman Rangkorrelationskoeffizient r_s	Auflösung Berechnungsraster	RAPS		MAIS	
		Sigma-2 (n = 15)	PMF (n = 44)	Sigma-2 (n = 26)	PMF (n = 49)
Entfernung zum nächsten Feld	1 x 1 m	-0,344 (n.s.)	-0,552***	-0,655***	-0,687***

4.2.7 GIS-gestützte Regionalisierung - Pollendepositionsindex

Etwas aufwändiger als die zuvor beschriebene Methode ist die ebenfalls rasterbasierte GIS-Berechnung des Pollendepositionsindex (PDI, siehe v.a. Kap. 3.6.2 und Kap. 3.7.2). Unter Berücksichtigung der Feldfläche, -geometrie, -abstand und Windrichtung werden für alle Rasterzellen (Zellgröße: 5 x 5 m) Indexwerte berechnet, die die Intensität der Pollendeposition widerspiegeln (siehe Abb. 4.32).

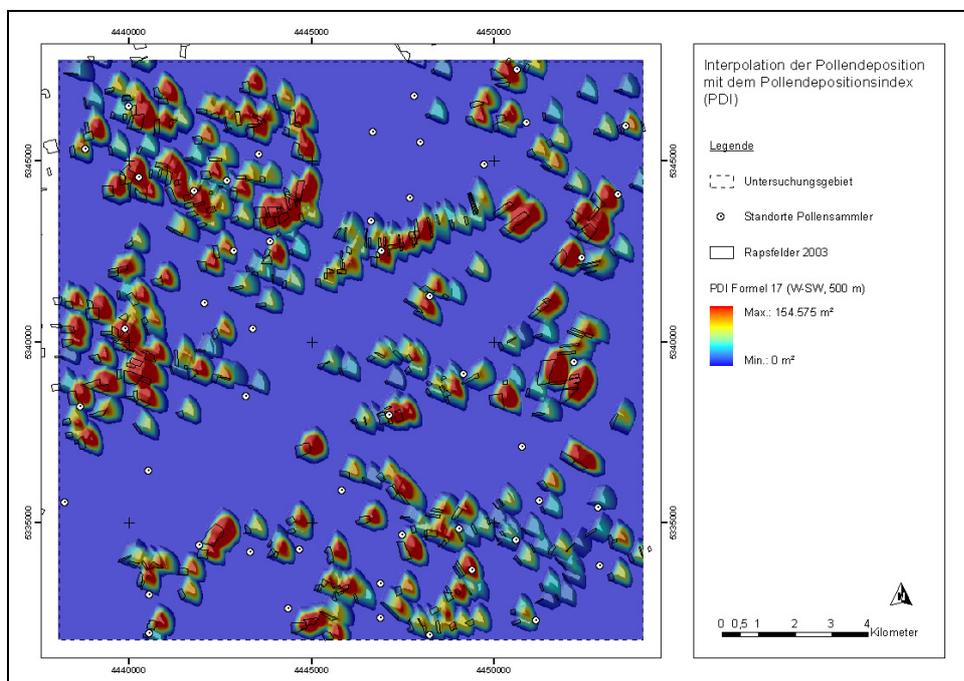


Abb. 4.32: Berechnung der Pollendeposition im Untersuchungsgebiet nach dem „Pollendepositionsindex PDI“ (basierend auf den Rapsfeldern 2003)

Berechnung: PDI Formel 16, 500 m-Nachbarschaftsraum, Windrichtungen: W und SW

Die Genauigkeit der Berechnung¹⁸² ist wiederum von der Auflösung des Rasters und dem Digitalisierungsmaßstab der Felder abhängig. Eine signifikante Korrelation zwischen gemessener Pollendeposition und den PDI-Werten tritt auf (siehe Tab. 4.30). Im Vergleich zur Methode „Entfernung zum nächsten Feld“ liegen die Korrelationskoeffizienten deutlich (Raps) oder leicht (Mais) höher.

Tab. 4.30: Korrelation der gemessenen und berechneten Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene nach der Methode „Pollendepositionsindex PDI“

Spearman Rangkorrelationskoeffizient r_s	Auflösung Berechnungsraster	RAPS		MAIS	
		Sigma-2 (n = 15)	PMF (n = 44)	Sigma-2 (n = 26)	PMF (n = 49)
PDI	5 x 5 m	0,624* ¹⁸³	0,738*** ¹⁸⁴	0,726*** ¹⁸⁵	0,739*** ¹⁸⁶

4.2.8 Ausbreitungsmodell AUSTAL2000

Das Ausbreitungsmodell AUSTAL2000 simuliert die realen Prozesse des Pollenflugs und deshalb ist die Berechnung sehr komplex und zeitintensiv. Aus diesem Grund musste – wie in Kap. 3.7.4 beschrieben – ein grobes Berechnungsraster (100 x 100 m) verwendet und die Felder als Punktquellen definiert werden.

Abgesehen von der Auflösung des Berechnungsrasters ist zur Genauigkeit der Daten anzumerken, dass die statistische Unsicherheit der berechneten Pollendeposition mit der Entfernung zur Pollenquelle ansteigt. Da höhere Fehlerraten nur bei sehr niedrigen Depositionswerten in großer Entfernung zur Quelle auftreten, sind sie für das Gesamtergebnis der Ausbreitungsberechnung (siehe Abb. 4.33) von geringer Bedeutung.

Wie bei den beiden vorherigen Methoden liegen signifikante Korrelationen zwischen gemessener und berechneter Pollendeposition vor (siehe Tab. 4.31). Allerdings liegen die Werte der Korrelationskoeffizienten unter denen des „Pollendepositionsindex (PDI)“, aber über denen der Methode „Entfernung zum nächsten Feld“.

¹⁸² Rechendauer ~3h

¹⁸³ PDI Formel 15, 600m-Nachbarschaftsraum, Windsektor: West

¹⁸⁴ PDI Formel 16, 500m-Nachbarschaftsraum, Windsektoren: West, Südwest

¹⁸⁵ PDI Formel 21c, 100m-Nachbarschaftsraum, Windsektoren: Südwest, West, Nordwest, Nord, Nordost

¹⁸⁶ PDI Formel 21d, 100m-Nachbarschaftsraum, Windsektoren: Südwest, West, Nordwest, Nord, Nordost

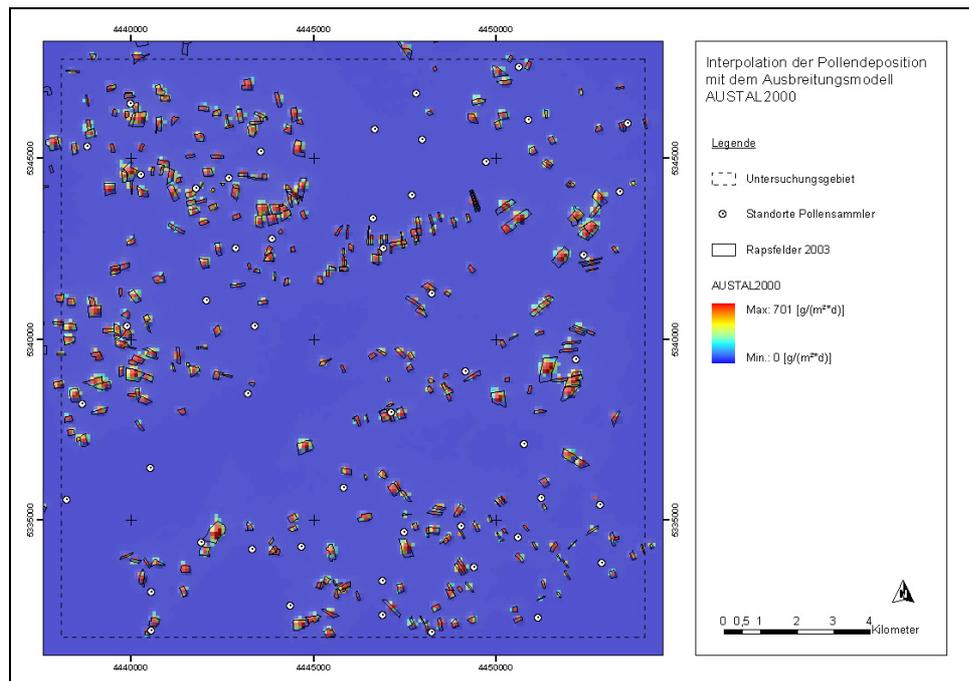


Abb. 4.33: Berechnung der Pollendeposition im Untersuchungsgebiet nach „AUSTAL2000“ (basierend auf den Rapsfeldern 2003)

Tab. 4.31: Korrelation der gemessenen und berechneten Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene nach der Methode „AUSTAL2000“

Spearman Rangkorrelationskoeffizient r_s	Auflösung Berechnungsraster	RAPS		MAIS	
		Sigma-2 (n = 15)	PMF (n = 44)	Sigma-2 (n = 26)	PMF (n = 49)
AUSTAL2000	100 x 100 m	0,156 (n.s.)	0,534***	0,666***	0,600***

5 Diskussion

5.1 Pollenmessung auf mesoskaliger Ebene mit GVP-Hintergrund

Eine Übersicht über Untersuchungen zur Pollenmessung auf mesoskaliger Ebene zeigt die Tab. 1.4. Abgesehen von der Untersuchung von Ramsay et al. (2003) beschäftigte sich keine Studie mit der Pollenausbreitung von ackerbaulichen Nutzpflanzen. Dies ist insofern nicht verwunderlich, da die allermeisten Studien einen allergologischen Hintergrund haben. Mit der aufkommenden Diskussion um die Einführung gentechnisch veränderter Pflanzen in der Landwirtschaft wurde die Pollenausbreitung von Kulturpflanzen zum Gegenstand des Interesses (Timmons et al. 1996). Später wurde der Fokus von kleinflächigen auf großflächige Feldversuche gelenkt (Klein et al. 2003: 146). Trotzdem sind großflächige Untersuchungen zur Pollenausbreitung unter realen Anbaubedingungen bis heute selten (Ausnahmen: Ramsay et al. 2003, Devaux et al. 2005). Angesichts der Tatsache, dass 53,5% der Landesfläche der Bundesrepublik Deutschland landwirtschaftlich genutzt werden (davon wiederum 69,5% für den Ackerbau) (Statistisches Bundesamt 2004) und diese in Zukunft mit gentechnisch veränderten Pflanzen bestellt werden könnten, ist die Zurückhaltung unverständlich. Ohne das Wissen um Pollenausbreitung auf mesoskaliger Ebene sind Risikoabschätzungen über die Einführung von GVP nicht vollständig und aussagekräftig. Zur Schließung der Wissenslücke soll diese Arbeit einen Beitrag leisten.

5.2 Analytik der Pollenproben

5.2.1 Bildanalyse der Sigma-2- und PMF-Proben

5.2.1.1 Identifizierung von Raps- und Maispollen

Weltweit zählen zur Familie der Brassicaceae oder Cruciferae (Kreuzblütengewächse) 84 Gattungen. In Mitteleuropa kommen 56 Gattungen mit insgesamt 174 Arten vor. Zur Gattung *Brassica* (Kohl) zählen sieben Arten (zusätzlich mehrere Subspezies und Varietäten), darunter Raps (*Brassica napus* L.) (Zander 2002, Beug 2004). Auffällig ist, dass die Pollenkörner der Brassicaceae dickwandig sind und die Variabilität der Pollen innerhalb der Arten groß ist (Beug 2004: 306). Auf Grund des zeitgleichen Vorkommens von Rapspollen und Pollen anderer Kreuzblütler ist eine Fehlklassifikation nicht gänzlich auszuschließen. Um eine möglichst fehlerfreie Klassifizierung der (Raps-)Pollen der Sigma-2-Proben zu erhalten, benutzte der DWD eine Referenzdatenbank mit 1.000 Pollenarten (Varia), 200 Pollenagglomeraten, 7.500 Aerosolpartikeln und zusätzlich ca. 2.400 Rapspollen (gewonnen aus Schüttelproben und dem Vorversuch aus dem Jahr 2002) (Beismann & Kuhlmann 2006: 71). Das Institut für Bienenkunde verfügte über die Celler melissopalynologische Sammlung (CMS) als Bestimmunggrundlage für die (Raps-)Pollen der PMF-Proben (von der Ohe & von der Ohe 2003).

Bei Maispollen (*Zea mays* L.) besteht die Problematik der Fehlklassifikation praktisch nicht, da keine verwandten Arten in Europa vorkommen und der Maispollen sich aufgrund der Größe von den allermeisten Pollen deutlich unterscheidet. Obwohl innerhalb der Familie der Poaceae (zu der auch Mais gehört) der Pollentyp recht einheitlich ist, ist die Verwechslungsgefahr selbst mit besonders groß geratenen Pollen von *Triticum* (Weizen) oder *Avena* (Hafer) gering, da in der Skulpturierung Unterschiede bestehen (Beug 2004: 75, 81).

5.2.1.2 Auswertungsmethoden und Zählfehler bei Pollenproben

Eine grundlegende Unsicherheit bei der Analyse von Pollenproben resultiert aus der partiellen Auszählung des pollentragenden Mediums. Dies betrifft sowohl passive Pollensammler wie den Sigma-2, als auch aktive Pollensammler, wie den weit verbreiteten Burkard-Sammler (Sporenfalle nach Hirst 1952)¹⁸⁷. Eine detaillierte Untersuchung über verschiedene Auszählmethoden und deren Einfluss auf den Zählfehler unternahm Comtois et al. (1999) im Hinblick auf den Burkard-Sammler. Sie verglichen das Ergebnis der Komplettauszählung eines mit 12 Pollenarten belegten Tapes (672 mm²) mit drei verschiedenen Auszählmethoden: Subsamples aus (1) vertikalen und (2) horizontalen Streifen sowie (3) zufälligen Feldern. Zudem wurde die Auszählfläche der Subsamples schrittweise erhöht (von ~1 bis 75%). Grundsätzlich reduzierte sich der Zählfehler mit steigender Auszählfläche. Für das Standard-Auszählverfahren (4 Längsstreifen, entspricht ~13% der Gesamtfläche) wurde ein Zählfehler zwischen 10,5 und 474% ermittelt. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Auszählmethoden konnte nicht nachgewiesen werden. Allerdings wies die Methode der zufällig ausgewählten Felder im Mittel die geringsten Zählfehler auf. Comtois et al. (1999: 27) kommen zu der Aussage: „[...] *there will always be imprecision linked to the airborne pollen count, unless we count the whole slide.*“ Cariñanos et al. (2000), die ähnliche Untersuchungen durchführten, gehen einen Schritt weiter und geben zu bedenken, dass jede Auszählung nur ein Schätzwert der realen Pollenkonzentration in der Luft sein kann.

Eine weitere Fehlerquelle, die unabhängig vom Typ des Pollensammlers auftritt, ist die fehlerhafte Bestimmung von Pollen durch das Laborpersonal. Im Rahmen der Qualitätskontrolle des deutschen Polleninformationsdienstes (PID) wurden im Mittel eine Fehlklassifizierung von 33,1% (Ringversuch im Jahr 1996) bzw. 18,7% (Ringversuch 2002) festgestellt (Müsken & Hansmeier 2005).

¹⁸⁷ Bei diesem Gerät beträgt die Fläche der exponierten Haftfolie 672 mm² (48 x 14 mm) bei einer Versuchsdauer von 24h (Hirst 1952: 258) bzw. 4.704 mm² (336 x 14 mm) für 7 Tage (Subiza 2001). Die übliche Auswertefläche umfasst 10-13% der Gesamtfläche (Cariñanos et al. 2000: 339, Subiza 2001: 62), nach Empfehlung des deutschen Polleninformationsdienstes (PID) 7,1% (Hecht & Winkler 2001: 22).

5.2.1.3 Auswertungsmethode und Zählfehler der Sigma-2-Proben

Wie in Kap. 3.3.1.1 beschrieben, wurden 200 bzw. 324 mm² große Teilflächen der gesamten Haftfolie (4225 mm²) lichtmikroskopisch untersucht (4,7 bzw. 7,7%). Die Pollenanzahlen, die auf den Auswerteflächen gezählt wurden (siehe Kap. 4.1.4.1.2), unterliegen der Poisson-Verteilung, da die gezählten Ereignisse¹⁸⁸ relativ selten, zufällig und voneinander unabhängig in einer Flächeneinheit auftreten (Sachs 1997: 284). Deshalb sind für verschiedene Teilflächen der Folie unterschiedliche Zählergebnisse für eine Zielpollenart zu erwarten. Damit auf der Basis einer Teilfläche eine statistisch abgesicherte Aussage (95%-Vertrauensbereich) über die Präsenz der Zielpollenart in der Probe gemacht werden kann, müssen vier oder mehr Zielpollen identifiziert werden (siehe Abb. 5.1). Die Abb. 5.1 verdeutlicht zudem den Unterschied zwischen gezählter und wahrer Anzahl der Zielpollen. Beispielsweise kann bei sechs gezählten Pollen die wahre Anzahl zwischen zwei und zwölf liegen.

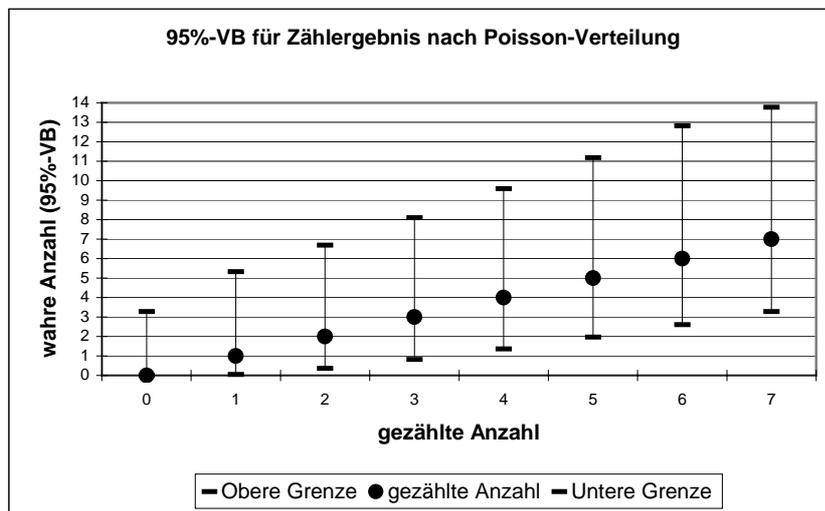


Abb. 5.1: 95%-Vertrauensbereich (VB) für das Zählergebnis der Sigma-2-Proben nach Poisson-Verteilung (VB nach Sachs 1997: 446)

Aufgrund der o.g. Rahmenbedingungen müssen die Zählergebnisse und die daraus abgeleiteten Auswertungen kritisch betrachtet werden, d.h. die intervallskalierten Daten sind eher als ordinalskalierte Daten zu bewerten.

Aus den Messergebnissen des Sigma-2 ist ferner abzuleiten, dass unter den gewählten Versuchsbedingungen (Aufstellung in der freien Landschaft, Fokus auf Raps- und Maispollen, o.g. Auszählmethode) eine einwöchige Expositionsdauer nicht ausreicht, um eine ausreichende Anzahl von Zielpollen zu akkumulieren. Alternativ zu einer Verlängerung der Expositi-

¹⁸⁸ Raps: Zählergebnis „0“: 102 Proben, Median der Zählergebnisse „>0“: 2,0 Rapspollen. Mais: Zählergebnis „0“: 79 Proben, Median der Zählergebnisse „>0“: 2,5 Maispollen.

onszeit könnten – entsprechend den Ergebnissen von Comtois et al. (1999) – Anzahl und Fläche der Auszählflächen vergrößert werden.

5.2.1.4 *Auswertungsvolumina und Zählfehler der PMF-Proben*

Die lichtmikroskopische Auswertung der PMF-Proben erfolgte ebenfalls nur für einen Teil der Gesamtprobe (Kap. 3.3.1.2). Bei den Rapsproben entsprach dies 0,17 bis 1,0% der Gesamtprobe, bei den Maisproben 0,5 bis 2,5%. Im Gegensatz zu den Sigma-2-Proben lagen die Zählergebnisse der PMF-Proben höher: Der Median der Maispollen betrug 25,5 ($n = 110$). Da die Angabe der Pollen/PMF-Probe auf einer Hochrechnung von zwei bis vier Auszählungen beruht, wird der Standardfehler des Medians berechnet (Sachs 1997: 160). Bei den Maisproben liegt die Spannweite des Standardfehlers zwischen $\pm 0,0$ und $\pm 8,9$ Pollen (Median $\pm 1,7$ Pollen).

Die Unsicherheit der Zählergebnisse ist damit geringer als bei den Sigma-2-Proben. Allerdings ist festzustellen, dass im Einzelfall der prozentuale Fehler $\pm 57,7\%$ beträgt (im Mittel $\pm 4,4\%$). Die Schwankungen zwischen den einzelnen Auszählungen je Probe sind mitunter nicht unerheblich.

5.2.2 **Messunsicherheit der Pollensammler Sigma-2 und PMF**

Neben den o.g. Unsicherheiten, die sich aus der bildanalytischen Auswertung der Proben ergeben, sind weitere Unsicherheiten zu betrachten, die aus dem Messverfahren (Probennahme, -aufbewahrung und -transport) resultieren und auf der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Messkomponente (den Pollen) beruhen. Zur Ermittlung der Messunsicherheit wurden während der Feldversuche 2003 mit dem Pollensammler Sigma-2 neun bzw. 12 Doppelmessungen (zeitgleiche Raps- bzw. Maispollen-Messung mit zwei baugleichen, unabhängigen Messeinrichtungen) und mit dem Pollensammler PMF jeweils neun Doppelmessungen durchgeführt. Nach VDI-Richtlinie 4219 (2005) sind zur Ermittlung der Messunsicherheit bei Emissionsmessungen mindestens 20 Doppelmessungen miteinander zu vergleichen.

Eine ausreichende Anzahl an Doppelmessungen wurde in einem ergänzenden Feldversuch 2004 für Rapspollen mit dem Pollensammler Sigma-2 erhoben (siehe Beismann & Kuhlmann 2006: 53-54). Die Berechnung der Unsicherheitsparameter nach VDI-Richtlinie 4219 (2005) mit dem „Direkten Ansatz mit Doppelbestimmung“ zeigt Tab. 5.1. Andere Verfahren¹⁸⁹ zur Ermittlung der Messunsicherheit boten sich nicht an (EUROLAB 2007).

¹⁸⁹ Single laboratory validation approach, interlaboratory validation approach, PT approach – Proficiency Testing (EQA).

Tab. 5.1: Unsicherheitsparameter nach VDI 4219 (2005) für die Rapspollenmessung mit Pollensammler Sigma-2

Parameter	Abkürzung	Wert
Anzahl der ausgewerteten Doppelmessungen	N	37
Effektive Anzahl der Freiheitsgrade	ν_{eff}	37
Schätzwert für die Varianz	$\text{var}(y)$	12,4 (Pollen/cm ²) ²
Bias (systematische Abweichungen)	u_B	1,20 Pollen/cm ²
Quotient aus Quadrat des Biasbeitrags und Schätzwert für die Varianz	$u_B^2 / \text{var}(y)$	0,117
(Kombinierte) Standardunsicherheit des Messergebnisses y	$u_c(y)$	3,5 Pollen/cm ²
Erweiterte Messunsicherheit des Messergebnisses y für das Vertrauensniveau $p = 95\%$	$U_{0,95}(y)$	7,0 Pollen/cm ²

Der Schätzwert für die Varianz beträgt 12,4 Rapspollen/cm², und der in der Varianz enthaltene Bias beträgt 1,2 Rapspollen/cm². Der Beitrag des Bias ist zu vernachlässigen, da ein signifikanter Bias erst gegeben ist, wenn $u_B^2 / \text{var}(y) \geq 0,5$ beträgt (in diesem Fall: 0,117). Die Standardunsicherheit eines einzelnen Messergebnisses y beträgt $u_c(y) = 3,5$ Rapspollen/cm² (bezogen auf den betrachteten Messbereich von 0 Rapspollen/cm² $\leq y \leq 77$ Rapspollen/cm²). Das bedeutet, dass der „wahre“ Wert sich innerhalb des angegebenen Wertebereichs ($\pm 3,5$ Rapspollen/cm²) um das Messergebnis bewegt. Für ein Vertrauensniveau von 95% und bezogen auf die hier vorliegenden 37 Doppelmessungen sowie den betrachteten Messbereich von 0 Rapspollen/cm² $\leq y \leq 77$ Rapspollen/cm² beträgt die erweiterte Messunsicherheit („*expanded uncertainty*“) $U_{0,95}(y) = 7,0$ Rapspollen/cm². Damit ist die größtmögliche Abweichung des Messergebnisses vom „wahren“ Wert mit 95%iger Wahrscheinlichkeit angegeben.

5.2.3 Raps- und Maispollennachweise mit den Pollensammlern Sigma-2 und PMF

Der Umstand, dass sowohl der Sigma-2- als auch der PMF-Sammler mehr Mais- als Rapspollen gesammelt haben (siehe Tab. 4.23), ist angesichts der Tatsache, dass der Rapspollen über deutlich bessere Voraussetzungen für Windverbreitung als der Maispollen verfügt (siehe Kap. 3.1.1.4 und 3.1.2.4) überraschend. Dieses Ungleichgewicht betrifft sowohl die Anzahl der positiven Proben als auch die Anzahl an Zielpollen. Das Ergebnis ist etwas zu relativieren, da die Entfernung zwischen Pollensammler und Feld beim Raps¹⁹⁰ größer war als beim Mais¹⁹¹ (siehe Tab. 4.25). Trotz allem entsprechen die positiven Nachweise (n=10) von Maispollen mittels PMF in Entfernungen von 0,2 bis 1,2 km zum nächsten Maisfeld nicht den gängigen Angaben in der Literatur. Laut Aylor (2002) und Jarosz et al. (2003) beträgt die Sink- bzw. Depositionsgeschwindigkeit von Maispollen 20-30 cm s⁻¹ bzw. 50-60 cm s⁻¹ und ist damit im

¹⁹⁰ Median des Abstandes Pollensammler zu Feld: 133 m (Sigma-2), 220 m (PMF)

¹⁹¹ Median des Abstandes Pollensammler zu Feld: 5 m (Sigma-2), 50 m (PMF)

Vergleich zu anderen windblütigen Pflanzen ($2-3 \text{ cm s}^{-1}$) recht hoch (Di-Giovanni et al. 1995). Nach Raynor et al. (1972) und Jarosz et al. (2003) nimmt die Maispollendeposition in der unmittelbaren Feldumgebung stark ab. Allerdings sind in beiden Fällen die Maisfelder mit 0,03 ha bzw. 0,04 ha sehr klein und die Pollendeposition in größerer Entfernung zum Feld ($>60 \text{ m}$) wird nicht untersucht. Bei praxisnahen Untersuchungsbedingungen (v.a. hinsichtlich der Feldgröße) stellen Jones & Brooks (1950) Auskreuzungen von Mais bis zu einem Feldabstand von 503 m ¹⁹² fest¹⁹³. Garcia et al. (1998) und Luna et al. (2001) berichten ebenfalls über Auskreuzungen in größerer Entfernung (184 bzw. 200 m) trotz kleiner Versuchsfelder. In der Schweiz konnten Bannert & Stamp (2005a, 2005b) durch Untersuchung von 13 Maisfeldern (0,25 bis 1,44 ha Feldgröße) mit gelbem und weißem Mais Auskreuzungen von 0,01% bis zu einer Entfernung von 4,1 km nachweisen. Die Auskreuzung von Mais in größerer Entfernung zum Feld ist unter den realen Anbaubedingungen offensichtlich nicht so selten, wie die Ergebnisse von kleinen Versuchsfeldern nahelegen.

