KURZGUTACHTEN
ZUR ABSCHÄTZUNG DER MAISPOLLENDEPOSITION IN RELATION ZUR ENTFERNUNG VON MAISPOLLENQUELLEN MITTELS TECHNISCHEM POLLENSAMMLER PMF

Auftraggeber:

Bundesamt für Naturschutz BfN

Bearbeiter:

Dipl.-Biol. Frieder Hofmann

ÖKOLOGIE BÜRO

Rennstieg 25
D-28205 Bremen
Tel.: +49-421-706474
Fax: -74106

25. Mai 2007

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung 1

2 Technische Pollensammler: Vergleich zwischen dem Sigma-2/PMF und anderen Verfahren 1

2.1 Der technische Pollensammler Sigma-2/PMF 1

2.2 Sporenfalle nach Hirst (Burkard Falle) 2

2.3 Microbus 3

2.4 Rotorod-Sammler 3

2.5 Objektträger, Durham-Falle 4

2.6 Kaskaden-Impaktor 4

3 Datenbasis 5

3.1 Standorte und Versuchsjahre 5

3.2 Ermittlung der Abstandsdaten 6

3.3 Statistik 7

4 Ermittlung von Pollenfluss und Pollendeposition aus den PMF-Daten 7

4.1 Faktoren, die die Pollenausschüttung, den Pollenflug und die Pollendeposition beeinflussen 7

4.2 Ermittlung des horizontalen Pollenflusses aus den PMF-Daten 8

4.3 Ermittlung der Pollendeposition 9

5 Ergebnisse 11

5.1 Maispollenfluss und Maispollendeposition in Abhängigkeit vom Abstand zur Pollenquelle 11

5.2 Abschätzung der Entfernungen für definierte Depositionen von 2, 5, 10, 15 oder 20 Pollenkörnern pro cm^2 15

6 Diskussion 16

7 Literatur 20

1 Aufgabenstellung

Maispollen wird über den Wind verbreitet. Im Fall von Bt-Mais gelangen Pollen, und damit Teile des Toxins, das die Pflanzen produzieren, auf benachbarte Flächen. Das Ausmaß der Pollendeposition ist somit für die Abschätzung der Exposition von Nichtzielorganismen außerhalb der GV-Flächen von zentraler Bedeutung. Relevant wird dies besonders beim Anbau von Bt-Mais in Nachbarschaft von Schutzgebieten, die empfindliche Nichtzielorganismen, wie z.B. einige Schmetterlingsarten, beherbergen. Es stellt sich daher die Frage, wie groß die Sicherheitsabstände von GV-Anbauflächen zu Schutzgebieten mindestens sein müssen.

Durch die drängende Frage der Koexistenz wurde, insbesondere in den letzen Jahren, eine Reihe von Forschungsarbeiten zum Thema GV-Maisflächen und Einkreuzung per Pollenflug auf Nachbarmaisflächen durchgeführt (z.B. Sanvido et al. 2005)[1]. Weitere Daten liegen zur Auskreuzung von Mais vor, die vor dem Hintergrund der Saatgutreinhaltung stehen. Im Gegensatz zur Fragestellung der Auskreuzung mangelt es jedoch an hinreichend aussagefähigen Arbeiten, die sich quantitativ mit der Deposition von Maispollen im Hinblick auf Wirkungen auf Nichtzielorganismen auseinandergesetzt haben. Dies gilt insbesondere für die Deposition von Maispollen in Entfernungen zwischen 50 und 1.000 m. Auch die bisher durchgeführte Sicherheitsforschung hat keine entsprechende Datenlage generiert (Heink 2006). Die bis dato umfangreichsten Untersuchungen zum Pollenfluss und zur Pollendeposition stammen aus zwei Bund-Länder-Modellprojekten „Bremen“ (Hofmann et al. 2005) und „Bayern“ (Beismann & Kuhlmann 2006). Schwerpunkte der Modellprojekte lagen dabei auf der Entwicklung eines für das GVO-Monitoring geeigneten Pollensammlers (PMF/Sigma-2) und Fragen der Raumrepräsentativität zur Aufstellung der Sammler.

Mit dem vorliegenden Gutachten werden die vorhandenen Daten der beiden Modellprojekte mit weiteren Daten, die mit dem PMF-Sammler seit dessen Entwicklung erhoben worden sind, zusammengeführt und hinsichtlich der Frage der Maispollendeposition in Abhängigkeit von der Entfernung zur Pollenquelle ausgewertet.

2 Technische Pollensammler: Vergleich zwischen dem Sigma-2/PMF und anderen Verfahren

Es existieren eine Vielzahl von Möglichkeiten den Pollenflug zu erfassen, die für unterschiedliche Anwendungszwecke ausgelegt sind. Nur wenige dieser Methoden eignen sich dabei zur quantitativen Ermittlung der Pollendeposition (Gregory 1973; Edmonds 1979). Der Sigma-2/PMF Sammler ermöglicht solch quantitative Messungen des Pollenflusses.

2.1 Der technische Pollensammler Sigma-2/PMF

Die Daten zum Maispollenflug des vorliegenden Gutachtens wurden mit dem technischen Pollensammler Sigma-2/PMF gemessen (Abbildung 1) (Hofmann et al. 2005; VDI-Richtlinie 4330 Bl. 3 2007). Das Verfahren wurde speziell für das Pollenmonitoring mit Expositionszeiten über Blühzeiträume von vier Wochen und länger in einem Vorhaben des Bundes und des

[1] siehe auch: http://www.biosicherheit.de/de/fokus/koexistenz/511.doku.html (20.5.2007)

Landes Bremen für das GVO-Monitoring entwickelt und die grundsätzlichen Sammeleigenschaften geprüft (Modellvorhaben Bremen, Hofmann et al. 2005). Der Sigma-2/PMF-Sammler verfügt dabei über zwei Komponenten: Über den Sigma-2-Sammler wird die Deposition (Sedimentation) direkt erfasst, mit dem PMF (Pollenmassenfilter) der Pollenfluss. Der Pollenmassenfilter PMF ist hierbei für die Sammlung größerer Pollenmengen ausgerichtet, um eine molekularbiologische Analyse der Pollen zu ermöglichen. Die Pollenproben des PMF werden weiterhin mikroskopisch auf Art und Anzahl der Pollen analysiert, so dass sich mit dem PMF der Pollenfluss quantitativ ermitteln lässt. Auf Grund der größeren Pollenmengen besitzt der PMF erheblich bessere Nachweisgrenzen als der Sigma-2, so dass die umfangreichere Datenbasis zum Maispollenflug für den PMF vorliegt.

Vergleichsdaten zur Pollenkonzentration wurden mit der Standardpollenfalle der Polleninformationsdienste, der Burkard-Sporenfalle nach Hirst (1958), erhoben. Der Sigma-2/PMF-Sammler wurde desweiteren im Vorhaben Bayern (Beismann & Kuhlmann 2006) im Hinblick auf Raumrepräsentativität überprüft.

Das Pollenmonitoring mit dem Sammler Sigma-2/PMF ist als VDI-Richtlinie 4330 Bl. 3 (2007) standardisiert und gewährleistet reproduzierbare und vergleichbare Daten zu Pollenfluss und -deposition. Das Verfahren wird seit 2001 angewendet und hat sich in der Praxis bewährt.

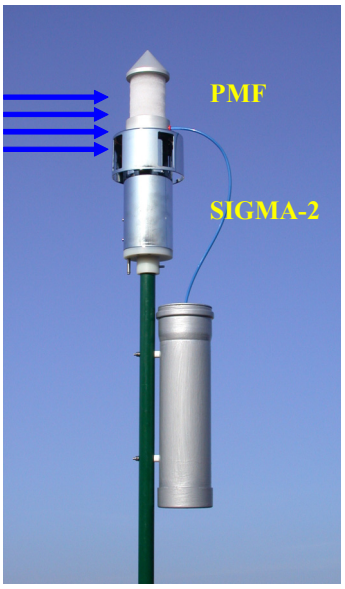

Abb. 1: Der technische Pollensammler Sigma-2/PMF nach VDI-Richtlinie 4330 Bl. 3 (2007)

2.2 Sporenfalle nach Hirst (Burkard Falle)

Die Standardpollenfalle der Polleninformationsdienste (PID) in Europa ist die Sporenfalle nach Hirst (1958), wobei in Nord- und Westeuropa die Geräte der Firma Burkard aus England dominieren, im südlichen Europa die der Firma Lanzonii aus Italien. Bei der Falle handelt es sich um ein volumetrisches Aktivgerät, d.h. es wird ein konstanter Volumenstrom an Luft eingesaugt. Der waagerecht angeordnete Einsaugstutzen wird über eine Windfahne ausgerichtet. Die Aerosolpartikel werden auf einem Klebestreifen impaktiert, die Auswertung erfolgt unter dem Mikroskop. Von der Impaktion wird auf die Konzentration geschlossen. Die Regelexposition beträgt 7 Tage, wobei Tageswerte ermittelt werden.

Das Verfahren gilt als Konventionsverfahren und ist europaweit von den Polleninformationsdiensten (PID) standardisiert (http://www.pollenstiftung.de; http://www.polleninfo.org). Die

Sammeltechnik und Konstruktion der Burkard-Falle ist seit den 50er Jahren unverändert. Eine neuere Ausführung der Fa. Burkard ist seit kurzem auf dem Markt, wobei bewusst das physikalische Sammelprinzip für eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Daten beibehalten wurde. Als Vorteil des Verfahrens gilt die verbreitete Anwendung und die zeitliche Differenzierung.

Die Fallen des PID sind in Europa standardmäßig auf hohen Gebäuden installiert, vornehmlich auf Klinikgebäuden in Städten, um mit einer Falle möglichst repräsentative Aussagen für die Bevölkerung im Hinblick auf allergene Pollenbelastung zu erzielen. Die der Agrarlandschaft zugeordneten Maispollen, die als nicht bzw. nur gering allergen gelten, gehören daher weder zum Standard-Auswerteprofil des PID noch zu den dort häufig erfassten Pollen. Dementsprechend gibt es keine systematische Datenbasis zu Maispollen aus den PID-Analysen in Deutschland. Seit 2003 werden mit dem PMF regelmäßig an einer Referenzmessstation im ländlichen Raum Vergleichsmessungen mit der Burkard-Falle durchgeführt, so dass Bezüge möglich sind.

