

# Raumrepräsentativität technischer Pollensammler für ein Monitoring von transgenen Pollen auf regionaler Ebene

M. Kuhlmann, H. Beismann

**Zusammenfassung** Die Richtlinie 2001/18/EG schreibt das Monitoring gentechnisch veränderter Organismen vor. Ein wichtiger Bestandteil kann das Pollen-Monitoring transgener Pflanzen sein. Zur Untersuchung der Raumrepräsentativität von technischen Pollensammlern wurden in einem 256 km<sup>2</sup> großen Untersuchungsgebiet westlich von München technische Pollensammler an 50 als repräsentativ beurteilten Standorten aufgestellt. Diese Sammler erfassten im landwirtschaftlich genutzten Raum den Expositionsgrad transgener und nicht transgener Raps- und Maispollen. Die gesammelten Pollenproben wurden bildanalytisch nach Art und Anzahl der Pollen untersucht. Transgener Pollen wird durch eine molekulargenetische Analyse nachgewiesen. Die Methodik basiert auf standardisierten bzw. standardisierfähigen Geräten und Verfahren, um bei zukünftigen Untersuchungen verschiedene Gebiete vergleichen zu können. Unter Verwendung von Geografischen Informationssystemen, Geostatistik und Ausbreitungsmodellierung soll das Messnetz angepasst und optimiert werden.

## Spatial representativeness of technical pollen traps for a monitoring of transgenic pollen at a regional scale

**Abstract** The Directive 2001/18/EC stipulates the monitoring of genetically modified organisms. An important part may be the monitoring of transgenic pollen. A study area of 256 km<sup>2</sup> situated in the west of Munich was set up to test the spatial representativeness of technical pollen traps. Pollen traps were put up at 50 sites, which have been assessed as representative. These traps measure the level of exposure of the agricultural land with transgenic and non-transgenic pollen of oil seed rape and maize. The species and the number of pollen grains have been determined by using computer aided image analysis. The presence of transgenic pollen is determined via molecular analysis. The methodology is based on instruments and procedures that are already standardised or have the capability to be standardised to be able to compare different regions in future monitoring. By means of geographical information systems, geostatistics and dispersal models the measuring network will be adjusted and optimised.

## 1 Einleitung

Verfahren zur Dauerbeobachtung der Umwelt sind etablierte Maßnahmen des Umweltschutzes. Durch die Präsenz in den Medien sind insbesondere die Überwachungsprogramme zur Luftreinhaltung, z. B. die Ozonüberwachung oder der jährliche Waldzustandsbericht, bekannt. Während diese Programme erst eingerichtet wurden, nachdem Gesundheits- oder Umweltschäden auftraten, verfolgt die EU im Zusammenhang mit dem Inverkehrbringen von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) mit der so genannten Freisetzungsrichtlinie (2001/18/EG) und mit weiteren Regularien eine prospektive Gefährdungsabschätzung [1]. Eine zentrale Forderung dieser Richtlinie ist die Durchführung

Dipl.-Ing. Martin Kuhlmann, Dr. Heike Beismann,  
Technische Universität München, Lehrstuhl für  
Vegetationsökologie, Freising.

eines Monitorings (Anhang VII – Überwachungsplan). Die Richtlinie sieht einen „auf jeden einzelnen Fall zugeschnitten[en]“ Überwachungsplan vor, der als „allgemeine überwachende Beobachtung“ (general surveillance) und – „erforderlichenfalls“ – als „fallspezifische Überwachung“ (case specific surveillance) auszuführen ist. Ziel ist es, etwaige Risiken und Gefahren, die im Rahmen der Zulassung nicht erkennbar waren, sich aber nach längeren Zeiträumen oder bei großflächigem Anbau von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP) einstellen können („unerwartete schädliche Auswirkungen“), aufzudecken und zu dokumentieren [2]. Eine besondere Bedeutung bei der Freisetzung von transgenen Pflanzen kommt den Blütenpollen zu, die vor allem durch Wind und Insekten in die Umwelt verbracht werden. Der Verbleib bzw. der Expositionsgrad transgener Pollen in der Umwelt kann als Indikator dienen, um Rückschlüsse auf andere nicht unmittelbar messbare Veränderungen, z. B. Wirkung auf Nicht-Zielorganismen, Verwildерung, Auskreuzung etc., zu ermöglichen. Deshalb stellt das Pollen-Monitoring in dem Gesamtkomplex GVP-Monitoring einen wichtigen Bestandteil dar, für den es geeignete Methoden und Verfahren zu entwickeln gilt. Die Erfahrungen, die schon auf den Gebieten der Luftreinhaltung und der ökologischen Umweltbeobachtungsprogramme existieren, sollen in ein Pollen-Monitoring gentechnisch veränderter Pflanzen einfließen [1].

