
**MODELLRECHNUNGEN ZUR AUSBREITUNG VON
MAISPOLLEN UNTER WORST-CASE-ANNAHMEN MIT
VERGLEICH VON FREILANDMESSDATEN**

Auftraggeber:

Bundesamt für Naturschutz BfN

Auftragnehmer:

Dipl.-Biol. Frieder Hofmann



ÖKOLOGIE BÜRO

Rennstieg 25
D-28205 Bremen
Tel.: +49-421-706474
Fax: -74106
f.hofmann@oekologiebuero.de

Unter Mitwirkung von:

Dr. Lutz Janicke, Dr. Ulf Janicke

Ing.-Büro Janicke, Dunum/Überlingen

(Ausbreitungsmodellierung, Kap. 3)

Dr. Reinhard Wachter

Aeropalynologie, Westerloge

(Messdatenauswertung Referenzstation, Kap. 2)

Dipl.-Biol.‘in Ulrike Kuhn

Büro Kuhn, Bremen

Redaktionelle Bearbeitung:

F. Hofmann, U. Kuhn



Danksagung

Wir danken dem BfN und insbesondere Dr. M. Otto für die Unterstützung bei der Planung und Abfassung der Studie. Weiterhin bedanken wir uns für die geleistete inhaltliche Unterstützung bei den Mitwirkenden sowie bei Dr. W. Müller, Dr. M. Reiber und Dipl.-Agr.Ing. R. Vögel.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
2	Evaluation von Worst-Case-Annahmen bei der Ausbreitung von Maispollen	3
2.1	Pollenproduktion	3
2.2	Feldgröße und -form	5
2.3	Meteorologie und Topografie	5
2.4	Thermische Konvektionszellen	6
2.5	Befruchtungsfähigkeit des Pollens und Blühsynchronisation	10
2.6	Verlauf der Maispollenblüte	10
3	Modellrechnungen zur Ausbreitung von Maispollen unter Berücksichtigung von Worst-Case-Annahmen	13
3.1	Einführung in die Modellierung	13
3.2	Flugweite von Maispollen in Abhängigkeit von Schichtungsstabilität und Windgeschwindigkeit	15
3.3	Transport bei einem Maisfeld unter typischen Bedingungen	23
3.4	Entfernungsabhängigkeit der bodennahen Konzentration	26
3.4.1	Mittel über einen längeren Zeitraum bei mittleren Bedingungen, Einzelfeld	27
3.4.2	Meteorologische Einzelsituationen unter Berücksichtigung von Worst-Case-Annahmen, Einzelfeld	28
3.4.3	Meteorologische Einzelsituationen, Einfluss weiterer Maisfelder	29
3.5	Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse	31
4	Vergleich der Ergebnisse aus der Ausbreitungsmodellierung für Einzelfelder unter Worst-Case-Annahmen mit den Freilandmessdaten unter normalen Anbaubedingungen	33
5	Bedeutung der Ergebnisse für die Expositions- und Risikoabschätzung	37
6	Literatur	39

Zusammenfassung

Mais ist ein Windblütler, dessen Pollen über den Wind verbreitet wird. Im Fall von gentechnisch veränderten Maissorten wie Bt-Mais gelangen Pollen, und damit Transgene und Teile des Toxins, das die Pflanzen produzieren, in die Umwelt. 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.

Während für den Anbau von Bt-Mais in Deutschland Abstandsregeln zu konventionell (150 m) und biologisch (300 m) bewirtschafteten Flächen einzuhalten sind, gibt es derzeit keine entsprechenden gesetzlichen Vorgaben zu Abstandsregelungen für Naturschutzgebiete. So fordert unter anderem auch der Sachverständigenrat für Umweltfragen (2008) aus Vorsorgegründen hier nachzubessern und diese Lücke dringend zu schließen. Wichtig ist hierbei, dass die Abstände hinreichend groß bemessen sind, dass diese auch unter ungünstigen Ausbreitungsbedingungen (Worst-Case) ausreichenden Schutz gewähren. Aus Freilandmessungen ist belegt, dass Maispollen über Distanzen von 1.000 m und mehr in erheblichen Mengen verfrachtet werden können (Emberlin 2000; Hofmann 2007). Für die Maispollenausbreitung gibt es jedoch Erkenntnislücken dazu, wie und in welchem Maße Maispollen unter Worst-Case-Annahmen verbreitet werden. Dies liegt unter anderem daran, dass in Freilandmessungen die gerade herrschenden Bedingungen einfließen und Worst-Case-Bedingungen nur unzureichend experimentell „erzeugt“ werden können.

Für das Gutachten bedurfte es zunächst einer Klärung, welche Bedingungen als Worst-Case in Frage kommen, da diese nicht eindeutig auf der Hand liegen. Hierzu wurden die raumzeitliche Variabilität von Pollenproduktion und Schüttung sowie meteorologische und topographische Bedingungen zur Pollenausbreitung betrachtet, für die Pollenausbreitung günstige Situationen identifiziert und anhand dieser bestimmte Worst-Case-Annahmen definiert. Es zeigte sich, dass unter Worst-Case-Annahmen eine ganze Reihe an Bedingungen zu nennen sind:

- Mais produziert enorme Menge an Pollen in einer Bandbreite von ca. 10^{11} bis $4,0 \cdot 10^{12}$ Pollen/ha, abhängig von bestimmten sortenspezifischen und anbaurelevanten Aspekten (Sorte, Pflanzdichte, Standort, Entwicklung).
- Mehrjährige Verlaufsreihen zur Maispollenimmission belegen, dass der in Frage kommende Zeitraum der Pollenschüttung und damit der Beeinflussung nicht auf wenige Tage eingrenzbar ist und nicht gleichförmig vonstatten geht. Vielmehr kann sich die Pollenschüttung über mehr als 6 Wochen erstrecken und dabei erhebliche Immissionsspitzen aufweisen.
- Ungünstige topographische Verhältnisse begünstigen den Transport der Pollen in bestimmte Richtungen und in größere Entfernungen (enge Täler, „Tunneleffekt“, Höhendifferenz).

- Ungünstige meteorologische Situationen können zu höheren Belastungen in größeren Entfernungen führen.

Der letztgenannte Aspekt der Meteorologie wurde im Gutachten eingehend unter Verwendung von Ausbreitungsmodellierungen analysiert (AUSTAL2000/LASAT, Lagrange-Partikelmodell gemäß TA Luft und VDI-Richtlinie 3945 Blatt 3 2000). Dabei wurden bestimmte meteorologische Annahmen, die als Worst-Case in Frage kommen, simuliert und die Ausbreitungsergebnisse in ihren Gradienten verglichen. Es zeigte sich, dass als Worst-Case-Annahmen sowohl Starkwindlagen als auch im Sommer gehäuft auftretende thermisch bedingte Aufwinde bei labiler Schichtung in Betracht zu ziehen sind.

Es wurden dann Ausbreitungsrechnungen für Einzelflächen vorgenommen, die sowohl mittlere Bedingungen als auch die zuvor identifizierten Worst-Case-Annahmen berücksichtigen. Mit Hilfe der Ausbreitungsrechnungen wurde die Flugweite von Maispollen im Abstandsbereich von 10 m bis mehrere 1.000 m von einem Maisfeld untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass unter mittleren Ausbreitungsbedingungen mehr als 0,1 % der freigesetzten Pollen über Entfernungen von mehreren Kilometern transportiert werden können. Bei den enormen Pollenmengen, die Mais produziert (s.o.), entspricht diese Menge jedoch immer noch hunderte von Millionen von Pollen, die kilometerweit transportiert werden. Für einzelne Wettersituationen unter Worst-Case-Annahmen, die den Pollentransport begünstigen, kann die bodennahe Pollenkonzentration in einem Kilometer Entfernung um bis zu zwei Größenordnungen höher sein als im Langzeitmittel. Starke Winde, thermischer Auftrieb sowie die Anwesenheit weiterer, pollenspendender Maisfelder können den Abfall der Pollenkonzentration mit der Entfernung zum Maisfeld erheblich abschwächen.

Die Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierungen wurden im Folgenden mit mehrjährigen Freilanddaten (Hofmann 2007) verglichen, die unter normalen Anbaubedingungen gewonnen wurden.

Der Vergleich zeigte, dass unter Worst-Case-Annahmen die Ausbreitungsgradienten der Maispollen ausgehend von einzelnen Maisfeldern deutlich ungünstiger ausfallen können als bisherige Freilandmessungen des PMF (unter normalen Anbaubedingungen) erkennen lassen. Dies gilt insbesondere bei sommerlicher labiler Schichtung unter Berücksichtigung thermischer Aufwinde. Erst im km-Bereich (ca. 800 m bis 1.200 m) nähern sich die Kurven der Maispollen-Immissionsbelastung unter Worst-Case-Annahmen aus den Ausbreitungsmodellierungen dem oberen 90%-Vertrauensintervall für Einzelfälle aus den Freilandmessdaten an und unterschreiten es. Dies bedeutet, dass ein Abstandswert zwischen Schutzgebieten und GV-Mais unter Berücksichtigung von Worst-Case-Annahmen ohne genauere Daten nicht exakt bestimmt werden kann. Eine genauere Quantifizierung unter Worst-Case-Annahmen im Bereich bis ca. 1 km ließe sich über entsprechend geeignete Ausbreitungsmodellierungen zwar prinzipiell erzielen, hierzu bedarf es jedoch einer entsprechenden Parametrisierung der Modelle anhand geeigneter, detaillierter Freilanddaten zur Pollenschüttung, Topographie und Meteorologie, die bis dato nicht ausreichend vorliegen und ermittelt werden müssten.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Maispollen wird über den Wind verbreitet. Im Fall von Bt-Mais gelangen Pollen, und damit Teile des von den Pflanzen produzierten Toxins, 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 der Nachbarschaft von Schutzgebieten, die empfindliche Nichtzielorganismen, wie z.B. Schmetterlingsarten, beherbergen.