2.3 Microbus

Der automatische Bioaerosolmonitor MICROBUS (**M**icroscopical **I**dentification and **C**omputerbased **R**ecognition by **O**nline **B**iological **U**nit **S**ampling) wurde im BMBF-Verbundvorhaben OMNIBUSS entwickelt.[2] Der dem aktuellen Stand der Technik entsprechende Sammler soll ein schnelles, automatisches Monitoring von Bioaerosolen und deren Identifizierung erlauben, wobei aus der Vielfältigkeit möglicher Bioaerosole Pollen und Sporen im Vordergrund der Untersuchungen stehen. Beim Microbus wird über einen Rundumeinlasskopf ein größeres Luftvolumen eingesaugt, ein Teilstrom wird abgezweigt und daraus werden dann die Aerosolpartikel auf Haftflächen impaktiert. Die Proben werden im Gerät automatisch präpariert und mikroskopisch untersucht. Anwendungsmöglichkeiten des MICROBUS werden neben einem verbesserten Umweltmonitoring z. B. zur Polleninformation für Allergiker, auch bei der Sporenerkennung im Bereich des Arbeits- und Zivilschutzes und der Landwirtschaft gesehen.

Das Gerät wird jedoch frühestens ab Ende 2007 zur Verfügung stehen und soll als zukünftiges Referenzverfahren die Burkard-Falle ablösen. Das Gerät ist modulartig aufgebaut und steht damit weiteren Anwendungen offen. Auf Grund des hohen Preises und des Installationsaufwands ist eine breite Anwendung im Feld im Rahmen des GVO-Monitorings kaum möglich, jedoch wird ein hoher Nutzen als Referenzgerät an auswählten Messpunkten gesehen.

2.4 Rotorod-Sammler

Für die Polleninformationsdienste der USA wird als Standardgerät der Rotorod-Sammler eingesetzt (Noll 1970). Der Aktivsammler besteht aus einem Motor, an dessen Rotor zwei senkrechte Stäbe befestigt sind. Diese sind mit einem Haftfilm überzogen, an denen die Pollen haften bleiben und nach der Aufbereitung unter dem Mikroskop quantitativ bestimmt werden.

Die Funktionsweise des Rotorod basiert auf dem Impaktionsprinzip von Partikeln auf zylindrischen Oberflächen. In Unterscheidung zur Hirst-Falle und zum Microbus wird jedoch keine Luft eingesaugt und beschleunigt, die Impaktion erfolgt direkt in der Außenluft, indem die Akzeptoren entsprechend schnell bewegt werden. Dabei hängt die Sammeleffizienz entscheidend vom aerodynamischen Partikeldurchmesser, dem Durchmesser der Fangstäbe und der

[2] http://www.biophotonik.org/index.php?option=com_content&task=view&id=29&Itemid=44

Umdrehungsgeschwindigkeit ab. Das Verfahren ist günstig und zuverlässig, physikalisch gut fassbar und unempfindlich gegenüber Windeinflüsse oder auch Pollenbewegungen. Gewonnen wird pro Sammelperiode eine Probe, mikroskopisch wird die impaktierte Pollenanzahl pro Flächeneinheit erfasst. Über das von den Rods durchstrichene Luftvolumen wird auf die mittlere Pollenkonzentration rückgerechnet.

Das Verfahren eignet sich insbesondere für Kurzzeitmessungen, bei starken Pollenquellen sind die Rods nach ca. 20 – 60 Minuten belegt und müssen gewechselt werden. Daher werden gerne, insbesondere für Routinemessungen zur Pollenflugvorhersage, Geräte eingesetzt, bei denen die Exposition intervallartig erfolgt, wo die Rods in den Pausen eingezogen und damit vor Exposition geschützt werden, so dass die Probenahme über längere Zeitintervalle laufen kann. Die Rotorod-Falle wird in Europa seltener verwendet.

2.5 Objektträger, Durham-Falle

Die Erfassung von Sporen und Pollen mit Objektträgern, die mit einer klebrigen Haftschicht versehen sind (z.B. Vaseline, Silikonöl, synthetischer Klebefilm), gehört zu den ältesten und einfachsten Verfahren (Raynor 1979) die Pollendeposition zu ermitteln.

Objektträger sind preiswert und die Pollen können nach Exposition in der Luft direkt unter dem Mikroskop untersucht werden. Je nach Untersuchungszweck finden sich waagerechte Anordnungen zur Ermittlung der vertikalen Deposition, senkrechte zur Impaktion sowie schräge Anordnungen als Zwischenformen. Die einfachste Form ist die offene Exposition, die jedoch gegenüber Umwelteinflüssen wie Regen, Staub etc. empfindlich ist. Eine weit verbreitete, vor Regen etwas besser geschützte Anordnung zeigt beispielsweise die Durham-Falle (Durham 1946). Die Erfassung von Pollen über Objektträger ist gut untersucht, die Vor- und Nachteile sind bekannt (Gregory 1973; Raynor 1979). Als Vorteil gilt die einfache und preiswerte Erfassung, die viele Messpunkte ermöglicht. Als nachteilig gelten: Die waagerechte Anordnung ist besonders gegenüber Regen, Staub, Blätter, Insekten, Veränderungen der Windgeschwindigkeit (stärkere oder turbulente Winde) sowie Änderungen der Anströmwinkel (Neigungswinkel) empfindlich und abhängig vom aerodynamischen Partikeldurchmesser. Zudem ändern sich die Klebeeigenschaften mit zunehmender Belegung der Haftfläche erheblich. Eine gleichmäßige und vergleichbare Erfassung der Pollen ist damit nicht gewährleistet.

Gregory (1973) und Raynor (1979) beurteilen die offene Exposition von Objektträgern als probates Mittel um einen ersten Überblick zu gewinnen, jedoch als ungeeignet für quantitative Erfassungen. Die besten Ergebnisse der Methode werden bei Kurzzeitexpositionen von wenigen Stunden bei guter Witterung erzielt.

2.6 Kaskaden-Impaktor

Das klassische Referenzverfahren zur quantitativen Aerosolerfassung im unteren µm-Bereich ist der Kaskaden-Impaktor (z.B. der Firma Andersen) (Raynor 1979). Das Aktivgerät benötigt einen konstanten Volumenstrom. Für die Sammeleffizienz spielt neben der Abscheidetechnik jedoch auch die Einlassgeometrie eine Rolle, für die es technisch unterschiedliche Ausführungen gibt. Derzeit gibt es allerdings keine Gerätevariante, die eine gleichermaßen gute Erfassung des Pollenspektrums von 5-120 µm im Freiland gewährleistet. Es wird vor allem für lufthygienische Fragen, insbesondere zur Straubfraktionierung und Ermittlung der Feinstaubanteile sowie für Sporen verwendet. Regelanwendungen für Pollenmessungen in Deutschland sind uns nicht bekannt.

3 Datenbasis

3.1 Standorte und Versuchsjahre

Für die hier vorgenommene Auswertung standen Daten aus Freilanderhebungen zum Maispollenflug von 2001 bis 2006 aus verschiedenen Regionen Deutschlands und der Schweiz zur Verfügung (Tabelle 1).

Tab. 1: Datenbasis zur Maispollendeposition in Relation zum Abstand vom nächstgelegenen Maisfeld aus Freilanderhebungen mit dem PMF von 2001 – 2006. N: Anzahl der Standorte.

Land	Jahr	N	Entfernungs-bereich [m]	Sammel-zeitraum	Quelle / Institution
Niedersachsen Raum Sickte	2001	7	14 - 550	20.7.-16.8.	Hofmann et al. 2005
Bayern Raum Schwarzenau	2001	8	75 -570	25.7.-21.8.	Hofmann et al. 2005
Nordrhein-Westfalen Raum Aachen	2001	8	35 - 325	19.6.-9.8.	Hofmann et al. 2005
Baden-Württemberg Raum Freiburg	2001	2	1600	13.7.-27.7.	Hofmann et al. 2005
Bayern Raum Puch	2002	14	Im Feld - 980	19.7.-9.8.	Beismann & Kuhlmann 2006
Bayern Raum Fürstenfeldbruck Raum Puch	2003	60	Im Feld - 1200	4.7.-31.7.	Beismann & Kuhlmann 2006
Niedersachsen Westerloge	2003	2	30-33	12.7.-8.8.	Ökologiebüro / Dr. Wachter
Nordrhein-Westfalen Essen, Duisburg,	2004	3	300 - 2600	9.6.-29.9.	LANUV NRW (Dr. Köllner)
Niedersachsen Westerloge	2005	1	30	18.4.-15.9.	Ökologiebüro / Dr. Wachter
Nordrhein-Westfalen Duisburg,	2005	3	500 - 3300	5.4.-18.10.	LANUV NRW (Dr. Köllner)
Bayern Raum Puch	2006	4	Im Feld - 23	17.7.-9.8.	LfU BAY (Dr. Wilk, Dr. Peichl); LfL BAY (Dr. Eder)
Niedersachsen Westerloge	2006	1	30	30.4.-18.9.	Ökologiebüro
Nordrhein-Westfalen Raum Aachen	2006	6	1 - 180	18.7.-10.8.	LANUV NRW (Dr. Köllner)
Schweiz Raum Frick	2006	3	2 - 15	12.7.-28.9.	FIBL/BAFU(Dr. Oehen)
Summe		122			

Die bereits zuvor genannten Bund-Länder-Modellprojekte „Bremen“ (Hofmann et al. 2005) und „Bayern“ (Beismann & Kuhlmann 2006), die unter anderem zur Entwicklung des PMF

beigetragen haben, stellen den Großteil der Daten, die auf Felduntersuchungen zwischen den Jahren 2001 und 2003 basieren. Zusätzlich zu diesen Daten wurden Messergebnisse an verschiedenen Stellen angefragt, die seit dem Jahr 2003 den PMF-Sammler verwendeten. Insgesamt konnten so 122 Standortdaten in die Auswertung einbezogen werden, die aus verschiedenen Regionen der BRD und der Schweiz stammen (siehe Tabelle 1 und Abbildung 2).

Aufgrund der Fragestellung wurden dabei nur Messstandorte einbezogen, für die der Abstand zum nächstgelegenen Maisfeld ermittelt und bestätigt werden konnte (vgl. 2.3).