Das Konzept eines Monitorings von Umweltwirkungen transgener Kulturpflanzen wurde von Züghart und Breckling [3] entwickelt. Das Verfahren für ein Pollen-Monitoring von gentechnisch veränderten Pflanzen wurde bereits von Hofmann et al. [4; 5] im Auftrag des Umweltbundesamts erarbeitet und basiert auf einer Kombination von technischen und biologischen (Honigbiene) Pollensammlern. Allerdings kann ein Monitoring transgener Pollen aufgrund logistischer und finanzieller Beschränkungen voraussichtlich nicht flächendeckend in ganz Deutschland durchgeführt werden. Als Alternative bietet sich an, das Monitoring auf Teilgebiete zu begrenzen, die die Verhältnisse in Deutschland repräsentativ widerspiegeln. Innerhalb dieser Gebiete gilt es, Grundlagen und Kriterien für die Auswahl repräsentativer Messpunkte zu entwickeln.

## 2 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit wird im Auftrag des Bundesamts für Naturschutz (BfN) – aufbauend auf den Arbeiten von Hofmann et al. [4; 5] – die Raumrepräsentativität von technischen Pollensammlern für das Pollen-Monitoring untersucht. Das Ziel besteht darin, innerhalb eines festgelegten Gebietes – das ein zukünftiges Monitoring-Gebiet darstellen könnte – die Anordnung technischer Pollensammler zu optimieren. Die Pollensammler sollen für den landwirtschaftlich genutzten Raum auf regionaler Ebene den Expositionsgrad transgener und nicht transgener luftgetragener Pollen repräsentativ erfassen.

Die Untersuchung beschränkt sich auf landwirtschaftliche Nutzflächen, da die potenziellen Auswirkungen von gentechnisch veränderten (Kultur-)Pflanzen zunächst primär das Agrarökosystem betreffen werden. Dort befinden sich Felder mit gentechnisch veränderten und konventionellen Kulturpflanzen sowie Wildpflanzen in räumlicher Nähe zueinander. Auswirkungen auf Pflanzen, Tiere und Menschen in anderen Ökosystemen können nicht ausgeschlossen werden, sind aber nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Im Hinblick auf einen zukünftigen kommerziellen Anbau von gentechnisch veränderten Kulturpflanzen wird wie im Vorgängerprojekt [4; 5] besonderer Wert darauf gelegt, dass die Methoden für einen Routine-Einsatz bei einem zukünftigen bundesweiten Monitoring mit hohem Probendurchlauf geeignet sind.

Die räumliche Verteilung der windverbreiteten Pollen kann durch Kombination der Punktmessungen eines Monitoring-Messnetzes mit einem Ausbreitungsmodell dargestellt werden. Damit bietet sich die Möglichkeit, Gradienten zu lokalisieren und zu klassifizieren und Gebiete unterschiedlicher Exposition abzugrenzen. Eine derartige Präzision ausschließlich auf der Basis eines Monitoring-Messnetzes würde eine erhebliche Verdichtung der Messpunkte erfordern [6]. Aussagekräftige Ausbreitungsmodelle für Pollen auf regionaler Ebene sind allerdings erst in Entwicklung. Dies beruht vor allem auf der Tatsache, dass für die Ausbreitungsmodellierung wichtige Parameter wie die Pollenproduktion und die Dichteverteilung der Pflanzen sowie die artspezifische Sinkgeschwindigkeit des Pollens nicht hinreichend bekannt sind [7; 8].

### 3 Begriffsbestimmungen

Die Eigenart einer Gesamtheit wird entweder durch einen Einzelnen oder eine Gruppe charakterisiert [9]. Auf der Grundlage der Definition von *Schröder* [10] verstehen die Autoren unter Repräsentativität die häufigkeitsstatistische Abbildung (Variabilität und Variationsbreite) der Grundgesamtheit durch eine Stichprobe bezüglich der zu untersuchenden Merkmale. Beim Begriff „Raumrepräsentativität“ kommt als weiteres Merkmal die räumliche Lage hinzu. In diesem Vorhaben bezieht sich Raumrepräsentativität auf die Eigenschaften des Standorts innerhalb des Untersuchungsgebietes, die Auswirkungen auf den Expositionsgrad der Pollen haben und damit zu Kriterien für die Auswahl repräsentativer Standorte werden können.

Unter einem Monitoring wird die zeitlich wiederholte Aufnahme eines Umweltparameters nach standardisierten Arbeitsverfahren verstanden, mit dem Ziel, die Einhaltung eines festgelegten Standards oder einer Norm bzw. die Abweichung davon zu erfassen [11]. Anzumerken ist, dass im Gegensatz zu den anthropogenen Luftschadstoffen für die natürlich auftretenden luftgetragenen Pollen keine gesetzlichen Überschreitungswerte in Form von Grenz-, Richt- oder Beurteilungswerten definiert sind.

### 4 Material und Methoden

#### 4.1 Kulturpflanzen

Das hier vorgestellte Pollen-Monitoring konzentriert sich auf transgenen HR-Raps (Herbizid-Resistenz) und Bt-Mais (Eigenproduktion des Toxins des *Bacillus thuringiensis* zur Vermeidung von Schädlingsbefall). Den Kulturpflanzen

Raps (*Brassica napus* L. ssp. *napus*) und Mais (*Zea mays* L.) wird eine hohe Priorität für ein Monitoring aufgrund des Potenzials für ökologische Wirkungen und der wirtschaftlichen Bedeutung zugesprochen [12].