Eine Erklärung für die im Jahr 2003 gemessene Maispollendeposition könnten die meteorologischen Bedingungen zur Sommerzeit sein. Da zum Zeitpunkt der Pollenfreisetzung (tagsüber mit Maximum am Vormittag, siehe Kap. 3.1.2.4) eine völlige Windstille wohl nur selten auftritt, sinken die Maispollen nach der Freisetzung nicht zwangsläufig sofort der Schwerkraft folgend zu Boden, sondern werden durch den Wind aus dem Bestand getragen (wie in Pollen-Ausbreitungsmodellen (u.a. Loos et al. 2003, Helbig et al. 2004, Schueler & Schlünzen 2006) simuliert¹⁹⁴). Die (meist turbulenten) Luftströmungen der atmosphärischen Grenzschicht (siehe Kap. 1.4.8) können insbesondere unter „*convective conditions*“ – wie sie im Sommer durch die Temperaturverteilung der Luftschichten entstehen – Pollen vom Freisetzungsort in weniger als einer Stunde in viele Kilometer Entfernung transportieren (Boehm et al. 2008). Möglicherweise wurde die Ausbreitung der Maispollen während des Feldversuchs durch die außergewöhnlichen klimatischen Bedingungen des Jahres 2003 (siehe Kap. 4.1.3.1 und 4.1.3.2) zusätzlich begünstigt (Gehrig 2006).

5.2.4 Vergleich der Pollensammler Sigma-2 und PMF

In der Literatur sind vergleichende Untersuchungen zur Sammelleistung verschiedener Pollensammler rar¹⁹⁵. Meist sind die Vergleiche deskriptiv und allgemein (Ogden et al. 1974,

¹⁹² Jones & Brooks (1950) geben die Entfernung nur in Reihen an (0-100 rods). Raynor et al. (1972) rechnen die Angaben von Jones & Brooks (1950) in Meter um (100 rods entsprechen demzufolge 503 m).

¹⁹³ Jones & Brooks (1950) zitieren eine Studie von Salamov (1940) aus der UdSSR, der eine Auskreuzungsrate von 0,21% in einer Entfernung von 160 Reihen (rods), d.h. $\sim 800 \text{ m}$ angibt.

¹⁹⁴ Siehe Computersimulation zur Pollenfreisetzung aus einem Feld unter <http://www.biosicherheit.de/de/mais/auskreuzung/147.doku.html>

¹⁹⁵ Auch der Verlässlichkeit von Pollensammlern (Vergleich baugleicher Typen) wurde bisher wenig Beachtung geschenkt: Giorato et al. (2003) testeten 2 baugleiche Geräte an einem Standort und erhielten Korrelationskoeffizienten von 0,87 bis 0,91.

Mullins & Emberlin 1997, Subiza 2001). Der Vergleich von Pollenanalysen beschränkt sich vorrangig auf unterschiedliche Lokalitäten (Hall 1990, Emberlin & Norris-Hill 1991, Leuschner 1999, Arobba et al. 2000, Bricchi et al. 2000), unterschiedliche Arten (Moreno-Grau et al. 2000, Kasprzyk et al. 2001, Rodríguez-Rajo et al. 2003, Syrigou et al. 2003) oder mehrere Jahresreihen (Leuschner et al. 2000, Aira et al. 2001, Jato et al. 2001a, Jato et al. 2001b, Frenguelli et al. 2002, Gonianakis et al. 2005).

Die Unterschiede zwischen der Sammelleistung der Pollensammler Sigma-2 und PMF, wie sie in Kap. 4.1.6 dargelegt sind, beruhen in erster Linie auf den unterschiedlichen Abscheideprinzipien (Sedimentation bzw. Filtration, siehe 1.4.7.1) sowie der geschützten bzw. ungeschützten Probenahme. Während beim Sigma-2 aufgrund der Bauform die Nass-Deposition nahezu ausgeschlossen werden kann, ist dies beim PMF nicht der Fall. Das bedeutet, dass zum einen durch den Niederschlag Pollen aus dem Filter herausgewaschen¹⁹⁶ / herausgeschlagen und zum anderen im Regenwasser suspendierte Pollen in das Filtermaterial eingebracht werden können. Trotzdem konnten signifikante Korrelationen beim Vergleich der Zählergebnisse von Sigma-2 und PMF hinsichtlich der Zielpollen nachgewiesen werden (siehe Tab. 4.24). Die Übereinstimmung zwischen Sigma-2 und PMF beruht v.a. auf den feldnahen Sammlern (siehe Tab. 4.25), d.h. den Sammlern mit einem Feldabstand ≤ 475 m (Raps) bzw. ≤ 170 m (Mais). Aufgrund der hohen Probenanzahl mit Pollenbelegungen unterhalb der Nachweisgrenze (siehe Kap. 4.1.5), können keine gesicherten Aussagen zu feldfernen Standorten getroffen werden. Der kombinierte Betrieb der Pollensammler Sigma-2 und PMF liefert zumindest für die Zielpollen im feldnahen Bereich Messwerte der Pollendepositionen, die miteinander in Bezug gesetzt werden können (siehe Tab. 4.24).

5.2.5 PCR-Analyse der PMF-Proben

Obwohl der Pollenmassenfilter PMF eine große Anzahl an Pollen akkumuliert – mehr als 1.000 Zielpollen (Raps oder Mais) wurden an 36 Standorten (Rapsversuch) bzw. 49 Standorten (Maisversuch) in der Gesamtprobe gemessen – war das Ergebnis der PCR-Analyse nicht zufriedenstellend (siehe Kap. 4.1.7). Dieses Ergebnis ist auf den ersten Blick überraschend in Anbetracht der Literatur, die beispielsweise über den Nachweis von DNA-Sequenzen mittels PCR auf der Grundlage eines Pollenkorns der Pflanzenarten *Hordeum vulgare* und *Secale strictum* berichtet (Petersen et al. 1996). Einschränkend ist zu bemerken, dass die beiden untersuchten Pollenkörner jeweils mehr als hundert Plastiden besaßen, die genomtragend waren und die DNA-Zielsequenz deshalb zahlreich im Pollenkorn vorlag. Als problemlos wird der Nachweis von Pollen in Honig durch Waiblinger et al. (1999) beschrieben. Allerdings enthält

¹⁹⁶ Durch die bauliche Gestaltung des PMF ist gewährleistet, dass das im Filter ablaufende Niederschlagswasser (mit den gelösten Pollen) in einer Sammelflasche aufgefangen wird und für die weitere Auswertung zu Verfügung steht (siehe Kap. 3.2.1.2).

lt. Waiblinger et al. (1999: 46) das Ausgangsmaterial für die PCR (10 g Honig) 20.000 bis 100.000 Rapspollen. Im Vergleich dazu ist die Anzahl im Ausgangsmaterial des PMF (1 ml¹⁹⁷) deutlich geringer: 50 bis 8.450 Raps- (Median: 800) und 270 bis 24.950 Maispollen (Median: 1.360). Der Einsatz (5 µl) in die PCR enthält unter optimalen Bedingungen¹⁹⁸ durchschnittlich nur 40 (min. 3 bis max. 423) Raps- und 68 (min. 14 bis max. 1.248) Maispollen. Theoretisch stand für jeden PCR-Versuch jeweils nur der 1/80 Teil der Gesamtpollenmenge zur Verfügung. In der Aufspaltung der Gesamtprobe – verbunden mit der starken Verringerung der Zielpollenanzahl – ist ein wesentlicher Grund für die Schwierigkeiten bei der PCR-Analyse zu sehen. Zusätzlich wirkten sich Verschmutzungen, Fremdpollen und in der Probe enthaltene Inhibitoren nachteilig aus (Beismann & Kuhlmann 2006: 84-92). Auch Fiebig et al. (2007) berichten von Problemen bei der PCR-Analyse, die sie auf eine nicht ausreichende Qualität und Quantität des Sammelguts des Pollenmassenfilters zurückführen. Nach einer neuen Studie konnten die Probleme, die bisher bei der PCR-Analyse von PMF-Proben auftraten, durch verbesserte Separationstechniken zur Reinigung der Proben und zur Anreicherung der Zielpollen gelöst werden, so dass der qualitative und quantitative Nachweis von transgener Mais-DNA in zwei unabhängigen Laboren gelang (Hofmann et al. 2008). Somit scheint der analytische Mangel bei der PCR-Analyse von Proben des effektiven Pollensammlers PMF beseitigt.

5.3 Feldversuche 2003

5.3.1 Auswahl repräsentativer Pollensammler-Standorte

5.3.1.1 Geschichtete Stichprobe

Allgemein anerkannt ist der Grundsatz, dass die Auswahl repräsentativer Standorte für ein Monitoring – gleich welcher Art – von grundlegender Bedeutung für die Aussagekraft der erhobenen Daten ist (SRU 1991: 27, WMO 1996: I.5-6). Deshalb sollte die Methode der Standortauswahl bei jedem Monitoringprogramm ausreichend dokumentiert sein. Ansonsten ist die Verwendbarkeit der Messergebnisse in Frage gestellt (Schmotz 1996: 23). Betrachtet man Untersuchungen zum Pollenflug auf mesoskaliger Ebene (siehe Tab. 1.4), fällt auf, dass die Methoden der Standortauswahl häufig nicht explizit dargelegt werden.

Ein möglicher Ansatz zur Auswahl von Messstationen für ein Pollenmonitoring stammt aus der Überwachung der Luftqualität. Dieser Ansatz beruht auf Ausbreitungsmodellen für Luftschadstoffe¹⁹⁹, die auf mehrjährigen Messreihen basieren. Der Fokus der Luftüberwachung ist die menschliche Gesundheit, meistens unter Betrachtung urbaner Räume. Da sich die Über-

¹⁹⁷ 2 Unterproben à 0,5 ml.

¹⁹⁸ 100%ige DNA-Extraktionseffizienz und völlig homogene DNA-Lösung.

¹⁹⁹ Wie etwa: Kohlenwasserstoffe (C_nH_m), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Schwefeldioxid (SO₂), Ozon (O₃), Stickstoffoxide (NO_x), Partikel (PM10) etc.

wachung der Luftqualität seit Jahrzehnten etabliert hat, zielen die meisten Verfahren auf eine Optimierung bestehender Messnetze ab (Chang & Tseng 1999, Clench-Aas et al. 1999, Baldauf et al. 2001, Mazzeo & Venegas 2008). Da im Gegensatz zu Luftschadstoffen über die Variablen der Ausbreitung von Pollen (Quellen, Freisetzung, Transport, Deposition) wenig bekannt ist und sehr wenige empirische Daten vorliegen, kommt dieser Ansatz zur Auswahl von repräsentativen Standorten nicht in Frage.

Aufgrund dieser Wissenslücke bietet sich eine Zufallsstichprobe zur Standortwahl der Pollensammler an. Da jedoch Informationen über (1) die Landschaft, (2) deren Einfluss auf die Verteilung der Pollenquellen und (3) die Pollenausbreitung vorhanden sind, wurde bei dieser Untersuchung die Methode der geschichteten Stichprobe (siehe Kap. 3.5.2) angewendet. Diese repräsentative Stichprobennahme bietet sich an, wenn für die Fragestellung relevantes Vorwissen über das Gebiet vorliegt (Bortz 1993). Dieses Vorwissen wurde aus der Literatur, aus geowissenschaftlichen Datensätzen, aus Vorversuchen und aus Geländebegehungen gewonnen (siehe Kap. 1.4.9) und diente der Auswahl der Strata (siehe Kap. 3.5.2). Die Relevanz der verwendeten Strata (Kap. 4.1.1.2) und die Repräsentativität der Standorte hinsichtlich des Feldabstands (Kap. 4.1.1.5) wurde nachgewiesen²⁰⁰. Das bedeutet, dass die Pollensammler-Standorte (Rapsversuch) nicht nur für die drei Strata der geschichteten Stichprobe, sondern auch für eine weitere Determinante (den Abstand der Pollensammler zum nächsten Feld), die für die Pollendeposition von Bedeutung ist, repräsentativ sind.

5.3.2 Kartierung der Raps- und Maisfelder

Pflanzen als Emittenten von Pollen sind – im Gegensatz zu Schadstoffemissionen aus Industrie, Gewerbe, privaten Haushalten und selbst Verkehr – räumlich nicht leicht zu erfassen. Dies betrifft insbesondere Wild-, aber auch Kulturpflanzen. Allerdings ist diese Information essentiell, wenn von den Pollenmessungen Aussagen über die Herkunft der Pollen abgeleitet werden sollen. Die räumliche Verteilung der Pollenquellen können Satellitenbilder, Vegetationskarten (Kawashima & Takahashi 1995, Hidalgo et al. 2002) oder Kartierungen (Menzel & Born 2004) liefern.

5.3.2.1 Felderkartierung

Die Kartierung der Raps- und Maisfelder im Jahr 2003 erfolgte im Gelände mit Orthofotos als Kartierungsgrundlage. GPS-Geräte mit ausreichender Genauigkeit zur Erleichterung der Positionsbestimmung standen für die Kartierer nicht in ausreichender Stückzahl zu Verfügung, weshalb die Abgrenzung der Felder nicht gänzlich fehlerlos erfolgte, wie durch ein hochaufgelöstes Satellitenbild aufgedeckt wurde (siehe Kap. 4.1.2.2 und Abb. 4.5). Deshalb sollte in

²⁰⁰ Dies gilt nur bedingt für die Pollensstandorte des Maisversuchs.

weiträumigen oder unübersichtlichen Agrarlandschaften die Kartierung mit Unterstützung von GPS erfolgen. Denn grundsätzlich gewährleistet nur die Kartierung vor Ort aktuelle, präzise, bewölkungsunabhängige und zeitnahe Ergebnisse über die Landnutzung. Ein begrenzender Faktor für die Felderkartierung ist jedoch die Fläche des Untersuchungsgebietes. Größere Gebiete (>250 km²) lassen sich nicht mit vertretbarem finanziellen und zeitlichen Aufwand erfassen. Möglicherweise können zukünftig die räumlichen Daten aus dem „Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem“ (InVeKoS) Auskunft über die schlaggenauen Anbauverhältnisse²⁰¹ geben (InVeKoSDG 2004). Die Anfrage beim Amt für Landwirtschaft und Forsten Dachau / Fürstenfeldbruck / Landsberg und beim StMLF ergab, dass für das Jahr 2003 noch keine digitalen Daten für das Untersuchungsgebiet im InVeKoS vorlagen²⁰².

5.3.2.2 Satellitenbilddauswertung

Vor mehr als 20 Jahren zeigte Wright (1985), dass mittels LANDSAT-Daten Rapsfelder kartiert werden können. In neueren Untersuchungen wird in Hinblick auf die Problematik der Auskreuzung zwischen Raps und verwandten Wildarten versucht, mit Hilfe von Fernerkundung und GIS mögliche Standorte von Hybriden zu ermitteln (Davenport et al. 2000, Elliott et al. 2004). Eine grundsätzliche Problematik der Fernerkundung ist, dass aufgrund der unterschiedlichen Standortbedingungen und Entwicklungsstadien der Pflanzen die spektrale Reflexion gleicher Pflanzenbestände innerhalb einer Szene variiert und – abgesehen von atmosphärischen Einflüssen – die Klassifizierung gleicher Bestände erschwert (Albertz 2001). Deshalb empfehlen Lillesand & Kiefer (2000) die Verwendung mehrerer Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten eines Jahres. Aber selbst unter optimalen Bedingungen werden höchstens 82-92% der Rapsfelder als „Raps“ klassifiziert (Wright 1985, Davenport et al. 2000, Laue 2004). Relativ einfach gestaltet sich die Identifizierung von Raps während der Blühphase. Die Verwechslungsgefahr mit anderen Landnutzungen (v. a. Kulturpflanzen) ist höher, wenn der Raps nicht blüht, und besonders schwierig ist die Klassifizierung, wenn die Bestände noch nicht geschlossen sind. Laue (2004) berichtet von einer LANDSAT-Szene vom 3. April 2002, die zu einer nicht tolerierbaren Fehlklassifizierung beim Raps führte. Wie sich zeigte, trifft dies auch für die LANDSAT-7-Szene des Untersuchungsgebietes zu (Aufnahmezeitpunkt 1. April 2003), die nicht für die Klassifizierung von Rapsfeldern geeignet war.

²⁰¹ Einschränkung anzumerken ist, dass die exakte Lage der Felder im InVeKoS nicht in jedem Fall erfasst wird, da mehrere Flurstücke, die einheitlich – d.h. von einer Person – bewirtschaftet werden, zu einem Feldstück zusammengefasst werden.

²⁰² Schmidtner, A. (Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (Referat B4), München): Auskunft per E-Mail vom 04.08.2005.

Ein weiterer Nachteil der LANDSAT-7-Szene besteht in der relativ groben räumlichen Auflösung von 25 m²⁰³. Lillesand & Kiefer (2000: 209-212) empfehlen zur schlaggenauen und kulturspezifischen Abgrenzung landwirtschaftlich genutzter Flächen Satelliten- oder Luftbilder mit einer Auflösung von 1-5 m (Level III nach USGS Land Use/Land Cover Classification System). Die Mindestgröße der Rapsfelder, die mittels LANDSAT-7 klassifiziert werden können, gibt Laue mit 2 ha an (Laue 2004: 17, 154). Im Untersuchungsgebiet liegen jedoch 44% der kartierten Rapsfelder unter dieser Grenze. Zudem lässt sich die Geometrie eines Feldes – bei einer kleinteiligen Parzellenstruktur, wie sie im Untersuchungsgebiet vorherrscht – aus einem 25m-Raster nicht präzise ableiten.

Die Ergebnisse der Satellitenbilddauswertung zeigen, dass im Jahr 2003 die Fernerkundung die Kartierung der Rapsfelder²⁰⁴ im Untersuchungsgebiet nicht ersetzen konnte. Allenfalls ergänzende Informationen konnten aus den beiden vorhandenen Szenen gewonnen werden. Grundsätzlich kann die Fernerkundung einen wichtigen Beitrag zur Detektierung von Kulturpflanzenbeständen leisten. Mehrere Satelliten (z.B. LANDSAT, IRS, SPOT, ASTER, IKONOS) stehen zur Verfügung und können aktuelle Daten liefern, die sich – vorausgesetzt das Wetter (Wolken) lässt dies zu – entsprechend auswerten lassen.

Aufgrund der o.g. Bedingungen sind zur Bearbeitung der Fragestellung hochauflösende, hyperspektrale Fernerkundungsdaten besonders gut geeignet. Mit dieser Art von Fernerkundungsdaten (Auflösung: 2 x 2 m, 70 Bänder zwischen 400-970 nm) konnten Lu et al. (2007) in komplexen landwirtschaftlichen Nutzungsstrukturen die Anbauflächen von verschiedenen Pflanzenarten und -artengruppen²⁰⁵ mit einer Genauigkeit von 79,5-100% klassifizieren.

5.3.2.3 *Abstandsanalyse und Koexistenz von GVO- und konventioneller Landwirtschaft*

Wie in Kap. 4.1.2.3 gezeigt wurde, lag im Jahr 2003 innerhalb der landwirtschaftlichen Nutzfläche des Untersuchungsgebietes die durchschnittliche Entfernung zum nächsten Rapsfeld bei 280 Meter und zum nächsten Maisfeld bei 160 Meter. Die umfangreiche Studie von Ireland et al. (2006) an über 300 Maisfeldern in den USA und Kanada zur (unerwünschten) Einkreuzung von Pollen benachbarter Maisfelder in Maisfelder zur Saatgut-Herstellung zeigt, dass trotz Isolationsabständen zwischen 10-180 m und einer Mantelsaat mit Mais (0-32 Reihen) in der Feldmitte – d.h. 200 m im Saatgutfeld – die Auskreuzungsrate in allen drei Versuchsjahren im Mittel über 0,7% lag (in zwei Versuchsjahren sogar über 1,1%). Die Ergebnisse der Studie belegen, dass die Einkreuzungen durch Erhöhung der Isolationsabstände und Verbreiterung der Mantelsaat reduziert werden kann. Dagegen ließ sich die allgemeine An-

²⁰³ Der vorliegende LANDSAT-7-Datensatz hat eine Auflösung von 25 x 25 m (MS) und nicht 30 x 30 m (MS) wie Lillesand & Kiefer (2000, 379) und Albertz (2001, 49) angeben.

²⁰⁴ Für die Kartierung der Maisfelder eignen sich die o.g. Satellitenbilder nicht, da der Mais im Untersuchungsgebiet zu den Zeitpunkten noch nicht ausgesät war bzw. noch keine geschlossenen Bestände gebildet hatte.

²⁰⁵ Kürbis (100%), Tagetes (98,8%), Wassermelone (97,9%), Gras (97,1%) und Bäume (79,5%).

nahme nicht beweisen, dass durch Verbreiterung der Mantelsaat der Isolationsabstand reduziert werden kann und sich zugleich das Risiko von Auskreuzungen nicht erhöht. Zur Untersuchung von Weber et al. (2005), die den GVO-Anteil in (konventionellen) Silo- und Körnermais in Abhängigkeit von der Entfernung zu einer Bt-Mais-Fläche untersuchten, ist zum Versuchsaufbau kritisch anzumerken, dass (1) an allen 30 Standorten das Bt-Maisfeld innerhalb eines konventionellen Maisfeldes stand und (2) überlagernde Effekte mehrerer Bt-Maisfelder nicht berücksichtigt wurden und insofern der Versuchsaufbau nicht den realen Anbaubedingungen im Sinne der Frage nach der Koexistenz von GVO-Mais und konventionellem Mais entspricht. Sie kommen zu dem Schluss, dass entweder durch separate Beerntung eines 20 m breiten Randstreifens oder bei entsprechender Felddtiefe (mindestens 90 m Felddbreite) der GVO-Gehalt der (übrigen) Erntepartie unter den Grenzwert von 0,9% gedrückt werden kann.

Die von Barth et al. (2003, 138) zusammengetragenen Empfehlungen für Sicherheitsabstände zwischen gentechnikfreien Feldern und Feldern mit GVO-Anbau liegen – bei einer angestrebten Einkreuzungsrate <0,5% – beim Raps zwischen 10 und 600 m und beim Mais zwischen 200 und 1000 m. Die Gentechnik-Pflanzenerzeugungsverordnung (GenTPflEV 2008) legt für den Anbau von GV-Mais einen Abstand von 150 m zu konventionellem und von 300 m zu Bio-Maisanbau fest²⁰⁶. Die Abstandsanalyse zeigt, dass die Einhaltung von Abstandsregelungen in dieser Größenordnung in der Realität nicht einfach umzusetzen ist, denn die festgelegten Isolationsabstände liegen im Bereich der durchschnittlichen Entfernung zum nächsten Feld (siehe Tab. 4.11). Pascher & Dolezel (2005) haben in vier Szenarien²⁰⁷ beispielhaft die Isolationsabstände von Raps (200 bzw. 500 m) und Mais (200 bzw. 300 m) auf jeweils drei reale Agrarlandschaften in Österreich übertragen. Neben den Simulationsparametern GVO-Anteil, Feldverteilung und Isolationsabstand wirkte sich der Naturraum erheblich auf die Ergebnisse aus. Selbst in einer Region mit Raps als Nebenkultur war bereits bei einem 10%igen GVO-Anteil der Rapsfelder (zufällige Verteilung) und einem Isolationsabstand von nur 200 m der uneingeschränkte Rapsanbau auf 36% der landwirtschaftlichen Nutzfläche nicht mehr möglich. Bei einem 50%igen Anteil an GVO-Feldern (Raps oder Mais) und einer freien Verteilung der GVO-Felder ist die konventionelle (und ökologische) Landwirtschaft auf den gesamten restlichen Ackerflächen faktisch ausgeschlossen und somit keine Koexistenz möglich.

²⁰⁶ Ähnliche pflanzenartsspezifische Vorgaben für weitere Kulturpflanzen sind in der Anlage zur GenTPflEV (2008) bisher nicht enthalten.

²⁰⁷ Annahmen für die vier Szenarien: 10% oder 50% der Felder mit GVO-Saatgut bestellt und eine zufällige oder geclusterte Verteilung der GVO-Felder.

5.4 Räumliche Analysen zur Untersuchung der Pollendeposition (mikroskalig)

5.4.1 Abstand zwischen Pollensammler und nächstem Feld

Die in dieser Studie erbrachten Nachweise von windinduziertem Rapspollentransport bis zu einer Entfernung von 900 m sind nicht ungewöhnlich, wie Studien z.B. aus England, Australien und Kanada zeigen (Timmons et al. 1995, Thompson et al. 1999, Hall et al. 2000, Rieger et al. 2002, Beckie et al. 2003), die Ausbreitungen von Rapspollen bis zu Entfernungen zwischen 400 m und 4 km dokumentieren. Der Nachweis, dass die Maispollendeposition bis zu einer Entfernung von über 600 m in ihrer Intensität mit der Rapspollendeposition vergleichbar ist, stellt eigentlich keine neue Erkenntnis dar, wie die Literaturrecherche zur Maispollenausbreitung durch Feil & Schmid (2001) zeigt. Trotzdem hält sich – wohl in Kenntnis der Versuche von Raynor et al. (1972)²⁰⁸ – die Meinung, dass Maispollen nur in unmittelbarer Umgebung eines Feldes nachweisbar sind. Dieser Aussage muss nach den Ergebnissen dieser Studie, die auf realen Anbaubedingungen und nicht nur auf landwirtschaftlichen Feldversuchen fußt – widersprochen werden.

An die in den Abbildungen Abb. 4.19 bis Abb. 4.21 dargestellten Messwerte lassen sich Ausbreitungskurven (inverse Potenzfunktionen oder (negative) logarithmische Funktionen) anpassen, wie sie aus Auskreuzungsversuchen und Pollenmessungen von Raps und Mais im Freiland oder aus der Theorie der Ausbreitungsberechnung bekannt sind (Raynor et al. 1972, Moseholm et al. 1987, Okubo & Levin 1989, Thompson et al. 1999, Staniland et al. 2000, Ramsay et al. 2003). Die Streuung der Messwerte um die angepasste Ausbreitungskurve – wie sie auch in anderen Studien festgestellt wurde (z.B. Thompson et al. 1999, Ramsay et al. 2003) – muss auf dem Einfluss weiterer Faktoren beruhen und lässt sich nicht durch die Entfernung der Messstandorte zum nächsten Feld erklären²⁰⁹. Die geringe Abhängigkeit der Messwerte von der Entfernung zum nächsten Feld wird bei den Rapsproben des Sigma-2 deutlich (siehe Abb. 4.18). Über dieses Phänomen berichten bereits Thompson et al. (1999), die – für Messstandorte zwischen 150 bis 4.000 m zum nächsten Rapsfeld – keine Korrelation der gemessenen Pollendeposition mit der Entfernung zum nächsten Feld feststellen.