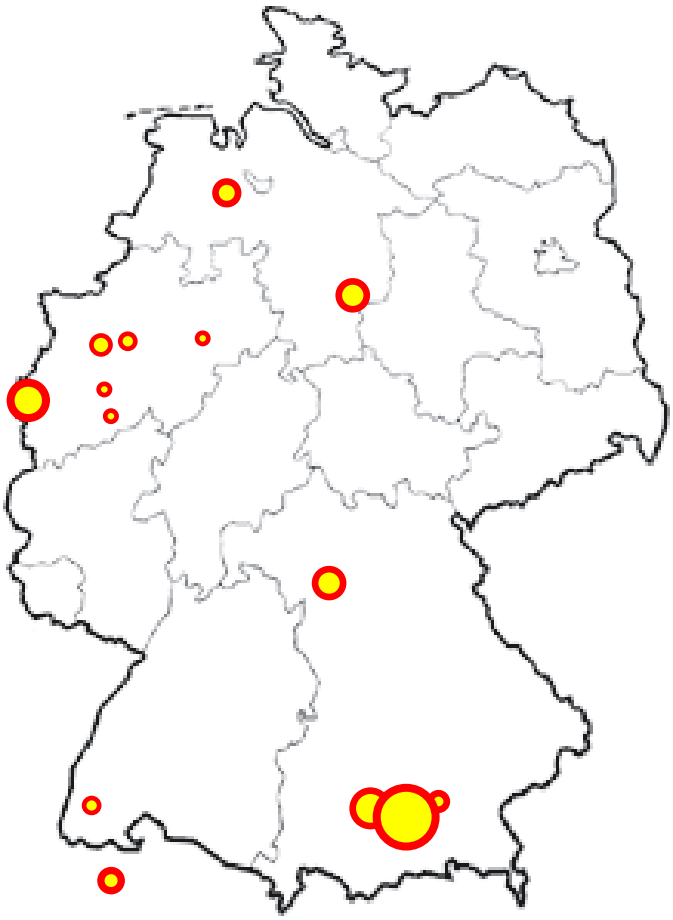

Abb. 2: ***Lage der Messstandorte in Deutschland und der Schweiz. Größere Kreise kennzeichnen Untersuchungsräume mit mehreren Standorten, die Größe symbolisiert die Anzahl gemäß Tabelle 1.***

3.2 Ermittlung der Abstandsdaten

Die mit dem Pollensammler PMF von 2001 bis 2006 durchgeführten Messungen erfolgten primär unter anderen Fragestellungen, so dass die relevanten Abstandsdaten der Messstandorte zum nächsten Maisfeld teilweise erst von den zuständigen Versuchsleitern anhand vorhandener Unterlagen ermittelt werden mussten. Für die Auswertung wurden nur Messstandorte einbezogen, für die der Abstand zum nächstgelegenen Maisfeld sicher erfasst werden konnte (Tabelle 1). Der Abstand wurde ermittelt, indem um den Messpunkt konzentrische Kreise mit zunehmendem Radius angelegt wurden. Das nächstgelegene Maisfeld ist dann dasjenige mit dem geringsten radialen Abstand.

Die Abstände zwischen Messpunkt und dem nächstgelegenen Maisfeld wurden für die einzelnen Versuche wie folgt ermittelt:

Modellprojekt „Bremen“ (Hofmann et al. 2005): Die Abstände wurden anhand vorhandener Unterlagen ermittelt. Für die kleineren Untersuchungsräume Schwarzenau in Bayern und Aachen in NRW lagen dabei komplette Angaben über die Maisfelder vor. Die Angaben für den Standort bei Freiburg in Baden-Württemberg stammen von Herrn Dietze, der den Versuch in 2001 durchgeführt hat. Für den Untersuchungsraum Sickte in Niedersachsen lagen Entfernungsangaben zu einem HR-Maisversuchsfeld der BBA vor sowie Angaben für das nähere Umfeld bis 1 km. Diese wurden mit Angaben der Arbeitsgruppe Prof. Richter (Kai Lipsius), die dort Ausbreitungsberechnungen durchführte, abgeglichen. Eine vollständige Kartierung der Maisfelder im weiteren Umfeld erfolgte nicht, so dass hier nur die gesicherten Angaben für die Standorte im näheren Umfeld in die Auswertung einbezogen wurden.

Modellprojekt „Bayern“ (Beismann & Kuhlmann 2006): In dem 625 km²-großen Untersuchungsraum südlich von München bei Fürstenfeldbruck wurden in 2003 sämtliche Maisfelder genau kartografiert und per GIS ausgewertet, so dass die Abstände der Messstandorte zu den nächstliegenden Maisfeldern und auch weiter entfernt liegenden bekannt sind. Ebenso lagen genaue Angaben über die Maisfelder für die Vorversuche in 2002 und die Zusatzversuche in 2003 für den Raum Puch vor. Die Abstandsdaten wurden von Herrn Kuhlmann und Prof. Dr. Rogg (beide TU München) ermittelt und mitgeteilt.

Der Standort Westerloge wird als Referenzstandort seit 2003 regelmäßig in Zusammenarbeit mit Dr. Wachter beprobt, der die Abstandsdaten übermittelte.

In NRW wurden vom LANUV NRW (Dr. Köllner) seit 2004 Versuche mit den Pollensammlern durchgeführt. Die Abstandsdaten für den Raum Aachen aus 2006 wurden anhand von Aufzeichnungen von Frau Dr. Köllner ermittelt und mitgeteilt, für 2004 von Herrn Schlechtriemen (TIEM). Die Daten zu 2005 stammen für 2 Standorte aus eigenen Aufzeichnungen, für den Standort Duisburg wurden die Abstandsdaten von Herrn Debrus, Landwirtschaftskammer NRW, mitgeteilt.

Für die Standorte der Versuche in Bayern aus 2006 in Grub bei München (LfU Dr. Peichl, Dr. Wilk; LfL Dr. Eder) wurden uns die Daten von Frau Dr. Wilk mitgeteilt.

Für die Versuche aus 2006 bei Frick in der Schweiz (BAFU/FIBL) wurden die Daten von Frau Dr. Oehen (FIBL) zur Verfügung gestellt.

3.3 Statistik

Für die statistischen Berechnungen der linearen Regression mit Vertrauensbereichen und Residuen wurde das Programm XLSTAT-Pro 6.1 (Addinsoft) unter Excel (2003) nach log-Transformation der Entfernungs- (X) und Depositionswerte (Y) verwendet, die Grafiken wurden in Excel (2003) generiert.

4 Ermittlung von Pollenfluss und Pollendeposition aus den PMF-Daten

4.1 Faktoren, die die Pollenausschüttung, den Pollenflug und die Pollendeposition beeinflussen

Feldgröße: Die von einem Feld emittierte absolute Pollenmenge hängt u.a. von der Feldgröße ab. Da unterschiedliche Feldgrößen der realen Anbausituation entsprechen, wurde nicht zwischen unterschiedlichen Feldgrößen differenziert.

Standortcharakteristika und Sorten: Die Sorte kann einen wesentlichen Einfluss auf die Pollenausschüttung haben. Die Sortencharakteristik bestimmt die Entwicklung der Pflanze am Standort und beeinflusst damit die Pollenreifung und den Zeitpunkt und Verlauf der Pollenausschüttung.

Die Blühsynchronisation spielt bei Mais eine große Rolle hinsichtlich der Frage nach Auskreuzungen und Isolierabständen (siehe Aylor et al. 2003). Für die Wirkung der Bt-Maispollendeposition auf Nichtzielorganismen sind hingegen die Befruchtungsfähigkeit des Pollens und die Blühsynchronisation irrelevant.

Klimatische Verhältnisse (z.B. Temperatur, Feuchtigkeit, Wind) und Topografie können die Pollenreifung, die Pollenausschüttung und die Ausbreitung des Pollens maßgeblich beeinflussen (Ogden et al. 1969; Aylor et al. 2003). Damit bestimmen standörtliche Faktoren wesentlich die vorzufindende Variation bei der Pollendeposition. Während die Pollenausschüttung von den witterungsbedingten Reifeprozessen abhängt, bestimmen Windgeschwindigkeit, –richtung und topografische Verhältnisse wesentlich die Ausbreitung. Für den Maispollenflug relevant sind u.a. auch die im Sommer auftretenden, thermisch bedingten Aufwinde, die die Pollen in höhere Luftschichten transportieren und für eine weite Verbreitung sorgen können (Aylor et al. 2003; Loos et al. 2003; Helbig et al. 2004). In dieser Untersuchung finden sich Standorte in unterschiedlicher topografischer und relativer Lage zu den Maisfeldern, ohne Rücksicht auf Mitwind-, Quer-zum-Wind- oder Gegenwindlage. Die Standorte repräsentieren diesbezüglich eine zufällige Auswahl. Worst-case-Fälle wurden nicht gesondert berücksichtigt, z.B. Standorte in Abwindrichtung und ungünstiger Topografie, wie beispielsweise bei Bannert (2006). Die Raumrepräsentativität der Messstandorte war explizit Gegenstand des bayerischen Vorhabens (Beismann & Kuhlmann 2006).

Messhöhe: Da bei der Pollenverbreitung ein ausgeprägtes Höhenprofil (Abnahme der Werte mit der Höhe) vorzufinden ist, spielt die relative Höhe zwischen Pollenquelle, Höhe des Messpunktes der Sammler und Höhe des Akzeptors eine Rolle (Aylor et al. 2003; Aylor 2005; Aylor et al. 2006). Die Fahne als Pollenquelle beim Mais liegt je nach Sorte und Entwicklungsstand in ca. 1,5 bis 3 m Höhe. Der Messpunkt des Pollensammlers PMF befindet sich in ca. 1,8 m Höhe. Die für die Wirkung auf Nichtzielorganismen relevanten Akzeptoren (z.B. Futterpflanzen von Schmetterlingsraupen) liegen in der Regel deutlich bodennaher, so dass dort auf Grund der niedrigeren Position im Höhenprofil mit höheren Werten gegenüber dem PMF in 1,8 m Höhe zu rechnen ist.

Die eigentliche Deposition von Pollen in der Umgebung wird weiterhin auch vom Akzeptor bestimmt (z.B. Beschaffenheit und Neigungswinkel der Blattoberfläche) (vgl. Aylor et al. 2003; Felke & Langenbruch 2005). Da die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen jedoch mannigfaltig sind, sind für Untersuchungen zur Entfernungsabhängigkeit der Pollendeposition Standardisierungen erforderlich. Die Depositionswerte dieses Gutachtens wurden sämtlich nach demselben standardisierten Verfahren gewonnen, das in der VDI-Richtlinie 4330 Bl. 3 (2007) dokumentiert ist.