In 2007 erfolgte die Auswertung von 6-jährigen Freilandmessungen mit dem PMF zur Beziehung zwischen Maispollendeposition und Abstand zum nächstgelegenen Maisfeld (Hofmann 2007). Die Analyse erfolgte anhand von Freilanddaten unter normalen Anbaubedingungen, so dass verschiedene Feldgrößen, Feldkonstellationen, Anbauregionen als auch unterschiedliche (Wind)-Richtungen berücksichtigt wurden. Für die Risikoabschätzung ist jedoch ebenfalls wichtig, welche Polleneinträge bei ungünstigen Verhältnissen (Worst-Case) zu erwarten sind.

Aus den Freilanddaten von Hofmann (2007), die unter normalen Anbaubedingungen gewonnen wurden, lässt sich nicht ohne weiteres eine Worst-Case-Ableitung für Einzelfelder vornehmen. Zwar setzen sich die Messungen unter realen Anbaubedingungen stets aus der Summe der Einflüsse einzelner Felder zusammen, die einzelnen Komponenten lassen sich aber nicht auf einfache Weise trennen. Messungen an isolierten Feldern in wenigen Versuchsjahren würden nur bedingt Abhilfe schaffen, da eine Erfassung von Worst-Case-Situationen lange Zeiträume notwendig macht. Entsprechende Daten liegen bisher nicht vor. Hinzu kommt, dass Messungen ohne Einfluss von Nachbarfeldern für größere Distanzen in Mitteleuropa schwierig zu realisieren sind. Dabei ist jedoch gerade der Entfernungsbereich von 100 m bis in den Kilometerbereich bedeutsam.

Ein weiteres Problem stellt dar, dass Worst-Case-Annahmen für die Maispollenimmission aus meteorologischer Sicht bislang nicht definiert wurden. Das vorliegende Gutachten dient daher auch dazu, die Randbedingungen für Worst-Case-Situationen zu definieren und die Maispollenausbreitung unter derartigen Bedingungen zu beschreiben.

Extremsituationen, wie bestimmte Wetterlagen, können in geplanten Freilandversuchen kaum adäquat untersucht werden, da diese nicht vorhersehbar auftreten. Ausbreitungsmodelle können hier ein wertvolles Hilfsmittel darstellen, da verschiedene Szenarien unter Berücksichtigung ungünstiger Annahmen durchgespielt werden können. Hierzu liegen weitreichende Erfahrungen aus anderen Regelbereichen, z.B. dem Immissionsschutz (s. BImSchG, TA Luft) vor. Daher wurde im vorliegenden Gutachten auf das in der TA Luft festgeschriebene Lagrangesche Ausbreitungsmodell AUSTAL 2000 bzw. dessen erweiterte Version LASAT zurückgegriffen und verschiedene meteorologische Situationen im Hinblick auf Worst-Case-Annahmen durchgerechnet.

Die aus den Ausbreitungsmodellierungen resultierenden Ergebnisse unter Worst-Case-Annahmen wurden dann in ihren Gradienten mit Freilanddaten des PMF unter normalen Anbaubedingungen (Hofmann 2007) verglichen. Hierbei soll dem Umstand Rechnung getra-

gen werden, dass aus der Literatur Widersprüche zwischen erwarteter Immission aus Ausbreitungsrechnungen und Immissionsmessung gerade bei Mais bekannt sind (Aylor et al. 2003; Loos et al. 2003; Brunet et al. 2003; Kuparinen 2006; Boehm et al. 2008). Maispollen werden erheblich weiter verfrachtet als erwartet und entsprechend flachere Gradienten wurden beobachtet. Als ein möglicher Grund hierfür wird die besondere Rolle thermischer Aufwinde während der sommerlichen Maisblüte angeführt (Kuparinen et al. 2007; Boehm et al. 2008). Zudem ist die Bedeutung des Verlaufs der Maisblüte unter Worst-Case-Annahmen zu berücksichtigen. In den gemäßigten Breiten Deutschlands verläuft die Maisblüte nicht kontinuierlich über 5-7 Tage wie in den wärmeren Zonen, aus denen der Mais stammt, sondern erstreckt sich über wesentlich längere Zeiträume mit phasenweisen Schüben der Pollenfreisetzung.

Im Einzelnen ergaben sich folgende Arbeitsziele:

- Analyse und Definition von Worst-Case-Annahmen im Hinblick auf Maispollenausbreitung.
- Modellierung der Maispollenausbreitung aus Einzelflächen im Hinblick auf Worst-Case-Annahmen mit dem Partikelmodell nach VDI/TA Luft.
- Vergleich der Modellergebnisse für Einzelfelder mit den überregionalen Freilanddepositionsdaten beim Anbau von Mais (PMF Daten aus 2001-2006).
- Schlussfolgerungen im Hinblick auf die zu erwartende Deposition von Maispollen aus GV-Anbauflächen in angrenzende Gebiete.

2 Evaluation von Worst-Case-Annahmen bei der Ausbreitung von Maispollen

Für die Risikoabschätzung von GVO und die Festlegung von Sicherheitsabständen ist die maximale Menge an Pollen, die in einem bestimmten Abstand von einem Maisfeld deponiert werden kann, entscheidend. Dies macht die Abschätzung von Extremsituationen notwendig, die von einer Reihe von Faktoren beeinflusst werden können:

2.1 Pollenproduktion

Mais gehört zu den Windblütlern und ist für sehr große Pollenmengen, die produziert werden, bekannt. In dem Review von Emberlin (1999) finden sich folgende Angaben:

“Maize pollen is produced in enormous quantities. Each of the numerous florets within a tassel contains three anthers, each of which produces in the order of 2,000 (Miller 1985) or 2,500 grains (Kiesselbach 1949) to 7,500 (Goss, 1968) pollen grains, depending on the plant, the variety, and the conditions of growth. This means that a spikelet produces c. 15,000 grains, and a tassel between 2-5 million grains. Estimates for the numbers of pollen grains produced by an average-sized plant range from 14 million (Miller 1985), to about 50 million (Miller 1985), to fertilise approximately 1,000 kernels per plant (Evans, 1975) so that there are 20,000 to 30,000 pollen grains for each silk (Purseglove, 1972). This high ratio of pollen grains per female flower available for fertilisation is typical of plants fertilised by wind pollination or anemophilous plants such as corn and pine.

Nowakowski and Morse (1982) found that "many sweet corn varieties produce over 150 pounds of pollen per acre". They collected sweet corn pollen from the plants using paper cones and found that even more pollen was collected by taking plants into the still conditions of a laboratory the day before pollen shedding started. Although a field of maize may release pollen over a period of up to 13 days each plant will be active for less than this. An average of 3.5 g of pollen was produced per plant in total in their experiments. Maize is typically cultivated at 20,000 plants per acre giving a pollen output of approximately 154 pounds/ 70 kg per acre.“

Die Abschätzung 70 kg Maispollen/acre bei 20.000 Pfl./acre bedeutet eine Maispollenproduktion von 173 kg/ha bei einer Pflanzdichte von ca. 5 Pfl./m².