Weitere wichtige Faktoren, die die Pollendeposition beeinflussen und über die Betrachtung des Abstands zwischen Pollenquelle und Messort hinausgehen, werden im folgenden Kapitel besprochen.

²⁰⁸ Die Versuche von Raynor et al. (1972) stammen aus den Jahren 1963 und 1964. Das Maisfeld hatte eine Fläche von ca. 263 m² und der Mais erreichte nur eine Höhe von 1,2 bis 1,4 m (Raynor et al. 1972: 421).

²⁰⁹ Über eine große Varianz von Auskreuzungsraten und –mustern unter realen kanadischen Anbaubedingungen (22 Rapsfelder zwischen 10-64 ha) berichten Beckie et al. (2003).

5.4.2 Einfluss der Flächengröße, Richtung und Entfernung der Felder im Umkreis der Pollensammler auf die Pollendeposition - Berechnungen mit dem Pollendepositionsindex (PDI)

Als wichtige meteorologische Einflussfaktoren für die Flugphase des Pollens nennen Rodríguez-Rajo et al. (2003) Niederschlag, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Windturbulenz. Insbesondere für Pollensammler mit einer langen Expositionsdauer von mehreren Tagen oder Wochen (wie Sigma-2 und PMF) ist – aufgrund des Fokus auf die Gesamtdeposition – die stündliche oder tägliche Varianz der Pollendeposition nicht von Belang. Der Einfluss kurzfristiger Ereignisse wie z.B. Regen, der für wenige Stunden den Pollen aus der Luft entfernt, ist deshalb nicht von großer Bedeutung. Entscheidend ist – abgesehen von der Entfernung zur nächsten Pollenquelle – die Frage nach der Windrichtung (und damit indirekt nach der Lage der Pollenquellen), da sie die Pollenkonzentration der anströmenden Luft bestimmt, wenn in der Umgebung unterschiedliche Pollenquellen zufällig verteilt sind.

Als Ansatz zur Erklärung der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Streuung der Messwerte der Pollendeposition wurde der Einfluss des Windes, insbesondere der Windrichtung untersucht. Durch die während des Feldversuchs vorherrschenden Windrichtungen²¹⁰ ist davon auszugehen, dass Pollensammler im Leebereich von Felder stärker beeinflusst wurden. In der Literatur sind je nach den lokalen geografischen und klimatischen Verhältnissen meist signifikante negative oder signifikante positive Korrelationen der Windrichtungen mit der Pollenkonzentration/-deposition beschrieben (Aira et al. 2001, Ribeiro et al. 2003, Rodríguez-Rajo et al. 2003, Palacios et al. 2007).

Allerdings ist in der Realität zum einen zu berücksichtigen, dass die an einem Standort vorherrschende Windrichtung nicht zwangsläufig auf andere Standorte eines Untersuchungsgebietes übertragbar ist. Wie Ma et al. (2004) anmerken, kann trotz geringen Abstands zwischen den Standorten²¹¹ die vorherrschende Windrichtung während des Versuchszeitraums²¹² sehr unterschiedlich sein²¹³. Zum anderen ist zu berücksichtigen, dass die Pollenausbreitung nicht ausschließlich in Windrichtung und zudem nicht am stärksten in Windrichtung erfolgen muss²¹⁴. Und letztendlich ist zu berücksichtigen, dass lokale turbulente Windströmungen möglicherweise einen stärkeren Einfluss auf die Pollenausbreitung haben als die über ein Zeitintervall gemittelte Hauptwindrichtung (Ma et al. 2004).

Bezogen auf den Feldversuch 2003 kann weder belegt noch ausgeschlossen werden, dass die Winddaten der Referenzstation des DWD in Landsberg/Lech (vgl. Kap. 4.1.3.3) uneinge-

²¹⁰ Raps: Westen und Süden, Mais: Westen, Nordwesten, Norden und Süden; siehe Kap. 4.1.3.3

²¹¹ Ma et al. (2004): Drei Versuchsfelder innerhalb von 3 km.

²¹² Ebd.: Zeitraum der Maisblüte.

²¹³ Ebd.: Südwesten, Osten, Nordwesten.

²¹⁴ Ebd.: Bei einer dreijährigen Versuchsreihe wurde in einem Jahr die höchste Auskreuzungsrate entgegen der Hauptwindrichtung gemessen.

schränkt auf alle 50 Messtandorte übertragbar sind²¹⁵. Ebenfalls ist die Pollenausbreitung in alle Himmelsrichtungen (nicht nur die Hauptwindrichtung) möglich und der Einfluß von Turbulenzen unklar. Da keine Anemometer an allen 50 Pollensammler-Standorten aufgestellt werden konnten, kann nur von dem Ansatz einheitlicher Windverhältnisse im gesamten Untersuchungsgebiet ausgegangen werden.

Da für das Untersuchungsgebiet die Messwerte der Pollendeposition praktisch nur als singulärer Wert für den gesamten Blühzeitraum vorliegen, sind direkte Vergleiche mit den Windrichtungsdaten nicht möglich. Statt der Windrichtung, von der man letztendlich Aussagen zur Lokaliät der Pollenquellen erwartet, wurde direkt die Flächengröße der Felder – unterteilt nach den Himmelsrichtungen in acht 45°-Kreissektoren – im Umkreis der Messstandorte in Bezug zur Pollendeposition am Messstandort gesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass es zu signifikanten Korrelationen der Messwerte der Pollendeposition mit der summierten Feldfläche eines Kreissektors kommt, wenn der Kreissektor in der Hauptwindrichtung des Messstandortes liegt. Die in Kap. 4.2.3 dargestellten Ergebnisse zeigen zudem höhere Korrelationen (Raps: 0,624** (Sigma-2), 0,738*** (PMF), Mais: 0,689*** (Sigma-2), 0,735*** (PMF)) mit den Messwerten der Pollendeposition als Studien, die den Einfluss der Windrichtung auf die Pollenkonzentration/-deposition untersuchen²¹⁶.

Als Gründe für die verbleibende Varianz der Messwerte sind denkbar: (1) Eine Abweichung der lokalen Windverhältnisse am Messstandort von den Windverhältnissen an der DWD-Referenzstation. (2) Die maßgebliche Pollendeposition je Standort ist möglicherweise auf ein enges Zeitfenster beschränkt und der Mittelungszeitraum der Winddaten ist demgegenüber zu lang. (3) Die Pollenausbreitung durch Wind aus Windrichtungen, die nicht zu den Hauptwindrichtungen zählen. (4) Eine Beeinflussung der Pollenausbreitung und Pollendeposition durch turbulente und vertikale Windströmungen (Helbig et al. 2004: 16-17, Boehm et al. 2008), die zu „Ferntransport“ von Pollen und letztendlich zur Immission von Pollen aus entfernt liegenden Feldern führen kann.

²¹⁵ Der Einsatz von zwei mobilen Windmessgeräten im Untersuchungsgebiet als Vergleichsmessungen für die DWD-Referenzstation scheiterte aus technischen Gründen (siehe Kap. 3.4.2.1).

²¹⁶ Aira et al. 2001 ($r_s = -0,285^{***}$ bis $0,356^{**}$ [Bezugsgröße: Wind Run (Windrichtung und Windgeschwindigkeit)], Ribeiro et al. 2003 ($r_s = -0,28$ bis $0,69^{**}$), Rodríguez-Rajo et al. 2003 ($r_s = -0,288^{**}$ bis $0,262^{**}$), Palacios et al. 2007 (positive, negative und keine signifikante Korrelation, ohne Angabe von Korrelationskoeffizienten).

5.5 Räumliche Analysen zur Untersuchung der Pollendeposition (Regionalisierung)

5.5.1 Geostatistische Modellierung

Die Geostatistik umfasst vorrangig räumliche Interpolationsverfahren zur flächendeckenden Darstellung von punktuell erhobenen geowissenschaftlichen Phänomenen. Wenn deterministische Modelle nicht erklären können, wie sich ein Phänomen zwischen verschiedenen Messorten verhält, sind statt dessen laut Isaaks & Srivastava (1989: 197) besonders geostatistische Ansätze gefragt. Nach Gübefeldt (1997: 14) bieten sich diese Verfahren an, wenn – abgesehen von einer raumdistanziellen Abhängigkeit – keine zusätzlichen Determinanten für die Verteilung des betrachteten Phänomens bekannt sind. Obwohl dies im vorliegenden Fall nicht zutrifft (Determinanten, siehe Abb. 1.2), wurden Versuche zur Anwendung von Kriging-Verfahren unternommen. Da nach Journel & Huijbregts (1978: 194) mindestens 30-50 Wertepaare je Abstandsvektor („Lag“) für das Semivariogramm benötigt werden und der maximale Abstandsvektor kleiner als die halbe Länge des Untersuchungsgebietes sein sollte, wurden die Messwerte der Sigma-2-Sammler von vornherein ausgeschlossen und ausschließlich die Messwerte der PMF-Sammler ($n = 44$ bzw. 49) verwendet. Es ist zu beachten, dass der räumlichen Interpolation Grenzen gesetzt sind, wenn eine geringe Anzahl an Messpunkten vorliegt oder die Entfernung zwischen den Messpunkten sehr groß ist. In solchen Fällen besteht möglicherweise keine Autokorrelation der Messwerte, die jedoch Voraussetzung für eine solide geostatistische Interpolation ist (Brus & de Gruijter 1997: 38). Wie schon in Kapitel 4.2.5 gezeigt, waren die Rahmenbedingungen für Kriging-Verfahren – bei einem durchschnittlichen Abstand der Pollensammler von ca. 1,3 km (siehe Tab. 4.5) – nicht gegeben und es konnten keine verlässlichen Interpolationsergebnisse erzielt werden. Es ist zu konstatieren, dass für ein räumlich (und zeitlich) so variables Phänomen wie die Pollendeposition ein sehr engmaschiges Messnetz²¹⁷ notwendig wäre, um auf dessen Grundlage das Kriging-Verfahren erfolgreich anzuwenden. Ansonsten kommt – wie Houlding (2000) es formuliert – der Nachteil der Geostatistik zum Tragen, in Form von gemittelten Werten über einer Diskontinuität. Übertragen auf diese Untersuchung ist folgende Situation möglich: In direkter Linie zwischen zwei Pollensammlern liegt ein Feld, das auf keinen der beiden Pollensammler einen maßgeblichen Einfluss ausübt. Die interpolierten Werte (auf Grundlage der zwei Sammler) sind im Bereich des Feldes offensichtlich falsch, da im Feld und in der Feldumgebung von einer hohen Pollendeposition auszugehen ist.

²¹⁷ Aus den Ergebnissen der PDI-Berechnung zur Reichweite des Einflusses benachbarter Felder auf die Pollendeposition (siehe Kap. 4.2.3.3) kann abgeleitet werden, dass die notwendige Anzahl für das Untersuchungsgebiet (landwirtschaftliche Nutzfläche) 209 Rapspollensammler ($1,27$ Sammler / km^2) bzw. 1307 Maispollensammler ($7,96$ Sammler / km^2) betragen würde.

Zwei Ansätze zur Berücksichtigung von zusätzlichen Daten zur Verbesserung der Kriging-Interpolation sind das *Cokriging* und das *Kriging with External Drift* (Deutsch & Journel 1998, Wackernagel 2003). Dabei wird die primäre (zu interpolierende) Variable durch eine/mehrere sekundäre Variable(n) ergänzt, die mit der primären Variablen stark korreliert. Dieses Vorgehen bietet sich besonders dann an, wenn die Stichprobe der sekundären Variablen deutlich größer bzw. ihre räumliche Auflösung deutlich höher ist als die zu schätzende primäre Variable²¹⁸ (Isaaks & Srivastava 1989, Wackernagel 2003). Leider gibt es für das Untersuchungsgebiet und die primäre Variable „Pollendeposition“ keinen korrelierenden, hochaufgelösten, sekundären Datensatz, der das Cokriging oder das Kriging with External Drift ermöglichen würde.

Möglicherweise sind die oben aufgezeigten Schwierigkeiten der Grund, warum nur wenige Studien zur geostatistischen Interpolation von Pollendepositions- oder Pollenkonzentrationsmessungen vorliegen. Cundill (1998) stellt auf der Grundlage von zehn Pollensammlern Verteilungskarten der Deposition von Rapspollen ohne Angabe des Interpolationsverfahrens für ein Untersuchungsgebiet von ca. 2,4 km² dar. Eine lange Tradition hat die Verwendung von Kriging-Verfahren hingegen in den Bereichen Bergbau/Geologie, Bodenkunde, Hydrologie, Ozeanographie, Klimatologie u.a. zur Interpolation von Messwerten abiotischer Parameter der Umweltkompartimente (Boden, Wasser, Klima/Luft, Relief) (siehe Armstrong 1989a, 1989b, Heinrich 1994, Forster 1994, Mues 2000). Dies hängt sicherlich zu einem Großteil mit der Datenverfügbarkeit zusammen, die aus den Wetteraufzeichnungen seit Ende des 18. Jahrhunderts und dem Aufbau von Umweltmessnetzen seit den späten 1960er Jahren resultiert (SRU 1991).

5.5.2 GIS-gestützte Regionalisierung – Entfernung zum nächsten Feld

Ein bedeutender und auch in Zukunft bestehender Vorteil der Regionalisierung mittels GIS-basierter Abstandsberechnung besteht in der sehr kurzen Berechnungsdauer. Selbst bei einem sehr feinen Raster (1 x 1 m) und einer dementsprechend großen Anzahl von Rasterzellen (in diesem Fall 256 Mio.) liegt das Ergebnis nach wenigen Minuten Rechenzeit vor. Durch eine klassifizierte Darstellung (z.B. nach Quartilen, Perzentilen, einheitlichen Intervallen oder der Standardabweichung) oder durch Re-Klassifizierung der Werte (z.B. Rangstufen), lassen sich Klassen unterschiedlicher Entfernungen bilden und damit die potentiellen Pollendepositionen räumlich verorten (siehe Abb. 4.31). Nachteile ergeben sich daraus, dass: (1) Kein direkter und allgemein gültiger Rückschluss von der Entfernung auf die tatsächlichen Pollendepositionen

²¹⁸ Ein Beispiel zur Anwendung des Kriging with External Drift ist die Interpolation von Lufttemperatur- oder Niederschlagsmessungen mittels der sekundären Variable „Geländehöhe“, die aus einem hochaufgelösten digitalen Geländemodell übernommen werden kann. Zuvor ist der Nachweis eines linearen Zusammenhangs zwischen primärer und sekundärer Variablen nachzuweisen.

on möglich ist. (2) Der Einfluss mehrerer Felder unberücksichtigt bleibt, da die Entfernung zum nächsten Feld unabhängig davon ist, wie viele weitere Felder sich in der Umgebung befinden. (3) Abgesehen vom Abstand zum nächsten Feld, keine weiteren Faktoren berücksichtigt werden und damit die Aussagekraft der Ergebnisse mit zunehmender Entfernung zum Feld abnimmt, da der Einfluss anderer Faktoren kontinuierlich steigt (Windrichtung, Topographie etc.). Aus diesen Gründen kann dieser Ansatz zur Regionalisierung der Pollendeposition zu nicht mehr als einer groben Abschätzung der tatsächlichen Pollendeposition führen.

5.5.3 GIS-gestützte Regionalisierung – Pollendepositionsindex

Da der geostatistische Ansatz zur flächenhaften Darstellung der Pollendeposition im Untersuchungsraum nicht gelang (siehe Kap. 5.5.1), wurde aufgrund der Erkenntnisse, die mit dem Pollendepositionsindex (PDI) auf mikroskaliger Ebene gewonnen wurden (siehe Kap. 5.4.2) für das Untersuchungsgebiet eine flächendeckende Berechnung des PDI auf Grundlage eines feinen Rasters (Zellgröße: 5 x 5 m) für Raps- und Maispollen vorgenommen.

Mit diesem Ansatz ist die flächendeckende Darstellung der Pollendeposition für das Versuchsjahr 2003 für Raps- und Maispollen möglich. Das Upscaling der Messwerte mit Hilfe des PDI ergibt neue Erkenntnisse zur flächenhaften Verteilung der Pollendeposition im Untersuchungsgebiet. Die Visualisierung der flächenhaften Pollendeposition (siehe Abb. 4.32 mit Rapspollen) zeigt Gebiete mit besonders hoher und niedriger Pollendeposition, „Hot Spots“ der Pollendeposition (besonders im Westen und Nordwesten des Untersuchungsgebietes), Überlagerungseffekte durch eng nebeneinanderliegende Felder und die erhöhte Pollendeposition im Leebereich der Felder.

Damit erfüllt die GIS-gestützte Regionalisierung mittels PDI die Funktion eines einfachen Ausbreitungsmodells, das als Input-Daten die Geometrie der Pollenquellen (Felder) und Angaben zur Häufigkeitsverteilung der Windrichtung verwendet und ggf. über eine Ausbreitungsfunktion die Flugeigenschaften des Pollens berücksichtigt.

5.5.4 Ausbreitungsmodell AUSTAL2000

Wie Di-Giovanni & Kevan (1991: 1163) und VDI (2000: 13) ausführen, handelt es sich bei dem Lagrangeschen Partikelmodell – wie es AUSTAL2000 verwendet – um den exaktesten Ansatz zur Modellierung der physikalischen Vorgänge im Luftstrom, die auf ein Pollenkorn von der Emission über die Transportphase bis zur Deposition einwirken. Hehl et al. (2005) verwenden den Ansatz zur Berechnung der Bioaerosol-Exposition in der Nähe von Tierhaltungsanlagen. Aylor et al. (2006) und Boehm et al. (2008) nutzen ein Partikelmodell, um

Konzentrationsmessungen von Maispollen mit stationären und mobilen²¹⁹ Pollensammlern an einem bzw. mehreren Maisfeld(ern) zu modellieren. Die Berechnungen zur Ausbreitung von Pollen – in Verbindung mit der Erhebung empirischer Daten – beschränken sich meist auf die direkte Umgebung einer Pollenquelle (Klein et al. 2003: 0,014 km², Loos et al. 2003: 0,04 km², Hofmann et al. 2005²²⁰: 64 km², Aylor et al. 2006: 1 km², Boehm et al. 2008: 4 km²). Weitere Ausbreitungsmodelle für Pollen liegen vor, sind allerdings nicht durch empirische Daten abgesichert (Kawashima & Takahashi 1995²²¹, Kawashima & Takahashi 1999²²², Hidalgo et al. 2002, Helbig et al. 2004, Schueler & Schlünzen 2006). Insofern stellt der hier unternommene Versuch, die Pollendeposition unter möglichst realitätsnahen Bedingungen (Verwendung eines Oberflächenmodells, meteorologischer Stundenwerte und 3D-Windfelder) mit einem Lagrangeschen Partikelmodell für über 380 Raps- und über 870 Maisfelder in einem Gebiet von 256 km² zu berechnen, einen neuen Schritt dar. Wie in den Kap. 3.7.4 und 4.2.8 dargelegt, waren einige Einschränkungen bei der Definition der Eingangsparameter vorzunehmen, um überhaupt einen erfolgreichen Rechendurchgang zu gewährleisten. Zudem konnten Testläufe zur Kalibrierung der Eingabeparameter nur für ein kleinflächiges Teilgebiet erfolgen (Beismann & Kuhlmann 2005). Ein entscheidendes Manko ist sicherlich das grobe Berechnungsraster (100 x 100 m), wodurch die Pollendeposition abrupt von einer Rasterzelle zur nächsten abnimmt (siehe Abb. 4.33). Dies zeigt sich besonders beim Vergleich mit dem Ergebnis der Ausbreitungsberechnung mittels PDI (siehe Abb. 4.32). Die Darstellung einer gleichmäßigen Ab- oder Zunahme der Pollendeposition ist aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung des Phänomens mit dem 100m-Raster nicht möglich. Trotz allem liegt die Übereinstimmung zwischen der berechneten und der gemessenen Maispollendeposition (Spearman-Rangkorrelationskoeffizient $r_s = 0,60^{***}$ bzw. $0,67^{***}$, siehe Tab. 5.2) in einem ähnlichen Bereich, wie ihn Aylor et al. (2006) für die Korrelation der Maispollenkonzentration (berechnet vs. gemessen) angeben (Pearson-Korrelationskoeffizient $r = 0,62^{***}$).

5.5.5 Vergleich der Modelle zur Regionalisierung der Messwerte der Pollendeposition

Da bisher nur wenige Untersuchungen zur Pollenausbreitung von Kulturpflanzen auf mesoskaliger Ebene vorliegen (Thompson et al. 1999, Rieger et al. 2002, Ramsay et al. 2003, Devaux et al. 2005) besteht weiterhin Forschungsbedarf in dieser Richtung. Aussagekräftige Modelle zur Regionalisierung von Pollendeposition oder -konzentration – sei es auf Grundla-

²¹⁹ Exposition von zwei bis vier Petrischalen, die unterhalb der Tragflächen eines Modellflugzeugs senkrecht zum Luftstrom befestigt waren, während der Flugphase.

²²⁰ Leider geben Hofmann et al. (2005) keinen direkten Vergleich der berechneten mit der gemessenen Pollendeposition an.

²²¹ Nur ein Bruchteil des Untersuchungsgebietes (ca. 4%) ist mit Pollensammlern bestückt.

²²² Nur ein sehr geringer Teil des Untersuchungsgebietes (ca. 10%) ist mit Pollensammlern bestückt.

ge empirischer Daten oder aufgrund von Szenarien – werden in Zukunft von zunehmender Bedeutung sein.

Tab. 5.2: Korrelation der gemessenen und berechneten Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene – Vergleich von drei Ansätzen zur Regionalisierung

Spearman Rangkorrelationskoeffizient r_s	Auflösung Berechnungsraster	RAPS		MAIS	
		Sigma-2 (n = 15)	PMF (n = 44)	Sigma-2 (n = 26)	PMF (n = 49)
Entfernung zum nächsten Feld	1 x 1 m	-0,344 (n.s.)	-0,552***	-0,655***	-0,687***
PDI	5 x 5 m	0,624* ²²³	0,740*** ²²⁴	0,750*** ²²⁵	0,754*** ²²⁶
AUSTAL2000	100 x 100 m	0,156 (n.s.)	0,534***	0,666***	0,600***

Die vier untersuchten Ansätze (Geostatistik, GIS-gestützte Regionalisierung: (a) Entfernung zum nächsten Feld, (b) Pollendepositionsindex, Pollenausbreitungsmodell) zur Regionalisierung der Raps- und Maispollendeposition im 256 km² großen Untersuchungsgebiet unterscheiden sich u.a. hinsichtlich Methodik, Modell-Komplexität, Input-Daten, Zielvariable, Berechnungsaufwand, Berechnungsraster und Genauigkeit (siehe Tab. 5.2 und Tab. 5.3). Das

Tab. 5.3: Vergleich der Modelle zur Regionalisierung der Messwerte der Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene

	GIS-basiert "Entfernung zum nächsten Feld"	GIS-basiert "Pollendepositions- index (PDI)"	Ausbreitungs- modell AUSTAL2000
Zeitaufwand zur Aufbereitung der Input-Daten	+	o	o
Zeitaufwand zur Berechnung	+	o	-
Auflösung des Berechnungsrasters	+	+	-
Korrelation mit empirischen Daten	o	+	o
Realitätsnahe Abbildung der Ausbreitungsprozesse	-	-	+

Bewertung der Modelleigenschaften: (+) positiv, (o) neutral, (-) negativ

Ziel des Vergleichs bestand darin, zu ermitteln mit welchem Ansatz akzeptable Ergebnisse bei der Regionalisierung von empirischen Daten der Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene erzielt werden können. Da die Geostatistik aufgrund der geringen Anzahl an Messwerten kei-

²²³ PDI Formel 15, 600m-Nachbarschaftsraum, Windsektor: West

²²⁴ PDI Formel 16, 500m-Nachbarschaftsraum, Windsektoren: West, Südwest

²²⁵ PDI Formel 21c, 100m-Nachbarschaftsraum, Windsektoren: Südwest, West, Nordwest, Nord, Nordost

²²⁶ PDI Formel 21c, 100m-Nachbarschaftsraum, Windsektoren: Südwest, West, Nordwest, Nord, Nordost

ne Anwendung fand (siehe Kap. 4.2.5 und 5.5.1), enthält die Tab. 5.2 für die verbliebenen drei Ansätze die Korrelation von gemessener und berechneter Pollendeposition.

Grundsätzlich gilt für alle Ansätze, dass sie vorrangig für strukturarme Landschaften ohne komplexe Hindernisse und Barrieren konzipiert bzw. aufgrund der Rahmenbedingungen der Untersuchung derart ausgelegt sind²²⁷. Insbesondere die Windverhältnisse in Siedlungs- oder Waldgebieten weichen von denen des landwirtschaftlich genutzten Raumes ab und können zu einem veränderten Depositionsverhalten der Pollen führen.

Die Vorteile des GIS-basierten Modells „Entfernung zum nächsten Nachbarn“ liegen eindeutig in seiner Einfachheit und dem geringen Zeitaufwand für Datenaufbereitung und Berechnung. Befinden sich die Pollensammler sehr nah an den Pollenquellen (Feldern) sind auch die Ergebnisse akzeptabel, wie die Korrelation mit der Maispollen-Messung zeigt. Liegen jedoch große Distanzen zwischen den Pollensammlern und den Feldern vor (kennzeichnend für die Messung der Rapspollen), zeigen sich die Vorteile des flächenhaften und integrativen Ansatzes (Berücksichtigung der Feldfläche, der nachbarschaftlichen Felder und der Windrichtung) des Pollendepositionsindex (PDI). Die Pollendeposition der Raps- und Maispollensammler lässt sich durch den PDI besser ausdrücken als durch den Ansatz „Entfernung zum nächsten Feld“ (siehe Tab. 5.2). Trotz des hochkomplexen Berechnungsalgorithmus von AUSTAL2000 und der realitätsnahen Abbildung des Untersuchungsgebietes und der Ausbreitungsprozesse (Oberflächenmodell, meteorologische Stundenwerte, 3D-Windfelder) fällt auch das Partikelmodell AUSTAL2000 gegenüber dem PDI in seiner Aussagekraft ab. Die Genauigkeit der Depositionsberechnung durch die Simulation der Flugbewegung mehrerer Millionen Einzelpartikel wird durch das grobe Berechnungsraster (100 x 100 m) stark generalisiert. Zusammenfassend ist zu sagen, dass für eine erste Abschätzung der Pollendeposition mesoskaliger Untersuchungsgebiete das GIS-basierte Modell „Entfernung zum nächsten Nachbarn“ verwendet werden kann. Für genauere Aussagen zur Pollendeposition – insbesondere bei einer Vielzahl von Feldern – eignen sich der eigenentwickelte und hier vorgestellte Pollendepositionsindex (PDI). Das Lagrangesche Ausbreitungsmodell AUSTAL2000 ist auf mikroskalige Untersuchungsgebiete mit wenigen (Flächen-)Quellen bei gleichzeitiger hoher Auflösung des Berechnungsrasters beschränkt, wenn sein Potenzial ausgeschöpft werden soll. Durch die kontinuierliche Zunahme der Leistungsfähigkeit der Computer kann diese Einschränkung für AUSTAL2000 mittelfristig möglicherweise aufgehoben werden.