4.2 Ermittlung des horizontalen Pollenflusses aus den PMF-Daten

Der PMF filtert die Pollen passiv aus dem Luftstrom und repräsentiert den sammlerspezifischen Fluss [$F_{i,PMF}$ in n Pollen/m²]. Die relevante Filterquerschnittsfläche beträgt 8 cm x 10 cm = 0,008 qm². Unter Berücksichtigung der Sammeleffizienz des PMF für Maispollen

gegenüber der Burkard-Falle[3] [35 %] berechnet sich der horizontale Maispollenfluss im Luftstrom daraus wie folgt:

$$F_{i,Air}(T) = \frac{F_{i,PMF}(T)}{E_{i,PMF}} \quad \text{in} \quad \left[\frac{n\ Pollen}{m^2}\right] \qquad \text{Formel 1}$$

wobei:

$F_{i,Air}$ Horizontaler Fluss für die Pollenart i Luftstrom [n Pollen/m²];

$F_{i,\ PMF}$ Per PMF gemessener horizontaler Fluss aus dem Luftstrom für die Pollenart i [n Pollen/m²];

i Pollenart, hier Maispollen;

T Sammelzeitraum (für die verwendeten Messdaten in der Regel den Hauptblühzeitraum umfassend, mindestens jedoch 14 Tage);

$E_{i,\ PMF}$ Spezifische Sammeleffizienz des PMF für Maispollen (35 % nach empirischen Vergleichen mit der Burkard-Falle als Konventionsverfahren);

Sammeleffizienz: Die vom Sammler und der Pollenart abhängige Sammeleffizienz $E_{i,PMF}$. $E_{i,PMF}$ wird nach empirischen Vergleichen mit der Burkard-Falle als Konventionsverfahren mit 35% geschätzt. Mit der Einführung von absoluten Messverfahren, wie z.B. dem MICROBUS, kann in Zukunft eine genaue Bestimmung erfolgen.

4.3 Ermittlung der Pollendeposition

Die Deposition von Partikeln hängt wesentlich von den Eigenschaften der Partikel und ihrem Verhalten in der Atmosphäre ab (McCartney & Aylor 1987). Bei groben Aerosolpartikeln wie Maispollen ist die gravitationsabhängige Sedimentation die wesentliche partikelabhängige Schlüsselgröße zum Verhalten in der Atmosphäre.

Die vertikale Pollendeposition auf einer waagerechten Oberfläche (Sedimentation) berechnet sich aus dem horizontalen Fluss unter Berücksichtigung der mittleren Windgeschwindigkeit und der Depositionsgeschwindigkeit für Maispollen wie folgt (Brown 1993; Gregory 1973; Hofmann et al. 2005):

$$D_{i,Sed}(T) = \frac{F_i(T) \bullet v_{d,i}}{U(T)} \quad \text{in} \quad \left[\frac{n\ Pollen}{m^2}\right] \qquad \text{Formel 2}$$

wobei:

$D_{i,\ Sed}$ Vertikale Deposition auf horizontaler Fläche (Sedimentation) für die Pollenart i aus der Luft in der Standardeinheit n Pollen/m²;

U (T) Mittlere Windgeschwindigkeit in m/s über den Sammelzeitraum T;

$v_{d;\ i}$ Pollenartspezifische Depositionsgeschwindigkeit in m/s.

[3] Standardfalle der Polleninformationsdienste zur Pollenflugvorhersage für Allergiker

Die Umrechnung der metrischen Standardeinheit Pollendeposition pro m² wurde mit Hinblick auf die Frage von Nichtzielorganismen auch auf die Bezugsgröße cm² umgerechnet. Die Umrechnung erfolgt über Teilung durch den Faktor 10.000.

Depositions- / Sedimentationsgeschwindigkeit: Sie hängt vom aerodynamischen Durchmesser (Größe, Dichte, Form und Oberflächenstruktur) der Pollenart und damit auch vom Reife- und Trocknungszustand des Pollens ab. Allgemein gilt die genaue Bestimmung der Sedimentations- und Depositionsgeschwindigkeit von Pollen als schwierig, da sie mit einer - auch natürlich bedingten - Variation behaftet ist. Für Maispollen liegen jedoch relativ gut bestimmte und experimentell überprüfte Angaben vor. Die Literaturwerte für Maispollen, der zwischen 60 bis 130 µm Durchmesser aufweist, bewegen sich zwischen 0,15 – 0,4 m/s (Di-Giovanni et al. 1995, Aylor 2002, Hofmann et al. 2005). Als mittlerer Wert für die Berechnungen wurde eine Depositionsgeschwindigkeit von 0,2 m/s angenommen.

Mittlere Windgeschwindigkeit: Bei der Umrechnung von Fluss in Deposition geht die mittlere Windgeschwindigkeit über den Messzeitraum ein. Hier ist eine standörtliche und zeitliche Variation anzunehmen, die sich statistisch im Mittel jedoch ausgleicht. Für die Berechnungen wurde von einer mittleren Windgeschwindigkeit von 2 m/s ausgegangen.

5 Ergebnisse

5.1 Maispollenfluss und Maispollendeposition in Abhängigkeit vom Abstand zur Pollenquelle

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse zu Maispollenfluss pro m² und Deposition pro cm² aus den Freilandmessungen mit dem PMF über die Jahre 2001 bis 2006 in Relation zum Abstand vom nächstgelegenen Maisfeld zusammenfassend dargestellt.

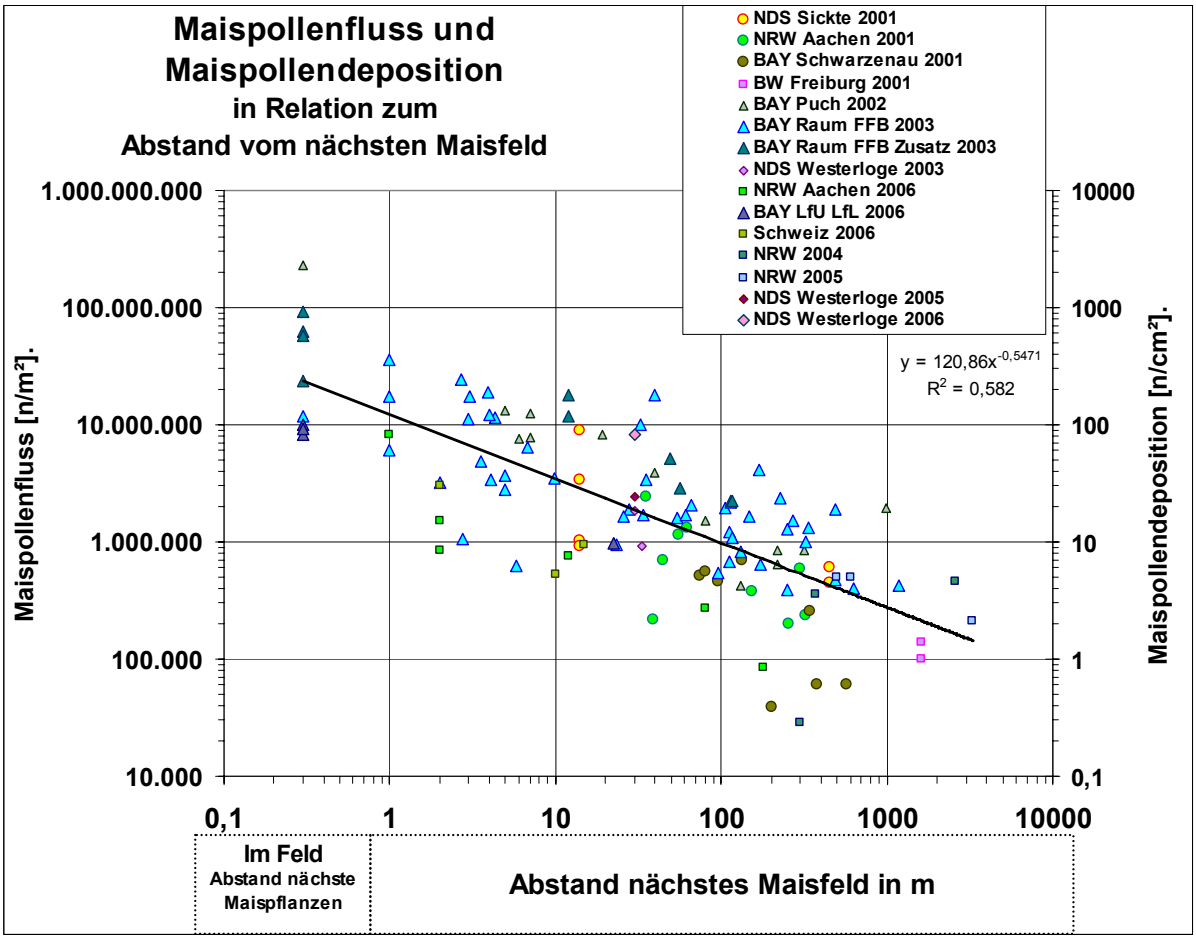

Abb. 3: Ergebnisse zu Maispollenfluss und –deposition in Relation zum Abstand vom nächsten Maisfeld aus Versuchen mit dem Pollensammler PMF in den Jahren 2001 bis 2006

Insgesamt liegen Daten von 122 Standorten aus verschiedenen Regionen Deutschlands und der Schweiz mit Abstandsangaben zum nächsten Maisfeld vor. Die Messwerte sind den Versuchen entsprechend über Symbole und Farben gekennzeichnet. Die linke, senkrechte Achse bezeichnet den ermittelten horizontalen Maispollenfluss pro m² in logarithmischer Skalierung. Die Skala rechts kennzeichnet entsprechend die vertikale Pollendeposition pro cm². Auf der unteren waagerechten Skala sind die Abstände zum nächstgelegenen Maisfeldrand in m angegeben, ebenfalls in logarithmischer Skalierung. Für Standorte in den Feldern wurde ein mittlerer Abstandswert zur nächsten Maispflanzenreihe (30 cm) angesetzt.

Die Freilanddaten reichen damit vom im Feld liegend bis in 3,3 km Abstand zum nächsten Maisfeld. Die gemessenen Werte für den Maispollenfluss umspannen einen Bereich von

230 Millionen Maispollen/m² bis 20.000 Maispollen/m², entsprechend für die Maispollendeposition von 2.300 Maispollen/cm² bis 0,2 Maispollen/cm².

Die Ergebnisse aus den Bund-Länder-Vorhaben „Bayern“ (Beismann & Kuhlmann 2006) und „Bremen“ (Hofmann et al. 2005) sowie aus den weiteren Versuchen ergeben hierbei ein stimmiges Bild. Hierbei ist sowohl eine Abhängigkeit von der Entfernung als auch eine erhebliche Variation der Pollenimmissionen zu erkennen.