[1 acre = 40,47 a = 0,4047 ha; 70 kg/acre = 70 kg/acre / 0,4047 acre/ha = 173 kg Maispollen/ha; 20.000 Pfl./acre ~ 50.000 Pfl./ha ~ 5 Pfl./m²]

Die Bestandesdichte im Maisanbau ist sorten-, verfahrens- und standortabhängig und beträgt in der Regel etwa 8 - 12 Pflanzen/m² (Zscheischler 1990). Die obige Abschätzung nahm Bezug auf eine relativ geringe Dichte von 5 Pfl./m². Fonseca et al. (2003) gaben bis zu 18 Maispflanzen/m² bei Sortenversuchen an. Fonseca et al. (2003) ermittelten zudem erhebliche Sortenunterschiede in der Pollenproduktion. Legt man die 3,5 g Maispollen/Pflanze von Nowakowski & Morse (1982) zit. bei Emberlin (1999) zugrunde, so ergeben sich folgende Abschätzungen für die Maispollenproduktion abhängig von der Pflanzdichte:

Tabelle 2.1: Maispollenproduktion in Abhängigkeit von der Pflanzdichte

Pflanzdichte	n/m ²	5	8	10	12	18
Anzahl Maispflanzen pro Flächeneinheit bei verschiedenen Pflanzdichten						
	n/ha	50.000	80.000	100.000	120.000	180.000
	n/acre	20.000	32.376	40.470	48.564	72.846
Produzierte Maispollenmasse pro Flächeneinheit bei verschiedenen Pflanzdichten						
Maispollenmasse/Pfl.	g/Pfl.	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Maispollenproduktion	g/ha	173.000	280.000	350.000	420.000	630.000
	kg/acre	70	113	142	170	255
	kg/ha	173	280	350	420	630

Bei Gewichts- und Größenangaben für Maispollen ist der Bezug Frischgewicht oder Trockengewicht zu beachten, letzteres üblich bei 60°C. Bei Emberlin (1999) zitiert finden sich 247 ng/Maispollen. Fonseca et al. (2003) gibt für Trockengewichte neuerer Sorten eine Spanne von 150 bis 500 ng/Maispollen an. Die Größe der Maispollen aus unseren Fallen in der Deutschland variieren zw. 60-125 µm, meistens zw. 80-100 µm, als Mittel kann 90 µm angenommen werden (frischer Zustand, nicht getrocknet). Für die Frischgewichte ergeben sich je nach Durchmesser Werte von 141 ng (bei 60 µm) bis 1.278 ng/Maispollen (bei 125 µm und 1,25 g/cm³), für mittlere Pollendurchmesser von ca. 90 µm kann ein Frischgewicht von ca. 477 ng/Maispollen angesetzt werden.

Über die produzierte Anzahl und die Masse pro Pollenkorn ergeben sich folgende Abschätzungen für die pro Fläche produzierte Maispollenmasse als Frischgewichte:

Tabelle 2.2: Pollenmasse und Maispollenproduktion

a) Variation der Maispollengröße und -masse						
Pollenmasse		mittelgroße Pollen			kleine Pollen	große Pollen
Durchmesser		80 µm	90 µm	100 µm	60 µm	125 µm
Frischgewicht	ng/Pollen	335 ng	477 ng	654 ng	141 ng	1.278 ng

b) Variation der Maispollenproduktion pro Pflanze				
Pollenproduktion	n Maispollen/Pfl.	Gramm/Pfl. mittelgroße Pollen 90 µm	Gramm/Pfl. kl. Pollen 60 µm	Gramm/Pfl. gr. Pollen 125 µm
gering	2.000.000	1,0 g	0,3 g	2,6 g
mittel	14.000.000	6,7 g	2,0 g	17,9 g
hoch	50.000.000	23,9 g	7,1 g	63,9 g



c) Variation der Maispollenproduktion pro Fläche bei mittleren Annahmen zu Pollengröße und Bestandsdichte			
	Maispollenproduktion pro Pflanze	Maispollenproduktion pro ha	
Maispollen	mittelgroße Maispollen von 90 µm	Bestandsdichte 8 Pfl./m ²	Bestandsdichte 10 Pfl./m ²
Anzahl	2.000.000 /Pfl	1,6·10 ¹¹ Pollen/ha	2·10 ¹¹ Pollen/ha
Masse	1,0 g/Pfl	76 kg/ha	100 kg/ha
Anzahl	14.000.000 /Pfl	1,1·10 ¹² Pollen/ha	1,4·10 ¹² Pollen/ha
Masse	6,7 g/Pfl	534 kg/ha	668 kg/ha
Anzahl	50.000.000 /Pfl	4,0·10 ¹² Pollen/ha	5,0·10 ¹² Pollen/ha
Masse	23,9 g/Pfl	1.909 kg/ha	2.382 kg/ha

Anbaudichte, Sorte, Größe und Menge der produzierten Maispollen variieren erheblich, so dass entsprechend mit einer hohen Variation bei der produzierten Maispollenmasse pro ha zu rechnen ist. Zudem ist zwischen Frisch- und Trockengewicht zu unterscheiden.

Trotz der Bedeutung für die Risikobewertung sind keine detaillierten Angaben zur sortenspezifischen Maispollenproduktion für Bt-Mais und deren Variation im Freiland bekannt.

2.2 Feldgröße und -form

Die Feldgröße bestimmt abhängig von Sorte und Anbaudichte die Anzahl der Maispflanzen und beeinflusst damit die produzierte und letztlich freigesetzte Menge an Pollen (Quellstärke). Zudem kann die Größe von Maisfeldern Einfluss auf die Bildung thermischer Aufwinde nehmen und damit zu einer weiteren Verbreitung der Pollen führen (siehe Abschnitt 2.4).

Die von einem Feld in die Umgebung hinausgehende Pollenmenge wird weiterhin von der Feldform beeinflusst, da ein Teil der Pollen innerhalb des Maisfeldes verbleibt (Paterniani & Stort 1974). Dadurch spielt die Form der Feldes in Verbindung mit der Windrichtung eine Rolle. Bei einem langgestreckten Feld beispielsweise verbleiben mehr Pollen im Feld, wenn der Wind in Längsrichtung durch das Feld streicht.

2.3 Meteorologie und Topografie

Der Verlauf der Witterung, e.g. Temperatur, Feuchtigkeit, Wind und Strahlung, 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 Variation der Pollenschütte und der Pollendeposition.

Während die Pollenschüttung von den sorten- und witterungsbedingten Reifeprozessen abhängt, bestimmen meteorologische und topographische Verhältnisse die Ausbreitung von Maispollen. Unter Worst-Case-Bedingungen würden zunächst all diejenigen Situationen fallen, die eine Verteilung und Verdünnung verhindern.

Unter Freilandbedingungen spielt die **relative Lage** des Immissionsrezeptors zum emittierenden Maisfeld als Pollenquelle eine wesentliche Rolle. Meteorologisch ist dies z.B. der Fall, wenn der Wind zum Zeitpunkt der Pollenschüttung aus einer Richtung bläst und der Empfänger sich in **Abwindlage** (Lee) des Feldes befindet. In Abwindlage sind deutlich mehr Pollen zu erwarten als seitlich zur Windrichtung oder gar in Gegenwindlage (Luv). Für Worst-Case-Annahmen ist aus diesem Grund von der Abwindlage (Lee) auszugehen.

Ein weiterer wichtiger Faktor bei der Ausbreitung von Aerosolen oder Gasen stellt die **Windgeschwindigkeit** dar. Bei inerten Gasen, die in Bodennähe freigesetzt werden, die ungünstigste Situation durch niedrige Windgeschwindigkeit in Kombination mit stabiler atmosphärischer Schichtung (geringer Vertikalaustausch) gekennzeichnet. Bei sedimentierenden Pollen ist dies nicht unbedingt zu erwarten, da der Ferntransport durch die Sedimentation insbesondere bei niedriger Windgeschwindigkeit und stabiler Schichtung behindert wird. Daher gilt es den Einfluss der Windgeschwindigkeit in den Modellszenarien genauer zu betrachten, um ungünstige Fälle zu ermitteln.

Topografische Verhältnisse, wie z.B. enge Täler, größere Hindernisse etc., können zu ungünstiger Anströmung führen, die höhere Pollenimmissionen an bestimmten Orten induzieren und einen Transport über weitere Distanzen begünstigen. Eine Worst-Case-Situation liegt dann vor, wenn der Wind während der Blüte stets in die gleiche Richtung weht, dabei eine geringe Verteilung und Verdünnung vorliegt, so dass in Abwindlage maximale Immissionen auftreten. Die Worst-Case-Annahme hierzu wurde in den Ausbreitungsmodellierungen in Kap. 3 entsprechend berücksichtigt.

2.4 Thermische Konvektionszellen

Besonders bedeutsam bei der Maispollenausbreitung sind thermische Konvektionszellen, die zu einem weiteren Transport führen können. Maispollen werden während der Blühperiode von Juli bis August hauptsächlich bei trockenen Wetterbedingungen in der Zeit vom späten Vormittag bis zum frühen Nachmittag freigesetzt. Dann liegen meist labile Schichtungen der Atmosphäre mit zum Teil starker **Konvektion** vor, so dass die freigesetzten Maispollen in der Atmosphäre vertikal gut verteilt werden.