#### 4.2 Technische Pollensammler

In diesem Vorhaben kommen vorrangig standardisierte oder standardisierfähige Geräte zum Einsatz, um bei einem zukünftigen Monitoring vergleichbare Daten nach einem einheitlichen Verfahren zu erheben und verschiedene Monitoring-Gebiete vergleichend betrachten zu können. Zwei Typen von passiven Sammelgeräten werden genutzt: (1) Der Sedimentationssammler Sigma-2 nach VDI-Richtlinie 2119, Blatt 4 [13] und (2) der Pollenmassenfilter PMF (Gebrauchsmuster Nr. 201 17 632.7). Zum kombinierten Betrieb der Sammler ist der PMF auf den Sigma-2-Sammler installiert (Gesamthöhe ca. 50 cm; **Bild 1**). Diese Geräteanordnung ist auf einem 2 m langen Stahlrohr montiert, das ca. 50 cm tief im Boden eingelassen ist. Die Sammler kommen ohne Strom und weitere Installationen aus, so dass sie ohne größere Einschränkung im Gelände aufgestellt werden können. Der Sedimentationssammler Sigma-2 ist seit 15 Jahren beim Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Probenahme gasförmiger (NO<sub>2</sub>, Benzol) und partikelförmiger Luftbeimengungen in Kurorten im Einsatz. In dem windberuhigten Inneren des Sigma-2 sedimentieren Partikeln > 2,5 µm Durchmesser auf eine transparente Depositionsfläche, die für eine anschließende quantitativ-mikroskopische Auswertung geeignet ist. Der PMF wurde vom Ökologie Büro Hofmann, Bremen, speziell als Zusatzeinrichtung für das GVP-Monitoring entwickelt, um ausreichende Pollenmengen für die molekular-genetische Analyse zum Nachweis der transgenen Pollen zu sammeln. Die Kombination der beiden Sammler wurde in einem Modellprojekt des Umweltbundesamtes bereits erfolgreich getestet [4; 5].

#### 4.3 Bildanalyse und molekulargenetische Analyse des Pollens

Zur Auswertung der Depositionsproben aus dem Sigma-2-Sammler steht beim DWD in Freiburg ein vollautomatisches Bildanalysesystem zur Verfügung. Zur Bestimmung der Pollenzahl und Nachweis der Artzugehörigkeit wird eine Klassifikationssoftware eingesetzt, die von der Universität Freiburg und dem DWD entwickelt wurde [14]. Der



**Bild 1.** Technische Pollensammler: Sigma-2 mit aufmontiertem Pollenmassenfilter (PMF).

Klassifikator soll im Laufe des Projekts weiter angepasst werden, um Pollen in Konglomeraten zu identifizieren.

Ein Nachweisverfahren für transgene Pollen aus den PMF-Sammlern wird am Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (LfU) in Augsburg entwickelt. Transgene Pollen werden in den Proben mithilfe einer Real-time PCR (Polymerase Chain Reaction) detektiert. Bei der Real-time PCR (TaqMan-PCR) wird das nachgewiesene DNA-Fragment während der PCR durch eine Zunahme der Fluoreszenzsignale aufgespürt. Methoden für den Nachweis von transgenem Raps wurden dazu bereits veröffentlicht [15; 16].

Die Analyseverfahren des DWD und des LfU sollen so weit entwickelt werden, dass für ein zukünftiges bundesweites Monitoring eine zuverlässige Routineanalyse bereit steht.

#### 4.4 Vorversuche und Ausbreitungsmodellierung

Zum Test der Messapparatur und der Verfahrensabläufe bei der Probenahme wurden im Jahr 2002 im Landkreis Fürstfeldbruck Vorversuche auf lokaler Ebene durchgeführt. An der Versuchstation Roggenstein der Technischen Universität München und am Staatlichen Versuchsgut Puch konnten Parzellen mit HR-Raps und Bt-Mais genutzt werden. In verschiedenen Entfernungen und Himmelsrichtungen wurden um die Parzellen 14 Sigma-2-Sammler mit PMF und vier Sigma-2-Sammler ohne PMF aufgestellt. Für eine relative räumliche Abschätzung der Exposition von Raps- und Maispollen wurde das Programm AUSTAL2000 [17; 18] – ein Partikelmodell nach der TA Luft [19] – eingesetzt.