Die Beziehung zwischen Entfernung und Pollendeposition über alle Messergebnisse lässt sich über eine Potenzfunktion beschreiben (Formel 3):

$$Y = 120{,}86 \bullet X^{-0{,}5471} \quad \text{in} \quad \left[\frac{n\ Pollen}{cm^2}\right] \quad \text{Formel 3}$$

wobei:

Y Maispollendeposition pro cm² [n Pollen/cm²];

X Entfernung vom nächsten Maisfeld in m.

Die Beziehung zwischen Pollendeposition und dem Abstand zum nächsten Maisfeld ist dabei hoch signifikant ($p<0{,}01$), das Bestimmtheitsmaß beträgt $r^2 = 0{,}58$. Die Form der Potenzfunktion entspricht dabei der von Aylor et al. (2003) beschriebenen Charakteristik. In einer log-log-Darstellung ergeben die Depositionswerte damit eine lineare Beziehung, die statistisch über lineare Regression näher analysiert werden kann.

Die Ergebnisse aus der statistischen Regressionsanalyse über die Beziehung von Maispollendeposition zur Entfernung vom nächstgelegenen Maisfeldrand sind in Abbildung 4 als log-log-Grafik dargestellt. Die Analyse hier umfasst einen Bereich vom im Feld gelegen bis 3,3 km Entfernung, so dass auch Entfernungen über 100 m häufig vertreten sind. Damit werden Angaben aus der Literatur ergänzt, deren Datendichte vor allem im Nahbereich angesiedelt ist. Das Ergebnis der Regressionsanalyse ist als Regressionsgerade über die blaue Linie in Abbildung 4 gekennzeichnet. Die dazugehörigen Parameter gehen aus der Formel oben rechts in der Grafik hervor, wobei x und y sich auf die log-transformierten Werte bezieht.

Die Regressionsgerade charakterisiert die bei wiederholten Messungen im Mittel bei bestimmten Enfernungen zu erwartenden Depositionswerte. Der 95 %-Vertrauensbereich des Verlaufs der Regressionsgeraden wird über die gestrichelten Linien angegeben. Die Beziehung ist statistisch mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p<0{,}01$ hoch signifikant. Die Regressionsgerade bestätigt den Zusammenhang zwischen der Pollendeposition und dem Abstand zur nächstgelegenen Pollenquelle. Das Bestimmtheitsmaß r^2 der Regression gibt an, dass ein Anteil von 58 % der Variation allein über die Entfernung erklärt werden kann. Wie zuvor in Kap 2.5 beschrieben, wird die Pollendeposition jedoch auch von anderen Faktoren beeinflusst, die die Maispollenschüttung (Sorte, Feldgröße, Reifung) und Pollenausbreitung (Wind, Temperatur, Topografie, Sink- und Depositionsgeschwindigkeit) beeinflussen. Mit 58% Erklärungsanteil ist der Entfernung als einzelnem Faktor das höchste Gewicht zuzusprechen.

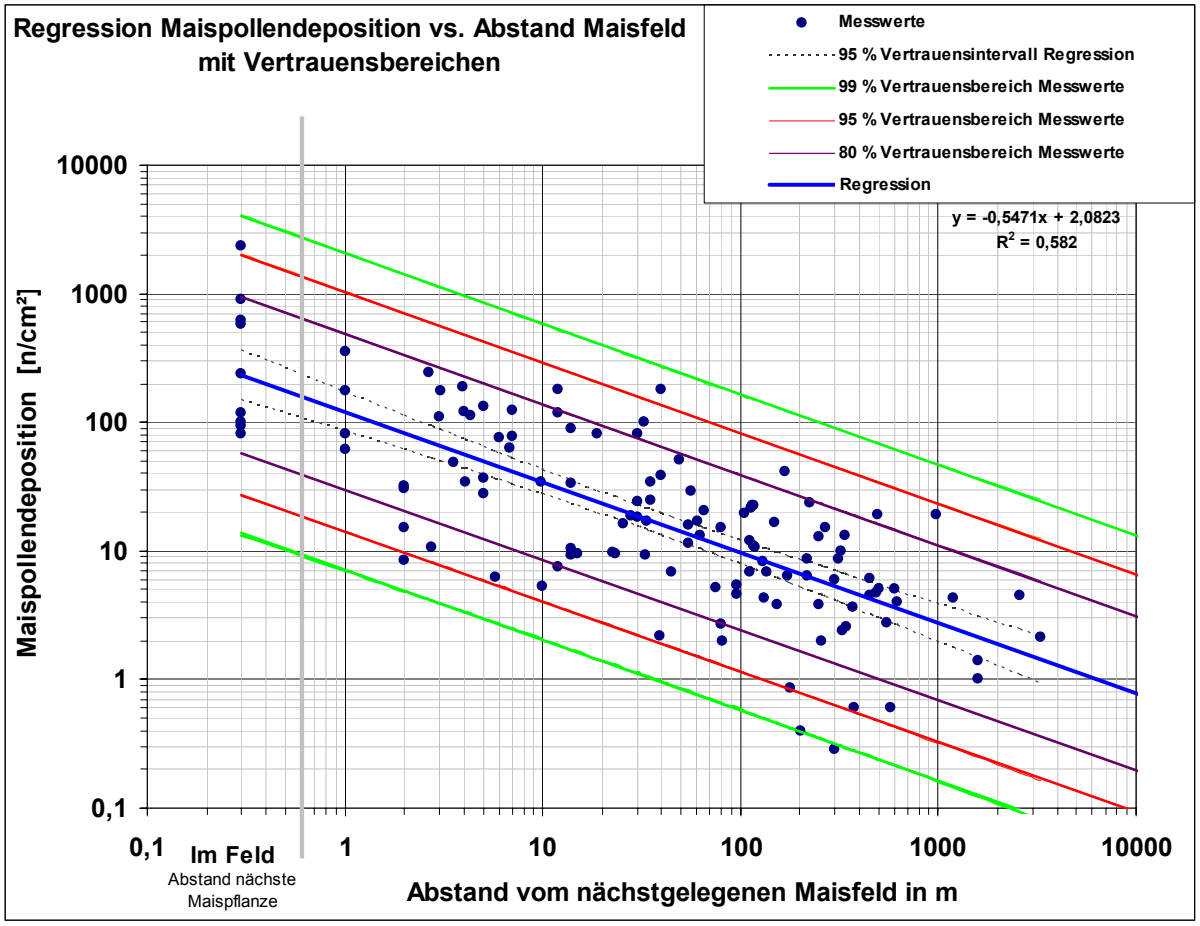

Abb. 4: ***Ergebnis der statistischen Regressionsanalyse zur Beziehung von Maispollendeposition zur Entfernung vom nächstgelegenen Maisfeldrand.***

Regression: Im Mittel sind y Maispollen/cm² bei x m Entfernung zu erwarten, bei 100 m sind das beispielsweise 9,7 Maispollen/cm²;

Vertrauensintervalle (VI)

80% VI: 20% liegen außerhalb des VI, d.h. statistisch liegen 1 von 5 Fällen außerhalb des VI und 1 von 10 Fällen über dem oberen VI (10 %);
Beispiel: Bei 100 m Entfernung reicht der 80% Vertrauensbereich von 2,4 Maispollen/cm² bis 39 Maispollen/cm². Bei 1 von 10 Fällen wird die obere Grenze des Vertrauensbereiches überschritten;

95% VI: 5% liegen außerhalb des VI, d.h. statistisch liegen 1 von 20 Fällen außerhalb des VI und 1 von 40 Fällen über dem oberen VI;
Beispiel: Bei 100 m Entfernung reicht der 95% Vertrauensbereich von 1,2 Maispollen/cm² bis 82 Maispollen/cm². Bei 1 von 40 Fällen wird die obere Grenze des Vertrauensbereiches überschritten;

99% VI: 1% liegen außerhalb des VI, d.h. statistisch übersteigt 1 von 200 Fällen die obere Grenze
Beispiel: Der 99 % Vertrauensbereich geht bei 100 m Entfernung von 0,58 Maispollen/cm² bis 160 Maispollen/cm².

Abbildung 3 enthält zusätzlich die aus der Regressionsanalyse hervorgehenden Vertrauensbereiche in Bezug auf Einzelmesswerte. Das 95 %-Vertrauensintervall gibt hierbei den Schwankungsbereich an, innerhalb dessen 95 % der Einzelwerte zu erwarten sind. Von den verbleibenden 5 % der Messwerte, die außerhalb des Vertrauensbereiches liegen, überschreitet die Hälfte, also 2,5 %, die obere Grenze. Die 80 %- und 99 %-Vertrauensbereiche geben entspre-

chend die Bereiche an, in denen 80 % bzw. 99 % der Messwerte liegen und entsprechend 10 % bzw. 0,5 % der Werte die obere Grenze des jeweiligen Vertrauensintervalls übersteigen.

Der mittlere Erwartungswert aus der Regressionsbeziehung beträgt für die Maispollendeposition im Feld 230 Maispollen/cm², das gemessene Minimum 81 Maispollen/cm² und das Maximum 2.330 Maispollen/cm². Das 95 %-Vertrauensintervall [VI] umfasst den Bereich von 27 bis 2.040 Maispollen/cm² und das 99 %-VI den Bereich von 13 bis 4.090 Maispollen/cm².

Bei 10 m ist im Mittel mit 35 Maispollen/cm² zu rechnen, das 95 %-Vertrauensintervall geht hierbei von 4,1 bis 290 Maispollen/cm², das 99 %-Vertrauensintervall von 2,1 bis 580 Maispollen/cm², das 90 %-Vertrauensintervall von 5,8 bis 210 Maispollen/cm² und das 80 %-Vertrauensintervall von 8,7 bis 140 Maispollen/cm².

Bei 100 m muss im Mittel mit 9,7 Maispollen/cm² gerechnet werden, für 95 % der Standorte sind Werte zwischen 1,2 und 82 Maispollen/cm² zu erwarten, für 99 % Werte zwischen 0,58 und 160 Maispollen/cm², für 90 % Werte zwischen 1,6 und 58 Maispollen/cm² und für 80 % Werte zwischen 2,4 und 39 Maispollen/cm².

Bei 1.000 m Entfernung zum Maisfeld liegen der Erwartungswert für das Mittel bei 2,8 Maispollen/cm², der Vertrauensbereich von 95 % zwischen 0,32 und 24 Maispollen/cm², das VI von 99 % zwischen 0,16 und 47 Maispollen/cm², das VI von 90 % zwischen 0,46 und 17 Maispollen/cm² und das VI von 80 % zwischen 0,68 und 11 Maispollen/cm².