²²⁷ AUSTAL2000 kann komplexe Hindernisse (z.B. Siedlungsstrukturen) berücksichtigen, für ein Gebiet von 256 km² kann jedoch (noch?) nicht die Umströmung jedes einzelnen Hauses simuliert werden.

6 Ausblick

6.1 GVP-Monitoring

Ein anbaubegleitendes Monitoring, wie es beispielsweise die Konzepte von Traxler et al. (2000), Sanvido et al. (2003), Züghart & Breckling (2003a, 2003b) vorsehen, wurde in Deutschland bisher nicht umgesetzt. Die Erhebung des Status-Quo (vor Einführung von GVP) ist demnach nicht erfolgt und in vielen Teilgebieten Deutschlands ist es dafür bereits zu spät. Wie dem Standortregister des BVL zu entnehmen ist, stieg die Anbaufläche von GVP zwischen 2005 und 2008 um jährlich 118% bis 284%²²⁸. Der Schwerpunkt des Anbaus von GVP (>90% der Flächen) befindet sich im Osten Deutschlands in den Bundesländern Brandenburg, Sachsen und Mecklenburg-Vorpommern. Vor dem Hintergrund der weltweiten Zunahme des Anbaus von gentechnisch veränderten Pflanzen und des vergleichsweise geringen GVP-Anteils in Deutschland (ca. 2,7% der Anbaufläche in 2008²²⁹) ist von einer Fortsetzung des Trends in Deutschland auszugehen. Die Hindernisse, die durch die Gentechnik-Pflanzenerzeugungsverordnung (GenTPflEV) und das Umweltschadensgesetz (USchadG) bestehen – und zu einem Großteil die Zurückhaltung der Landwirte erklären – könnten mittelfristig z.B. durch die Versicherungsbranche (Erschließung eines neuen Marktes für GVP-Versicherungspolice) oder geänderte rechtliche Rahmenbedingungen überwunden werden.

6.2 GVP-Pollenmonitoring – Messnetzplanung und Messung

Für ein bundesweites GVP-Pollenmonitoring wurde bereits gefordert, die Pollenmessungen zur Nutzung von Synergieeffekten an vorhandene Umweltmessnetze zu koppeln. Neben den Immissionsmessstationen der Bundesländer (499 Stationen) und des Umweltbundesamtes (25 Stationen) (Eickelpausch & Eickelpausch 2004: 37-39) kämen die Messnetze des Deutschen Wetterdienstes (179 hauptamtliche Wetterstationen), das Messnetz des Polleninformationsdienstes (ca. 50 Stationen) und in Bayern das Agrarmeteorologische Messnetz der Landesanstalt für Landwirtschaft (~120 Stationen) in Frage. Der Fokus dieser Messnetze ist allerdings auf Luftqualität, Meteorologie oder Pflanzenproduktion gerichtet, was sich beispielsweise in der Lage des Messstandorts niederschlägt (v.a. städtisches Siedlungsgebiet). Es ist deswegen sinnvoller, ein GVP-Pollenmonitoring als Teil eines umfassenden GVP-Monitorings zur Erfassung ökosystemarer Zusammenhänge und Folgen des GVP-Anbaus zu etablieren. In dieser Hinsicht würde auf Bundesebene die Ökologische Flächenstichprobe (ÖFS) geeignete Standorte für ein GVP-Pollenmonitoring liefern. Das Monitoringkonzept mit repräsentativer Flä-

²²⁸ Die prozentuale Veränderung der Freisetzungsfläche betrug im gleichen Zeitraum zwischen -65% und 763%.

²²⁹ Angaben zur Bodennutzung (Ackerland) in Deutschland im Jahr 2008 (vorläufiges Ergebnis) nach www.destatis.de [26.10.2008].

chenauswahl²³⁰ wurde vom Statistischen Bundesamt in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Naturschutz entwickelt (Back et al. 1996). Nach der Methode der ÖFS wurden in ganz Deutschland Monitoringflächen ausgewiesen, allerdings wurde nur in Nordrhein-Westfalen (NRW) auf 195 Untersuchungsflächen²³¹ von jeweils 1 km² mit der Dauerbeobachtung²³² begonnen und für einzelne Flächen bereits die Wiederholungserhebung (5-Jahresintervalle) abgeschlossen (König 2003). Die grundsätzliche Eignung der ÖFS für das GVP-Monitoring wurde bereits von Middelhoff et al. (2006) bestätigt und Fiebig et al. (2007) untersuchten in NRW die Einbindung von einzelnen Aspekten eines GVP-Monitorings in das System der ÖFS. Aufgrund der langjährigen Erfahrung in NRW und den ersten positiven Ergebnissen hinsichtlich der (stufenweisen) Integration eines GVP-Monitorings wäre es wünschenswert, wenn die übrigen Bundesländern möglichst bald die ÖFS etablieren würden, um noch rechtzeitig den Status-Quo von Flora und Fauna vor dem Anbau von gentechnisch veränderten Pflanzen zu erfassen.

Ein Verfahren zur automatischen Erkennung von Pollen haben Ronneberger et al. (2002) auf Basis von Grauwert-Invarianten entwickelt, das es ermöglicht Pollen – unabhängig von Position und Orientierung auf der mikroskopischen Probe – zu identifizieren. Von der Entwicklung eines automatisierten Messgeräts, das die Probenahme, die Partikelabscheidung auf einer mikroskopierfähigen Oberfläche, die Proben-Präparation, die mikroskopischen Abbildungstechniken, die Mustererkennung und die stündliche Angabe der Anzahlkonzentration luftgetragener Pollen vereint, berichten Scharring et al. (2006a, 2006b). Im April 2009 wurden mit der Eröffnung der Pollenflugzentrale des Deutschen Wetterdienstes in Freiburg die ersten beiden Geräte des automatischen Pollenmonitor BAA (Bio-Aerosol-Analysator) in Betrieb genommen. Bis Ende 2011 baut der DWD ein neues Messnetz²³³ mit 15 Geräten auf (DWD 2009a). Der Pollenmonitor BAA (in der Größe einem Gefrierschrank vergleichbar) bestimmt Pollen mit einer Genauigkeit von 90%. Die Messergebnisse der Pollenkonzentration liegen bereits nach einer Stunde vor. Bei stündlichen Messungen und unbeaufsichtigtem Betrieb beträgt der Messzeitraum des Gerätes zwei Wochen (vier Wochen bei acht Messungen pro Tag) (DWD 2009b). Damit ist der Pollenmonitor BAA als Referenzgerät für den Einsatz in einem bundesweiten GVP-Pollenmonitoring ideal geeignet. Dieses Pollen-Messsystem ist

²³⁰ Geschichtete Zufallsstichprobe (Stratum: Landschaftsräume) mit Hilfe von ATKIS-Daten.

²³¹ Davon 170 in der „Normallandschaft“ und 25 in FFH- und Vogelschutzgebieten.

²³² Erhebung ausgewählter Parameter auf 2 Ebenen: Ebene I: quantitative und qualitative Erfassung von Biotop-typen, Ebene II: Erfassung ausgewählter Indikatorgruppen von Flora und Fauna.

²³³ Die 15 Standorte des Pollenmonitor-Messnetzes befinden sich in Potsdam (BB), Feldberg/Schwarzwald (BW), Freiburg (BW), Konstanz (BW), Fürstenzell (BY), Würzburg (BY), Offenbach (HE), Bad Lippspringe (NW), Nürburg-Barweiler (RP), Trier (RP), Fehmarn (SH), St. Peter-Ording (SH), Saarbrücken (SL), Görlitz (SN) und Seehausen (ST) (DWD 2009c).

allen Pollen-Messgeräten, die zur Zeit Verwendung finden, in seiner Entwicklungsstufe um Jahrzehnte voraus²³⁴.

Ebenso ist die Erfassung der Pollenkonzentration in höheren Luftschichten zur Zeit (siehe Aylor et al. 2006, Boehm et al. 2008) auf dem gleichen Stand wie vor 70 Jahren (Remppe 1937). An Flugzeugen oder Modellflugzeugen werden Petrischalen angebracht und der sich während des Fluges niederschlagende Pollen wird unter Verwendung zahlreicher Annahmen in eine Pollenkonzentration umgerechnet. Eine zukunftsweise Technik hinsichtlich der Erfassung und Messung von Pollen während des Transports in der Luft, könnte die Radar- oder Lasertechnik sein. Schon seit über 20 Jahren ist es mit Doppler-Polarisationsradar möglich, die Form und Größe von flüssigen und gefrorenen Wasserpartikeln²³⁵ in Echtzeit über große Distanzen (>100 km) zu bestimmen²³⁶. Zur Zeit beträgt die untere Grenze der erfassbaren Teilchen wenige Zehntel-Millimeter. Durch stetige Weiterentwicklung der Technik könnte die detektierbare Partikelgröße auf das Maß von Pollen (10-100 µm) sinken. Einen anderen messtechnischen Ansatz stellt die Lasertechnik (LIDAR²³⁷) dar, die bereits zur Erfassung der optischen Eigenschaften von Aerosolen und zur Modellierung des luftgetragenen Sahara-Staubes genutzt wird (Esselborn et al. 2008, Heinold et al. 2008). Eine Anwendung auf Bio-Aerosole wäre denkbar und ein gewaltiger Schritt vorwärts in Richtung einer fortschrittlichen Messtechnik zur Erfassung und Modellierung der Pollenausbreitung.

²³⁴ Als Standardgerät zur Messung der Pollen-Konzentration wird nach wie vor die Burkard-Sporenfalle beruhend auf der Sporen-Falle nach Hirst (1952) verwendet, eine Messtechnik aus den frühen 1950er Jahren.

²³⁵ Regentropfen, Schnee, Graupel und Hagel

²³⁶ POLDIRAD (Polarization Diversity Radar): http://www.pa.op.dlr.de/poldirad/index_p.html

²³⁷ LIDAR: Light Detection and Ranging

7 Zusammenfassung

7.1 Zusammenfassung

Pollen von gentechnisch veränderten (GV) Kulturpflanzen stellen ein Agens des möglichen horizontalen und vertikalen Gentransfers sowie der Verbreitung von GV-Genkonstrukten oder GV-Produkten in die Umwelt dar. Diese Auswirkungen des Anbaus von transgenen Kulturpflanzen bergen Risiken, deren Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß nicht vollständig abzuschätzen sind. Deshalb besteht gemäß der EU-Freisetzung-Richtlinie 2001/18/EG beim Inverkehrbringen gentechnisch veränderter (transgener) Kulturpflanzen die gesetzliche Verpflichtung zur Aufstellung eines Überwachungsplans (*monitoring plan*), der die unvorhergesehenen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ermitteln soll.

Das Ziel dieser Untersuchung bestand darin, ein Monitoring im Sinne des Überwachungsplans innerhalb eines 256 km² großen Gebietes für transgene und nicht-transgene luftgetragene Raps- und Maispollen für den landwirtschaftlich genutzten Raum zu entwickeln und durchzuführen. Vom 25. April bis 23. Mai (Rapsversuch) und vom 4. bis 31. Juli 2003 (Maisversuch) wurde jeweils an 50 Messstandorten im westlich von München gelegenen Untersuchungsgebiet die Pollendeposition mit zwei Typen von technischen Passiv-Pollensammlern (Sigma-2 und Pollenmassenfilter (PMF) in Kombination) gemessen. Die Geräte brauchen keinen Strom, sind einfach aufzustellen und zu bedienen und damit sehr kostengünstig und robust in der Datenlieferung.

Die Proben des Sigma-2 und des PMF wurden lichtmikroskopisch qualitativ und quantitativ auf Pollen von Ziel- und Nicht-Zielarten untersucht. Zusätzlich wurden die Proben des PMF mittels molekulargenetischer Analyse (PCR) qualitativ und quantitativ auf transgene und nicht transgene Zielpollen untersucht. Als Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Abhängigkeit von Pollenmessungen und Pollenquellen wurden die Raps- und Maisfelder im Untersuchungsgebiet flächendeckend kartiert und meteorologische Daten von bestehenden Messnetzen ausgewertet. Zur Untersuchung des Einflusses von mehreren Feldern (unter Berücksichtigung von Feldgröße, Feldabstand und Himmelsrichtung) auf die Pollendeposition an einem Messort wurde als einfaches Ausbreitungsmodell der Pollendepositionsindex (PDI) entwickelt und angewendet. Zur räumlichen Analyse der Pollendeposition auf mesoskaliger Ebene wurden geostatistische Interpolationsverfahren, Verfahren zur GIS-gestützten Regionalisierung (u.a. unter Verwendung des PDI) und ein Lagrangesches Partikelmodell (AUSTAL2000) angewendet.

Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen aufgeführt:

- Zur Auswahl von repräsentativen Messstandorten, die für das Untersuchungsgebiet repräsentative Messwerte der Deposition von Raps- und Maispollen für die landwirt-

schaftliche Nutzfläche liefern, wurde die proportional geschichtete Stichprobe angewendet. Als Schichten (Strata) wurden der Naturraum (naturräumliche Haupteinheiten), die Höhenlage (Orografie) und die Landnutzung (landwirtschaftliche Nutzungstypen) verwendet (siehe Kap. 3.5.2). Die Relevanz der verwendeten Strata für die Fragestellung der Untersuchung wurde nachgewiesen (siehe Kap. 4.1.1.2), ebenso die Raumrepräsentativität der Pollensammlerstandorte bezüglich des Abstands zum nächsten Rapsfeld (siehe Kap. 4.1.1.5).

- Die Kartierung der Pollenquellen (Raps- und Maisfelder), die auf Basis von aktuellen Orthofotos im Maßstab 1:5.000 erfolgte, kann unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nur für Untersuchungsgebiete von geringer Flächenausdehnung (<250 km²) durchgeführt werden. Der Einsatz von GPS in Kombination mit Tablet-PC oder PDA²³⁸ wird empfohlen. Als ein großer Vorteil der Geländekartierung ist die Möglichkeit der frühzeitigen Datenerhebung (vor Blühbeginn) anzusehen (siehe Kap. 5.3.2.1).
- Eine schlaggenaue Abgrenzung der Pollenquellen (in der kleinparzellierten Landschaft Süddeutschlands) kann generiert werden durch die Auswertung von Fernerkundungsdaten (hochaufgelöste und/oder multispektrale Satelliten- und Luftbilder) oder durch Nutzung von Anbaudaten, die von den Landwirtschaftsministerien der Länder und dem Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) verwaltet werden (InVeKoS, Standortregister²³⁹ der GVP-Anbauflächen). Eine (stichprobenartige) Überprüfung der Daten im Gelände ist in jedem Fall sinnvoll – um mögliche Fehler bei der Datenerhebung auszuschließen – und für die Verarbeitung der multispektralen Fernerkundungsdaten unerlässlich („ground truth“). Als Nachteil dieses Vorgehens kann die verzögerte Bereitstellung der Daten (ggf. erst nach der Blühperiode) angesehen werden (siehe Kap. 5.3.2.2).
- Rapspollen wurden an 15 (Sigma-2) bzw. 44 (PMF) von 50 Standorten gefunden. Der Abstand der Sammler zum nächsten Rapsfeld betrug zwischen 1 und 1510 m. Rapspollen wurden mit den PMF bis zu einer Entfernung von 900 m zum nächsten Rapsfeld nachgewiesen. Die durchschnittliche Depositionsrate (Sigma-2) betrug 4.300 Rapspollen m⁻² d⁻¹ und der durchschnittliche Pollenfluss (PMF) betrug 14.300 Rapspollen m⁻² d⁻¹ (siehe Kap. 4.2.1).
- Maispollen wurden an 26 (Sigma-2) bzw. allen (49 auswertbare PMF) Standorten gefunden. Der Abstand der Sammler zum nächsten Maisfeld betrug zwischen 0 und 1190 m. Maispollen wurden mit den PMF bis zu einer Entfernung von 624 m zum

²³⁸ PDA – Personal Digital Assistant

²³⁹ Das Standortregister wird vom Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) geführt. Informationen zu den Anbau- und Freisetzungsfächen von GVP können im Internet abgerufen werden (http://194.95.226.237/stareg_web/showflaechen.do).

nächsten Maisfeld nachgewiesen²⁴⁰. Die durchschnittliche Depositionsrates (Sigma-2) betrug 5.700 Maispollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ und der durchschnittliche Pollenfluss (PMF) betrug 25.200 Maispollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (siehe Kap. 4.2.1).

- Die Expositionsdauer von einer Woche ist für Proben des Pollensammlers Sigma-2 (unter den Bedingungen des Feldversuchs 2003) zu kurz, da die Belegung mit Zielpollen nicht immer ausreichend war (siehe Kap. 4.1.5). Auf Kosten der zeitlichen Auflösung der Messwerte der Pollendeposition ist daher eine Expositionsdauer von 2 Wochen für Sigma-2-Proben zu empfehlen. Die lange Expositionsdauer der PMF-Proben von bis zu vier Wochen (gesamter Blühzeitraum der entsprechenden Pflanze) hat für die bildanalytische Auswertung der Proben keine nachteilige Auswirkung. Für die molekulargenetische Analyse ist die vierwöchige PMF-Expositionsdauer nicht förderlich (siehe Kap. 4.1.5, Kap. 4.1.7 und Kap. 5.2.5), sie sollte möglichst auf zwei Wochen beschränkt werden.
- Die molekulargenetische Analyse der PMF-Proben zum qualitativen und quantitativen Nachweis von DNS der Zielpollen von Raps und Mais sowie transgener Gensequenzen ergab nur in Einzelfällen positive Ergebnisse. Zum einen wurde die PCR inhibiert, zum anderen war durch die Verdünnung der Ausgangsprobe die Anzahl der Pollen in der PCR-Probe zu gering. Inzwischen wurde die Funktionsfähigkeit der Analysemethode jedoch unter Beweis gestellt (siehe Kap. 5.2.5).
- Sigma-2-Pollenmessung (siehe Kap. 4.2.1): Die Rapspollendepositionsrates zeigt keine signifikante Korrelation mit der Entfernung zum nächsten Feld (siehe Abb. 4.18 und Tab. 4.26), sondern eine gleichmäßige Verteilung im Nah- und Fernbereich der Rapsfelder. Die niedrigen Depositionswerte in Feldnähe sind ungewöhnlich, die konstanten Depositionswerte in größerer Entfernung hingegen nicht (vgl. Thomson et al. 1999, Funk 2006). Die Maispollendepositionsrates (siehe Abb. 4.19 und Tab. 4.26) zeigt eine sehr starke Abhängigkeit von der Entfernung zum Maisfeld. Hohe Depositionswerte treten nur in unmittelbarer Nähe zur Quelle (<50 m) auf und nehmen mit zunehmender Entfernung stark ab. Jenseits von 170 m Entfernung liegen keine Nachweise vor.
- PMF-Pollenmessung (siehe Kap. 4.2.1): Sowohl der Rapspollen- als auch der Maispollenfluss zeigt eine Abhängigkeit von der Entfernung zum nächsten Feld (siehe Abb. 4.20, Abb. 4.21 und Tab. 4.26). Mit steigender Entfernung zum Feld sinken die Messwerte des Pollenflusses beim Mais schneller als beim Raps (wie aufgrund der aerodynamischen Eigenschaften zu erwarten). Der Nachweis von Maispollen bis zu ei-

²⁴⁰ Für den Messstandort, der 1,2 km vom nächsten Maisfeld entfernt liegt, kann nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass der nachgewiesene Maispollen von einem näherliegenden Feld stammt, da aufgrund der randlichen Lage des Standorts ein Einfluss von außerhalb des Untersuchungsgebietes möglich ist.

ner Entfernung von 624 m ist beachtlich und nur mit Thermik und turbulenten Luftströmungen zu erklären.

- Einflussfaktoren der Rapspollendeposition (siehe Kap. 4.2.3): Wie die Berechnungen mit dem Pollendepositionsindex (PDI) zeigen, haben Himmelsrichtung, Feldgröße und Feldabstand einen großen Einfluss auf die Rapspollenmessungen von Sigma-2 und PMF. Konkret beeinflussen die Felder, die sich westlich und südwestlich vom Pollensammler in einer Entfernung bis 500 bzw. 600 m befinden, die Pollenmessung am stärksten. Dieses Ergebnis korrespondiert gut mit den Windmessungen im Untersuchungsgebiet während des Versuchszeitraums, die eine Dominanz der Windrichtungen W, SW und S belegen (siehe Abb. 4.7).
- Einflussfaktoren der Maispollendeposition (siehe Kap. 4.2.3): Wie die Berechnungen mit dem Pollendepositionsindex (PDI) zeigen, haben Feldgröße und Feldabstand einen großen Einfluss auf die Maispollenmessungen von Sigma-2 und PMF. Die Himmelsrichtung und die Verwendung einer Ausbreitungsfunktion führen nur zu einer geringfügigen Verbesserung. Konkret beeinflussen die Felder, die sich in westlichen und nördlichen Richtungen vom Pollensammler in einer Entfernung bis 100 m befinden die Pollenmessung am stärksten. Dieses Ergebnis korrespondiert mit den Windmessungen im Untersuchungsgebiet während des Versuchszeitraums, die eine recht ausgewogene Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen belegen (siehe Abb. 4.8).
- Zur flächenhaften Darstellung der Pollendeposition für das gesamte Untersuchungsgebiet (256 km²) wurden auf Grundlage der empirischen Daten des Jahres 2003 verschiedene Interpolationsverfahren (GIS-basierte Regionalisierung, Pollen-Ausbreitungsmodell) angewendet. Geostatistische Interpolationsverfahren waren aufgrund der hohen räumlichen Inhomogenität der gemessenen Pollendeposition nicht anwendbar. Auf mesoskaliger Ebene konnte durch GIS-basierte Regionalisierung des eigenentwickelten Pollendepositionsindex (PDI) eine geringfügig bessere Vorhersage der Pollendeposition gegenüber dem komplexen 3D-Ausbreitungsmodell AUSTAL2000 erreicht werden (siehe Kap. 5.5.5).

7.2 Summary

Pollen of genetically modified (GM) plants is one agent for horizontal or vertical gene transfer and for the dispersal of GM genes and GM products into the environment. These effects of the cultivation of GM plants in agriculture have inherent risks, whose loss potential and probability are not able to be completely predefined. Therefore the Directive 2001/18/EC provides for a monitoring plan of GM crops, which is mandatory after the placing on the market, to identify the unpredictable effects on mankind and environment.

The aim of this investigation was to develop and to run a monitoring programme for airborne transgenic and non-transgenic oilseed rape and maize pollen within the agricultural land of a 256 km² sized investigation area according to the monitoring plan. At 50 sites from April 25 to May 23 (oilseed rape) and from July 4 to July 31 (maize), respectively, the pollen deposition was measured in the investigation area West of Munich. Two different types of technical passive pollen traps were used in combination (Sigma-2, pollen mass filter PMF). This equipment is independent of electricity, simple to set up and to operate and therefore of a reasonable price and robust in data delivery.

Sigma-2 samples and PMF samples were analysed qualitatively and quantitatively with regard to target pollen and other pollen by using light microscopy. Additionally PMF samples were analysed by using methods of molecular genetics (PCR) to specify the amount of GM and non-GM target pollen. As a basis for further investigations – concerning the dependence of pollen measurements and pollen sources – fields of oilseed rape and maize were mapped throughout the whole investigation area and meteorological data was gathered from existing meteorological networks. Moreover, a simple dispersal model, the pollen deposition index (PDI), was developed and applied to analyse the influence of neighbouring fields (considering area, distance and direction of these fields) on pollen deposition at a pollen trap. To determine the pollen deposition throughout the whole investigation area (on mesoscale level) geostatistical interpolation methods, methods of GIS-based regionalisation (amongst others application of PDI) and a Lagrangian dispersal model (AUSTAL2000) were used.

Most important results are shown, as follows:

- The investigation area was stratified (subdivided into different levels/strata) to gain representative measuring sites within the agricultural land concerning the deposition of oilseed rape and maize pollen. As strata the natural division, the altitude (orography) and the landuse (type of agricultural usage) were chosen (see chapter 3.5.2). The relevance of the chosen strata in regard to the question of the investigation was proved (see chapter 4.1.1.2) and the spatial representativeness of the pollen trap sites in regard to the distance to the next oilseed rape field (see chapter 4.1.1.5), too.
- The mapping of pollen sources (fields of oilseed rape and maize) was carried out by using current aerial images at 1:5,000 scale. From an economic point of view this kind of mapping is applicable only for smaller investigation areas (<250 km²). The use of GPS combined with a tablet PC or PDA is recommended. One major advantage of this kind of mapping is the early data acquisition (far before full development of the crops), see chapter 5.3.2.1.
- The accurate delineation of the pollen sources (e.g. small agricultural parcels in Southern Germany) can be obtained alternatively by analysing remote sensing data

(high resolution and/or multispectral satellite and aerial images) or by using the acquired data about the cropping system (InVeKoS) and the cultivated area of GM crops (*Standortregister*²⁴¹) which is held by agricultural ministries of the federal states and the Federal Office of Consumer Protection and Food Safety (BVL). Nevertheless a (random) verification of the data on-site is reasonable to exclude possible mistakes during data acquisition or processing (in case of processing remote sensing this is indispensable). One disadvantage of this approach is the delayed supply of the data (possibly far after full development of the crops) (see chapter 5.3.2.2).