Thermisch bedingte Aufwinde (Konvektionszellen) können dabei Pollen in höhere Luftschichten transportieren und für eine weite Verbreitung sorgen (Aylor et al. 2003; Loos et al. 2003; Helbig et al. 2004; Jarosz et al. 2003 & 2004; Boehm et al. 2008). Brunet et al. (2003) wiesen in Frankreich Maispollen in mehreren hundert Metern Höhe nach. Quantitative Messungen zu diesem Effekt liegen für die Maispollenschütte in Deutschland bis dato nicht vor. Seit geraumer Zeit wird der Einfluss der Thermik auf den Freisetzung- und den Ausbreitungsvorgang von Maispollen diskutiert. In Modellrechnungen des Julius Kühn Instituts (ehemals BBA) (<http://www.biosicherheit.de/de/mais/auskreuzung/147.doku.html>) wurde

eine geringe Anfangsübererhöhung der geometrischen Quellhöhe von 10 m über Grund angesetzt, die bereits zu einer deutlich weiteren Verbreitung der Maispollen führte und damit eine bessere Übereinstimmung von Ausbreitungsrechnung und Freilandmessungen bewirkte. Auf Grund der grundsätzlichen Bedeutung soll die Entstehung und Wirkung von **thermischen Konvektionszellen oder Thermikblasen** im Folgenden etwas näher ausgeführt werden:¹

Die Darstellungen in Abb. 2.1 und Abb. 2.2 zeigen anschaulich das eigentliche räumliche und zeitliche Problem:

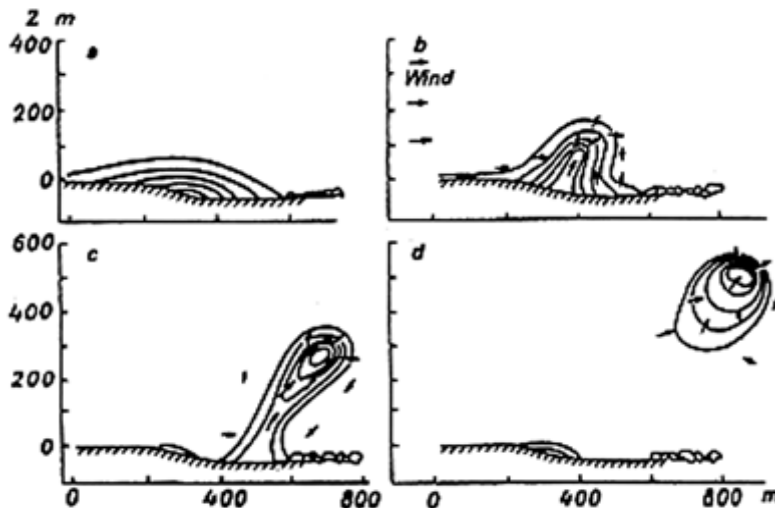


Abb. 2.1: Entstehung einer Thermikblase. a) Aufheizung der bodennahen Luftschichten. b) Vom Erdboden aus einsetzende Konvektion. c) Aufsteigen der Thermikblase. d) Abreißen der Thermikblase. (Quelle: http://www.shv-fsvl.ch/sg_archiv/wetter/de/0501.htm)

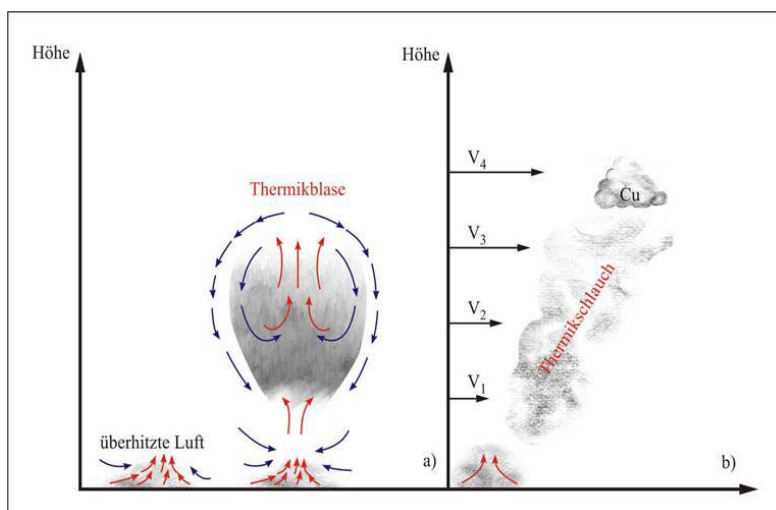


Abb. 2.2: a) Entstehung einer Thermikblase b) Neigung eines Thermikschlauches in Abhängigkeit vom Wind (Quelle: Reiber 2008 aus : http://www.pik-potsdam.de/~friwi/vorl_ss_2007_07.pdf)

¹ basierend auf Ausführungen von W.J. Müller für die AG VDI-RL 4330 Bl. 2 (Mittlg. 2007) und M. Reiber [www.DrMReiber.de]

Die thermische Konvektion erfolgt in Form von sogenannten Thermikblasen. Abb. 2.1 zeigt die Entstehung einer solchen Thermikblase. Die Sonne heizt zunächst den Erdboden und nachfolgend indirekt auch die untersten Luftschichten sehr stark auf. Da die erwärmte Luft nun leichter ist als ihre Umgebung, setzt Konvektion ein. Eine Thermikblase beginnt sich vom Boden zu lösen und aufzusteigen. Nach einiger Zeit reißt die Thermikblase vom Boden ab und wird mit dem Wind davon getragen. Je nach Stabilität der Luftschichtung kann die Thermikblase unterschiedlich hoch aufsteigen, bevor sie sich auflöst. Nun kann der gesamte Prozess an gleicher Stelle von neuem beginnen. In den Abb. 2.2 bis Abb. 2.4 sind skizzenhaft die Entstehung von Thermikblasen mit Wolkenbildung und Einfluss von Wind und Topographie dargestellt.

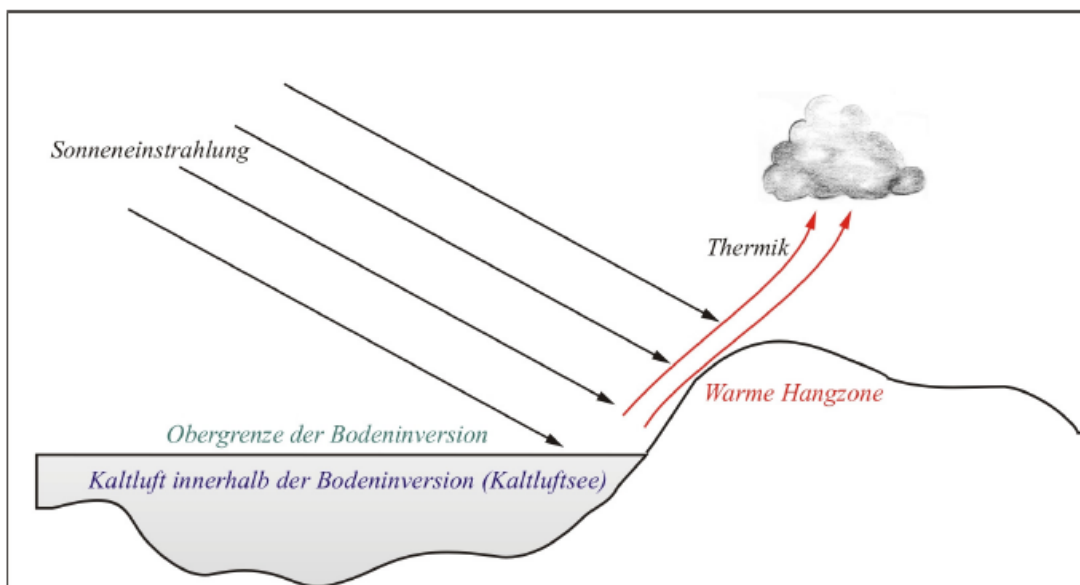


Abb. 2.3: Ausbildung von Thermik im gegliederten Gelände, schon bevor die Bodeninversion aufgelöst ist (Quelle: Reiber 2008)

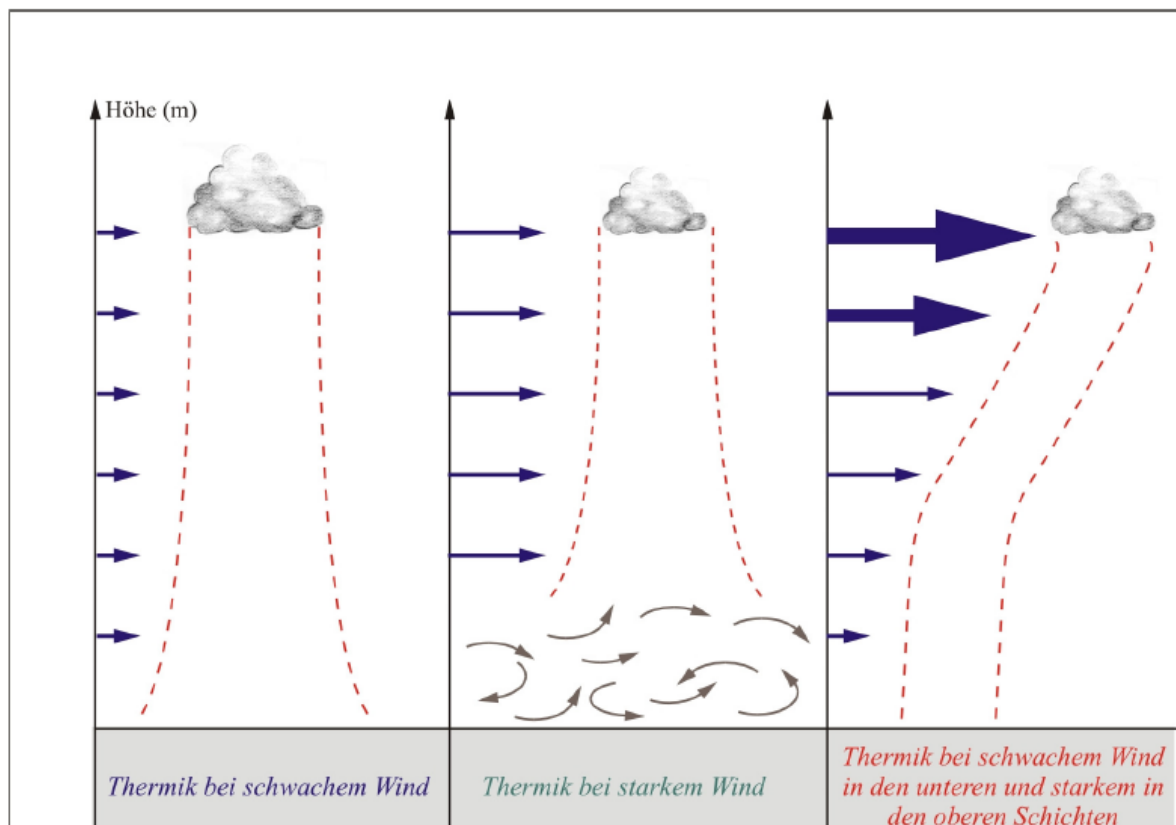


Abb. 2.4: Thermik bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten (Quelle: Reiber 2008)