Weitere Erwartungswerte für die Maispollendeposition sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Tab. 2: ***Erwartungswerte der statistischen Regressionsanalyse zur Beziehung von Maispollendeposition zur Entfernung vom nächstgelegenen Maisfeldrand.***
VI: Vertrauensintervall; Werte gerundet auf mindestens 2 signifikante Ziffern.

Entfernung zur nächsten Pollenquelle [m]	Erwartete Pollendeposition [Pollen/cm²]				
	Mittel	VI 99%	VI 95%	VI 90%	VI 80%
Im Feld	230	13 - 4.090	27 - 2.040	38 - 1.430	57 - 960
1	120	7,0 - 2.070	14 - 1.040	20 - 730	30 - 490
10	35	2,1 - 580	4,1 - 290	5,8 - 210	8,7 - 140
100	9,7	0,58 - 160	1,2 - 82	1,6 - 58	2,4 - 39
200	6,7	0,40 - 110	0,79 - 56	1,1 - 40	1,7 - 27
300	5,3	0,32 - 90	0,63 - 45	0,89 - 32	1,3 - 21
500	4,0	0,24 - 68	0,47 - 34	0,67 - 24	1,0 - 16
1000	2,8	0,16 - 47	0,32 - 24	0,46 - 17	0,68 - 11
2000	1,9	0,11 - 33	0,22 - 16	0,31 - 11	0,46 - 7,7

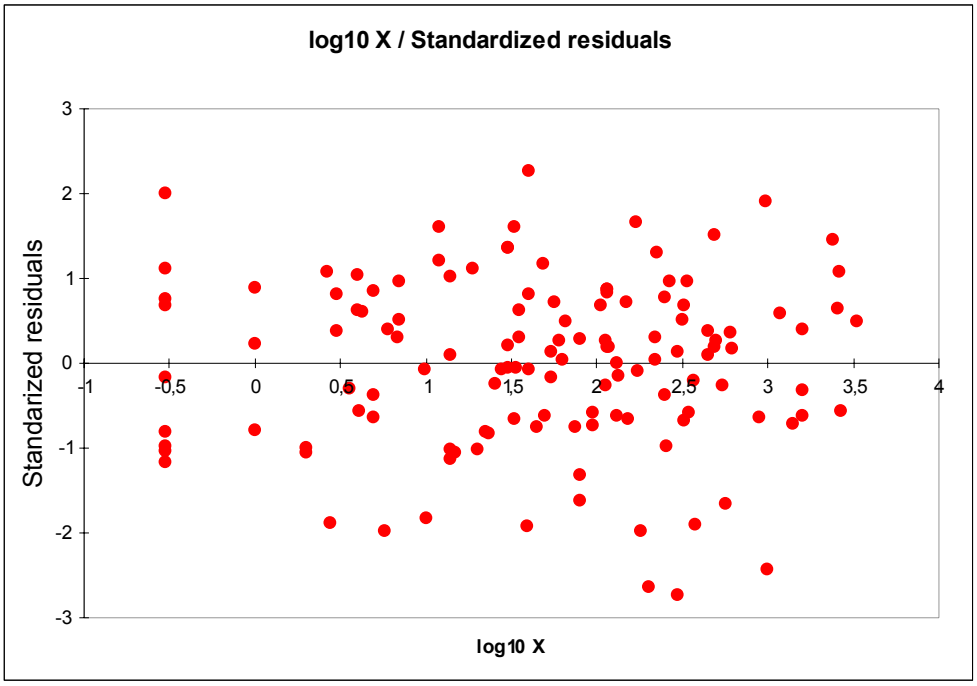

Abb. 5: Standardisierte Residuen der Regressionsanalyse über Entfernung X.

Aus der gleichmäßigen Streuung der standardisierten Residuen aus der Regressionsanalyse über die Entfernung in Abbildung 5 lässt sich schließen, dass die gefundene Beziehung den mittleren Zusammenhang von Entfernung und Deposition gut beschreibt.

5.2 Abschätzung der Entfernungen für definierte Depositionen von 2, 5, 10, 15 oder 20 Pollenkörnern pro cm^2

Hier sollen nun die Entfernungen abgeschätzt werden, bei denen noch mit 2, 5, 10, 15 oder 20 Maispollen/cm² zu rechnen ist (Vorgabewerte). Die entsprechenden Entfernungen werden über die Ergebnisse der Regressionsanalyse abgeleitet, indem ausgehend von der jeweiligen Maispollendeposition auf der senkrechten Achse waagerecht gehend die Schnittpunkte mit der Regressionsgeraden und den Vertrauensbereichen bestimmt werden. In Abbildung 4 sind die 80 %-, 95 %- und 99 %-Vertrauensbereiche angegeben. Die entsprechenden Abstandswerte gehen aus Tabelle 3 hervor.

Tab. 3: Erwartungswerte der Entfernung für bestimmte Maispollendepositionen (Y in n/cm²) nach den Ergebnissen aus der Regressionsanalyse mit Vertrauensintervallen (Werte gerundet).

	Maispollendeposition [n/cm²]				
	2	**5**	**10**	**15**	**20**
Mittlere Entfernung aus Regression abgeleitet	**1.800 m**	**340 m**	**95 m**	**45 m**	**27 m**
Vertrauensintervalle (VI)					
80 % unteres VI	140 m	27 m	7 m	4 m	2 m
80 % oberes VI	23 km	4,2 km	1,2 km	570 m	340 m
90 % unteres VI	70 m	13 m	4 m	1,7 m	1 m
90 % oberes VI	46 km	8,7 km	2,5 km	1,1 km	700 m
95 % unteres VI	35 m	7 m	2 m	0,9 m	0,5 m
95 % oberes VI	93 km	18 km	4,9 km	2,3 km	1,4 km
99 % unteres VI	10 m	1,9 m	0,5 m	0,3 m	0,1 m
99 % oberes VI	305 km	57 km	16 km	7,8 km	4,6 km

Eine Pollendeposition von beispielsweise 10 Maispollen/cm^2 ist im Mittel bei 95 m Entfernung vom Maisfeldrand, also rund 100 m, zu erwarten. Will man mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ausschließen, dass diese Deposition erreicht wird, ist die obere Grenze des Vertrauensbereiches maßgebend. Um zu verhindern, dass in weniger als 10 % der Fälle die Deposition von 10 Maispollen/cm² überschritten wird, ist eine Entfernung von 1,2 km erforderlich (obere Grenze des 80 %-Vertrauensintervalls). Will man, dass in höchstens 5 % der Fälle eine Überschreitung vorkommt, ist ein Abstand von mindestens 2,5 km einzuhalten. Weitere Daten können entsprechend der Tabelle 3 entnommen werden.

6 Diskussion

Im Gegensatz zu vielen anderen Arbeiten beziehen sich die im vorliegenden Gutachten ausgewerteten Daten nicht auf die Messung der Auskreuzung, sondern auf die Deposition von Maispollen aus dem Feld in die umgebende Landschaft. Die Auswertung der mit dem PMF-Pollensammler erhobenen Daten erfolgte dabei in Relation der Sammler zum nächstgelegenen Maisfeld. Insgesamt konnten Freilanddaten aus den Jahren 2001 bis 2006 von 122 Standorten (Messpunkten) aus Deutschland und der Schweiz ausgewertet werden. Für alle Messpunkte lagen eindeutige Abstandsdaten zum nächstgelegenen Maisfeld in der Umgebung vor bzw. konnten ermittelt werden. Die Standorte verteilen sich über einen Entfernungsbereich von innerhalb von Feldern bis in 3,3 km Abstand. Die Daten wurden mit demselben Verfahren, das nach VDI-Rl 4330 Bl. 3 (2007) standardisiert ist, gewonnen, so dass die Vergleichbarkeit der Daten der einzelnen Standorte gewährleistet ist. Die Messungen des Pollenflusses erfolgten stets in 1,8 m Höhe und die Erfassungszeiten umfassten den Hauptblühzeitraum vom Mais am jeweiligen Standort. Die Probenaufbereitung und mikroskopische Auszählung der Pollenproben erfolgte stets nach der gleichen, vorgegebenen Routine. Aus den Messwerten des

Pollenflusses pro m² wurde die Maispollendeposition pro cm² in Messhöhe abgeleitet. Die Auswertung stellt dabei die nach unserer Kenntnis umfangreichste Auswertung von vergleichbaren Maispollendepositionsdaten über mehrere Jahre unter Praxisbedingungen dar.

Die Messergebnisse zeigen, dass die Deposition von Maispollen nicht auf den Nahbereich von 0-100 m begrenzt ist, sondern auch in größeren Entfernungen in erheblichen Mengen nachgewiesen werden kann. Auch in der größten ermittelten Entfernung von 3,3 km wurde ein Pollenfluss von 20.000 Pollen/m^2, entsprechend einer Deposition von 0,2 Pollen/cm^2 ermittelt.

In der statistischen Auswertung konnte eine negative Korrelation zwischen der aufgefangenen Pollenmenge und der Entfernung zum nächsten Maisfeld hergestellt werden. Die Maispollendeposition über den Entfernungsbereich von 0,3 m (im Feld) bis 3,3 km folgte dabei einem statistisch hoch signifikanten Zusammenhang, der sich mit einer Potenzfunktion gut beschreiben lässt. Die Auswertung der Messdaten steht im Einklang mit Befunden aus den USA von Aylor et al. (2003), die diese Art des Zusammenhangs aerobiologisch begründeten und experimentell bestätigten. Nach log-log-Transformation ergibt die Potenzfunktion eine lineare Funktion, so dass sich der Zusammenhang über eine lineare Regressionsanalyse statisch näher untersuchen ließ. Diese hatte zum Ergebnis:

Im Feld betrug die Maispollendeposition im Mittel 230 Maispollen/cm², im Minimum 81 und im Maximum 2.330 Maispollen/cm². In 1 m Abstand vom Feldrand waren noch im Mittel 120 Maispollen/cm² zu erwarten, in 10 m Entfernung 35 Maispollen/cm², in 100 m 9,7 Maispollen/cm², in 300 m 5,3 Maispollen/cm², in 500 m 4 Maispollen/cm², in 1 km 2,8 Maispollen/cm² und in 2 km Entfernung noch 1,9 Maispollen/cm². Wie aus Abbildung 4 deutlich wird, beschreibt die gewählte Funktion (Formel 3) den gesamten Bereich der Messdaten in Entfernungen vom Feld bis in 3 km gut.