- Pollen of oilseed rape was found at 15 (Sigma-2) and 44 (PMF) sites, respectively. The distance of the pollen trap to the next oilseed rape field was between 1 and 1510 m. Pollen of oilseed rape was detected up to a distance of 900 m to the next oilseed rape field. The average deposition rate (Sigma-2) was 4,300 oilseed rape pollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ and the average pollen flux (PMF) was 14,300 oilseed rape pollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (see chapter 4.2.1).
- Pollen of maize was found at 26 (Sigma-2) and all (49 evaluable PMF) sites, respectively. The distance of the pollen trap to the next maize field was between 0 and 1190 m. Pollen of maize was detected up to a distance of 624 m to the next maize field. The average deposition rate (Sigma-2) was 5,700 maize pollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ and the average pollen flux (PMF) was 25,200 maize pollen $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (see chapter 4.2.1).
- Under the conditions of the field trial in 2003 the exposure period of one week for Sigma-2 pollen trap samples was too short, because the amount of target pollen was not sufficient (see chapter 4.1.5). Hence an exposure period of two weeks is recommended, at the expense of the temporal resolution of pollen deposition measurements. The exposure period up to four weeks for PMF samples (covering the whole blossom period of a plant) has no negative impact on the analyses by light microscopy, but is not beneficial for molecular genetical analyses (see chapter 4.1.5 and chapter 5.2.5), hence an exposure period of two weeks is recommended, too.
- The molecular genetical analyses of PMF samples for qualitative and quantitative detection of GM and non-GM DNA of the target pollen (oilseed rape, maize) was only successful in singular cases. On the one hand the PCR was inhibited and on the other hand due to dilution of the initial sample the amount of pollen was too low. In the meantime the functional capability of the analysis has been proofed (see chapter 5.2.5).

²⁴¹ The „Standortregister“ is administrated by the Federal Office of Consumer Protection and Food Safety (BVL). Information about the cultivated area of GM crops and field trials with GM crops are provided in the internet (http://194.95.226.237/stareg_web/showflaechen.do).

- Sigma-2 pollen measurement (see chapter 4.2.1): The oilseed rape pollen deposition rate shows no significant correlation with the distance to the next field (see Abb. 4.18 and Tab. 4.26), instead of that constant values in the close-up range and the distance of the oilseed rape fields. The low values in the close-up range are exceptional, but not the stable deposition values with increasing distance (see Thomson et al. 1999, Funk 2006). The maize pollen deposition rate (see Abb. 4.19 and Tab. 4.26) shows a strong dependence on the distance to the next maize field. High values of deposition occur only very close to the source (<50 m) and decrease with increasing distance to the source. Beyond a distance of 170 m no maize pollen was detected.
- PMF pollen measurement (see chapter 4.2.1): Both the oilseed rape pollen and the maize pollen flux show dependence on the distance to the next field (see Abb. 4.20, Abb. 4.21 and Tab. 4.26). With increasing distance to the field the values of pollen flux are decreasing – the maize pollen more than the oilseed rape pollen due to their aerodynamic properties. The detection of maize pollen up to a distance of 624 m is remarkable and only explainable by thermal lift and turbulent airflow.
- The influencing factors of the oilseed rape pollen deposition (see chapter 4.2.3): The calculations with the pollen deposition index (PDI) show, that direction, area and distance of the fields have a major influence on the Sigma-2 and PMF measurements of oilseed rape pollen. Roughly speaking the most important influence on the pollen measurements at the pollen traps comes from fields, which are within a distance of 500 and 600 m, respectively in the West and Southwest of the sites. This result corresponds with the anemometer data of the investigation period, which recorded West, Southwest and South as dominant wind directions (see Abb. 4.7).
- The influencing factors of the maize pollen deposition (see chapter 4.2.3): The calculations with the pollen deposition index (PDI) show, that area and distance of the fields have a major influence on the Sigma-2 and PMF measurements of maize pollen. Direction and the use of dispersal functions cause only minor improvement. Roughly speaking the most important influence on the pollen measurements at the pollen traps comes from fields, which are within a distance of 100 m to the West and to the North of the sites. This result corresponds with the anemometer data of the investigation period, which recorded a balanced frequency of the wind directions (see Abb. 4.8).
- For the area-wide display of the pollen deposition for the whole investigation area (256 km²) – based on the empirical data from 2003 – different kinds of interpolation methods (GIS-based regionalisation, pollen dispersal model) were applied. Geostatistical methods couldn't be used due to the high spatial inhomogeneity of the measured pollen deposition. On mesoscale level the GIS-based regionalisation of the self-developed pollen deposition index (PDI) achieved a slightly better prediction of the

pollen deposition than the complex 3D dispersal model AUSTAL2000 (see chapter 5.5.5).

8 Literatur

Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften

- Entscheidung 2002/623/EG der Kommission vom 24. Juli 2002 über Leitlinien zur Ergänzung des Anhangs II der Richtlinie 2001/18/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die absichtliche Freisetzung genetisch veränderter Organismen in die Umwelt und zur Aufhebung der Richtlinie 90/220/EWG des Rates. ABl. EG L 200 vom 30.7.2002, S. 22-33
- Entscheidung 2002/811/EG des Rates vom 3. Oktober 2002 über Leitlinien zur Ergänzung des Anhangs VII der Richtlinie 2001/18/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die absichtliche Freisetzung genetisch veränderter Organismen in die Umwelt und zur Aufhebung der Richtlinie 90/220/EWG des Rates. ABl. EG L 280 vom 18.10.2002, S. 27-36
- Gesetz über die Verarbeitung und Nutzung von Daten im Rahmen des integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems nach den gemeinschaftsrechtlichen Vorschriften für landwirtschaftliche Stützungsregelungen (InVeKoS-Daten-Gesetz - InVeKoSDG) vom 21. Juli 2004 (BGBl. I S. 1763, 1769), geändert am 31. Oktober 2006 (BGBl. I S. 2407)
- Gesetz über die Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden (Umweltschadengesetz - USchadG) vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S. 666), das durch Artikel 7 des Gesetzes vom 19. Juli 2007 (BGBl. I S. 1462) geändert worden ist.
- Gesetz zur Durchführung von Verordnungen der Europäischen Gemeinschaft auf dem Gebiet der Gentechnik (EG-Gentechnik- Durchführungsgesetz - EGGenTDurchfG) vom 22. Juni 2004 (BGBl. I S. 1244)
- Gesetz zur Regelung der Gentechnik (Gentechnikgesetz - GenTG) vom 20. Juni 1990 (BGBl. I S. 2066), zuletzt geändert am 1. April 2008 (BGBl. I S. 499)
- Richtlinie 2001/18/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. März 2001 über die absichtliche Freisetzung genetisch veränderter Organismen in die Umwelt und zur Aufhebung der Richtlinie 90/220/EWG des Rates. ABl. EG L 106 vom 17.4.2001, S. 1-38
- TA Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft). Vom 24. Juli 2002. GMBL. vom 20.7.2002, Heft 25 – 29, S. 511-605
- Verordnung (EG) Nr. 1829/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. September 2003 über genetisch veränderte Lebensmittel und Futtermittel. ABl. EG L 268 vom 18.10.2003, S. 1-23
- Verordnung (EG) Nr. 1830/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. September 2003 über die Rückverfolgbarkeit und Kennzeichnung von genetisch veränderten Organismen und über die Rückverfolgbarkeit von aus gentechnisch veränderten Organismen hergestellten Lebensmitteln und Futtermitteln sowie zur Änderung der Richtlinie 2001/18/EG. ABl. EG L 268 vom 18.10.2003, S. 24-28
- Verordnung (EG) Nr. 1946/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Juli 2003 über grenzüberschreitende Verbringungen genetisch veränderter Organismen. ABl. EG L 287 vom 5.11.2003, S. 1-10
- Verordnung (EG) Nr. 65/2004 der Kommission vom 14. Januar 2004 über ein System für die Entwicklung und Zuweisung spezifischer Erkennungsmarker für gentechnisch veränderte Organismen. ABl. EG L 10 vom 16.1.2004, S. 5-10
- Verordnung über die gute fachliche Praxis bei der Erzeugung gentechnisch veränderter Pflanzen (Gentechnik-Pflanzenerzeugungsverordnung - GenTPflEV) vom 7. April 2008 (BGBl. I S. 655)

Technische Regeln

- VDI 2119, Blatt 4 (1997): Messung partikelförmiger Niederschläge. Mikroskopische Unterscheidung und größenfraktionierte Bestimmung der Partikeldeposition auf Haftfolien Probenahmegerät Sigma-2 (Measurement of Particulate Precipitations. Microscopic Differentiation and Size Fractionated Determination of Particle Deposition on Adhesive Collection Plates Sigma-2 Sampler). VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 4. Berlin: Beuth
- VDI 2463, Blatt 7 (1982): Messen von Partikeln. Messen der Massenkonzentration (Immission). Filterverfahren. Kleinfiltergerät GS 050. VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 4. Berlin: Beuth
- VDI 3945, Blatt 3 (2000): Umweltmeteorologie. Atmosphärische Ausbreitungsmodelle. Partikelmodell (Environmental meteorology. Atmospheric dispersion models. Particle model). VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b. Berlin: Beuth
- VDI 4219, Entwurf (2005): Ermittlung der Unsicherheit von Emissionsmessungen mit diskontinuierlichen Messverfahren. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 5. Berlin: Beuth
- VDI 4330, Blatt 1 (2006): Beobachtung ökologischer Wirkungen gentechnisch veränderter Organismen. Gentechnisch veränderte Pflanzen. Grundlagen und Strategie (Monitoring the ecological effects of genetically modified organisms. Genetically modified plants. Basic principles and strategies). VDI-Handbuch Biotechnologie, Band 1 GVO Monitoring. Berlin: Beuth
- VDI 4330, Blatt 2 (in Bearbeitung): Probenahme für ein Pollenmonitoring. VDI-Handbuch Biotechnologie, Band 1 GVO Monitoring. Berlin: Beuth
- VDI 4330, Blatt 3 (2007): Monitoring der Wirkungen gentechnisch veränderter Organismen (GVO). Pollenmonitoring. Technische Pollensammlung mit Pollenmassenfilter (PMF) und Sigma-2-Sammler (Monitoring the effects of genetically modified organisms (GMO). Pollen monitoring. Technical pollen sampling using pollen mass filter (PMF) and Sigma-2-sampler). VDI-Handbuch Biotechnologie, Band 1 GVO Monitoring. Berlin: Beuth
- VDI 4330, Blatt 4 (2006): Monitoring der Wirkungen von gentechnisch veränderten Organismen (GVO). Pollenmonitoring. Biologische Pollensammlung mit Bienenvölkern (Monitoring the effects of genetically modified organisms (GMO). Pollen monitoring. Biological pollen sampling using bee colonies). VDI-Handbuch Biotechnologie, Band 1 GVO Monitoring. Berlin: Beuth
- VDI 4330, Blatt 5 (in Bearbeitung): Probenahme von Pflanzenmaterial für den Nachweis gentechnisch modifizierter Nukleinsäuren in der Umwelt. VDI-Handbuch Biotechnologie, Band 1 GVO Monitoring. Berlin: Beuth
- VDI 4330, Blatt 6 (in Bearbeitung): Extraktionsverfahren zum Nachweis gentechnisch modifizierter Nukleinsäuren in der Umwelt. VDI-Handbuch Biotechnologie, Band 1 GVO Monitoring. Berlin: Beuth
- VDI 4330, Blatt 7 (2006): Monitoring der Wirkungen gentechnisch veränderter Organismen (GVO). PCR-Verfahren zum Nachweis gentechnisch veränderter Nukleinsäuren in der Umwelt (Monitoring of effects of genetically modified organisms (GMOs). PCR-methods for the detection of genetically modified nucleic acids in the environment). VDI-Handbuch Biotechnologie, Band 1 GVO Monitoring. Berlin: Beuth
- VDI 4330, Blatt 8 (in Bearbeitung): Quantitative Verfahren zum Nachweis gentechnisch modifizierter Nukleinsäuren in der Umwelt. VDI-Handbuch Biotechnologie, Band 1 GVO Monitoring. Berlin: Beuth
- VDI 4330, Blatt 9 (2008): Monitoring der Wirkungen gentechnisch veränderter Organismen (GVO). Erfassung der Diversität von Farn- und Blütenpflanzen. Vegetationsaufnahme (Monitoring the effects of genetically modified organisms (GMO). Assessment of the diversity of ferns and flowering plants. Vegetation survey). VDI-Handbuch Biotechnologie, Band 1 GVO Monitoring. Berlin: Beuth

VDI 4330, Blatt 10 (in Bearbeitung): Kartierung gentechnisch veränderter Pflanzen. VDI-Handbuch Biotechnologie, Band 1 GVO Monitoring. Berlin: Beuth

Zitierte Literatur

- Aira M J, Dopazo A, Jato M V (2001): Aerobiological monitoring of Cupressaceae pollen in Santiago de Compostela (NW Iberian Peninsula) over six years. *Aerobiologia*, 17, S. 319-325
- Albertz J (2001): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft
- Ammann K, Rufener P, Jacot Y (2000): Konzept und praktische Lösungsansätze zur ökologischen Begleitforschung. In: Schulte E, Käppli O (Hrsg.): Nachhaltige Landwirtschaft und grüne Gentechnik. Basel: Fachstelle für Biosicherheitsforschung und Abschätzung von Technikfolgen des Schwerpunktprogrammes Biotechnologie des Schweizerischen Nationalfonds (BATS), S. 97-114
- Andersen A A (1958): New sampler for the collection, sizing, and enumeration of viable airborne particles. *Journal of Bacteriology*, 76, S. 471-484
- Anderson J D, Cox C S (1967): Microbial survival. In: Society for General Microbiology (Hrsg.): Airborne microbes. Cambridge: Cambridge University Press, S. 203-226
- Armstrong M (1989a): Geostatistics: Proceedings of the Third International Geostatistics Congress, September 5-9, 1988, Avignon, France: Volume 1. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers
- Armstrong M (1989b): Geostatistics: Proceedings of the Third International Geostatistics Congress, September 5-9, 1988, Avignon, France: Volume 2. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers
- Arobba D, Guido M A, Minale P, Montanari C, Placereani S, Pracilio S, Troie C, Voltolini S, Negrini A C (2000): Airborne pollen in Genoa (NW-Italy): a comparison between two pollen-sampling stations. *Aerobiologia*, 16, S. 233-243
- Aylor D E (2002): Settling speed of corn (*Zea mays*) pollen. *J. Aerosol Science*, 33, S. 1601-1607
- Aylor D E, Boehm M T, Shields E J (2006): Quantifying Aerial Concentrations of Maize Pollen in the Atmospheric Surface Layer Using Remote-Piloted Airplanes and Lagrangian Stochastic Modeling. *J Appl Meteorol Climatol*, 45, S. 1003-1015
- Back H-E, Rohner M-S, Seidling W, Willecke S (1996): Konzepte zur Erfassung und Bewertung von Landschaft und Natur im Rahmen der "Ökologischen Flächenstichprobe". UGR-Materialien, Beiträge zur Umweltökonomischen Gesamtrechnung, Heft 6. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Hrsg.)
- Baldauf R W, Lane D D, Marote G A (2001): Ambient air quality monitoring network design for assessing human health impacts from exposures to airborne contaminants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 66, S. 63-76
- Baltazar B M, de Jesús Sánchez-Gonzalez J, de la Cruz-Larios L, Schoper J B (2005): Pollination between maize and teosinte: an important determinant of gene flow in Mexico. *Theor Appl Genet*, 110, S. 519-526
- Bannert M, Stamp P (2005a): Cross fertilization in maize – results of a Swiss study. [http://www.coexistence.ethz.ch/PDF/Summary Coexistence Zurich June 2005.pdf](http://www.coexistence.ethz.ch/PDF/Summary%20Coexistence%20Zurich%20June%202005.pdf) [15.10.2008]
- Bannert M, Stamp P (2005b): Cross pollination in maize. Results of a 2 year study in Switzerland by using different maize kernel colour markers. <http://www.coexistence.ethz.ch/PDF/coex-Bannert.pdf> [16.10.2008]
- Barkmann J, Marggraf R (2004): Ökologische Schäden durch Vernachlässigung des Vorsorgeprinzips im nachhaltigen Landschaftsmanagement – eine umweltökonomische Perspektive. In: Potthast T (Hrsg.): Ökologische Schäden. Begriffliche, methodologische und ethische Aspekte. Frankfurt: Peter Lang, S. 57-76
- Barth R, Brauner R, Hermann A, Hermanowski R, Nowack K, Schmidt H, Tappeser B (2003): Grüne Gentechnik und ökologische Landwirtschaft. Berlin: Umweltbundesamt (Hrsg.), UBA-Texte 01/03

- Bartz R, Heink U, Kowarik I (2005): Ökologische Schäden durch Anwendungen der Agro-Gentechnik: zum Schadensbegriff und dessen Operationalisierung. *Natur und Landschaft*, 80 (7), 320-322
- Bauernhof.net: Lexikon der Landwirtschaft. <http://www.bauernhof.net/lexikon/kpl.htm> [07.11.2004]
- Beckie H J, Warwick S I, Nair H, Séguin-Swartz G (2003): Gene flow in commercial fields of herbicide-resistant canola (*Brassica napus*). *Ecological Applications*, 13 (5), S. 1276-1294
- Beismann H, Kuhlmann M (2006): Raumrepräsentativität technischer Pollensammler für ein Langzeitmonitoring von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP). Bonn: Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.), BfN-Skripten, Band 169
- Bergmann K-C (2001): Heuschnupfen, Pollenasthma und pollenassoziierte Nahrungsmittelallergie. In: Bergmann K-C & Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (Hrsg.): *Pollenbestimmungsbuch der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst*. Paderborn: Takt-Verlag, S. 16
- Beug H-J (2004): Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete. München: Verlag Dr. Friedrich Pfeil
- BIfA – Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und -technik (2004): BIfA Aktuell, Nr. 3/2004 [<http://www.bifa.de/>] [29.08.2006]
- Bill R (1996): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2. Heidelberg: Wichmann
- Bill R, Fritsch D (1991): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1. Karlsruhe: Wichmann
- Bill R, Zehner M L (2001): Lexikon der Geoinformatik. Heidelberg: Wichmann
- Boehm M T, Aylor D E, Shields E J (2008): Maize Pollen Dispersal under Convective Conditions. *J Appl Meteorol Climatol*, 47 (1), S. 291-307
- BKG – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie: Georeferenzierungen. (<http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/> → Technische Hinweise → Georeferenzierungen [07.11.2004])
- BMVEL – Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (2003): Bericht über den Zustand des Waldes. Ergebnisse des forstlichen Umweltmonitorings. Bonn
- Bortz J (1993): Statistik für Sozialwissenschaftler. Springer: Berlin
- Bortz J, Döring N (2002): Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler. Springer: Berlin
- Braun M, Teichert O, Zweck A (2006): Übersichtsstudie Biokatalyse in der industriellen Produktion. Fakten und Potenziale zur weißen Biotechnologie. Düsseldorf: Zukünftige Technologien Consulting (ZTC) der VDI Technologiezentrum GmbH (Hrsg.), Band 57
- Bricchi E, Frenguelli G, Mincigrucci G (2000): Experimental results about *Platanus* pollen deposition. *Aerobiologia*, 16, S. 347-352
- Brus D J, de Gruijter J J (1997): Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with Discussion). *Geoderma*, 80, S. 1-44
- Brydges T (2004): Basic Concepts and Applications of Environmental Monitoring. In: Wiersma G B (Hrsg.): *Environmental Monitoring*. Boca Raton: CRC Press, S. 83-109
- Bund/Länder-AG „Monitoring der Umweltwirkungen von GVP“ (2000): Eckpunkte für ein Monitoring der Umweltwirkungen von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP)
- Bund/Länder-AG „Monitoring der Umweltwirkungen von GVP“ (2001): Monitoring von gentechnisch veränderten Pflanzen – Prioritätensetzung. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Stand der Entwicklung des Monitoring von gentechnisch veränderten Organismen (GVO)*, Berlin: UBA-Texte 60/01, S. 34-55
- Bund/Länder-AG „Monitoring der Umweltwirkungen von GVP“ (2002): Entwurf eines Konzeptes für das Monitoring von gentechnisch veränderten Organismen (GVO), 20. September 2002
- Cadle R D (1975): The measurement of airborne particles. New York: John Wiley & Sons

- Campbell I D, McDonald K, Flannigan M D, Kringayark J (1999): Long-distance transport of pollen into the Arctic. *Nature*, 399 (6731), S. 29-30
- Caplan R (2001): GMOs in Agriculture: An Environmentalist Perspective. In: Nelson G C (Hrsg.): *Genetically Modified Organisms in Agriculture. Economics and Politics*. London: Academic Press, S. 197-203
- Cariñanos P, Emberlin J, Galán C, Dominguez-Vilches E (2000): Comparison of two pollen counting methods of slides from hirst type volumetric trap. *Aerobiologia*, 16, S. 339-346
- Chang N-B, Tseng C C (1999): Optimal design of a multi-pollutant air quality monitoring network in a metropolitan region using Koahsiung, Taiwan as an example. *Environmental Monitoring and Assessment*, 57, S. 121-148
- Chamberlain A C (1960): Aspects of the deposition of radioactive and other gases and particles. *International Journal of Air Pollution*, 3, S. 63-88
- Chamberlain A C (1967): Deposition of Particles to Natural Surfaces. In: *Society for General Microbiology (Hrsg.): Airborne microbes*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 138-164
- Clark P J, Evans F C (1954): Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology*, 35, S. 445-453
- Clench-Aas J, Bartonova A, Bøhler T, Grønскеi K E, Sivertsen B, Larsen S (1999): Air pollution exposure monitoring and estimating – Part I. Integrated air quality monitoring system. *Journal of Environmental Monitoring*, 1 (4), S. 313-319
- Clot B (2001): Airborne birch pollen in Neuchâtel (Switzerland): onset, peak and daily patterns. *Aerobiologia*, 17, S. 25-29
- Comtois P (1997): Pollen dispersal and long distance transport: the case of thermophilic pollen in subarctic Canada. *Aerobiologia*, 13, S. 37-42
- Comtois P, Alcazar P, Néron D (1999): Pollen counts statistics and its relevance to precision. *Aerobiologia*, 15, S. 19-28
- Cour P (1974): Nouvelles techniques de détection de flux et retombées polliniques – études de la sédimentation des pollens et des spores à la surface du sol. *Pollen et Spores*, 16, S. 103-141
- Cramer N (1990): *Raps. Anbau und Verwertung*. Stuttgart: Ulmer
- Crane P R (1986): Form and function in wind dispersed pollen. In: Blackmore S, Ferguson I K (Hrsg.): *Pollen and Spores. Form and Function*. Linnean Society Symposium Series, Number 12. London: Academic Press, S. 179-202
- Cressie N A C (1993): *Statistics for Spatial Data*. New York: J. Wiley & Sons
- Cundill P R (1986): A new design of pollen trap for modern pollen studies. *J. Biogeography*, 13, S. 83-98
- Cundill P (1998): A study of the transport and deposition of oilseed rape (*Brassica napus* L.) pollen in east Fife, Scotland. *Aerobiologia*, 14, S. 5-11
- Davenort I J, Wikinson M J, Mason D C, Charters Y M, Jones A E, Allainguillaume J, Butler H T, Raybould A F (2000): Quantifying gene movement from oilseed rape to its wild relatives using remote sensing. *Int. J. Remote Sensing*, 21 (18), 3567-3573
- Delaplane K S, Mayer D F (2000): *Crop pollination by bees*. Wallingford: CABI Publishing
- Deutsch C V, Journel A G (1998): *GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York: Oxford University Press
- Devaux C, Lavigne C, Falentin-Guyomarc'h H, Vautrin S, Lecomte J, Klein E K (2005): High diversity of oilseed rape pollen clouds over an agro-ecosystem indicates long-distance dispersal. *Molecular Ecology*, 14 (8), 2269-2280
- Diepenbrock W, Fischbeck G, Heyland K-U, Knauer N (1999): *Spezieller Pflanzenbau*. Stuttgart: Ulmer

- Di-Giovanni F, Kevan P G (1991): Factors affecting pollen dynamics and its importance to pollen contamination: a review. *Can. J. For. Res.*, 21, S. 1155-1170
- Di-Giovanni F, Kevan P G, Nasr M E (1995): The variability in settling velocities of some pollen and spores. *Grana*, 34, S. 39-44
- Dietz-Pfeilstetter A, Zwerger P (2004): Verbreitung von Herbizidresistenzgenen bei großflächigem Anbau von gentechnisch verändertem Raps mit unterschiedlichen Herbizidresistenzen. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz (Journal of Plant Diseases and Protection)*, Sonderheft XIX, S. 831-838
- Dorak M T (Hrsg., 2006): *Real-time PCR*. New York: Taylor & Francis
- Downey R K (1999): Gene flow and rape – the Canadian experience. In: Lutman P J W (Hrsg.): *Gene Flow and Agriculture: Relevance for Transgenic Crops*. Symposium Proceedings No. 72. Farnham: British Crop Protection Council, S. 109-116
- Durham O C (1943): The volumetric incidence of atmospheric allergens: I. Specific Gravity of Pollen Grains. *Journal of Allergy*, 14 (6), S. 455-461
- Durham O C (1944): The volumetric incidence of atmospheric allergens: II. Simultaneous Measurements by Volumetric and Gravity Slide Methods. Results With Ragweed Pollen and *Alternaria* Spores. *Journal of Allergy*, 15 (3), S. 226-235
- Durham O C (1946): The volumetric incidence of atmospheric allergens: IV. A Proposed Standard Method of Gravity Sampling, Counting, and Volumetric Interpolation of Results. *Journal of Allergy*, 17 (2), S. 79-86
- Duden (1989): *Etymologie. Herkunftswörterbuch der deutschen Sprache – Duden Band 7*. Hrsg.: Wissenschaftlicher Rat der Dudenredaktion. Mannheim: Dudenverlag
- Duden (1997): *Fremdwörterbuch – Duden Band 5*. Hrsg.: Wissenschaftlicher Rat der Dudenredaktion. Mannheim: Dudenverlag
- DWD – Deutscher Wetterdienst (Hrsg., [1991-2005a]): *Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Bayern für den Monat [April / Mai] [1991 bis 2005] – Ausgabe Südbayern*
- DWD – Deutscher Wetterdienst (Hrsg., [1991-2005b]): *Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Bayern für den Monat Juli [1991 bis 2005] – Ausgabe Südbayern*
- DWD – Deutscher Wetterdienst (Hrsg., 2003a): *Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Bayern für den Monat März 2003 – Ausgabe Südbayern*
- DWD – Deutscher Wetterdienst (Hrsg., 2003b): *Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Bayern für den Monat April 2003 – Ausgabe Südbayern*
- DWD – Deutscher Wetterdienst (Hrsg., 2003c): *Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Bayern für den Monat Mai 2003 – Ausgabe Südbayern*
- DWD – Deutscher Wetterdienst (Hrsg., 2003d): *Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Bayern für den Monat Juni 2003 – Ausgabe Südbayern*
- DWD – Deutscher Wetterdienst (Hrsg., 2003e): *Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Bayern für den Monat Juli 2003 – Ausgabe Südbayern*
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2006): *Pollenflugvorhersage*. <http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Medizin/Pollenvs/abfrage.htm> [05.02.2006]
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2009a): *Presse-Info*. http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2009/PK__27__04__09/20090427__Pressemitteilung__zur__PK,templateID=raw,property=publicationFile.pdf/20090427__Pressemitteilung__zur__PK.pdf [19.07.2009]
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2009b): *High-Tech-Überwachung des Pollenflugs mit dem Pollenmonitor BAA (Bio-Aerosol-Analysator)*. <http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Pres>