#### 4.5 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet sollte folgenden Anforderungen entsprechen: (1) Vorkommen von transgenen Raps- und transgenen Maisanbauflächen, (2) Vorkommen verschiedener Naturräume mit unterschiedlichen Nutzungsstrukturen. Die Anforderungen sollten gewährleisten, dass unterschiedliche Expositionsgrade von luftgetragenen transgenen und nicht transgenen Raps- und Maispollen auftreten. Ein westlich von München gelegenes Gebiet (**Bild 2**) erfüllte diese Anforderungen. Es umfasst eine Fläche von 16 x 16 km, erstreckt sich über Teile der Landkreise Fürstfeldbruck, Dachau, Starnberg und der Stadt München und könnte ein Monitoring-Gebiet im Rahmen eines bundesweiten Monitorings darstellen. Im Untersuchungsgebiet grenzen vier naturräumliche Haupteinheiten aneinander: Münchener Ebene (Flächenanteil am Untersuchungsgebiet: 42,6 %), Fürstfeldbrucker Hügelland (33,7 %), Donau-Isar-Hügel-

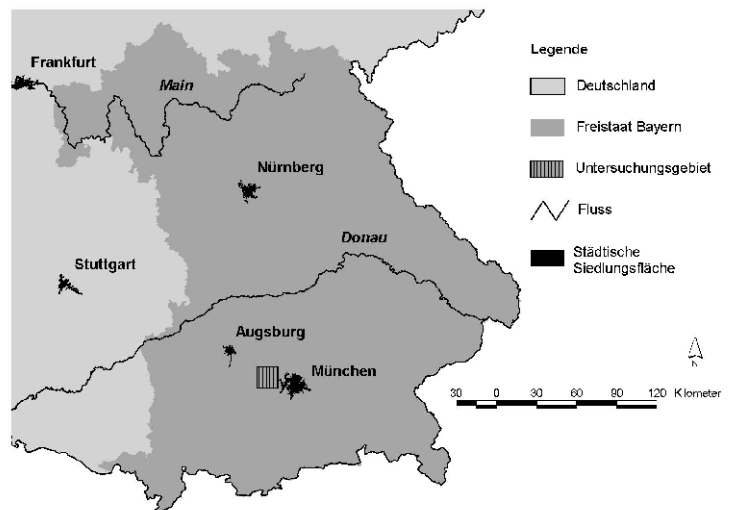


Bild 2. Lage des Untersuchungsgebietes.

land (18,7 %) und Ammer-Loisach-Hügelland (5,1 %). Der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Untersuchungsgebiet (**Tabelle 1**) liegt bei 80 % im Donau-Isar-Hügelland (Tertiärhügelland), bei 60 % in der Münchener Ebene (glaziale Schotterfelder) und dem Fürstfeldbrucker Hügelland (flachwellige Altmoränenplatten) sowie bei 40 % im Ammer-Loisach-Hügelland (subalpines Jungmoränenland) [20 bis 23].

#### 4.6 Feldversuch 2003

Das 256 km<sup>2</sup> große Untersuchungsgebiet wurde nach den Anforderungen der Raumrepräsentativität in drei Strata untergliedert und 50 Pollensammler (flächen-)proportional in jedes Stratum aufgeteilt. Als Strata wurden die naturräumlichen Haupteinheiten [22] (**Tabelle 2**), die orografische Höhe [24] (Höhenintervall: 10 m) und landwirtschaftliche Landnutzungstypen (Ackerland, Grünland, Mischnutzung Ackerland/Grünland) [25] gewählt. 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. Ausgeschlossen wurden zunächst alle nicht landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen. 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 Partikeln, (3) mehr als 100 m Abstand zu großflächigen

Tabelle 1. Prozentuale Verteilung der Landnutzungstypen im Untersuchungsgebiet.

	Münchener Ebene	Fürstfeldbrucker Hügelland	Donau-Isar-Hügelland	Ammer-Loisach Hügelland
Ackerfläche in %	40,23	49,86	69,50	23,56
Sonstige landwirtschaftliche Nutzfläche in %	21,60	10,95	12,61	16,39
Wald in %	7,06	27,51	10,61	57,27
Siedlung in %	25,93	10,45	5,24	2,78
Sonstiges in %	5,18	1,24	2,04	–
<b>Summe in %</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Tabelle 2. Aufteilung der Pollensammler auf die naturräumlichen Haupteinheiten im Untersuchungsgebiet.

Naturraum	Fläche in ha	Anteil in %	Anzahl Sammler	Anteil in %
Münchener Ebene	10897,85	42,57	21	42
Fürstenfeldbrucker Hügelland	8622,23	33,68	17	34
Donau-Isar-Hügelland	4783,21	18,68	9	18
Ammer-Loisach-Hügelland	1296,71	5,07	3	6
<b>Summe</b>	<b>25600</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>100</b>

Landnutzungstypen, die eine freie Anströmung verhindern (z. B. Siedlungen und Wälder).

Um eine räumliche Konzentrierung der Sammlerstandorte zu erkennen und zu vermeiden, wurde die Punktverteilung mit dem Nearest Neighbour Index nach Clark und Evans untersucht [25; 26]. Dazu wird der Quotient aus der durchschnittlich beobachteten Nächste-Nachbar-Distanz mit der durchschnittlich zu erwartenden Nächste-Nachbar-Distanz einer räumlichen Zufallsverteilung (complete spatial randomness, CSR) gebildet. Die Abweichung des Index von der räumlichen Zufallsverteilung wurde auf Signifikanz getestet. Zur Berechnung wurde das Software-Programm CrimeStat II eingesetzt [27].