Für die Risikobewertung im Hinblick auf Effekte von Bt-Maispollen auf Nichtzielorganismen wurden mit dem vorliegenden Gutachten Mindestabstände berechnet, mit denen unter Anlage bestimmter Vertrauensbereiche [VI] (80 %; 90 %; 95 % und 99 %) Depositionswerte von 2, 5, 10, 15 und 20 Maispollen/cm² eingehalten werden können. Für die Fragestellung der Überschreitung eines gesetzten Schwellenwertes interessiert die obere Grenze des Vertrauensintervalls. Die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung beträgt dabei die Hälfte der verbleibenden Irrtumswahrscheinlichkeit (z.B. 2,5% für das 95% VI). Legt man beispielsweise eine Effektschwelle von 5 Pollen/cm^2 an, so wird aus den Ergebnissen deutlich, dass dieser Wert im Mittel erst bei einer Entfernung von 340 m unterschritten wird. Soll erreicht werden, dass in weniger als 10 % der Fälle eine Überschreitung dieses Schwellenwertes vorkommt, so ist ein Abstand von mindestens 4 km erforderlich. Für die Einhaltung eines höheren Schwellenwertes von 10 Pollen/cm^2 müsste entsprechend eine Entfernung von mindestens 1,2 km eingehalten werden. Die Ergebnisse belegen, dass durchaus mit erheblichen Maispollendepositionen auch über weitere Entfernungen von über 1 km in umliegende Gebiete zu rechnen ist.

Die hohe Variabilität der Messwerte spiegelt sich in den weiten Vertrauensintervallen der Regression wider. Die Schwankungsbreite von Messwerten und Regression entspricht jedoch der Erwartung, da die Pollenausschüttung im Freiland stark variiert und u.a. durch die Sorte, die Vielfalt an standörtlichen Bedingungen sowie durch unterschiedlichen Wind- und Wetterverhältnissen beeinflusst wird (vgl. 4.1). Die der Regression zu Grunde gelegten Daten repräsentieren die realen Bedingungen, die beim Maisanbau in Deutschland vorzufinden sind, einschließlich unterschiedlicher Feldgrößen und -anordnungen. Nicht berücksichtigt wurden in diesem Zusammenhang Szenarien, die sich zu einer „worst-case“ Abschätzung der Pollendeposition eignen, beispielsweise bedingt durch Standorte in Abwindrichtung und ungünstiger Topographie.

Auch beim GVO-Anbau ist wie beim konventionellen Anbau davon auszugehen, dass mehrere GVO-Felder in der Umgebung vorkommen und somit mehrere Felder zur Pollendeposition eines Messstandortes beitragen. Eine Abschätzung des Einflusses mehrerer Felder in Relation zum Nächstgelegenen wurde in einem Modellprojekt in Bayern von Beismann & Kuhlmann (2006) abgeschätzt. In diesem Projekt wurden sämtliche Maisfelder im Untersuchungsraum genau kartiert, so dass die Abstände der 60 Sammlerstandorte zu allen Maisfeldern bekannt sind. Die Autoren stellten in ihren geostatistischen Analysen zum Pollendepositionsindex PDI fest, dass der Einfluss aus den weiter entfernten Feldern zwar durchaus noch feststellbar ist, aber sich im Mittel von untergeordneter Bedeutung erweist. Dies ist plausibel, da für weiter entfernt liegende Standorte gemäß der Regressionsbeziehung im Mittel von einem entsprechend geringeren Einfluss auszugehen ist (Potenzfunktion).

Wie bereits erwähnt sind entsprechend umfassende Maispollendepositionsdaten über einen weiten Entfernungsbereich bei vergleichbarer Sammelmethode aus der Literatur nicht bekannt. Daten aus der Literatur, wie beispielsweise bei Aylor (2002, 2005), Aylor et al. (2003, 2006), Felke & Langenbruch (2005), Feil & Schmid (2002), Emberlin (1999), Treu & Emberlin (2000), Jarosz et al. (2003, 2004), Pleasants et al (2001) sowie Bannert (2006) erwähnt, stützen sich auf unterschiedliche Erhebungsmethoden (Sammeltechnik, Sammelzeiten) und/oder zielten teils auf andere Fragestellungen (Auskreuzung) ab. Bisherige Untersuchungen zur Maispollendeposition waren darüber hinaus auf den Nahbereich unter 100 m konzentriert. So bemängelt beispielsweise Heink (2006) das Fehlen ausreichender Daten für weitere Entfernungen. Als Begründung für die Begrenzung auf den Nahbereich wird meist die Meinung vertreten, dass der relativ schwere Maispollen rasch absinke und eine maßgebliche Verbreitung nur wenige Meter betrüge. Freilandmessungen belegen jedoch seit langem, dass Maispollen auch in weiteren Entfernungen mit dem Wind transportiert werden (vgl. auch Review von Emberlin 1999). Ein Maispollentransport in weitere Entfernungen kann insbesondere aufgrund von Turbulenzen und thermisch bedingten Aufwinden während der Hauptblütezeit des Mais im Sommer erfolgen (Aylor et al. 2003). Dabei wird der Pollen mit der Thermik in die Höhe befördert und vom Wind erfasst und transportiert. Für die Pollendeposition über einen bestimmten Zeitraum ist zudem zu berücksichtigen, dass die Maisblüte nicht kontinuierlich verläuft, sondern einem Tagesverlauf folgt und die Schüttung bei Schönwetterlagen ausgeprägter ist (Ogden et al. 1969). Die Maisblüte beginnt in Deutschland witterungsabhängig zwischen Anfang Juli und Anfang August. Ist die Pollenreifung ausreichend fortgeschritten, setzt bei günstigen Witterungsbedingungen die Hauptblüte ein, die bei anhaltend guter Wetterlage nach wenigen Tagen bis einer Woche vorüber ist. Tritt währenddessen ungünstige Witterung ein, so wird die Pollenschütte unterbrochen und zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt. Hierbei reifen beständig Pollen nach, so dass bis ans Ende der Standzeit (Ende August bis September) Pollen freigesetzt werden. In der Regel erstreckt sich die Hauptblüte über ein bis zwei Wochen, bei größerer Unterbrechung auch bis zu 4 Wochen. In dieser Zeit werden von den Maispflanzen enorme Pollenmengen produziert. Schätzungen gehen pro Pflanze je nach Sorte und Blühverlauf von ca. 10-50 Millionen Maispollen aus, pro Hektar ergeben sich daraus Anzahlmengen von ca. 10^{12} Maispollen. Aylor et al. (2003) beschreiben in diesen Zusammenhang ein Modell zur Maispollenproduktion und –verbreitung, das die soeben genannten Zusammenhänge berücksichtigt.

Aus dem zuvor gesagten wird deutlich, dass der Maispollenflug über alleinige Kurzzeitmessungen von wenigen Stunden oder einzelnen Tagen nicht angemessen erfasst werden kann. Depositionsmessungen, die den Blühzeitraum umfassen, finden sich in der Literatur jedoch nur vereinzelt (s. Aylor et al. 2003, Emberlin 1999, Treu & Emberlin 2000).

Im Folgenden wird exemplarisch auf einige vorliegende Daten zur Maispollendeposition aus dem deutschsprachigen Raum eingegangen. Die meisten Daten zur Maispollendeposition im

Hinblick auf Nichtzielorganismen liegen aus der Erfassung mit Objektträgern in offener Exposition vor. Die Vor- und Nachteile der Methode wurden bereits in Kapitel 2.5 erläutert. Da das Verfahren nicht standardisiert ist, finden sich unterschiedliche Vorgehensweisen. Eine Kalibrierung des Verfahrens anhand von Standardverfahren (z.B. Burkard-Falle, Rotorod o.ä.) unterblieb in den meisten Fällen. Wenngleich dies für die einzelnen Versuchszwecke hinreichend war, so erschwert dies eine Vergleichbarkeit der Daten insgesamt.

Lang et al. (2004) nutzten u.a. Objektträger, die mit Vaseline bestrichen waren, um die Pollenschüttung und Deposition in und am Rand von Bt-Maisfeldern in Grub (Bayern) über drei Versuchsjahre (2001-2003) zu erfassen. Zusätzlich wurden Daten zum Start der Pollenschütte von Maisfeldern in Bayern ausgewertet, der Toxingehalt der Pollen mittels ELISA analysiert und die Pollendeposition auf Blättern von *Daucas carota* (Wilde Möhre) als Futterpflanze für Schmetterlinge (z.B. *Papilio machaon,* Schwalbenschwanz) untersucht. In 2 m-Schritten bis zum Abstand von 10 m vom Feldrand wurde die Pollendeposition in Bodennähe von 6 bis 20 cm Höhe (Träger auf Holzstäbe) erfasst, die Expositionszeit erstreckte sich über 24 h zur Hauptblüte. Die festgestellten Pollendepositionen zeigten in Übereinstimmung mit den PMF-Daten eine starke Variabilität und reichten von 0 bis 429 Maispollen/cm². Die Pollenmengen nahmen hierbei ebenfalls mit der Entfernung ab, in 10 m Entfernung wurden noch bis zu 93 Maispollen/cm² gefunden. Zieht man die unterschiedlichen Expositionszeiten und Vertrauensbereiche in Betracht, so lassen sich die Daten von Lang et al. (2004) durchaus mit den über den PMF festgestellten Depositionsdaten vergleichen.

Ähnliches gilt für die Befunde von Lang (2004). Hier wurden in 2002 inmitten des Maisfeldes Objektträger in 20, 40, 80 und 170 cm Höhe exponiert (24 h) sowie in verschiedene Entfernungen zum Feldrand (20 cm Höhe). Auch hier wurde mit der Entfernung ein abnehmender Gradient gemessen. In 10 m Entfernung betrug der durchschnittliche Eintrag noch 60 Maispollen/cm². Bei Regen lagen die Werte niedriger.

Felke & Langenbruch (2005) setzten bei einem 40 m x 40 m großen Versuchsfeld in den Jahren 2001 und 2002 Objektträger ein, um Anhaltswerte für Maispollendeposition im Feld zu ermitteln. Die mit einem Klebestreifen versehenen Objektträger wurden dabei bodennah in ca. 20 cm Höhe auf umgedrehten Blumentöpfen offen exponiert. Felke & Langenbruch (2005) fanden im Feld im Versuchsjahr 2001 nach 4 h Exposition im Mittel ca. 84 Maispollen/cm², nach 18 h ca. 390 Maispollen/cm² und nach 7 Tagen 800 Maispollen/cm². In 2002 fanden sich nach 24 h 96 Maispollen/cm². Die Ergebnisse von Felke & Langenbruch (2005) lassen sich damit ebenfalls in die mit dem PMF ermittelte Bandbreite der Pollendeposition einordnen. Beim Vergleich der Werte sind insbesondere die unterschiedlichen Erfassungszeiten und Messhöhen zu berücksichtigen. Felke & Langenbruch (2005) führten zudem Messungen in 1, 2, 4, 8, 16 und 32 m Entfernung vom Feldrand durch. Die Autoren merkten an, dass mehrere Regenschauer im Zeitraum niedergingen, die zum Abwaschen der Pollen führten.