Entsprechend der Temperaturschichtung der Atmosphäre kann sich nach einer bodennahen Übererwärmung auch eine Wolke bilden. Die Höhe der Wolkenuntergrenze entspricht dem CCL Convective Condensation Level.

Die Zeit der Auflösung der nächtlichen Bodeninversion und beginnenden Thermikbildung liegt etwa in dem Bereich von 10 bis 12 Uhr. Dies entspricht in etwa dem morgendlichen Beginn der Maispollenemission. Damit wird deutlich, dass während der Blühzeit im Tagesverlauf über einem Maisfeld Thermikblasen entstehen und sich ablösen können. Die Größe der Thermikblasen wird u.a. von der Feldgröße, der Oberflächenstruktur der Umgebung und den jeweiligen Feuchtebedingungen abhängen. Der Transport der Blase wird dabei von der Windsituation beeinflusst.

Thermikblasen weisen in der Regel eine räumliche Ausdehnung von etwa 25 m bis 250 m auf und sind über einen Zeitraum von 5 bis 10 Minuten (Mikroskala) stabil.

In Maisbeständen werden Thermikblasen zudem dadurch begünstigt, dass Mais als C4-Pflanze die Verdunstung gegenüber anderen heimischen grünen Pflanzen bei sommerlicher Hitze reduziert und damit eine Wärmeinsel darstellt, so dass die Entstehung von Thermikblasen begünstigt wird. Hierbei spielen dann die Ausdehnung der Maisbestände und der Maisanteil in Relation zu anderen Landnutzungsarten in der Region eine Rolle. So wurden z.B. 2007

1.500 ha zusammenhängender Maisanbau im Bereich Schorfheide-Chorin in Brandenburg kartiert.²

2.5 Befruchtungsfähigkeit des Pollens und Blühsynchronisation

Die Blühsynchronisation spielt für die innerartliche Auskreuzung von Mais (Aylor et al. 2003) und damit für Fragen der Koexistenz eine große Rolle. Für die Wirkung der Bt-Maispollendeposition auf Nichtzielorganismen sind hingegen die Befruchtungsfähigkeit des Pollens irrelevant und die Blühsynchronisation ist nicht entscheidend. Auch Pollen, der seine Befruchtungsfähigkeit verloren hat, kann von Organismen aufgenommen werden. Die Blühsynchronisation unterschiedlicher Sorten ist bei der Betrachtung der Pollenschütte von Einzelflächen unbedeutend.

2.6 Verlauf der Maispollenblüte

Ein bedeutsamer Aspekt ist der Verlauf der Maispollenblüte. Die Maisblüte wird in warmen Klimazonen als kompakt über einen Zeitraum von 5-7 Tagen gehend beschrieben (Jarosz et al. 2003; Ogden et al. 1969). Dies lässt sich jedoch nicht ohne weiteres auf die nördlicheren, gemäßigten Breiten übertragen. Wie die unten folgenden Messdaten belegen, verläuft die Maisblüte in Deutschland regelmäßig über mehr als 4 Wochen. Die Menge an Maispollen, die von der Pflanze gebildet werden, ist von der Sorte und den Wachstumsbedingungen am Standort abhängig. Wasser-, Licht-, Nährstoffversorgung, Temperatur und Pflanzabstand steuern die Pollenreifung und Schüttung, so dass hier mit einer hohen Variation zu rechnen ist.

In Abb. 2.5 sind die Ergebnisse zur zeitlichen Variation des Maispollenfluges aus den Langzeitmessungen an der Referenzstation für den ländlichen Raum in Westerloge bei Delmenhorst in Niedersachsen über die Jahre 1994 bis 2007 abgebildet³. Für das jeweilige Jahr dargestellt sind die prozentualen Anteile der Tagesmittelwerte an der Jahres- bzw. Saisonsumme (Summe über die Pollenflugsaison) als auch die Mittelkurve über den gesamten betrachteten Zeitraum von 15 Jahren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Maisblüte in Deutschland nicht in 5-7 Tagen verläuft, sondern sich im Mittel über einen wesentlich längeren Zeitraum von Mitte Juli an bis Mitte August erstreckt, mit Variation von Anfang Juli bis Anfang September. Zudem erfolgt die Blüte meistens nicht kompakt in einem Block, sondern ist in Phasen gegliedert. Bei der Suche nach Worst-Case-Situationen sind beispielweise die Jahre 1999 und 2006 interessant, an denen über 35 % der Maispolleneinträge des Jahres an einem einzigen Tag gemessen wurden. Hinzu kommt, dass sich die Schüttung auf wenige Stunden konzentrieren kann, wie die Analyse einzelner Tagesverläufe zeigt (siehe auch Aylor 2003). Die Ergebnisse belegen deutlich, dass für Worst-Case-Annahmen ein breiter Zeitraum

² Mitteilung R. Vögel, LUA BBG

³ R. Wachter, Pollenmessstation Westerloge, dokumentierte Daten im Netzwerk der Polleninformationsdienste (DWD, PID, EAN)

und eine hohe Variation der Schütte anzunehmen ist, wobei es zu intensiven Spitzen der Maispollenschüttung kommen kann.

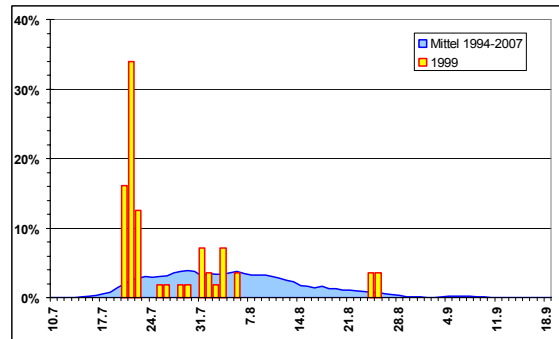
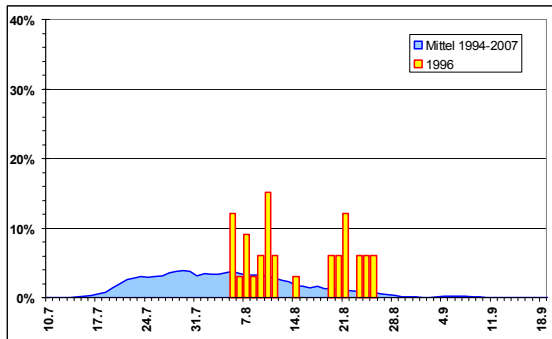
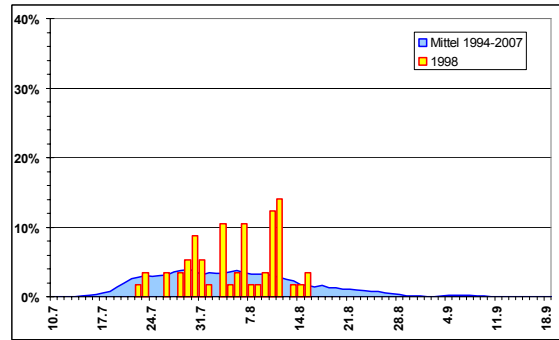
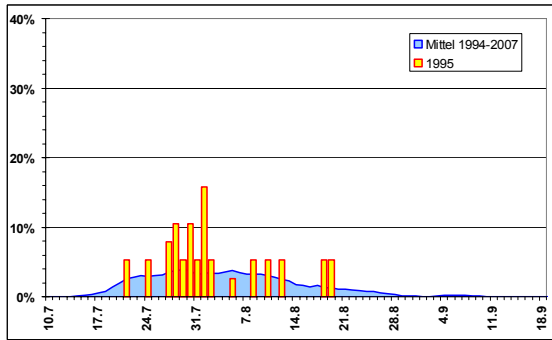
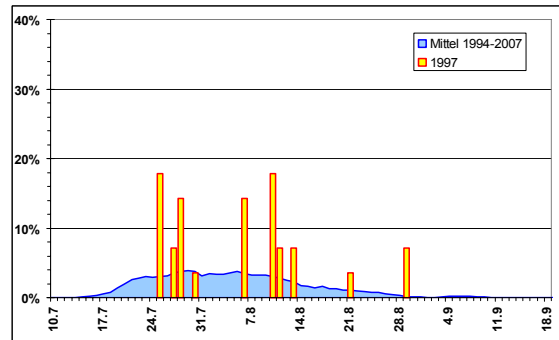
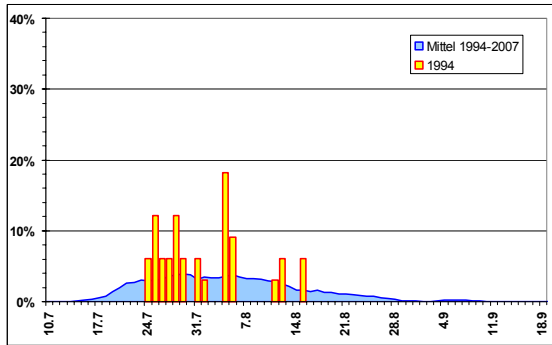