- se/Pressekonferenzen/2009/PK__27__04__09/20090427__Rede__Hund,templateID=raw,property=publicationFile.pdf/20090427__Rede__Hund.pdf [19.07.2009]
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2009c): Standortkarte. http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2009/PK__27__04__09/20090427__Standortkarte,templateID=raw,property=publicationFile.pdf/20090427__Standortkarte.pdf [19.07.2009]
- Eady C, Twell D, Lindsey K (1995): Pollen viability and transgene expression following storage in honey. *Transgenic Research*, 4, S. 226-231
- Eastham K, Sweet J (2002): Genetically modified organisms (GMOs): The significance of gene flow through pollen transfer. Kopenhagen: EEA – European Environment Agency (Hrsg.)
- Edmonds R L (1979, Hrsg.): *Aerobiology. The Ecological Systems Approach*. US/IBP synthesis series 10. Stroudsburg: Dowden, Hutchinson & Ross
- Edwards K, Logan J, Saunders N (2004): *Real-Time PCR. An Essential Guide*. Wymondham: Horizon Bioscience
- Eickelpasch D, Eickelpasch G (2004): Feststellung und Bewertung von Immissionen. Leitfaden zur Immissionsüberwachung in Deutschland. Berlin: Umweltbundesamt (Hrsg.), UBA-Texte 07/04
- Elliott L J, Mason D C, Wilkinson M J, Allainguillaume J, Norris C, Alexander M, Welters R (2004): The role of satellite image-processing for national-scale estimates of gene flow from genetically modified crops: rapeseed in the UK as a model. *Journal of Applied Ecology*, 41 (6), S. 1174-1184
- Emberlin J, Norris-Hill J (1991): Spatial variation of pollen deposition in North London. *Grana*, 30, S. 190-195
- Emberlin J, Adams-Groom B, Tidmarsh J (1999): A Report on the Dispersal of Maize Pollen. National Pollen Research Unit for the Soil Association. Bristol: Soil Association (Hrsg.) [<http://www.soilassociation.org/> → Library → Research Papers]
- Erdtmann G (1943): *An introduction to pollen analysis*. New York: Ronald Press Company
- Esselborn M, Wirth M, Fix A, Tesche M, Ehret G (2008): Airborne high spectral resolution lidar for measuring aerosol extinction and backscatter coefficients. *Applied Optics*, 47 (3), S. 346-358
- Etling D (2002): *Theoretische Meteorologie. Eine Einführung*. Berlin: Springer
- Eurimage (2005): ASTER [<http://www.eurimage.com/products/docs/aster.pdf>]
- EUROLAB – European Federation of National Associations of Measurement, Testing and Analytical Laboratories (2007): Measurement uncertainty revisited: Alternative approaches to uncertainty evaluation. Technical Report No. 1/2007, March 2007. http://www.eurolab.org/docs/technical report/ Technical_Report_Measurement_Uncertainty_2007.pdf [16.10.2008]
- Fægri K, Iversen J (1989): *Textbook of Pollen Analysis*. Chichester: John Wiley & Sons (4. Auflage: Fægri K, Kaland P E, Krzywinski K)
- Feil B, Schmid J E (2001): Pollenflug bei Mais, Weizen und Roggen. Ein Beitrag zur Frage der beim Anbau von transgenen Kulturpflanzen erforderlichen Isolierabstände. Aachen: Shaker
- Ferrandino F J, Aylor D E (1984): Settling Speed of Clusters of Spores. *Phytopathology*, 74 (8), S. 969-972
- Fiebig C, Altenbeck P, Brünen-Nieweler C, Kilwinski J, König H, Köllner B, Naumann H, Seher C, Verbücheln G (2007): GVO-Monitoring und Einbindung in bestehende Überwachungsprogramme in Nordrhein-Westfalen (NRW). Erste Erfahrungen mit der Integration ausgewählter Fragestellungen eines GVO-Monitorings in das System der Ökologischen Flächenstichprobe und Erprobung standardisierter Pollenmonitoring-Verfahren (VDI 4330, Bl. 3 und 4) in der Praxis. In: Breckling B, Dolek M, Lang A, Reuter H, Verhoeven R (Hrsg.): *GVO-Monitoring vor der Umsetzung*. Bonn (Bundesamt für Naturschutz): *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 49, S. 151-161
- Finck M, Seitz H, Beismann H (2007): Fortschritte in der Standardisierung und Harmonisierung von Methoden für das GVO-Monitoring. In: Breckling B, Dolek M, Lang A, Reuter H, Verhoeven R (Hrsg.): *GVO-*

- Monitoring vor der Umsetzung. Bonn (Bundesamt für Naturschutz): Naturschutz und Biologische Vielfalt 49, S. 71-81
- Forster E-M (1994): Optimierung eines Bioindikator-Meßnetzes mit Hilfe geostatistischer Methoden und eines Geographischen Informationssystems. Neuherberg: GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (Hrsg.), zugleich Dissertation, Universität München
- Fränze O (1978): The Structure of Soil Associations and Cenozoic Morphogeny in Southeast Africa. In: Nagl H (Hrsg.): Beiträge zur Quartär- und Landschaftsforschung – Festschrift zum 60. Geburtstag von Julius Fink. Wien: Verlag Ferdinand Hirt, S. 159-176
- Free J B (1993): Insect Pollination of Crops. London: Academic Press
- Frenguelli G, Tedeschini E, Veronesi F, Bricchi E (2002): Airborne pine (*Pinus* spp.) pollen in the atmosphere of Perugia (Central Italy): Behaviour of pollination in the two last decades. *Aerobiologia*, 18, S. 223-228
- Fuckerieder K (1976): Der Graspollengehalt der Luft in Mitteleuropa. Bonn: Umweltbundesamt (Hrsg.), Berichte 9/76, zugl. Dissertation Technische Universität München
- Funk T (2006): Monitoring der Überdauerung und Verbreitung von transgenem Raps (*Brassica napus* L.). Dissertation, Technische Universität München
- Funk T, Wenzel G, Schwarz G (2006): Outcrossing frequencies and distribution of transgenic oilseed rape (*Brassica napus* L.) in the nearest neighbourhood. *European Journal of Agronomy*, 24 (1), S. 26-34
- Gabarra E, Belmonte J, Canela M (2002): Aerobiological behaviour of *Platanus* L. pollen in Catalonia (North-East Spain). *Aerobiologia*, 18, S. 185-193
- Galinat W C (1988): The Origin of Corn. In: Sprague G F, Dudley J W (Hrsg.): Corn and Corn Improvement. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America
- Garcia M C, Figueroa J M, Gomez R L, Townsend R, Schoper J (1998): Pollen Control During Transgenic Hybrid Maize Development in Mexico. *Crop Science*, 38, S. 1597-1602
- Gehrig R (2006): The influence of the hot and dry summer 2003 on the pollen season in Switzerland. *Aerobiologia*, 22 (1), S. 27-34
- Geisler G (1988): Pflanzenbau. Ein Lehrbuch. Biologische Grundlagen und Techniken der Pflanzenproduktion. Berlin: Paul Parey Verlag
- Gonianakis M, Neonakis I, Darivianaki E, Gonianakis I, Bouros D, Kontou-Fili K (2005): Airborne Ascomycotina on the island of Crete: Seasonal patterns based on an 8-year volumetric survey. *Aerobiologia*, 21, S. 69-74
- Goovaerts P (1997): Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York: Oxford University Press
- Goss J A (1968): Development, Physiology, and Biochemistry of Corn and Wheat Pollen. *Botanical Review*, 34, S. 333-358
- Graul H (1962): Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 180 Augsburg. Bad Godesberg: Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung (Hrsg.)
- Gregory P H (1973): The Microbiology of the Atmosphere. Aylesbury: Leonhard Hill Books.
- Gregory P H, Stedman O J (1953): Deposition of air-borne *Lycopodium* spores on plane surfaces. *Annals of Applied Biology*, 40, S. 651-674
- Grottenthaler W (1980): Geologische Karte von Bayern 1:25000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 7833 Fürstfeldbruck. München: Bayerisches Geologisches Landesamt (Hrsg.)
- Güßefeldt J (1997): Grundsätzliche Überlegungen zu Regionalisierungsmodellen. *Geographische Zeitschrift*, 85 (1), S. 1-19

- Gunstone F D (2004, Hrsg.): Rapeseed and Canola Oil. Production, Processing, Properties and Uses. Oxford: Blackwell Publishing
- Häckel H (2005): Meteorologie. Stuttgart: Ulmer
- Haeupler H, Loos G H, Surkus B (2003): Monitoring von herbizidresistentem Raps in NRW. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Monitoring von Umweltwirkungen gentechnisch veränderter Organismen. Berlin: UBA-Texte 53/03, S. 71-89
- Halfhill M D, Millwood R J, Raymer P L, Stewart Jr. C N (2002): *Bt*-transgenic oilseed rape hybridization with its weedy relative, *Brassica rapa*. Environ. Biosafety Res. 1 (1), S. 19-28
- Hall S A (1990): Pollen deposition and vegetation in the southern Rocky Mountains and southwest Plains, USA. Grana, 29, S. 47-61
- Hall L, Topinka K, Huffman J, Davis L, Good A (2000): Pollen flow between herbicide-resistant *Brassica napus* is the cause of multiple-resistant *B. napus* volunteers. Weed Science, 48, S. 688-694
- Hecht R, Winkler H (2001): Empfehlungen zur Präparationstechnik, Bestimmung und Auswertung bei der Pollenflugerfassung mit der Burkard-Pollenfalle. In: Bergmann K-C & Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (Hrsg.): Pollenbestimmungsbuch der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst. Paderborn: Takt-Verlag, S. 20-23
- Hehl O, Hoopmann M, Etling C (2005): Modellgestützte Abschätzung der Bioaerosol-Exposition von Anwohnern in der Nähe von Tierhaltungsanlagen. Allergo Journal, 14 (2), S. 112-113
- Heinold B, Tegen I, Esselborn M, Kandler K, Knippertz P, Müller D, Schladitz A, Tesche M, Weinzierl B, Ansmann A, Althausen D, Laurent B, Petzold A, Schepanski K (2008): Regional Saharan Dust Modelling during the SAMUM 2006 Campaign. Tellus B - Chemical and Physical Meteorology (eingereichter Beitrag)
- Heinrich U (1994): Flächenschätzung mit geostatistischen Verfahren – Variogrammanalyse und Kriging. In: Schröder W, Vetter L, Fränze O (Hrsg.): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie. Braunschweig: Vieweg, S. 145-164
- Helbig N, Vogel B, Vogel H, Fiedler F (2004): Numerical modeling of pollen dispersion on the regional scale. Aerobiologia, 20, S. 3-19
- Hellawell J M (1991): Development of a rationale for monitoring. In: Goldsmith F B (Hrsg.): Monitoring for Conservation and Ecology. London: Chapman and Hall, S. 1-14
- Herbert F (1987): Mechanismen der nassen und trockenen Deposition. In: Jaenicke R (Hrsg.): Atmosphärische Spurenstoffe. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, S. 241-269
- Heslop-Harrison J (1979): An interpretation of the hydrodynamics of pollen. Amer. J. Bot., 66 (6), S. 737-743
- Heß D (1990): Die Blüte. Stuttgart: Ulmer
- Hesse H (2004): Umweltschäden und ökologisches Wissen – kleine Zwischenbetrachtung aus philosophischer Sicht. In: Potthast T (Hrsg.): Ökologische Schäden. Begriffliche, methodologische und ethische Aspekte. Frankfurt: Peter Lang, S. 51-56
- Hidalgo P J, Mangin A, Galán C, Hembise O, Vázquez L M, Sanchez O (2002): An automated system for surveying and forecasting *Olea* pollen dispersion. Aerobiologia, 18, S. 23-31
- Hinds W C (1999): Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. New York: John Wiley & Sons
- Hirst J M (1952): An automatic volumetric spore trap. Ann. Appl. Biol., 39 (2), S. 257-265
- Hirst J M, Hurst G W (1967): Long-distance Spore Transport. In: Society for General Microbiology (Hrsg.): Airborne microbes. Cambridge: Cambridge University Press, S. 307-344
- Hjelmroos M (1991): Evidence of long-distance transport of *Betula* pollen. Grana, 30, S. 215-228

- Hofmann F, Schlechtriemen U, Wosniok W, Foth M (2005): GVO-Pollenmonitoring – Technische und biologische Pollenakkumulatoren und PCR-Screening für ein Monitoring von gentechnisch veränderten Organismen. Bonn: Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.), BfN-Skripten, Band 139
- Hofmann F, Epp R, Kalchschmid A, Kruse L, Kuhn U, Maisch B, Müller E, Ober S, Radtke J, Schlechtriemen U, Schmidt G, Schröder W, von der Ohe W, Vögel R, Wedl N, Wosniok W (2008): GVO-Pollenmonitoring zum *Bt*-Maisanbau im Bereich des NSG/FFH-Schutzgebietes Ruhlsdorfer Bruch. Umweltwiss Schadst Forsch, DOI 10.2007/s12302-008-0016-2
- Houilding S W (2000): Practical Geostatistics. Modeling and Spatial Analysis. Berlin: Springer
- Hüsing J O, Nitschmann J (Hrsg., 1987): Lexikon der Bienenkunde. München: Ehrenwirth
- Huss-Marp J (2000): Untersuchung zur Bedeutung der relativen Luftfeuchte für die Allergenfreisetzung aus Pollen. Dissertation, Technische Universität München
- Ireland D S, Wilson Jr. D O, Westgate M E, Burris J S, Lauer M J (2006): Managing Reproductive Isolation in Hybrid Seed Corn Production. Crop Sci., 46, S. 1445-1455
- Isaaks E H, Srivastava R M (1989): An Introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press
- James C (2005): Executive Summary of Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2005. ISAAA Briefs No. 34. Ithaca: ISAAA
- Janicke, Ingenieurbüro (2003): AUSTAL2000, Programmbeschreibung zu Version 1.0, Stand 2003-02-09. (<http://www.austal2000.de>) [18.02.2003]
- Janicke, Ingenieurbüro (2005): LASAT – Ein Programmsystem zur Berechnung von Schadstoffausbreitung in der Atmosphäre (http://www.janicke.de/htm/g_home.htm) [14.08.2005]
- Jarosz N, Loubet B, Durand B, McCartney A, Foueillassar X, Huber L (2003): Field measurements of airborne concentration and deposition rate of maize pollen. Agricultural and Forest Meteorology, 119, S. 37-51
- Jarosz N, Loubet B, Huber L (2004): Modelling airborne concentration and deposition rate of maize pollen. Atmospheric Environment, 38, S. 5555-5566
- Jarosz N, Loubet B, Durand B, Foueillassar X, Huber L (2005): Variations in Maize Pollen Emission and Deposition in Relation to Microclimate. Environ. Sci. Technol., 39, S. 4377-4384
- Jato V, Dopazo A, Aira M J (2001a): Airborne pollen data of Platanaceae in Santiago de Compostela (Iberian Peninsula). Aerobiologia, 17, S. 143-149
- Jato V, Aira M J, Dopazo A, Iglesias M I, Méndez J, Rodríguez-Rajo F J (2001b): Aerobiology of *Castanea* pollen in Galicia. Aerobiologia, 17, S. 233-240
- Johnston K, Ver Hoef J M, Krivoruchko K, Lucas N (2001): Using ArcGIS Geostatistical Analyst. Redlands: ESRI
- Jones M D, Brooks J S (1950): Effectiveness of Distance and Border Rows in Preventing Outcrossing in Corn. Okla. Agr. Exp. Sta. Tech. Bull., 38, S. 3-18
- Jørgensen R B, Andersen B (1994): Spontaneous hybridisation between oilseed rape (*Brassica napus*) and weedy *B. campestris* (Brassicaceae): a risk of growing genetically modified oilseed rape. American Journal of Botany, 81 (12), S. 1620-1626
- Jørgensen R B, Andersen B, Landbo L, Mikkelsen T R (1996): Spontaneous hybridisation between oilseed rape (*Brassica napus*) and weedy relatives. Acta Horticulturae (ISHS), 407, S. 193-200
- Journel A G, Huijbregts C J (1978): Mining Geostatistics. London: Academic Press
- Kasprzyk I, Harmata K, Myszkowska D, Stach A, Stepalska D (2001): Diurnal variation of chosen airborne pollen at five sites in Poland. Aerobiologia, 17, S. 327-345
- Kawashima S, Takahashi Y (1995): Modeling and simulation of mesoscale dispersion processes for airborne cedar pollen. Grana, 34, S. 142-150

- Kawashima S, Takahashi Y (1999): An improved simulation of mesoscale dispersion of airborne cedar pollen using a flowering-time map. *Grana*, 38 (5), S. 316-324
- Kempken F, Kempken R (2004): *Gentechnik bei Pflanzen. Chancen und Risiken*. Berlin: Springer
- Khachatourians G G, Sumner A K, Phillips P W B (2001): An Introduction to the History of Canola and the Scientific Basis for Innovation. In: Phillips P W B, Khachatourians G G (Hrsg.): *The Biotechnology Revolution in Global Agriculture: Innovation, Invention and Investment in the Canola Industry*. Wallingford: CAB International, S. 33-47
- Kiesselbach T A (1999): *The Structure and Reproduction of Corn*. Cold Spring Harbor: Cold Spring Harbor Laboratory Press (Nachdruck, Original erschienen bei: Lincoln: University of Nebraska Press, 1949)
- Kjellsson G, Strandberg M (2001): *Monitoring and surveillance of genetically modified higher plants. Guidelines for procedures and analysis of environmental effects*. Basel: Birkhäuser
- Kleeberg H-B, Cemus J (1992): Regionalisierung hydrologischer Daten – Definitionen. In: Kleeberg, H.-B. (Hrsg.): *Regionalisierung in der Hydrologie*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft
- Klein E K, Lavigne C, Foueillassar X, Gouyon P-H, Larédo C (2003): Corn pollen dispersal: Quasi-mechanistic models and field experiments. *Ecological Monographs*, 73 (1), S. 131-150
- Köhler A (2004): Atmospheric Monitoring. In: Wiersma G B (Hrsg.): *Environmental Monitoring*. Boca Raton: CRC Press, S. 201-215
- König H (2003): Naturlandschaft der nordrhein-westfälischen Normallandschaft. *LÖBF-Mitteilungen* 2/03, S. 15-24
- Körber-Grohne U (1987): *Nutzpflanzen in Deutschland. Kulturgeschichte und Biologie*. Stuttgart: Konrad Theiss Verlag
- Kramer H J (2002): *Observation of the Earth and Its Environment. Survey of Missions and Sensors*. Springer: Berlin
- Kraus H (2004): *Die Atmosphäre der Erde. Eine Einführung in die Meteorologie*. Springer: Berlin
- Kruskal W, Mosteller F (1979): Representative Sampling, III: the Current Statistical Literature. *International Statistical Review*, 47, S. 245-265
- Kuhlmann M, Beismann H (2004): The pollen deposition index (PDI) as a measure for the amount of airborne pollen at specific sites. In: Gesellschaft für Ökologie (Hrsg.): *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie*, Band 34 (Proceedings of the GfÖ, Vol. 34), Berlin, S. 278
- Kuhlmann M, Beismann H (2005): Measuring the deposition of oilseed rape (*Brassica napus* L.) pollen on landscape level – from point measurement to interpolated surface area. *Allergo Journal*, 14 (4), S. 281-282
- Kuhnt G (1994): *Regionale Repräsentanz – Beiträge zu einer raumorientierten Meßtheorie*. Habilitation, Universität Kiel
- Laaidi M (2001): Regional variations in the pollen season of *Betula* in Burgundy: two models for predicting the start of the pollination. *Aerobiologia*, 17, S. 247-254
- Lacey J, Venette J (1995): Outdoor Air Sampling Techniques. In: Cox C S, Wathes C M (Hrsg.): *Bioaerosols handbook*. CRC Press: Boca Raton, S. 407-471
- Lambert D H, Villareal R L, Mackenzie D R (1980): A General Model for Gradient Analysis. *Phytopath. Z.*, 98, S. 150-154
- Lang A, Ludy C, Vojtech E (2004): Dispersion and deposition of *Bt* maize pollen in field margins. *J. Plant Diseases and Protection (Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz)*, 111 (5), S. 417-428
- Langridge D F, Goodman R D (1982): Honeybee pollination of oilseed rape, cultivar Midas. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 22, S. 124-126
- Larsson K-A (1993): Prediction of the pollen season with a cumulated activity method. *Grana*, 32, S. 111-114

- Latalowa M, Miętus M, Uruska A (2002): Seasonal variations in atmospheric *Betula* pollen count in Gdańsk (southern Baltic coast) in relation to meteorological parameters. *Aerobiologia*, 18, S. 33-43
- Laue H O A (2004): Automated Detection of Canola/Rapeseed Cultivation from Space. Application of new Algorithms for Identification of Agricultural Plants with Multispectral Satellite Data on the Example of Canola Cultivation. Dissertation, Universität Bremen
- Leins P (2000): Blüte und Frucht: Aspekte der Morphologie, Entwicklungsgeschichte, Phylogenie, Funktion und Ökologie. Stuttgart: Schweizerbart
- Leser H (1997): DIERCKE-Wörterbuch Allgemeine Geographie. München: Deutscher Taschenbuch Verlag und Braunschweig: Westermann
- Leuschner R M (1999): Comparison between pollen counts at ground and at roof level in Basel (Switzerland). *Aerobiologia*, 15, S. 143-147
- Leuschner R M, Christen H, Jordan P, Vonthein R (2000): 30 years of studies of grass pollen in Basel (Switzerland). *Aerobiologia*, 16, S. 381-391
- Lewis D M, Ogden E C (1965): Trapping Methods for Modern Pollen Rain Studies. In: Kummel B, Raup D (Hrsg.): Handbook of paleontological techniques. San Francisco: Freeman, S. 613-626
- LfL – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg., 2005): Agrarmärkte 2004. Schriftenreihe, 4
- LfL – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg., 2005): Monitoring der Umweltwirkungen des Bt-Gens. Schriftenreihe, 7
- LfStaD – Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (Hrsg., 2003): Statistisches Jahrbuch für Bayern 2003. München
- LfStaD – Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (Hrsg., 2007): Statistisches Jahrbuch für Bayern 2007. München
- Liedtke H, Marcinek J (Hrsg., 1995): Physische Geographie Deutschlands. Gotha: Justus Perthes Verlag
- Lillesand T M, Kiefer R W (2000): Remote Sensing and Image Interpretation. New York: John Wiley & Sons
- Lindner H P (2000): Pollen morphology and wind pollination in angiosperms. In: Harley M M, Morton C M, Blackmore S (Hrsg.): Pollen and Spores: Morphology and Biology. Kew: Royal Botanic Gardens, S. 73-88
- Loos C, Seppelt R, Meier-Bethke S, Schiemann J, Richter O (2003): Spatially explicit modelling of transgenic maize pollen dispersal and cross-pollination. *Journal of Theoretical Biology*, 225, S. 241-255
- Lu S, Oki K, Shimizu Y, Omasa K (2007): Comparison between several feature extraction/classification methods for mapping complicated agricultural land use patches using airborne hyperspectral data. *Int. J. Remote Sensing*, 28 (5), S. 963-984
- Ludlam F H (1967): The Circulation of Air, Water and Particles in the Troposphere. In: Society for General Microbiology (Hrsg.): Airborne microbes. Cambridge: Cambridge University Press, S. 1-17
- Luna S V, Figueroa J M, Baltazar B M, Gomez R L, Townsend R, Schoper J B (2001): Maize Pollen Longevity and Distance Isolation Requirements for Effective Pollen Control. *Crop Science*, 41 (5), S. 1551-1557
- Ma B L, Subedi K D, Reid L M (2004): Extent of Cross-Fertilization in Maize by Pollen from Neighboring Transgenic Hybrids. *Crop Science*, 44 (4), S. 1273-1282
- Maas D (1999): Umweltmonitoring – Biomonitoring: Begriffsdefinitionen. In: Blaschke T (Hrsg.): Umweltmonitoring und Umweltmodellierung. GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Entwicklung, Heidelberg: Wichmann, S. 47-53
- Mandrioli P, Negrini M G, Scarani C, Tampieri F, Trombetti F (1980): Mesoscale transport of *Corylus* pollen grains in winter atmosphere. *Grana*, 19, S. 227-233
- Mason C J (1979): Principles of atmospheric transport. In: Edmonds, R. L. (Hrsg.): Aerobiology. The Ecological Systems Approach. Stroudsburg: Dowden, Hutchinson & Ross, S. 85-95

- Matsuoka Y, Vigouroux Y, Goodman M M, Sanchez J G, Buckler E, Doebley J (2002): A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proc Natl Acad Sci USA (PNAS)*, 99 (9), S. 6080-6084
- May K R (1967): Physical Aspects of Sampling Airborne Microbes. In: Society for General Microbiology (Hrsg.): Airborne microbes. Cambridge: Cambridge University Press, S. 60-80
- Mazzeo N A, Venegas L E (2008): Design of an Air-Quality Surveillance System for Buenos Aires City Integrated by a NO_x Monitoring Network and Atmospheric Dispersion Models. *Environmental Modeling and Assessment*, 13(3), S. 349-356
- McCartney H A, Lacey M E (1991): Wind dispersal of pollen from crops of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *J. Aerosol Science*, 22 (4), S. 467-477
- McCartney H A (1994): Dispersal of spores and pollen from crops. *Grana*, 33, S. 76-80
- McPherson M J, Møller S G (2006): PCR. Second Edition. New York: Taylor & Francis
- Menrad K, Gaisser S, Hüsing B, Menrad M (2003): Gentechnik in der Landwirtschaft, Pflanzenzucht und Lebensmittelproduktion. Stand und Perspektiven. Heidelberg: Physica-Verlag
- Menzel G, Born A (2004): Empirische Analyse der Verbreitung von Raps und Kreuzungspartnern in Bremen und im Bremer Umland. In: UFT, Universität Bremen (2004): Forschungsverbund GenEERA - Generische Erfassung und Extrapolation der Rapsausbreitung (Abschlussbericht), S. B.2-1-B.2-58
- Mesquida J, Renard M (1982): Étude de la dispersion du pollen par le vent et de l'importance de la pollinisation anémophile chez le colza (*Brassica napus* L., var. *oleifera* Metzger). *Apidologie*, 13 (4), S. 353-367
- Mesquida J, Renard M, Pierre J-S (1988a): Rapeseed (*Brassica napus* L.) productivity: The effect of honeybees (*Apis mellifera* L.) and different pollination conditions in cage and field tests. *Apidologie*, 19 (1), S. 51-71
- Mesquida J, Marilleau R, Pham-Delegue M-H, Renard M (1988b): A study of rapeseed (*Brassica napus* L. var. *oleifera* Metzger) flower nectar secretions. *Apidologie*, 19 (3), S. 307-317
- Metz P L J, Jacobsen E, Stiekema W J (1997): Aspects of the biosafety of transgenic oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Acta Bot. Neerl.*, 46 (1), S. 51-67
- Meuer S, Wittwer C, Nakagawara K (Hrsg., 2001): Rapid cycle real-time PCR: methods and applications. Berlin: Springer
- Meynen E, Schmidthüsen J, Gellert J, Neef E, Müller-Miny H, Schultze J H (Hrsg., 1962): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Band I. Bad Godesberg: Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung
- Michler G (1994): Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 181 München. Bonn-Bad Godesberg: Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung (Hrsg.)
- Middelhoff U, Hildebrandt J, Breckling B (2006): Die Ökologische Flächenstichprobe als Instrument eines GVO-Monitoring. Bonn: Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.), BfN-Skripten, Band 172
- Mikkelsen T R, Andersen B, Jørgensen R B (1996): The risk of crop transgene spread. *Nature*, 380, S. 31
- Miller P D (1982): Maize Pollen: Collection and Enzymology. In: Sheridan W F (Hrsg.): Maize For Biological Research. A Special Publication of the Plant Molecular Biology Association, University Press, University of North Dakota, S. 279-293
- Mitchell A (1999): The ESRI Guide to GIS Analysis. Volume 1: Geographic Patterns & Relationships. Redlands: Environmental Systems Research Institute (Hrsg.)
- Moreno-Grau S, Angosto J M, Elvira-Rendueles B, Bayo J, Moreno J, Moreno-Clavel J (2000): Effects of meteorological parameters and plant distribution on Chenopodiaceae-Amaranthaceae, *Quercus* and *Olea* airborne pollen concentrations in the atmosphere of Cartagena (Spain). *Aerobiologia*, 16, S. 17-20