Bannert (2006) nahm in der Schweiz ergänzend zu Auskreuzungsversuchen mit Farbmais Messungen zum Pollen-Take off und zur Pollendeposition in unterschiedlichen Höhen in einem Maisfeld sowie in angrenzenden Bereichen vor. Er nutzte beidseitig mit Haftstreifen versehene Objektträger, die er an Seilen waagerecht aufspannte. Die Ergebnisse erbrachten Höheprofile und Gradienten.

Untersuchungen von Brunet et al. (2003) in Frankreich mittels flugzeuggetragenen Sammlern zeigten, dass Maispollen über Aufwinde bis in 1.800 m Höhe getragen und über weite Strecken transportiert werden. Ähnliche Ergebnisse finden sich bei Aylor et al. (2006) aus den USA.

Die Ergebnisse aus unseren Untersuchungen sowie aus der Literatur belegen übereinstimmend, dass ein beachtlicher Transport von Maispollen in Entfernungsbereiche von 1 km und mehr vorkommt. Mit dem vorliegenden Gutachten konnte eine funktionelle Beziehung zwischen der Deposition von Maispollen und der Entfernung zum nächstgelegenen Maisfeld als Pollenquelle statistisch unter Angabe von Vertrauensbereichen beschrieben werden. Die Auswertung beruht auf Daten, die einer realen Anbausituation entsprechen. Die beschriebene Funktion erlaubt die quantitative Abschätzung von einzuhaltenden Mindestabständen für vorgegebene Schwellenwerte, so dass mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit keine Überschreitung stattfindet. Das Gutachten liefert damit einen wichtigen Baustein, um die Exposition von Nicht-Zielorganismen beim Anbau von GV-Mais abschätzen zu können und entsprechend verlässliche Sicherheitsabstände zu Schutzgebieten festzulegen.

7 Literatur

Aylor, D.E. (2002): Settling speed of corn (Zea mays) pollen. J. Aerosol Sci. 33: 1599–1605

Aylor, D. (2003): Rate of dehydration of corn (Zea mays L.) pollen in the air. J. Exp. Bot. 54: 2307-2312

Aylor, D. E. (2005): Quantifying maize pollen movement in a maize canopy. Agricultural and Forest Meteorology 131: 247-256

Aylor, D. E., Schultes, N. P. and Shields, E. J. (2003): An aerobiological framework for assessing cross-pollination in maize. Agricultural and Forest Meteorology 119:111-129

Aylor, D. E., Boehm, M. T., and Shields, E. J. (2006): Quantifying aerial concentrations of maize pollen in the atmospheric surface layer using remote-piloted airplanes and Lagrangian stochastic modeling. Journal of Applied Meteorology and Climatology 45: 1003-1015

Bannert, M. (2006): Simulation of transgenic pollen dispersal by use of different grain colour maize. Diss. ETH Zürich

Beismann, H.; Kuhlmann, M. (2006): Raumrepräsentativität technischer Pollensammler für ein Langzeitmonitoring von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP). BfN-Skripten 169, Bonn, www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/skript169.pdf

Brown, R. C. (1993): Air Filtration. Pergamon Press, Oxford.

Brunet, Y.; Foueillassar, X.; Audran, A.; Garrigou, D.; Dayau, S.; Tardieu, L. (2003): Evidence for long-range transport of viable maize pollen. Proceedings of the 1st European Conference on the Co-existence of Genetically Modified Crops with Conventional and Organic Crops, 13-14 November 2003, Denmark

Devos, Y.; Reheul, D.; De Schrijver, A. (2005): The co-existence between transgenic and non-transgenic maize in the European Union: a focus on pollen flow and cross-fertilization. Environ. Biosafety Res. 4: 71-87

Di-Giovanni, F., Kevan, P.G., Nasr, M.E. (1995): The variability in settling velocities of some pollen and spores. Grana 34: 39–44

Durham, O.C. (1946): The volumetric incidence of airborne allergens. IV. A proposed standard method of gravitiy sampling, counting and voluemtric interpretation of results. Allergy 17: 79-86

Edmonds, R. L. (1979): Aerobiology: The Ecological systems approach. US/IBP Synsthesis Series 10, Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pennsylvania

Emberlin, J. (1999): A report on the dispersal of Maize pollen. Research paper. National Pollen Research Unit, University College Worcester, 21 pp. http://www.soilassociation.org →Research Papers

Feil, B.; Schmid, E. J. (2002): Dispersal of maize, wheat and rye pollen – A contribution to determining the necessary isolation distanzes for the cultivation of transgenic crops. Shaker, Aachen

Felke, M.; Langenbruch, G.-A. (2005): Auswirkungen des Pollens von transgenem Bt-Mais auf ausgewählte Schmetterlingslarven. BfN-Skripten 157, 143 S www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/skript157.pdf

Gregory, P.H. (1973): The microbiology of the atmosphere. A plant science monograph. 2nd edition. Hill Books, Aylesbury

Heink (2006): Stellungnahme zu „Anforderungen an die gute fachliche Praxis im Zusammenhang mit der Zulassung von Sorten aus der gentechnisch veränderten Maislinie „MON 810“ zum Anbau in Deutschland sowie dem weiteren Stoffstrom von derartigen Pflanzen innerhalb der Produktionskette“. Deutscher Bundestag, Ausschuss für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Ausschussdrucksache 16 (10) 242-G v. 23. Oktober 2006

Helbig, N.; Vogel, B.; Vogel, H.; Fiedler, F. (2004): Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale. Aerobiologia 3: 3-19

Hirst, J. M. (1958): The automatic volumetric spore trap and examples of its use in plant pathology. Proc. Linn. Soc. London, 169, No. 1-2: 66-73

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. - BfN-Skripten 139, 275 S. www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/skript139.pdf

Jarosz, N., Loubet, B., Durand, B., McCartney, H.A., Foueillassar, X., Huber, L. (2003). Field measurements of airborne concentration and deposition rate of maize pollen. Agric. For. Meteorol. 119: 37-51

Jarosz, N., Loubet, B., Huber, L. (2004): Modelling airborne concentration and deposition rate of maize pollen. Atmos. Environ. 38: 5555-5566

Lang, A. (2004): Effekte von Bt-Mais auf flugfähige Blütenbesucher und Prädatoren höherer Straten. Teilprojekt im Verbundvorhaben „Sicherheitsforschung und Monitoring-Methoden zum Anbau von Bt-Mais“. BMBF-Forschungsvorhaben, Bayer. Landesanstalt f. Landwirtschaft, Freising

Lang, A.; Ludy, C.; Vojtech, E. (2004): Dispersion and deposition of Bt maize pollen in field margins. J. Plant Disease Protection 111 (5): 417-428

Loos, C.; Seppelt, R.; Meier-Bethke, S.; Schiemann, J.; Richter, O. (2003): Spatially explicit modelling of transgenic maize pollen dispersal and cross pollination. Journal for Theoretical Biology 225 (2): 241-255

McCartney, H.A., Aylor, D.E. (1987): Relative contributions of sedimentation and impaction to deposition of particles in a crop canopy. Agric. For. Meteorol. 40: 343-358

Noll, K.E. (1970): A rotary inertial impactor for sampling giant particles in the atmosphere. Atmos. Environ. 4: 9-19

Ogden, E.C., Hayes, J.V., Raynor, G.S. (1969): Diurnal patterns of pollen emission in Ambrosia, Phleum, Zea, and Ricinus. Am. J. Bot. 56: 16-21

Pleasants, J.M.; Hellmich, R.L.; Dively, G.P.; Sears, M.K.; Stanley-Horn, D.E.; Mattila, H.R.; Foster, J.E.; Clark, T.L.; Jones, G.D. (2001): Corn pollen deposition on milkweeds in and near cornfields. PNAS 98: 11919-11924

Raynor, G.S. (1979): Sampling techniques in aerobiology. In: Edmonds, R.L.: Aerobiology: The Ecological systems approach. US/IBP Synsthesis Series 10, Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pennsylvania: 151-172

Raynor, G.; Ogden, E.; Hayes, J. (1972): Dispersion and deposition of corn pollen from experimental sources. *Agron. J.* 64: 420-427

Sanvido, O.; Widmer, F.; Winzeler, M.; Streit, B.; Szerencsits, E., Bigler, F. (2005): Konzept für die Koexistenz verschiedener landwirtschaftlicher Anbausysteme mit und ohne Gentechnik in der Schweiz, Schriftenreihe der FAL Nr. 55. Agroscope FAL Reckenholz, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich

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. A report for the Soil Association from the National Pollen Re-

search Unit, University College Worcester: http://www.soilassociation.org [→Library → GMO] Jan. 2000

VDI-Richtlinie 4330 Blatt 3 (2007): Monitoring der Wirkungen von gentechnisch veränderten Organsimen (GVO) – Pollenmonitoring – Technische Pollensammlung mit Pollenmassenfilter PMF und Sigma-2–Sammler. VDI-Handbuch Biotechnologie, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1a . Beuth-Verlag, Berlin

Danksagung:

Dank für die Freigabe der Daten, der Ermittlung und Verifizierung der Abstände gebührt allen beteiligten Personen, Institutionen und Ländern, insbesondere: Dr. H. Beismann, VDI Düsseldorf; Herr M. Debrus, Landwirtschaftskammer NRW; Dipl.-Met. V. Dietze, Freiburg; Dr. J. Eder, LfL Freising; Dr. B. Köllner, LANUV NRW Essen; Dipl.-Ing. M. Kuhlmann, TU München; Dr. B. Oehen, FIBL Frick (Schweiz); Dr. L. Peichl, LfU Augsburg; Prof. S. Rogg, TU München; Dipl.-Forstwirt U. Schlechtriemen, TIEM Nörten-Hardenberg; Dr. A. Wilk, LfU Augsburg. Für die Unterstützung bei der Abfassung des Manuskriptes möchte ich mich bei Dr. M. Otto, BfN bedanken, desweiteren bei Dipl.-Math. W. Wosniok, Institut für Statistik, Universität Bremen und bei Dipl.-Biol’in U. Kuhn, Bremen.