Abb. 2.5: Variabilität des zeitlichen Verlaufes des Maispollenfluges von 1994 bis 2007 am Referenzstandort ländlicher Raum, Westerloge. Relativwerte der Maispollenimmission (mittlere Tageswerte) zur Jahressumme, gemessen mit der Burkard-Falle. Zum Vergleich wurde das Mittel 1994-2007 (gleitendes Mittel 5) dargestellt. (Daten: R. Wachter, dokumentiert beim PID/DWD, EAN European Aeroallergen Network)

3 Modellrechnungen zur Ausbreitung von Maispollen unter Berücksichtigung von Worst-Case-Annahmen⁴

3.1 Einführung in die Modellierung

Maispollen werden während der Blüteperiode von Juli bis August hauptsächlich bei trockenem oder trocknenden Wetterbedingungen und in der Zeit von vormittags bis zum frühen Nachmittag freigesetzt. In diesem Zeitraum liegt meist labile Schichtung mit zum Teil starker Konvektion vor, so dass die freigesetzten Maispollen auch bei gravitativem Absinken in der Atmosphäre vertikal gut verteilt werden und eine entsprechend große Verweildauer zeigen können. Um die Flugweite von Maispollen quantitativ näher zu untersuchen, wurden für verschiedene Testszenarien Ausbreitungsrechnungen durchgeführt. Als Ausbreitungsmodell wurde LASAT eingesetzt.

LASAT (Lagrange-Simulation von Aerosol-Transport) ist ein Lagrangesches Ausbreitungsmodell zur Berechnung der Ausbreitung von Spurenstoffen in der Atmosphäre. Im Gegensatz zu Gaußschen oder Eulerschen Ausbreitungsmodellen stellt das Modell keine analytische oder numerische Lösung der Gleichungen, die den Transport der Spurenstoffe in der Atmosphäre beschreiben, dar, sondern der Transportprozeß selbst wird zeitabhängig modelliert. Das Ausbreitungsmodell, dessen Wurzeln in Forschungsmodellen liegen (Janicke 1983, 1985, 1987; Axenfeld & Janicke 1984; Janicke & Axenfeld 1988; Tully et al. 1985), wird seit dem Jahr 1990 vom Ing.-Büro Janicke als Programmsystem angeboten und ist seitdem bei Ingenieurbüros, TÜVs und anderen Gutachtern, Industrieunternehmen, Behörden und wissenschaftlichen Einrichtungen im Einsatz.

LASAT berechnet die Ausbreitung passiver Spurenstoffe in der unteren Atmosphäre (bis ca. 2000 m Höhe) im lokalen (einige 10 m) bis regionalen Bereich (bis ca. 150 km Entfernung). Folgende physikalische Vorgänge werden zeitabhängig simuliert:

- Transport durch den mittleren Wind,
- Dispersion in der Atmosphäre,
- Sedimentation schwerer Aerosole,
- Deposition am Erdboden (trockene Deposition),
- Auswaschen der Spurenstoffe durch Regen und nasse Deposition,
- Umwandlungen erster Ordnung,
- Gamma-Submersion (Wolkenstrahlung) bei radioaktiven Stoffen.

Für komplexes Gelände (Geländeprofil und/oder Gebäude) kommt ein diagnostisches Windfeldmodell zur Berechnung der dreidimensionalen Windfelder zum Einsatz. Die meisten Parameter der Ausbreitungsrechnung können als Zeitreihe vorgegeben werden. Als Ergebnis wird die über fortlaufende, frei vorgebbare Zeitintervalle gemittelte dreidimensionale Konzentrationsverteilung der emittierten Spurenstoffe, die Stoffstromdichte ihrer Deposition am

⁴ Die Ausbreitungsmodellierungen und Ausführungen dieses Kapitels wurden von Dr. L. Janicke und Dr. U. Janicke vorgenommen und redaktionell überarbeitet.

Erdboden sowie bei radioaktiven Stoffen die Gamma-Submersion (Wolkenstrahlung) berechnet.

Im Jahr 2000 wurde der LASAT zugrunde liegende Modelltyp durch eine VDI-Richtlinie standardisiert (VDI-Richtlinie 3945 Bl. 3 2000). LASAT ist konform mit dieser Richtlinie. Vor dem Hintergrund des langjährigen und bewährten Einsatzes von LASAT in der gutachterlichen Praxis wurde im Jahr 2000 im Rahmen der Novellierung der TA Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) das Gaußsche Fahnenmodell der TA Luft 86 durch ein Lagrangesches Partikelmodell nach der VDI-Richtlinie 3945 Bl. 3 ersetzt. Die technische Umsetzung wurde vom Ing.-Büro Janicke im Auftrag des Umweltbundesamtes auf der Basis von LASAT durchgeführt (Janicke & Janicke 2003). Das Ergebnis ist das Programmsystem AUSTAL2000. Es ist das offizielle Referenzmodell der TA Luft und wird inklusive Quelltext im Internet frei zur Verfügung gestellt.⁵ LASAT liefert mit den entsprechenden, zur TA Luft konformen Einstellungen dieselben Ergebnisse wie AUSTAL2000.

Neben der gutachterlichen Praxis werden LASAT und AUSTAL2000 auch als Standardmodelle für spezielle Fragestellungen eingesetzt (für eine Übersicht siehe Janicke & Janicke 2007). Im Laufe der langjährigen Anwendung wurde eine Vielzahl von Modellvalidierungen vorgenommen, sowohl für klassische Validierungsdatensätze wie die Prairie-Grass- und die KfK-Experimente (z.B. Janicke 2007; Janicke & Janicke 2000) als auch für komplexere Situationen (z.B. Janicke & Janicke 2004; Bahmann et al. 2006; Hirtl & Baumann-Stanzer 2007). In den letzten Jahren wurde LASAT verstärkt für Pollenausbreitungsrechnungen eingesetzt, so im Rahmen des gemeinsamen VDI-Fachausschusses *Ausbreitungsmodellierung/Pollenmonitoring zum Probenahmedesign für das GVO-Monitoring* (VDI-Richtlinienvorhaben 4330 Bl. 2) und in diesem Projekt.

Für eine Ausbreitungsrechnung müssen die physikalischen Eigenschaften der Pollen und ihre Freisetzungsbedingungen festgelegt werden. Für die in diesem Abschnitt dargestellten Rechnungen wurden folgende Werte verwendet:

In der Literatur werden Freisetzungsraten zwischen 20 und 100 bzw. zwischen 6 und 30 Pollen pro Pflanze und Sekunde angegeben (Aylor 2005; Aylor et al. 2006). Für die Testrechnungen wurde eine Freisetzungsrate von 50 Pollen pro Pflanze und Sekunde und eine Pflanzendichte von 6 Pflanzen pro Quadratmeter angenommen, also eine Freisetzungsrate von 300 Pollen /($m^2 s$).

Für die Festlegung der physikalischen Parameter zur Sedimentations- und Depositionsgeschwindigkeit von Maispollen wird die Dichte und der Durchmesser⁶ der Pollen benötigt. Bei Maispollen hängen sie unter anderem vom Grad der Dehydrierung ab (Aylor 2003). Typische Werte sind $1,25 \text{ g/cm}^3$ und $80 \text{ }\mu\text{m}$.

Die Masse eines solchen Maispollens beträgt $0,335 \text{ }\mu\text{g}$. Der Freisetzungsrate von 300 Pollen /($m^2 s$) entspricht also eine Massenstromdichte von $10^{-4} \text{ g/(m}^2 \text{ s)}$.

⁵ <http://www.austal.de>

⁶ Hier der Volumen-Äquivalenzdurchmesser, also der Durchmesser einer Kugel, die das gleiche Volumen wie der Maispollen hat.

Gemessene Sinkgeschwindigkeiten im Labor liegen zwischen 0,20 m/s und 0,25 m/s (Aylor 2002). Die Sinkgeschwindigkeit, die sich für 1,25 g/cm³ und 80 µm nach VDI-Richtlinie 3782 Blatt 5 ergibt, beträgt 0,21 m/s und ist in guter Übereinstimmung hiermit. Ein typischer Wert für die Depositionsgeschwindigkeit ist 0,24 m/s.⁷ Dieser Wert wurde in den Rechnungen verwendet.