Im Untersuchungsgebiet wurden die technischen Pollensammler an den 50 Standorten aufgestellt. Zur Erfassung der Rapspollen wurden in der Zeit vom 25. April bis 23. Mai 2003 (28 Tage) Proben genommen, zur Erfassung der Maispollen vom 4. Juli bis 31. Juli 2003 (27 Tage). Die Expositionsdauer der Haftfolien im Sigma-2-Sammler betrug jeweils eine Woche. Art und Anzahl der o. g. Pollen wurden halbautomatisch mit dem Bildanalyseprogramm des DWD und der Klassifikationssoftware bestimmt und als artspezifische Anzahldepositionsrate angegeben. Der Pollenmassenfilter verblieb jeweils über die gesamte Blühperiode von Raps und Mais am Messstandort. Anschließend wurden die akkumulierten Pollen auf die Anwesenheit von transgenen Pollen untersucht.

#### 4.7 Kartierung der Raps- und Maisfelder und Abstandsanalyse

Zur Dokumentation der Pollenquellen wurden im Jahr 2003 im gesamten Untersuchungsgebiet die Raps- und Maisfelder auf Grundlage der Flurkarten im Maßstab 1 : 5 000 kartiert [28] und mit einem Geografischen Informationssystem (GIS) digitalisiert [29]. Diese Daten bilden die Grundlage für die Ausbreitungsmodellierung und bieten sich zudem für eine Abstandsanalyse an. Dazu wurden die Vektordaten („Kartierung der Raps- und Maisfelder“, „landwirtschaftliche Landnutzungstypen“ und „naturräumliche Haupteinheiten“) in einheitliche Rasterdaten mit einer Auflösung von 10 x 10 m überführt. Für jede Rasterzelle, die einem landwirtschaftlichen Landnutzungstyp angehört, wurde der Abstand zur nächstgelegenen Rasterzelle, die als Mais oder Raps codiert war, als Distanz zwischen den Mittelpunkten der Rasterzellen berechnet. Das Raster wurde anschließend anhand der Naturraumgrenzen unterteilt [29; 30].

## 5 Erste Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Vorversuche und Ausbreitungsmodellierung

Die Vorversuche in der Umgebung der Raps- und Maisparzellen ergaben eine gute Praktikabilität der Sammler. In fast allen Proben der Sigma-2-Sammler konnten Raps- und in

mehreren Proben Maispollen nachgewiesen werden. Alle PMF-Proben enthielten in ausreichender Menge Raps- und Maispollen für die molekulargenetische Analyse.

Das Programm AUSTAL2000 wurde an die Verhältnisse des Vorversuchs angepasst und angewendet (Programmparameter: Rechengitter 3 x 3 m, Felder als Flächenquellen). Die Korrelation der gemessenen und er-

rechneten Rapspollen-Deposition nach *Bravais-Pearson* ergibt einen Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,797$  ( $n = 18$ ; Signifikanzniveau: 0,01). Die hohe Korrelation zwischen gemessener und berechneter Pollendeposition deutet darauf hin, dass AUSTAL2000 bei einem hoch aufgelösten Rechengitter gut geeignete Näherungswerte der Rapspollen-Deposition zu berechnen.

### 5.2 Feldversuche 2003

Die Aufteilung der Sammler auf das Stratum „naturräumliche Haupteinheiten“ zeigt Tabelle 2. Entsprechend des Flächenanteils der Naturräume wurden die 50 Sammler auf die Naturräume verteilt. Die meisten Sammler (21) entfielen auf die Münchener Ebene, die wenigsten (3) auf das Ammer-Loisach-Hügelland. Analog erfolgte die Aufteilung der Sammler auf die Strata „orografische Höhe“ und „landwirtschaftliche Landnutzungstypen“. Das Stratum Orografie setzte sich aus 13 Klassen (Höhenintervall 10 m) zusammen. Die höchste und niedrigste Klasse wurden aufgrund der geringen Klassenbelegung nicht mit Sammlern besetzt. Beim Stratum landwirtschaftliche Nutzung entfiel die Mehrheit der Sammler (36) auf das Ackerland, gefolgt von Grünland (10) und Mischnutzung (4). Eine identische Abbildung der Flächenanteile durch die Anzahl der Sammler ist jedoch nicht möglich, da nicht alle vorgesehenen Messstandorte unverändert beibehalten werden konnten. In Abstimmung mit den Eigentümern oder Pächtern wurden einige Sammlerstandorte um wenige bis einige hundert Meter von der ursprünglichen Position versetzt. Die Akzeptanz der Grundeigentümer und Pächter für Aufstellung und Betrieb der Messapparaturen war sehr hoch, weil Standorte zwischen Feldrand und Flurweg gewählt wurden. Diese Standorte zeichneten sich zudem durch eine gute Erreichbarkeit aus.