- Moseholm L, Weeke E R, Petersen B N (1987): Forecast of pollen concentrations of Poaceae (grasses) in the air by time series analysis. *Pollen et Spores*, 29 (2-3), S. 305-321
- Müller-Westermeier G (1996): Klimadaten von Deutschland Zeitraum 1961 – 1990. Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.)
- Mullins J, Emberlin J (1997): Sampling pollens. *J. Aerosol Science*, 28 (3), S. 365-370
- Mues V (2000): GIS-gestützte Regionalisierung von Klima- und Depositionsdaten in Niedersachsen. Dissertation, Universität Göttingen
- Müsken H, Hansmeier B (2005): Bedeutung von Qualitätskontrollen bei der Pollenflugvorhersage. *Allergo Journal*, 14 (4), S. 276
- Nelson G C (2001): Introduction. In: Nelson G C (Hrsg.): *Genetically Modified Organisms in Agriculture. Economics and Politics*. London: Academic Press, S. 3-6
- Neumeyer S, Zimmermann T (2005): Trends and tendency of pollen and moulds in Erlangen 1987-2004. *Allergo Journal*, 14 (4), S. 274-275
- den Nijs H, Bartsch D (2004): Introgression of GM Plants and the EU Guidance Note for Monitoring. In: den Nijs H, Bartsch D, Sweet J (Hrsg.): *Introgression from Genetically Modified Plants into Wild Relatives*. Wallingford: CABI Publishing, S. 365-389
- Norris-Hill J (1995): The modeling of daily Poaceae pollen concentrations. *Grana*, 34, S. 182-188
- Norris-Hill J (1998): A method to forecast the start of the *Betula*, *Platanus* and *Quercus* pollen seasons in North London. *Aerobiologia*, 14, S. 165-170
- Ogden E C, Raynor G S (1967): An new sampler for airborne pollen: the roto-slide. *Journal of Allergy*, 40, S. 1-11
- Ogden E C, Hayes J V, Raynor G S (1969): Diurnal patterns of pollen emission in *Ambrosia*, *Phleum*, *Zea*, and *Ricinus*. *American Journal of Botany*, 56 (1), S. 16-21
- Ogden E C, Raynor G S, Hayes J V, Lewis D M, Haines J H (1974): *Manual for sampling airborne pollen*. New York: Hafner Press
- von der Ohe K, von der Ohe W (2003): *Celler Melissopalynologische Sammlung – CMS – Celle's Melissopalynological Collection*. Celle: Niedersächsisches Landesinstitut für Bienenkunde (Hrsg.)
- Okubo A, Levin S A (1989): A theoretical framework for data analysis of wind dispersal of seeds and pollen. *Ecology*, 70 (2), S. 329-338
- Olea R A (1991): *Geostatistical glossary and multilingual dictionary*. New York: Oxford University Press
- Ong E K, Knox R B, Singh M B (1996): Molecular Characterization and Environmental Monitoring of Grass Pollen Allergens. In: Mohapatra S S, Knox R B (Hrsg.): *Pollen biotechnology. Gene expression and allergen characterization*, S. 176-210
- Orlanski I (1975): A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. *Bulletin American Meteorological Society*, 56 (5), S. 527-530
- Palacios I S, Molina R T, Muñoz Rodríguez A F (2007): The importance of interactions between meteorological conditions when interpreting their effect on the dispersal of pollen from homogeneously distributed sources. *Aerobiologia*, 23, S. 17-26
- Pascher K, Macalka-Kampfer S, Reiner H (2000): *Vegetationsökologische und genetische Grundlagen für die Risiko-Beurteilung von Freisetzungen von transgenem Raps und Vorschläge für ein Monitoring*. Wien: Bundesministerium für soziale Sicherheit und Generationen, Sektion IX (Hrsg.)
- Pascher K, Dolezel M (2005): Koexistenz von gentechnisch veränderten, konventionellen und biologisch angebauten Kulturpflanzen in der österreichischen Landwirtschaft – Handlungsempfehlungen aus ökologischer Sicht. *Forschungsberichte der Sektion IV, Band 2/2005* (Hrsg. Bundesministerium für Gesundheit und Frauen, Wien)

- Paterniani E, Stort A C (1974): Effective maize pollen dispersal in the field. *Euphytica*, 23, S. 129-134
- Paton J B (1921): Pollen and pollen enzymes. *American Journal of Botany*, 8 (10), S. 471-501
- Petersen G, Johansen B, Seberg O (1996): PCR and sequencing from a single pollen grain. *Plant Molecular Biology*, 31, S. 189-191
- Pohl F (1937a): Die Pollenerzeugung der Windblütler. Eine vergleichende Untersuchung mit Ausblicken auf den Bestäubungshaushalt tierblütiger Gewächse und die pollenanalytische Waldgeschichtsforschung. (Untersuchungen zur Morphologie und Biologie des Pollens VI.) Dresden: Beihefte zum Botanischen Centralblatt, Bd. LVI. Abt. A, S. 365-470
- Pohl F (1937b): Die Pollenkorngewichte einiger windblütiger Pflanzen und ihre ökologische Bedeutung. (Beiträge zur Morphologie und Biologie des Pollens VII.) Dresden: Beihefte zum Botanischen Centralblatt, Bd. LVII. Abt. A, S. 112-172
- Potthast T (2004): Conceptual, epistemological, and ethical perspectives on “Ecological Damage” with regard to genetically modified organisms. In: Breckling B, Verhoeven R (Hrsg.): *Risk Hazard Damage. Specification of Criteria to Assess Environmental Impact of Genetically Modified Organisms*, Bonn: Bundesamt für Naturschutz (BfN), *Naturschutz und Biologische Vielfalt*, 1, S. 245-256
- Punt W (1986): Functional factors influencing pollen form. In: Blackmore, S.; Ferguson, I. K. (Hrsg.): *Pollen and Spores. Form and Function*. Linnean Society Symposium Series, Number 12. London: Academic Press, S. 97-101
- Puppi Branzi G, Zanotti A L (1992): Estimate and mapping of the activity of airborne pollen sources. *Aerobiologia*, 8, S. 69-74
- Rakow G, Woods D L (1987): Outcrossing in rape and mustard under Saskatchewan prairie conditions. *Canadian Journal of Plant Science*, 67, S. 147-151
- Ramsay G, Thompson C E, Neilson S, Mackay G R (1999): Honeybees as vectors of GM oilseed rape pollen. In: Lutman P J W (Hrsg.): *Gene Flow and Agriculture: Relevance for Transgenic Crops*. Symposium Proceedings No. 72. Farnham: British Crop Protection Council, S. 209-214
- Ramsay G, Thompson C, Squire G (2003): Quantifying landscape-scale gene flow in oilseed rape. Final Report of DEFRA Project RG0216: An experimental and mathematical study of the local and regional scale movement of an oilseed rape transgene. [http://www.defra.gov.uk/environment/gm/research/pdf/epg_rg0216.pdf]
- Raynor G S (1979): Sampling techniques in aerobiology. In: Edmonds R L (Hrsg.): *Aerobiology. The Ecological Systems Approach*. US/IBP synthesis series 10. Stroudsburg: Dowden, Hutchinson & Ross, S. 151-172
- Raynor G S, Ogden E C, Hayes J V (1972): Dispersion and Deposition of Corn Pollen from Experimental Sources. *Agronomy Journal*, 64, S. 420-427
- Recher H, Schmotz W (1993): STABO-Standortauswahl für Bodenuntersuchungen Version 1.0. regionalstatistisches Kartenanalysesystem zur Durchführung der Nachbarschaftsanalyse und zur Ermittlung repräsentativer Probenahmestandorte – Benutzeranleitung. Kiel
- Reichenbecher W, Meise T, Otto M, Teichmann H, Winkel B, Tappeser B (2005): Die Umweltrisikoprüfung transgener Pflanzen. *Natur und Landschaft*, 80 (7), S. 302-306
- Rempe H (1937): Untersuchungen über die Verbreitung des Blütenstaubes durch die Luftströmungen. *Planta*, 27, S. 93-147
- Renk W (1977): Die räumliche Struktur und Genese der Bodendecke im Bereich der Großen Randstufe Transvaals und Swazilands. Dissertation, Universität Kiel
- Ribeiro H, Cunha M, Abreu I (2003): Airborne pollen concentration in the region of Braga, Portugal, and its relationship with meteorological parameters. *Aerobiologia*, 19, S. 21-27

- Richards J A (1999): Remote Sensing Digital Image Analysis. Berlin: Springer
- Richter R (1996): Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region. *Computers & Geosciences*, 22 (6), S. 675-681
- Richter R (2005): Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery (DLR-IB 565-01a/05). Wessling: DLR
- Richer O, Zwerger P, Dietz-Pfeilstetter A, Foit K (2004): Mathematische Modellierung der Ausbreitung genetischer Information durch Pollentransport und Anwendung auf transgenen Winterraps. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz (Journal of Plant Diseases and Protection)*, Sonderheft XIX, S. 839-846
- Rieger M A, Lamond M, Preston C, Powles S B, Roush R T (2002): Pollen-Mediated Movement of Herbicide Resistance Between Commercial Canola Fields. *Science*, 296, S. 2386-2388
- Rieux C, Personnaz M-B, Thibaudon M (2008): Spatial variation of airborne pollen over south-east France: characterization and implications for monitoring networks management. *Aerobiologia*, 24 (1), S. 43-52
- Rodríguez-Rajo F J, Jato V, Aira M J (2003): Pollen content in the atmosphere of Lugo (NW Spain) with reference to meteorological factors (1999-2001). *Aerobiologia*, 19, S. 213-225
- Ronneberger O, Schultz E, Burkhardt H (2002): Automated pollen recognition using 3D volume images from fluorescence microscopy. *Aerobiologia*, 18 (2), S. 107-115
- Rothmaler W (1999): *Exkursionsflora von Deutschland. Band 2. Gefäßpflanzen – Grundband*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag (Hrsg.: Bäßler, M.; Jäger, E. J.; Werner, K.)
- Sachs L (2004): *Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden*. Berlin: Springer
- Sanvido O, Bigler F, Widmer F, Winzeler M (2003): *Umweltmonitoring gentechnisch veränderter Pflanzen in der Schweiz: Erarbeitung konzeptioneller Grundlagen*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, BUWAL (Hrsg.)
- Saure C, Kühne S, Hommel B, Bellin U (2003): *Transgener, herbizidresistenter Raps – Blütenbesuchende Insekten, Pollenausbreitung und Auskreuzung*. Bern: vaö – Verlag Agrarökologie
- Scarisbrick D H, Daniels R W (Hrsg., 1986): *Oilseed Rape*. London: Collins
- Scharring S, Schultz E, Heimann U, Gehrig R, Defila C, Köhler B, Burkhardt H, Ronneberger O, Wang Q, Brandenburg A, Sulz G, v. Ehr M, Giel D, Fratz M, Koch W, Dunkhorst W, Lödding H, Müller W, Breitfuss G (2006a): Automatic pollen recognition – developments and perspectives. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.*, 58 (11), S. 309-314
- Scharring S, Brandenburg A, Breitfuss G, Burkhardt H, Dunkhorst W, v. Ehr M, Fratz M, Giel D, Heimann U, Koch W, Lödding H, Müller W, Ronneberger O, Schultz E, Sulz G, Wang Q (2006b): Online Monitoring of Airborne Allergenic Particles (OMNIBUSS). In: Popp J, Strehle M (Hrsg.): *Biophotonics. Visions for Better Health Care*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, S. 31–87
- Scheffler J A, Parkinson R, Dale P J (1993): Frequency and distance of pollen dispersal from transgenic oilseed rape (*Brassica napus*). *Transgenic Research*, 2, S. 356-364
- Scheffler J A, Parkinson R, Dale P J (1995): Evaluating the effectiveness of isolation distances for field plots of oilseed rape (*Brassica napus*) using a herbicide-resistance transgene as a selectable marker. *Plant Breeding*, 114, S. 317-321
- Schmidt G (2002): *Eine multivariat-statistisch abgeleitete ökologische Raumgliederung für Deutschland*. Berlin: dissertation.de, zugl. Dissertation, Hochschule Vechta
- Schmidt J E U, Hilbeck A (2005): Auswirkungen transgener Bt-Kulturpflanzen auf Nichtzielorganismen. *Fragestellungen und Lösungsansätze am Beispiel eines multidisziplinären europäischen Forschungsprojekts*. *Natur und Landschaft*, 80 (7), S. 330-334

- Schmotz W (1996): Entwicklung und Optimierung von Verfahren zur flächenhaften Erfassung der Schadstoffgehalte in Böden. EcoSys – Beiträge zur Ökosystemforschung, Band 17 (Hrsg.: Vorstand des „Vereins zur Förderung der Ökosystemforschung zu Kiel e.V.“ und Direktorium des „Ökologie-Zentrums der Universität Kiel“). Kiel: Verein zur Förderung der Ökosystemforschung zu Kiel
- Schnell R, Hill P B, Esser E (1993): Methoden der empirischen Sozialforschung. München: Oldenbourg
- Schnetter R (1964): Auftreten von Pollen in der Luft in Abhängigkeit von Jahreszeit, Witterung, Höhenlage und Vegetation in Mittelhessen. In: Knapp R (Hrsg.): Geobotanische Mitteilungen, Heft 23, S. 47-78. Gies-sen
- Schröder W (1994): Regionalisierung in den Geowissenschaften. In: Schröder W, Vetter L, Fränze O (Hrsg.): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie. Braunschweig: Vieweg, S. 17-30
- Schröder W, Schmidt G, Pesch R, Matejka H, Eckstein T (2001): Konkretisierung des Umweltbeobachtungsprogrammes im Rahmen eines Stufenkonzeptes der Umweltbeobachtung des Bundes und der Länder – Teilvorhaben 3. Berlin: Umweltbundesamt (Hrsg.), Förderkennzeichen (UFOPLAN 299 82 212 / 02)
- Schueler S, Schlünzen K H (2006): Modeling of oak pollen dispersal on the landscape level with a mesoscale atmospheric model. Environmental Modeling and Assessment, 11, S. 179-194
- Schütz L (1987): Atmosphärischer Mineralstaub. In: Jaenicke R (Hrsg.): Atmosphärische Spurenstoffe. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, S. 341-357
- Schwarz G (2003): Bestimmung der Persistenz transgener Rapses in der landwirtschaftlichen Umwelt. In: Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Monitoring der Umweltveränderungen von gentechnisch veränderten Organismen – Statusseminar zu den bayerischen Projekten, Augsburg, S. 33-34
- Scott L, van Zinderen Bakker Sr. E M (1985): Exotic pollen and long-distance wind dispersal at a sub-Antarctic Island. Grana, 24, S. 45-54
- Sehmel G A (1980): Particle and gas dry deposition: a review. Atmospheric Environment, 14, S. 983-1011
- Simpson E C, Norris C E, Law J R, Thomas J E, Sweet J B (1999): Gene flow in genetically modified herbicide tolerant oilseed rape (*Brassica napus*) in the UK. In: Lutman P J W (Hrsg.): Gene Flow and Agriculture: Relevance for Transgenic Crops. Symposium Proceedings No. 72. Farnham: British Crop Protection Council, S. 75-81
- Simpson E, McRoberts N, Sweet J (2006): Out-crossing between genetically modified herbicide-tolerant and other winter oilseed rape cultivars. Plant Genetic Resources, 4 (2), S. 96-107
- Smart I J, Tuddenham W G, Knox R B (1979): Aerobiology of Grass Pollen in the City Atmosphere of Melbourne: Effects of Weather Parameters and Pollen Sources. Australian Journal of Botany, 27, S. 333-342
- Spök A, Hofer H, Lehner P, Valenta R, Stirn S, Gaugitsch H (2005): Risk assessment of GMO products in the European Union. Wien: Umweltbundesamt (Hrsg.)
- Squire G R, Crawford J W, Ramsay G, Thompson C, Bown J (1999): Gene flow at the landscape level. In: Lutman P J W (Hrsg.): Gene Flow and Agriculture: Relevance for Transgenic Crops. Symposium Proceedings No. 72. Farnham: British Crop Protection Council, S. 57-64
- Squire G R, Brooks D R, Bohan D A, Champion G T, Daniels R E, Houghton A J, Hawes C, Heard M S, Hill M O, May M J, Osborne J L, Perry J N, Roy D B, Woiwood I P, Firbank L G (2003): On the rationale and interpretation of the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. Transactions of the Royal Society of London, Series B, 358, S. 1779-1799
- SRU – Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1988): Umweltgutachten 1987. Stuttgart: Kohlhammer
- SRU – Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1991): Allgemeine ökologische Umweltbeobachtung. Sondergutachten Oktober 1990. Stuttgart: Metzler-Poeschel

- SRU – Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (2004a): Koexistenz sichern: Zur Novellierung des Gentechnikgesetzes. Kommentar zur Umweltpolitik, März 2004, Nr. 4
- SRU – Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (2004b): Umweltgutachten 2004 des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen. Umweltpolitische Handlungsfähigkeit sichern. Berlin: Bundestagsdrucksache 15/3600
- Staniland B K, McVetty P B E, Friesen L F, Yarrow S, Freyssinet G, Freyssinet M (2000): Effectiveness of border areas in confining the spread of transgenic *Brassica napus* pollen. Can. J. Plant Sci., 80, S. 521-526
- Stanley R G, Linskens H F (1985): Pollen. Biologie, Biochemie, Gewinnung und Verwendung. Greifenberg/Ammersee: Urs Freund Verlag [Deutsche Lizenzausgabe von Stanley R G, Linskens H F (1974): Pollen. Biology, Biochemistry, Management. Berlin: Springer]
- Statistisches Bundesamt (Hrsg., 1996): UGR-Materialien. Beiträge zur Umweltökonomischen Gesamtrechnung. Heft 6. Konzepte zur Erfassung und Bewertung von Landschaft und Natur im Rahmen der „Ökologischen Flächenstichprobe“. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (Hrsg., 2004): Statistisches Jahrbuch 2004. Für die Bundesrepublik Deutschland. Wiesbaden
- Steffan-Dewenter I, Kuhn A (2003): Honeybee foraging in differentially structured landscapes. Proceedings of the Royal Society, Series B, 270 (1515), S. 569-575
- Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (2006): Pollenvorhersage. <http://www.pollenstiftung.de/> [05.02.2006]
- Stix E, Große-Brauckmann G (1970): Der Pollen- und Sporengehalt der Luft und seine tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unter mitteleuropäischen Verhältnissen. Flora, 159, S. 1-37
- Stix E, Ferretti M-L (1974): Grundwerte des Pollen- und Sporengehaltes der Luft in der Bundesrepublik Deutschland 1967-1970. Boppard: Harald Boldt Verlag
- StMLU – Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen & UBA – Umweltbundesamt (Hrsg. 2003): Ökosystemare Umweltbeobachtung. Vom Konzept zur Umsetzung. Von Schönthaler, K.; Meyer, U.; Pokorny, D.; Reichenbach, M.; Schuller, D.; Windhorst, W. Berlin: Erich-Schmidt-Verlag
- StMWVT – Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie (Hrsg., 2001): Bayerischer Solar- und Windatlas. München
- Straka H (1975): Pollen- und Sporenkunde. Eine Einführung in die Palynologie. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag
- Subba Reddi C, Reddi N S (1985): Relation of pollen release to pollen concentrations in air. Grana, 24, S. 109-113
- Subba Reddi C, Reddi N S (1986): Pollen production in some anemophilous angiosperms. Grana, 25, S. 55-61
- Subiza J (2001): How to interpret pollen counts (Cómo interpretar los recuentos de pólenes). Alergología e Inmunología Clínica, 16 (2), S. 59-65
- Syrigou E, Zanikou S, Papageorgiou P S (2003): Grasses, olive, parietaria and cypress in Athens: Pollen sampling from 1995 to 1999. Aerobiologia, 19, S. 133-137
- Szibalski M (2000): Großmaßstäbige Regionalisierung labiler Bodenkennwerte in standörtlich hochdiversen Kulturlandschaften. Dissertation, Universität Gießen
- Tampieri F, Mandrioli P, Puppi G L (1977): Medium range transport of airborne pollen. Agricultural Meteorology, 18, S. 9-20
- Tauber H (1965): Differential pollen dispersion and the interpretation of pollen diagrams. Kopenhagen: Danmarks Geologiske Undersøgelse, II. Række, Nr. 89 (Geological Survey of Denmark, II. Series, No. 89)

- Tauber H (1974): A static non-overload pollen collector. *New Phytologist*, 73, S. 359-369
- Thompson C E, Squire G, Mackay G R, Bradshaw J E, Crawford J, Ramsay G (1999): Regional patterns of gene flow and its consequences for GM oilseed rape. In: Lutman P J W (Hrsg.): *Gene Flow and Agriculture: Relavance for Transgenic Crops*. Symposium Proceedings No. 72. Farnham: British Crop Protection Council, S. 95-100
- Tiedje J M, Colwell R K, Grossman Y L, Hodson R E, Lenski R E, Mack R N, Regal P J (1989): The planned introduction of genetically engineered organisms: Ecological considerations and recommendations. *Ecology*, 70 (2), S. 298-315
- Timmons A M, O'Brien E T, Charters Y M, Dubbels S J, Wilkinson M J (1995): Assessing the risks of wind pollination from fields of genetically modified *Brassica napus* ssp. *oleifera*. *Euphytica*, 86, S. 417-423
- Timmons A M, Charters Y M, Crawford J W, Burn D, Scott S E, Dubbels S J, Wilson N J, Robertson A, O'Brien E T, Squire G R, Wilkinson M J (1996): Risks from transgenic crops. *Nature*, 380, S. 487
- Tobler W R (1970): A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46 (2), S. 234-240
- Tomlin C D (1990): *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall
- Transgen.de: Datenbank Pflanzen. <http://www.transgen.de/datenbank/pflanzen/> [20.01.2006]
- Traxler A, Heissenberger A, Frank G, Lethmayer C, Gaugitsch H (2000): *Ökologisches Monitoring von gentechnisch veränderten Organismen*. Wien: Umweltbundesamt (Hrsg.), Monographien, Band 126
- Treu R, Emberlin J (2000): Pollen dispersal in the crops Maize (*Zea mays*), Oil seed rape (*Brassica napus* ssp. *oleifera*), Potatoes (*Solanum tuberosum*), Sugar beet (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris*) and Wheat (*Triticum aestivum*). Evidence from publications. Bristol: Soil Association (Hrsg.) [<http://www.soilassociation.org/> → Library → GMO]
- Tyldesley J B (1967): Movement of Particles in the Lower Atmosphere. In: Society for General Microbiology (Hrsg.): *Airborne microbes*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 18-30
- Tyldesley J B (1973): Long range transmission of tree pollen to Shetland. *New Phytologist*, 72, S. 175-181
- U N (1935): Genome-analysis in *Brassica* with special reference to the experimental formation of *B. napus* and peculiar mode of fertilization. *Jpn. J. Bot.*, 7, S. 389-452
- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg., 1998): *Umweltbeobachtungsprogramme des Bundes – Integration der Beobachtungsprogramme anderer Ressorts*. Berlin: UBA-Texte 73/98, UBAFB Nr.: 98-112
- UBA – Umweltbundesamt & BBA – Biologische Bundesanstalt für Landwirtschaft und Forsten (2002): *Gemeinsames Positionspapier von UBA und BBA zum Monitoring von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP)*, August 2002
- UNEP – United Nations Environment Programme (1996): *UNEP International Technical Guidelines for Safety in Biotechnology*. Nairobi: UNEP [<http://www.unep.ch/biosafety/resources.htm>]
- Upton G J G, Fingleton B (1985): *Spatial Data Analysis by Example. Volume I. Point Pattern and Quantitative Data*. Chichester: John Wiley & Sons
- VDI (2000): VDI 3945 Blatt 3. *Umweltmeteorologie. Atmosphärische Ausbreitungsmodelle. Partikelmodell*. Berlin: Beuth
- VDI (VDI-Kompetenzfeld Biotechnologie), KRdL (Kommission Reinhaltung der Luft in VDI und DIN) (2005): *Probenahmedesigns für ein Pollen-Monitoring von gentechnisch veränderten Pflanzen – Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf* [http://www.vdi.de/vdi/organisation/schnellauswahl/fgkf/krdl/index.php?cms_id=114]
- Vetter L (1989): *Evaluierung und Entwicklung statistischer Verfahren zur Auswahl von repräsentativen Untersuchungsobjekten für ökotoxikologische Problemstellungen*. Dissertation, Universität Kiel