Ein wichtiger Parameter, der die Ausbreitung von Spurenstoffen bestimmt, ist die Stabilität der atmosphärischen Schichtung (Schichtungsstabilität). Sie wird in Deutschland hilfswise mit dem Klassierungsschema nach Klug und Manier beschrieben, den sogenannten Klug/Manier-Klassen. Ein genaueres und kontinuierliches Maß, das auch im Folgenden verwendet wird, ist die sogenannte **Monin-Obukhov-Länge L_M** .

Stabile Schichtungen werden durch einen positiven Wert, labile Schichtungen durch einen negativen Wert gekennzeichnet. Je kleiner der Absolutwert, desto extremer ist die Schichtung. Je größer der Absolutwert, desto mehr nähert sich die Schichtung dem indifferenten (neutralen) Zustand an. Daneben hängt der Wert der Monin-Obukhov-Länge auch von der Oberflächenbeschaffenheit der Landschaft ab, die durch die sogenannte **Rauhigkeitslänge** charakterisiert ist. Eine Klassierung der Monin-Obukhov-Länge in Abhängigkeit von der Klug/Manier-Klasse und der Rauhigkeitslänge findet sich zum Beispiel im Anhang 3 der TA Luft.

3.2 Flugweite von Maispollen in Abhängigkeit von Schichtungsstabilität und Windgeschwindigkeit

Um zu untersuchen, wie die Flugweite der Maispollen von den Parametern *Schichtungsstabilität* und *Windgeschwindigkeit* abhängt, wurde für die Ausbreitungsrechnungen eine zweidimensionale Geometrie gewählt: Eine unendlich lange Reihe von Maispflanzen wird quer angeströmt und es wird untersucht, welcher Anteil der emittierten Maispollen eine bestimmte Entfernung von dieser Linie erreicht.

Ein Maisfeld kann aufgrund seiner homogenen Struktur näherungsweise als eine Geländestufe angesehen werden. Beim Überströmen des Maisfeldes wird das Windprofil um die Höhe des Maisfeldes nach oben gedrängt und im Bereich des leeseitigen Feldrandes bildet sich eine kleinräumige Störung aus. In den Testrechnungen, die sich bis in eine Entfernung von 1.000 m erstrecken, wurden diese Strömungseffekte nicht explizit modelliert, da der unmittelbare Nahbereich nicht relevant war.⁸ Statt dessen wurde der Vertikalversatz des Strömungsprofils durch einen entsprechenden Versatz der Emissionsorte nach unten berücksichtigt. Das obere Ende einer Maispflanze, an dem die Pollen freigesetzt werden, wurde somit als vertikal ausgedehnte Quelle zwischen 0 und 0,5 m Höhe über Grund modelliert, wobei die Vertikalausdehnung der Unsicherheit in der tatsächlichen Freisetzungshöhe Rechnung tragen soll.

Die Bodenrauhigkeit wurde zu 0,16 m angesetzt, die Sinkgeschwindigkeit der Maispollen zu 0,21 m/s. Um Rundungsfehler bei der Ausbreitungsrechnung möglichst gering zu halten,

⁷ Für eine Schubspannungsgeschwindigkeit von 0,35 m/s und eine Monin-Obukhov-Länge von -20 m.

⁸ Red.Anm.: Zu Nahbereichseffekten und Ausbreitungsmodellierung von Maispollen siehe Jarosz et al. 2004 und 2005

wurde dem Ausbreitungsmodell nicht direkt eine Depositionsgeschwindigkeit vorgegeben, sondern eine Depositionswahrscheinlichkeit von 1. Dies bedeutet, dass Maispollen, die während der Ausbreitung einmal den Boden berühren, dort endgültig deponiert werden.

Maispollen werden bei trockenem, warmem Wetter freigesetzt, also in der Regel bei labiler Luftschichtung ($L_M < 0$). Daraus folgt auch ein ungefährender Wertebereich für die Windgeschwindigkeit, denn sie korreliert mit der Schichtungsstabilität. Um die für die verschiedenen Stabilitätsbereiche relevanten Wertebereiche der Windgeschwindigkeit festzulegen, wurden USAT⁹-Messungen analysiert, die in den Monaten Juli und August in allgemein landwirtschaftlich geprägtem Gebiet durchgeführt worden sind (10-Minuten-Mittelwerte).¹⁰ Spezifische Daten für Maisfelder waren nicht verfügbar.

Die bei einer Klassierung nach Windgeschwindigkeit u_a in Messhöhe 10 m über Grund und dem Stabilitätsmaß $R_1 = -1.000/L_M$ auftretenden relativen Häufigkeiten im Zeitraum zwischen 8 Uhr und 16 Uhr (lokale meteorologische Zeit) sind in Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 aufgelistet.

Tabelle 3.3 listet die maximale und die mittlere Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Monin-Obukhov-Länge auf.

Tabelle 3.1: Absolute Häufigkeit von Windgeschwindigkeit u_a (in m/s) und dem Stabilitätsmaß R_1 (in 1/m) in Datei 2003-07+08.def (2937 Werte von 07:00:00 UTC bis 14:50:00 UTC)

$u_a \setminus R_1$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	>100
0.50	0	0	2	10	12	3	0	0	0	0	0
1.00	1	1	1	19	52	22	1	0	0	0	0
1.50	1	0	4	48	62	51	12	0	0	0	0
2.00	6	11	3	53	112	60	5	0	0	0	0
2.50	20	25	21	82	114	60	7	0	0	0	0
3.00	40	35	21	103	130	39	2	0	0	0	0
3.50	65	46	56	86	88	11	1	0	0	0	0
4.00	77	55	70	56	23	1	0	0	0	0	0
4.50	100	97	92	37	6	0	0	0	0	0	0
5.00	85	88	67	23	1	0	0	0	0	0	0
5.50	84	67	54	4	0	0	0	0	0	0	0
6.00	60	47	27	0	0	0	0	0	0	0	0
6.50	30	21	20	0	0	0	0	0	0	0	0
7.00	21	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0
7.50	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.00	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>8.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summe	598	501	442	521	600	247	28	0	0	0	0
$\langle u_a \rangle$	4.5	4.3	4.2	2.7	2.2	1.9	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0

⁹ Ultraschallanemometer

¹⁰ Die Daten wurden freundlicherweise von Frau Dr. Köllner, LANUV NRW Essen, zur Verfügung gestellt.

Tabelle 3.2: Absolute Häufigkeit von Windgeschwindigkeit u_a (in m/s) und dem Stabilitätsmaß R_l (in 1/m) in Datei 2004-07+08.def (2806 Werte von 07:00:00 UTC bis 14:50:00 UTC).

$u_a \setminus R_l$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	>100
0.50	0	1	1	5	6	4	0	0	0	0	0
1.00	3	2	9	19	20	16	9	1	0	0	0
1.50	4	13	16	22	51	49	23	2	0	0	0
2.00	14	32	26	43	66	67	13	1	0	0	0
2.50	38	43	81	51	75	31	3	0	0	0	0
3.00	64	63	99	68	24	17	1	0	0	0	0
3.50	115	78	76	25	10	2	0	0	0	0	0
4.00	164	72	35	6	2	0	0	0	0	0	0
4.50	217	47	19	1	0	0	0	0	0	0	0
5.00	197	29	3	0	0	0	0	0	0	0	0
5.50	189	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.00	108	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.50	73	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.00	43	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.50	23	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.00	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>8.00	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summe	1271	437	365	240	254	186	49	4	0	0	0
$\langle u_a \rangle$	4.6	3.5	2.7	2.2	1.9	1.7	1.4	1.2	0.0	0.0	0.0

Tabelle 3.3: Maximale und mittlere Windgeschwindigkeit u_a (in m/s), wie sie sich aus der Auswertung der beiden Meßdateien für verschiedene Werte der Monin-Obukhov-Länge L_M (in m) bei labiler Schichtung ergeben.

L_M	u_a	$\langle u_a \rangle$
-100	<7.5	4.6
-50	<6.0	3.9
-25	<4.5	3.2
-16	<3.0	1.8
-12	<1.5	1.2

Die Ausbreitungsrechnungen wurden für eine konstante Quellstärke von 300 Pollen/(m² s) durchgeführt (stationäre Situation). Abb. 3.1 und Abb. 3.2 zeigen, wie sich die vertikale Konzentrationsverteilung mit wachsender Windgeschwindigkeit u_a bzw. mit abnehmender Stabilität (zunehmendem L_M) verändert.