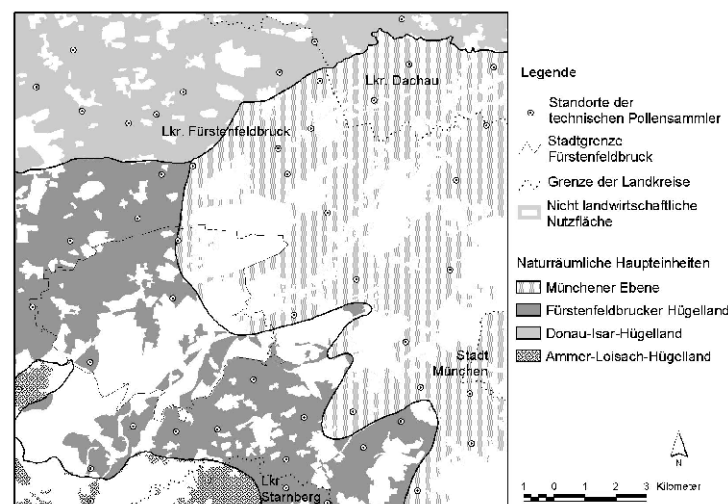


Bild 3. Standorte der Pollensammler bei den Feldversuchen 2003.

Tabelle 3. Kartierung der Raps- und Maisfelder im Untersuchungsgebiet im Jahr 2003.

Feldfrucht	Münchener Ebene		Fürstenfeldbrucker Hügelland		Donau-Isar-Hügelland		Ammer-Loisach-Hügelland	
	Raps	Mais	Raps	Mais	Raps	Mais	Raps	Mais
Anzahl Felder	148	310	116	264	84	186	5	15
Feldgröße (Median) in m <sup>2</sup>	17500	15500	28100	21800	28300	29700	53700	22900
Variationsbreite in 1 000 m <sup>2</sup>	219	191,3	203,8	173,8	117	189,4	78,3	146,9
Standardabweichung in m <sup>2</sup>	30800	18300	29100	25900	24900	26500	29200	36400
Anteil an Agrarfläche in %	6,16	9,85	7,72	15,69	7,76	18,33	7,03	13,78

Zeile 3-6: Berücksichtigung aller Felder, die vollständig innerhalb des Naturraums liegen

Zeile 7: Berücksichtigung aller Feldflächen, die innerhalb des Naturraums liegen

Tabelle 4. Abstände zwischen Raps- und Maisfeldern im landwirtschaftlich genutzten Raum des Untersuchungsgebiets im Jahr 2003.

Feldfrucht	Münchener Ebene		Fürstenfeldbrucker Hügelland		Donau-Isar-Hügelland		Ammer-Loisach-Hügelland	
	Raps	Mais	Raps	Mais	Raps	Mais	Raps	Mais
Abstand, Maximum in m	1890	1460	1690	1710	2130	640	2300	1830
Abstand, Median in m	300	180	250	150	280	140	620	290

Die endgültige Lage der Standorte der Pollensammler zeigt **Bild 5**.

Der Nearest Neighbour Index der Punktverteilung der Pollensammler-Standorte ergibt mit „Rectangular Edge Correction“ einen Wert von 1,155. Beträgt der Nearest Neighbour Index 1,0, entspricht die Punktverteilung einer Zufallsverteilung (CSR). Werte kleiner 1,0 deuten auf eine räumlich konzentrierte Verteilung und Werte größer 1,0 auf eine räumlich gleichmäßige Verteilung hin. Die Punktverteilung der Pollensammler-Standorte entspricht statistisch signifikant einer zufälligen Verteilung (Signifikanzniveau: 0,01). Somit konnte nachgewiesen werden, dass die Pollensammler im Untersuchungsgebiet weder geklumpt noch geometrisch gleichmäßig vorliegen.

### 5.3 Kartierung der Raps- und Maisfelder und Abstandsanalyse

Sowohl zwischen den Naturräumen als auch den Feldfrüchten Raps und Mais treten deutliche Unterschiede bezüglich der Feldgröße, der Variabilität der Feldgröße und des Anteils an der landwirtschaftlichen Nutzfläche auf (**Tabelle 5**). Der Vergleich zwischen Raps und Mais zeigt, dass in allen Naturräumen die Anbaufläche des Mais gegenüber dem Raps überwiegt. Die Maisfelder waren mit Ausnahme des Donau-Isar-Hügellands insgesamt kleiner und in der Münchener Ebene und im Fürstenfeldbrucker Hügelland bezüglich der Feldgröße einheitlicher (geringere Variationsbreite und Standardabweichung) als die Rapsfelder. Damit bestätigt sich die Zweckmäßigkeit der anfänglichen Forderung, zur Abgrenzung und Festlegung des Untersuchungsgebiets verschiedene Naturräume – zur Gewährleistung räumlich variierender Pollenexposition – zu berücksichtigen.