- Vetter L, Maass R (1994): Nachbarschaftsanalytische Verfahren. In: Schröder W, Vetter L, Fränzele O (Hrsg.): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie. Braunschweig: Vieweg, S. 103-107
- Wackernagel H (2003): Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications. Berlin: Springer
- Waiblinger H-U, Wurz A, Freyer R, Pietsch K (1999) Spezifischer Nachweis von gentechnisch verändertem Raps in Honig. Deutsche Lebensmittel-Rundschau, 95. Jahrgang, Heft 2, S. 44-48
- Walklate P J, Hunt J C R, Higson H L, Sweet J B (2004): A model of pollen-mediated gene flow for oilseed rape. Proc. R. Soc. Lond., 271, S. 441-449
- Wallace H A, Bressman E N (1949): Corn and corn growing. New York: J. Wiley & Sons
- Weber W E, Bringezu T, Broer I, Holz F, Eder J (2005): Koexistenz von gentechnisch verändertem und konventionellen Mais. Ergebnisse des Erprobungsanbaus Silomais 2004. Sonderdruck, Mais 1/2005, S. 1-4
- Weischet W (2002): Einführung in die Allgemeine Klimatologie. Physikalische und meteorologische Grundlagen. Berlin: Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung
- Wenkel K-O, Schultz A (1999): Vom Punkt zur Fläche – das Skalierungs- bzw. Regionalisierungsproblem aus der Sicht der Landschaftsmodellierung. In: Steinhardt U, Volk M (Hrsg.): Regionalisierung in der Landschaftsökologie. Stuttgart: Teubner, S. 19-42
- Westgate M E, Lizaso J, Batchelor W (2003): Quantitative Relationships between Pollen Shed Density and Grain Yield in Maize. Crop Science, 43 (3), S. 934-942
- Wilkinson M J, Davenport I J, Charters Y M, Jones A E, Allainguillaume J, Butler H T, Mason D C, Raybould A F (2000): A direct regional scale estimate of transgene movement from genetically modified oilseed rape to its wild progenitors. Molecular Ecology, 9 (7), S. 983-991
- Williams I H (1978): The pollination requirements of swede rape (*Brassica napus* L.) and of turnip rape (*Brassica campestris* L.). Journal of Agricultural Science, 91, S. 343-348
- Williams I H (1984): The concentrations of air-borne rape pollen over a crop of oil-seed rape (*Brassica napus* L.). Journal of Agricultural Science, 103, S. 353-357
- Winkler H (2001a): Die Entwicklung der Methoden zur Luftpollenerfassung. In: Bergmann K-C & Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (Hrsg.): Pollenbestimmungsbuch der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst. Paderborn: Takt-Verlag, S. 8-9
- Winkler H (2001b): Biologie des Pollens. In: Bergmann K-C & Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (Hrsg.): Pollenbestimmungsbuch der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst. Paderborn: Takt-Verlag, S. 17
- Winkler H, Ostrowski R, Wilhelm M (2001): Pollenbestimmungsbuch der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst. Paderborn: Takt-Verlag (Hrsg. Bergmann, K.-C. & Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst)
- Witting U, Tappeser B (2005): Rechtliche Regulierung der Agro-Gentechnik. Natur und Landschaft, 80 (7), S. 313-315
- WMO – World Meteorological Organization (Hrsg, 1996): Guide to meteorological instruments and methods of observation. Genf
- Wodehouse R P (1990): Pollen grains. Their structure, identification and significance in science and medicine. Ann Arbor: University Microfilms International. Nachdruck des Nachdrucks (New York: Hafner Publishing, 1959), Original erschienen bei: McGraw-Hill Book Company, 1935
- Wright G G (1985): Distribution and area of winter oilseed rape within eastern Scotland: a survey based on LANDSAT data. Research and Development in Agriculture, 2 (1), S. 41-45
- Yamamura K (2004): Dispersal distance of corn pollen under fluctuating diffusion coefficient. Popul Ecol, 46, S. 87-101

- Zander E (1997): Die Bienenweide. Stuttgart: Eugen Ulmer
- Zander R (1993): Handwörterbuch der Pflanzennamen. Stuttgart: Ulmer (Hrsg.: Encke F, Buchheim G, Seybold S)
- Zander R (2002): Handwörterbuch der Pflanzennamen. Stuttgart: Ulmer (Hrsg.: Erhardt W, Götz E, Bödeker N, Seybold S)
- Zar J H (1999): Biostatistical Analysis. Upper Saddle River: Prentice Hall
- Zeitler R (2003): Etablierung einer PCR-Routineanalytik für das Monitoring von transgenem Raps. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 63 (6), S. 231-235
- Zeitler R, Baumeister W (2000): Nachweis gentechnischer Veränderungen in Pflanzen und ihre Identifizierungsmöglichkeiten. Schriftenreihe des LfU, Heft 158, S. 22-24
- Zeitler R, Pietsch K, Waiblinger H-U (2002): Validation of real-time PCR methods for the quantification of transgenic contaminations in rape seed. European Food Research Technology, 214, S. 346-351
- Zscheischler J, Estler M C, Staudacher W, Groß F, Burgstaller G, Streyl H, Rechmann T (1990): Handbuch Mais. Umweltgerechter Anbau – Wirtschaftliche Verwertung. Frankfurt/Main: DLG-Verlag
- Züghart W, Breckling B (2003a): Konzeptionelle Entwicklung eines Monitoring von Umweltwirkungen transgener Kulturpflanzen, Teil 1. Berlin: Umweltbundesamt (Hrsg.), UBA-Texte 50/03
- Züghart W, Breckling B (2003b): Konzeptionelle Entwicklung eines Monitoring von Umweltwirkungen transgener Kulturpflanzen, Teil 2. Berlin: Umweltbundesamt (Hrsg.), UBA-Texte 50/03
- Züghart W, Benzler A, Berhorn F, Graef F, Sukopp U (2005): Monitoring der Wirkungen gentechnisch veränderter Organismen auf Natur und Landschaft nach Marktzulassung. Natur und Landschaft, 80 (7), S. 307-312

Daten

- BLVA – Bayerisches Landesvermessungsamt (a), München: Digitales Geländemodell DGM 25
- BLVA – Bayerisches Landesvermessungsamt (b), München: Flurkarte 98
- BLVA – Bayerisches Landesvermessungsamt (c), München: Digitale Orthofotos, Stand 1999, 2000
- GAF/EUROMAP (a), München, Neustrelitz: LANDSAT-7 (PAN+MS), 01.04.2003
- GAF/EUROMAP (b), München, Neustrelitz: IKONOS (PAN+MS), 10.06.2003
- LfU – Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg: Fachinformationssystem-Naturschutz (FIS): Haupt-Naturraumgrenzen [www.bayern.de/lfu/natur/schutzgebietskonzepte/fis_natur/index.html]
- PbS – Planungsbüro Prof. Dr. Jörg Schaller, Kranzberg (2001): GIS-Regionsatlas München. Version 3.1, Stand: 4.5.2001. Im Auftrag: Bayerischer Industrieverband Steine und Erden e.V.
- StMLF – Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, München: Agrarmeteorologisches Messnetz Bayern – Wetterdatenabruf (LfL – Landesanstalt für Landwirtschaft). [<http://www.stmlf.bayern.de/> → Landwirtschaft → Pflanzenbau → Wetterdatenbank]
- UBA – Umweltbundesamt, Berlin: Ökologische Raumklassen Deutschlands

Software

- Behrens T, Schneider O (2004): NAA (STABO), Vers. 2.0.4, Extension für ArcView, Vers. 3.x [www.geo-extend.de]
- ESRI – Environmental Systems Research Institute, Inc. (a), Redlands, CA, USA: ArcView, Vers. 3.2a
- ESRI – Environmental Systems Research Institute, Inc. (b), Redlands, CA, USA: ArcGIS, Vers. 8.1, 8.3, 9.1
- ESRI – Environmental Systems Research Institute, Inc. (c), Redlands, CA, USA: ArcInfo, Vers. 8.1, 9.1
- ESRI – Environmental Systems Research Institute, Inc. (d), Redlands, CA, USA: ArcGIS Geostatistical Analyst

- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln: GO-AUSTAL, Vers. 1.5. [www.grs.de]
- Janicke, Ingenieurbüro, Dunum: AUSTAL2000, Vers. 1.0.1 und Vers. 2.1.14 [www.austal2000.de]
- Levine N (2002): CrimeStat II: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations. Ned Levine & Associates, Houston, TX, and the National Institute of Justice, Washington, DC [<http://www.icpsr.umich.edu/CRIMESTAT/>]
- MjM Software, Gleneden Beach, OR, USA: PC-ORD, Vers. 4.0
- R, Vers. 2.1.0 [<http://www.r-project.org/>]
- Richter R (2005): ATCOR-2 – Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery. DLR, Wessling [<http://www.op.dlr.de/atcor/>]
- RSI – Research Systems Inc., Boulder, CO, USA: ENVI (The Environment for Visualizing Images), Vers. 4.1
- SPSS, Chicago, IL, USA: SPSS, Vers. 12 und 14

Anhang

Karte 1

Landnutzung im Untersuchungsgebiet – LANDSAT-7-Szene (Falschfarbenbild) mit Relief (DGM25)

Karte 2

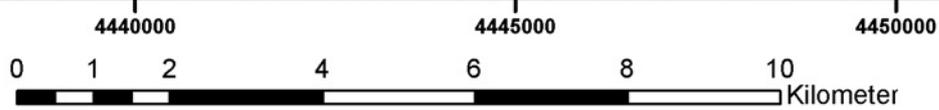
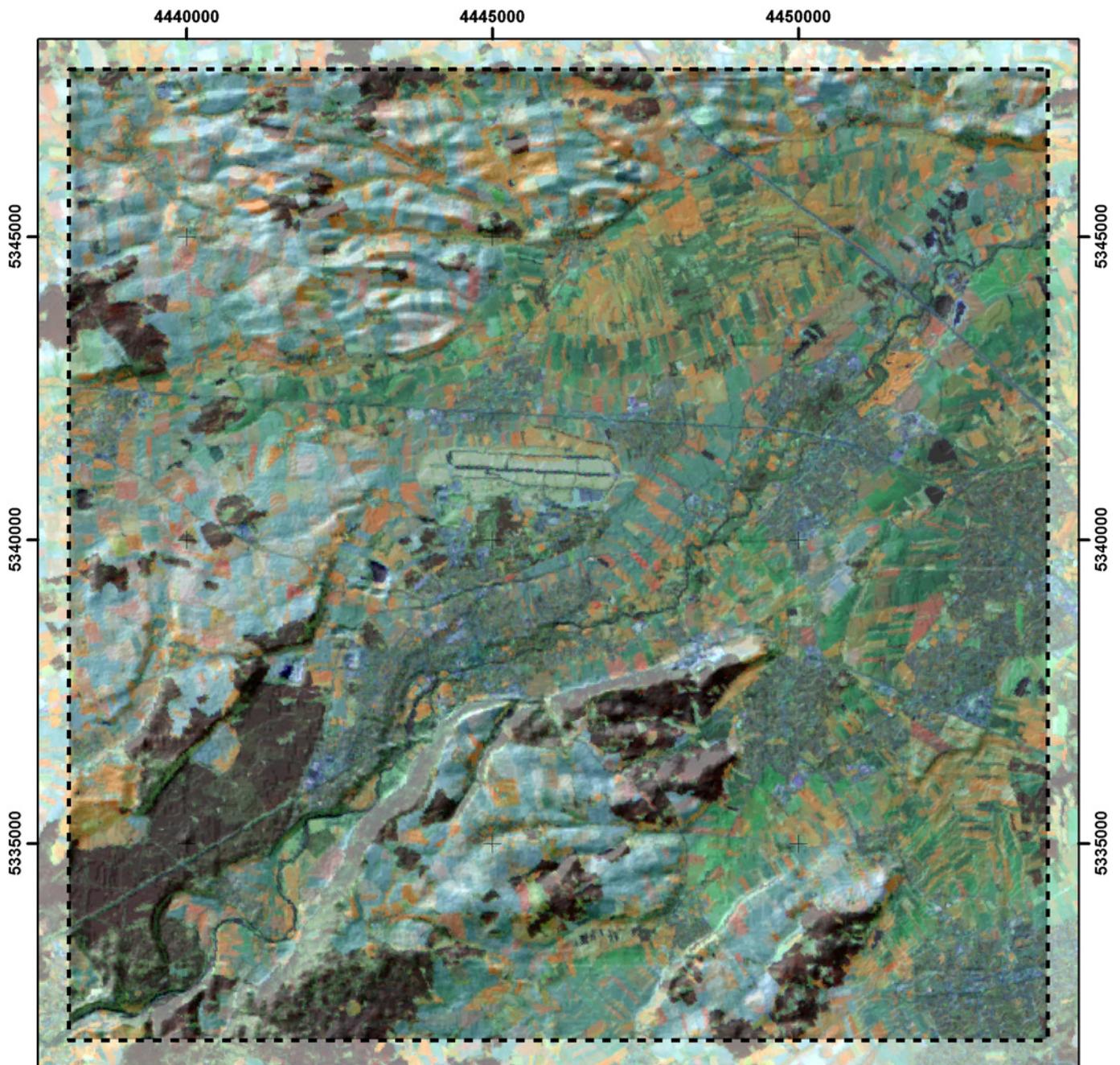
Feldversuch 2003 – Standorte der Pollensammler im Untersuchungsgebiet

Karte 3

Nachweis von Rapspollen mit technischen Pollensammlern im Untersuchungsgebiet

Karte 4

Nachweis von Maispollen mit technischen Pollensammlern im Untersuchungsgebiet



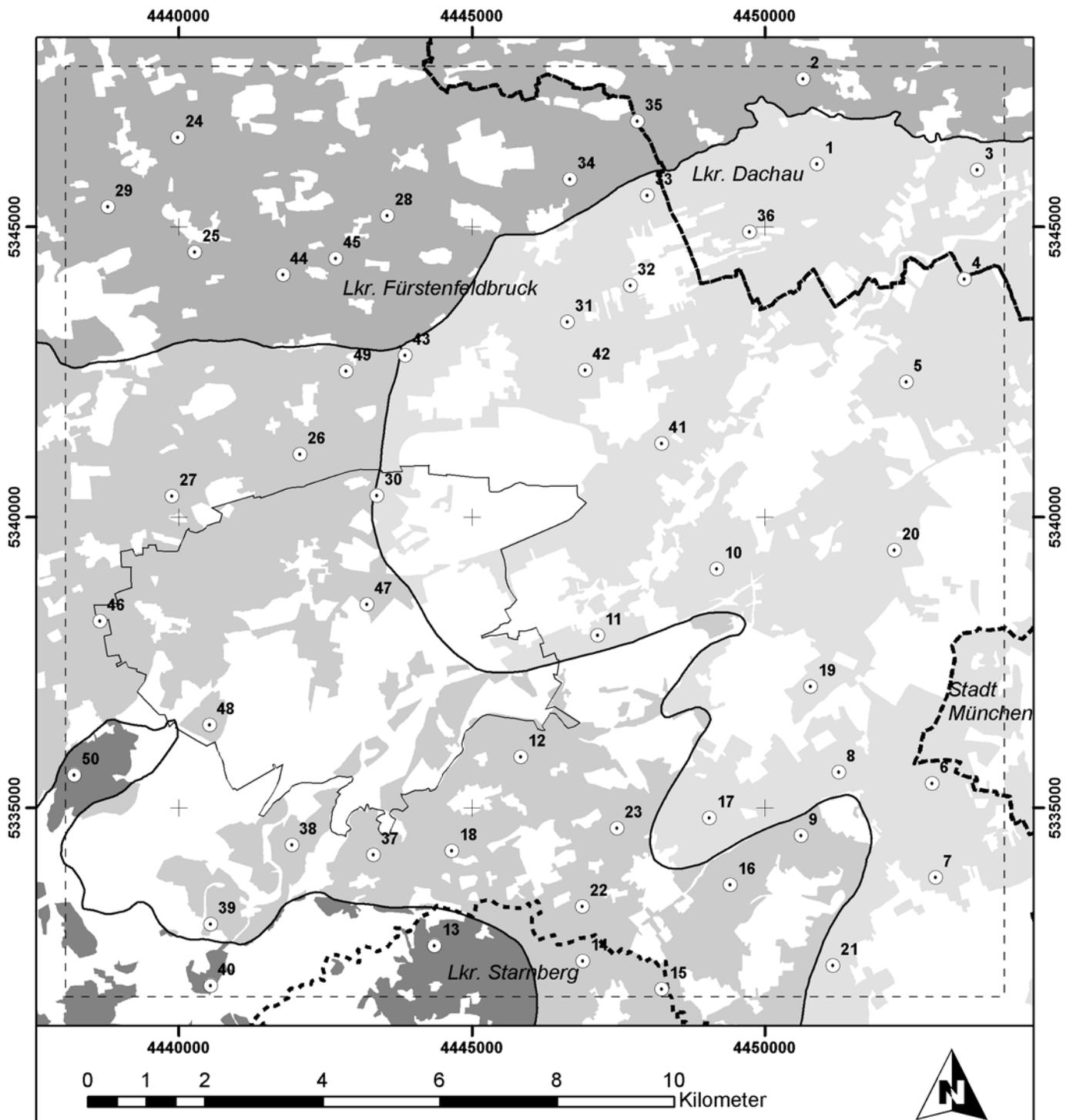
Legende

 Untersuchungsgebiet

Maßstab: 1 : 100.000

Karte 1

Landnutzung im Untersuchungs-
gebiet - LANDSAT-7-Szene
(Falschfarbenbild) mit Relief
(DGM 25)



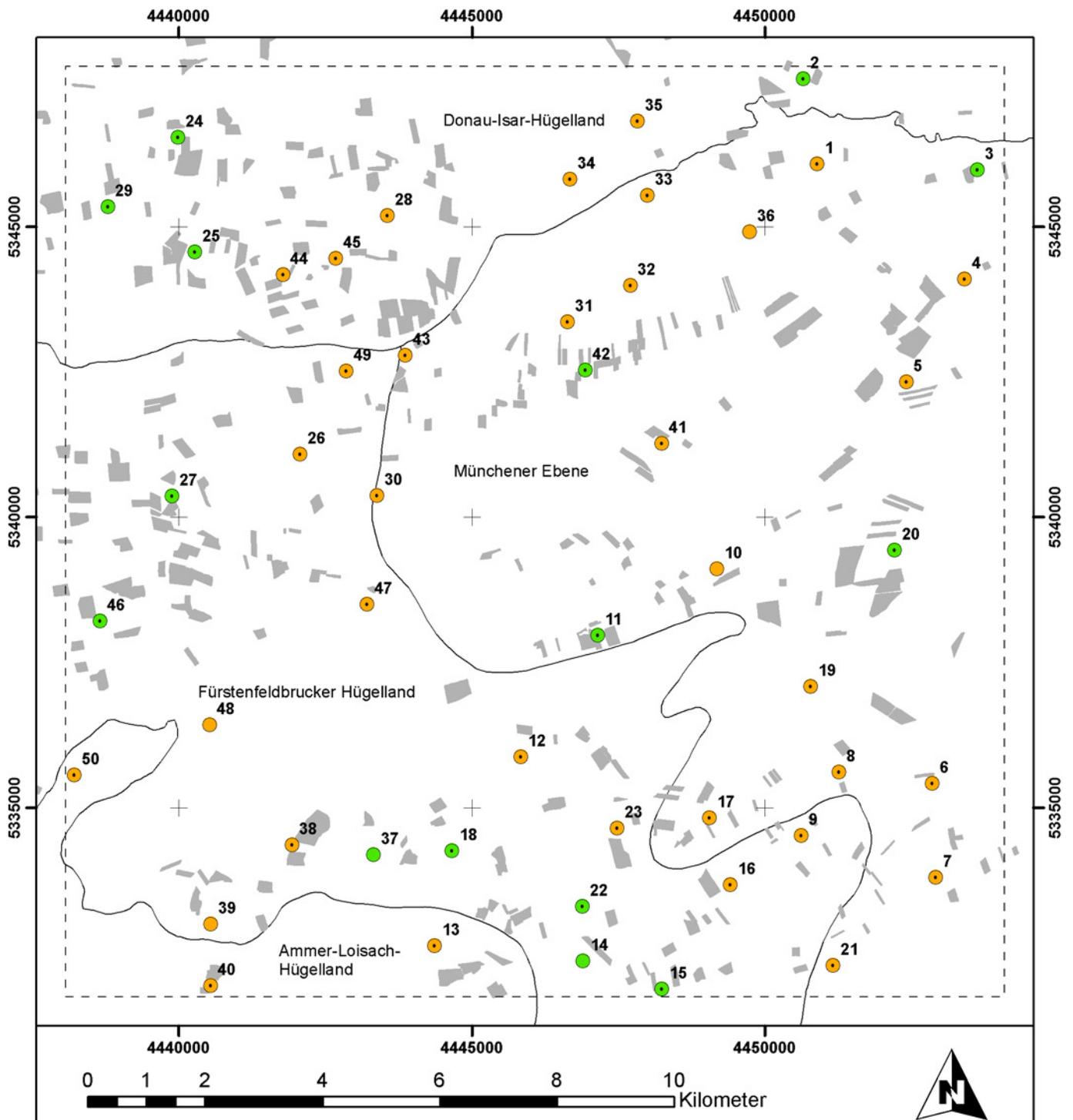
Legende

- Untersuchungsgebiet
- Standorte der Pollensammler
- Grenze der Landkreise
- Stadtgrenze Fürstenfeldbruck
- Landwirtschaftliche Nutzfläche im Naturraum**
- Ammer-Loisach-Hügelland
- Donau-Isar-Hügelland
- Fürstenfeldbrucker Hügelland
- Münchener Ebene

Maßstab: 1 : 100.000

Karte 2

Feldversuch 2003 -
Standorte der Pollensammler
im Untersuchungsgebiet



Legende

- Naturräumliche Haupteinheiten
- Untersuchungsgebiet
- Rapsfelder

Nachweis von Rapspollen mit PMF

- positiv
- negativ

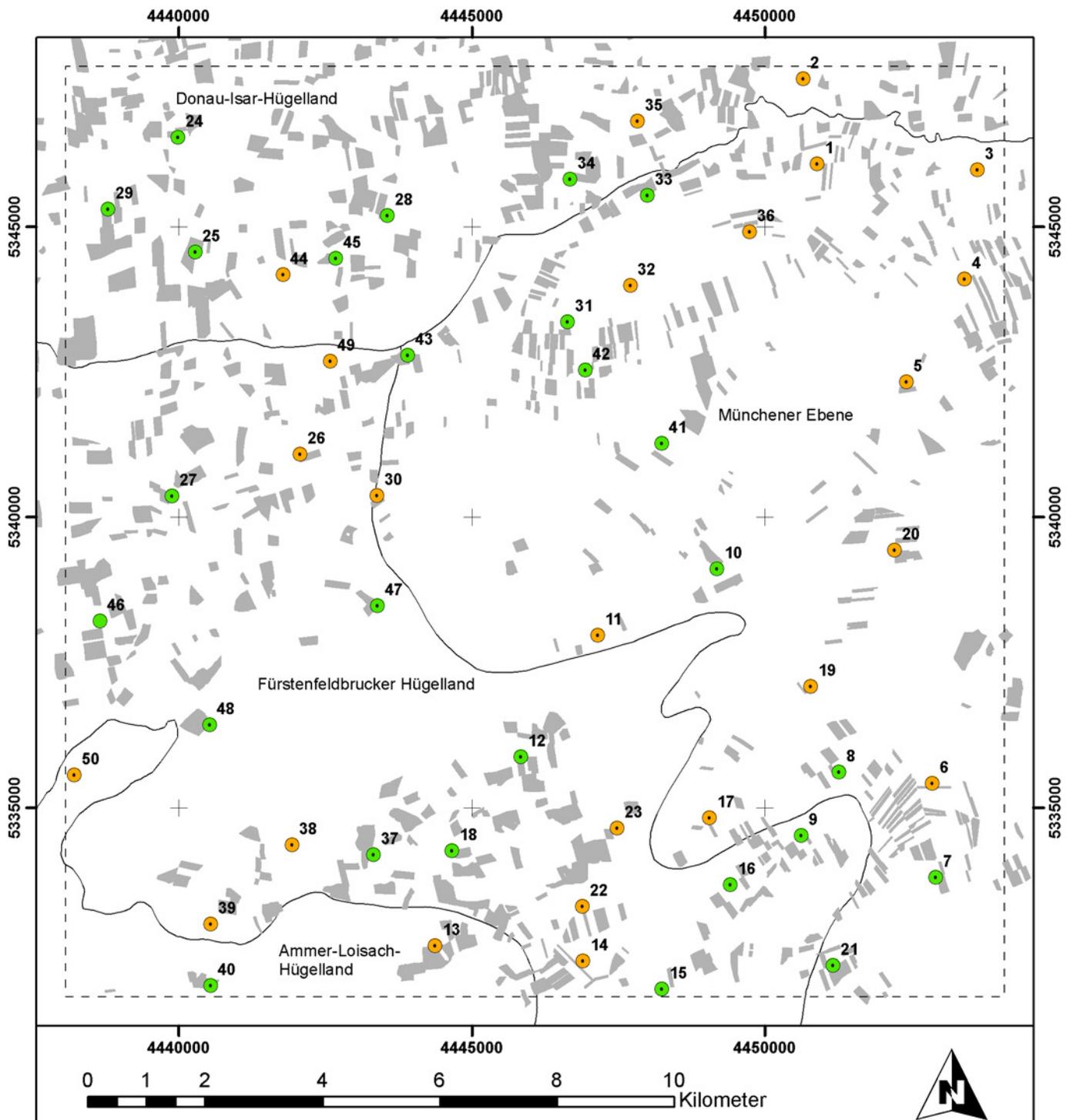
Nachweis von Rapspollen mit Sigma2

- positiv
- negativ

Maßstab: 1 : 100.000

Karte 3

Nachweis von Rapspollen mit technischen Pollensammlern im Untersuchungsgebiet



Legende

- Naturräumliche Haupteinheiten
- Untersuchungsgebiet
- Maisfelder

Nachweis von Maispollen mit PMF

- negativ
- positiv

Nachweis von Maispollen mit Sigma2

- positiv
- negativ

Maßstab: 1 : 100.000

Karte 4

Nachweis von Maispollen mit technischen Pollensammlern im Untersuchungsgebiet

Lebenslauf

Name Martin Kuhlmann
Geburtsdatum 11.11.1973
Geburtsort Münster (Westfalen)
Familienstand ledig, ein Sohn (Erik Leonard, geb. 20.01.2009)

Schul- und Berufsausbildung

1983 – 06/92 Gymnasium Wolbeck, Münster
11/92 – 05/94 Ausbildung „Gärtner“ (Garten- und Landschaftsbau), Schulze-Buschhoff, Münster

Studium

10/94 – 07/01 „Landeskultur und Umweltschutz“, Universität Rostock
10/97 – 07/98 „Umweltingenieur“, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich

Berufstätigkeit

05/94 – 09/94 Landschaftsgärtner, Schulze-Buschhoff, Münster
11/01 – 02/03 Wissenschaftlicher Angestellter, Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Technische Universität München
02/02 – 06/05 Wissenschaftlicher Angestellter, Lehrstuhl für Vegetationsökologie, Technische Universität München
03/06 – 12/06 Selbstständiger Ingenieur für GIS-Dienstleistungen und GIS-Schulungen (Tätigkeit u.a. für die Staatliche Universität Samarkand, Usbekistan)
seit 01/07 Landschaftsplaner, ifuplan – Institut für Umweltplanung, Landschaftsentwicklung und Naturschutz, München