In der Diskussion um die Koexistenz von transgener, konventioneller und ökologischer Landwirtschaft wird als Lösung zur Vermeidung unerwünschter Auskreuzungen sehr häufig eine Abstandsregelung vorgeschlagen. Auf der Grundlage der Felderkartierung und bezogen auf die landwirtschaftliche Nutzfläche wurde eine Abstandsberechnung für das Untersuchungsgebiet durchgeführt. Anzahl, Lage, Größe und Form der Felder spiegeln sich in den Abstandswerten der **Tabelle 4** wider. Im Donau-Isar-Hügelland lie-

gen die Maisfelder mit durchschnittlich 140 m am dichtesten beieinander, im Fürstenfeldbrucker Hügelland die Rapsfelder (250 m). Von verschiedenen Institutionen und Personen werden bei einer angestrebten Einkreuzungsrate < 0,5 % sehr unterschiedliche Abstände zwischen gentechnikfreien Feldern und Feldern mit GVO-Anbau vorgeschlagen: Beim Raps liegen die Distanzen zwischen 10 und 600 m und beim Mais zwischen 200 und 1 000 m [31]. Die Felderkartierung und die Abstandsanalyse der vorliegenden Untersuchung zeigen, dass die Einhaltung von Abstandsregelungen in der Praxis nur schwer zu realisieren sein wird, denn die meisten vorgeschlagenen Sicherheitsabstände liegen über den durchschnittlichen Feldabständen.

## 6 Ausblick

Die Anwendung von AUSTAL2000 auf regionaler Ebene (Untersuchungsgebiet) mit den Ergebnissen der Kartierung der Raps- und Maisfelder 2003 steht noch aus. Eine Generalisierung der Ausbreitungsmodellierung ist in diesem Fall nicht zu vermeiden, d. h. eine Vergrößerung des Rechengitters auf ungefähr 50 x 50 m und die Verwendung von Punkt- (geometrischer Schwerpunkt des Feldes) anstelle Flächenquellen ist wahrscheinlich vorzunehmen. Unter diesen Bedingungen wird eine geringere Korrelation der gemessenen mit den berechneten Pollendepositionen erwartet.

Nach Vorliegen der Ergebnisse der 50 Pollensammler der Feldversuche 2003 ist folgende weitere Vorgehensweise geplant: (1) Vergleich der Standorte der Pollensammler unter Einbeziehung der Messergebnisse und Standortfaktoren, (2) Berechnung der Pollendeposition nach AUSTAL2000, (3) Vergleich der gemessenen mit den nach AUSTAL2000

### Projektpartner

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg: R. Zeitler;  
 Deutscher Wetterdienst (DWD), Freiburg: E. Schultz;  
 Fachhochschule Weihenstephan, Freising: S. Rogg;  
 Ökologie Büro Hofmann, Bremen: F. Hofmann;  
 Universität Freiburg, Freiburg: G. Lausen.

berechneten Pollendepositionen, (4) Überprüfung der Anwendbarkeit und Anwendung geostatistischer Verfahren zur Interpolation der Punktdaten (Variogrammanalyse, Kriging), (5) Überprüfung der Sammlerstandorte mittels einer Raumrepräsentanz-Analyse [32] und (6) Untersuchungen zur Optimierung des Messnetzes hinsichtlich Anzahl und Lage der Messstandorte.

## Danksagung

Dieses Projekt wird als gemeinsames Bund/Länder-Modellprojekt vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (Az. 76a-8793-2001/12) und vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) finanziert. Das Projekt wird im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN; FKZ 201 67 430/33) ausgeführt. Dank gebührt der Versuchsstation Roggenstein der TU München (Landkreis Fürstenfeldbruck) und dem Staatlichen Versuchsgut Puch (Landkreis Fürstenfeldbruck) für die Unterstützung bei den Feldversuchen 2002 und 2003 sowie dem Lehrstuhl für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der TU München für die Mitnutzung der HR-Rapsparzellen. Für die Durchsicht des Manuskripts ist F. Hofmann, E. Schultz und R. Zeitler zu danken.

## Literatur

- [1] Finck, M.: Luftreinhaltung und Risikomanagement in der grünen Biotechnologie: Synergieeffekte. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 62 (2002) Nr. 11/12, S. 441.
- [2] 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 Nr. L 106 vom 17. April 2001, S. 1-38.
- [3] Züghart, W.; Breckling, B.: Konzeptionelle Entwicklung eines Monitoring von Umweltwirkungen transgener Kulturpflanzen, Teil 1 und Teil 2. Hrsg.: Umweltbundesamt. UBA-Texte Nr. 50/03. Berlin 2003.
- [4] Hofmann, F.; Schlechtriemen, U.; Wosniok, W.; Foth, M.; Seiffert, B.; Breitfuß, G.; von der Ohe, W.; von der Ohe, K.; Dietze, V.; Schultz, E.; Tappeser, B.: Technische und biologische Pollenakkumulatoren und PCR-Screening für eine erste Stufe eines GVP-Umweltmonitorings. Modellprojekt zum Langzeitmonitoring von GVP: Bremen. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Monitoring von Umweltwirkungen gentechnisch veränderter Organismen, S. 33-55. UBA-Texte Nr. 53/03. Berlin 2003.
- [5] Hofmann, F.; Schlechtriemen, U.; Wosniok, W.; Foth, M.: Technische und biologische Pollenakkumulatoren und PCR-Screening für eine erste Stufe eines GVP-Umweltmonitorings. Hrsg.: Umweltbundesamt. UBA-Texte, im Druck.
- [6] Clench-Aas, J.; Bartonova, A.; Böhler, T.; Grønskei, K. E.; Sivertsen, B.; Larssen, S.: Air pollution exposure monitoring and estimating. Part I. Integrated air quality monitoring system. J. Environ. Monit. 1 (1999), S. 313-319.
- [7] Hidalgo, P. J.; Mangin, A.; Galán, C.; Hembise, O.; Vázquez, L. M.; Sanchez, O.: An automated system for surveying and forecasting Olea pollen dispersion. Aerobiologia 18 (2002), S. 23-31.
- [8] Helbig, N.; Vogel, H.; Vogel, B.; Fiedler, F.: Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale. In: Abstracts of the European Aerosol Conference 2003. J. Aerosol Sci. (2003), S. 1015-1016.
- [9] Duden Fremdwörterbuch. Hrsg.: Wissenschaftlicher Rat der Dudenredaktion. Mannheim: Dudenverlag 1997.
- [10] Schröder, W.: Regionalisierung in den Geowissenschaften. In: Schröder, W.; Vetter, L.; Fränzle, O. (Hrsg.): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie, S. 17-30. Wiesbaden: Vieweg 1994.
- [11] Hellowell, J. M.: Development of a rationale for monitoring. In: Goldsmith F. B. (Hrsg.): Monitoring for conservation and ecology, S. 1-14. London: Chapman and Hall 1991.
- [12] Bund/Länder-AG „Monitoring der Umweltwirkungen von GVP“: Monitoring von gentechnisch veränderten Pflanzen – Prioritätensetzung. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Stand der Entwicklung des Monitoring von gentechnisch veränderten Organismen (GVO), S. 34-55. UBA-Texte Nr. 60/01. Berlin 2001.
- [13] VDI 2119, Blatt 4: Messung partikelförmiger Niederschläge. Mikroskopische Unterscheidung und größenfraktionierte Bestimmung der Partikeldeposition auf Haftfolien. Probenahmegerät Sigma-2. Berlin: Beuth 1997.
- [14] Ronneberger, O.; Burkhardt, H.; Schultz, E.: General-purpose object recognition in 3D volume data sets using gray-scale invariants – Classification of airborne pollen-grains recorded with a confocal laser scanning microscope. Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition, Quebec (Canada), September 2002, S. 1-6.
- [15] Zeitler, R.: Etablierung einer PCR-Routineanalytik für das Monitoring von transgenem Raps. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 63 (2003) Nr. 6, S. 231-235.
- [16] Zeitler, R.; Pietsch, K.; Waiblinger, H.-U.: Validation of real-time PCR methods for the quantification of transgenic contaminations in rape seed. Europ. Food Res. Techn. 214 (2002), S. 341-351.
- [17] Ingenieurbüro Janicke, Dunum: AUSTAL2000, Vers. 1.0.1. www.austal2000.de.
- [18] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Köln: GO-AUSTAL, Vers. 1.5. www.grs.de.
- [19] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002. GMBI. (2002) Nr. 25-29, S. 511-605.
- [20] Geographische Landesaufnahme 1 : 200 000. Naturräumliche Gliederung Deutschlands. Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 181 München. Hrsg.: Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumforschung. Bonn 1994.
- [21] Geographische Landesaufnahme 1 : 200 000. Naturräumliche Gliederung Deutschlands. Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 180 Augsburg. Hrsg.: Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumforschung. Bonn 1962.
- [22] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg: Fachinformationssystem-Naturschutz (FIS): Haupt-Naturraumgrenzen. www.bayern.de/lfu/natur/schutzgebietskonzepte/fis\_natur/index.html.
- [23] GIS-Regionsatlas München. Version 3.1, Stand: 4. Mai 2001. Planungsbüro Prof. Dr. Jörg Schaller, Kranzberg, im Auftrag des Bayerischen Industrieverbands Steine und Erden e. V. München 2001.
- [24] Bayerisches Landesvermessungsamt, München: Digitales Geländemodell DGM25.
- [25] Clark, P. J.; Evans, F. C.: Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationships in populations. Ecology 35 (1954), S. 445-453.
- [26] Cressie, N. A. C.: Statistics for spatial data. New York: J. Wiley & Sons 1993.
- [27] Levine, N.: 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 2002.
- [28] Bayerisches Landesvermessungsamt, München: Flurkarte 98.
- [29] Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI), Redlands, CA, USA: ArcView, Vers. 3.2a.
- [30] Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI), Redlands, CA, USA: ArcInfo, Vers. 8.1.
- [31] Grüne Gentechnik und ökologische Landwirtschaft. Hrsg.: Umweltbundesamt. UBA-Texte Nr. 01/03. Berlin 2003.
- [32] Vetter, L.; Maass, R.: Nachbarschaftsanalytische Verfahren. In: Schröder, W.; Vetter, L.; Fränzle, O. (Hrsg.): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie, S. 103-107. Wiesbaden: Vieweg 1994.