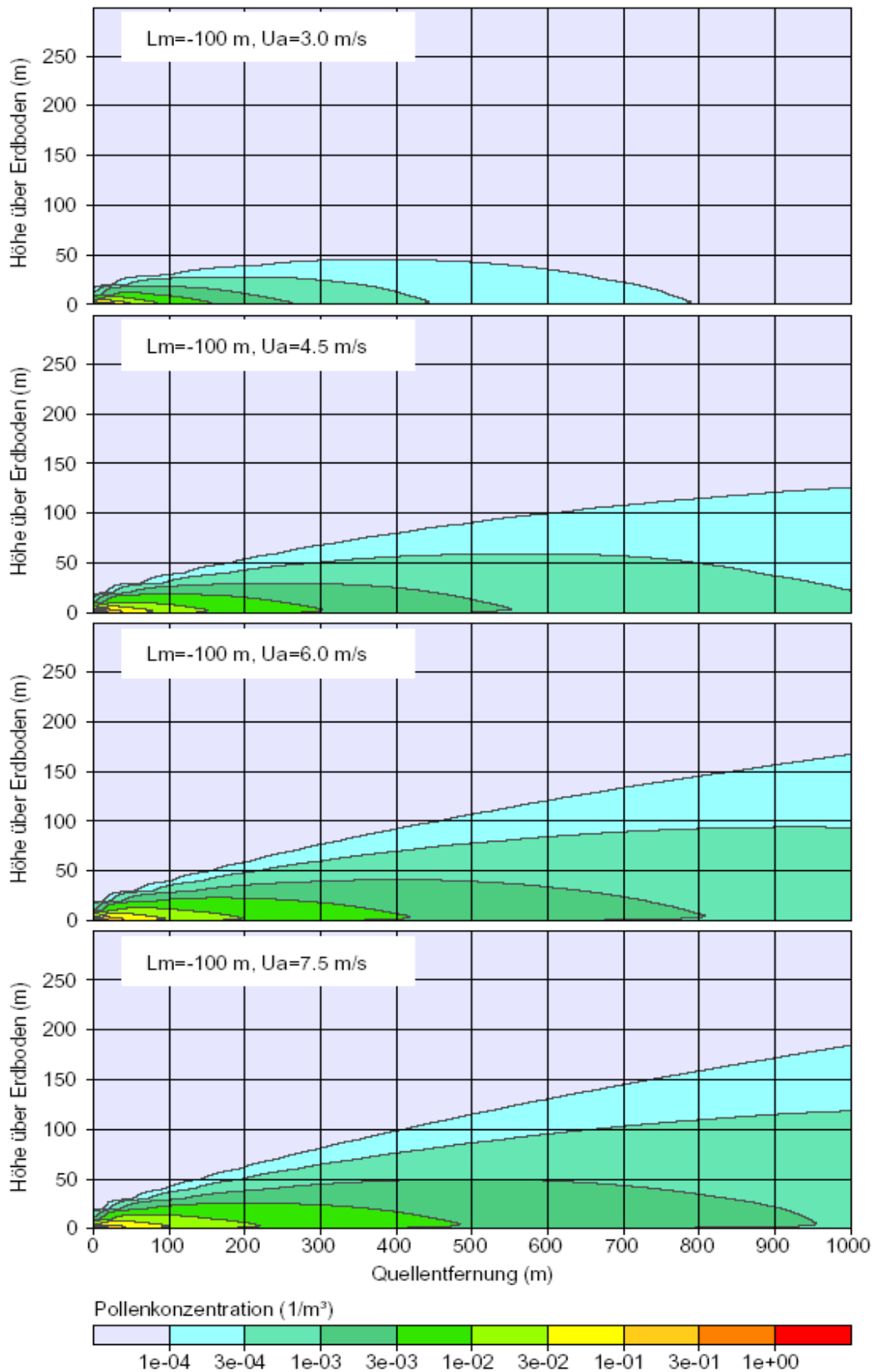


Abb. 3.1: Vertikalschnitt der Konzentration bei Variation der Windgeschwindigkeit u_a (zweidimensionale Rechnung, jeweils stationäre Situation).

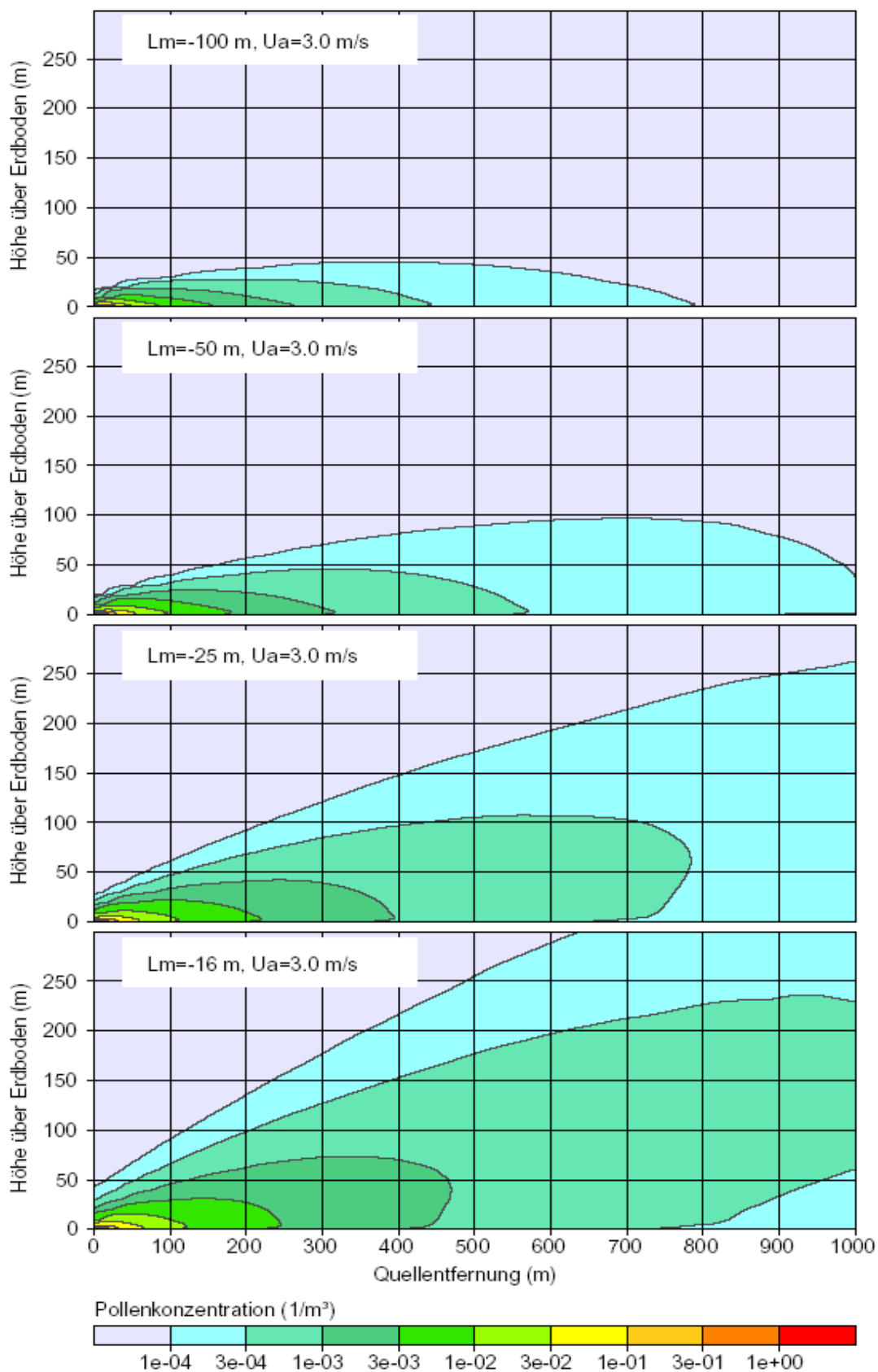


Abb. 3.2: Vertikalschnitt der Konzentration bei Variation der Monin-Obukhov-Länge L_M (zweidimensionale Rechnung, jeweils stationäre Situation).

Die Ergebnisse wurden daraufhin ausgewertet, wie viele der freigesetzten Pollen bis zu einer bestimmten Entfernung deponiert werden, und daraus, welcher relative Anteil der Pollen über diese Entfernung hinaus transportiert wird. Abb. 3.3 bis Abb. 3.7 zeigen die Resultate für die verschiedenen Stabilitäten (von leicht labil bis stark labil) und Windgeschwindigkeiten.

Die Ergebnisse der Rechnungen zeigen, dass bei gleicher Windgeschwindigkeit eine Verstärkung der Labilität der atmosphärischen Schichtung zu einer Vergrößerung der Transportweite führt (vgl. beispielsweise die schwarzen Kurven in Abbildung Abb. 3.3 bis Abb. 3.7). Allerdings scheint der Wert der Windgeschwindigkeit einen noch stärkeren Einfluss auf die Transportweite zu haben. Das führt dazu, daß der weiteste Transport eher bei schwach labiler Schichtung zu erwarten ist, da hier die typischen, in der Natur auftretenden Windgeschwindigkeiten höher sind als bei stark labiler Schichtung (siehe Tabelle 3.3).

Bei schwach labiler Schichtung ($L_M \leq -25$ m) und jeweils typischer Windgeschwindigkeit werden mehr als 0,5% der freigesetzten Pollen weiter als 1.000 m transportiert.

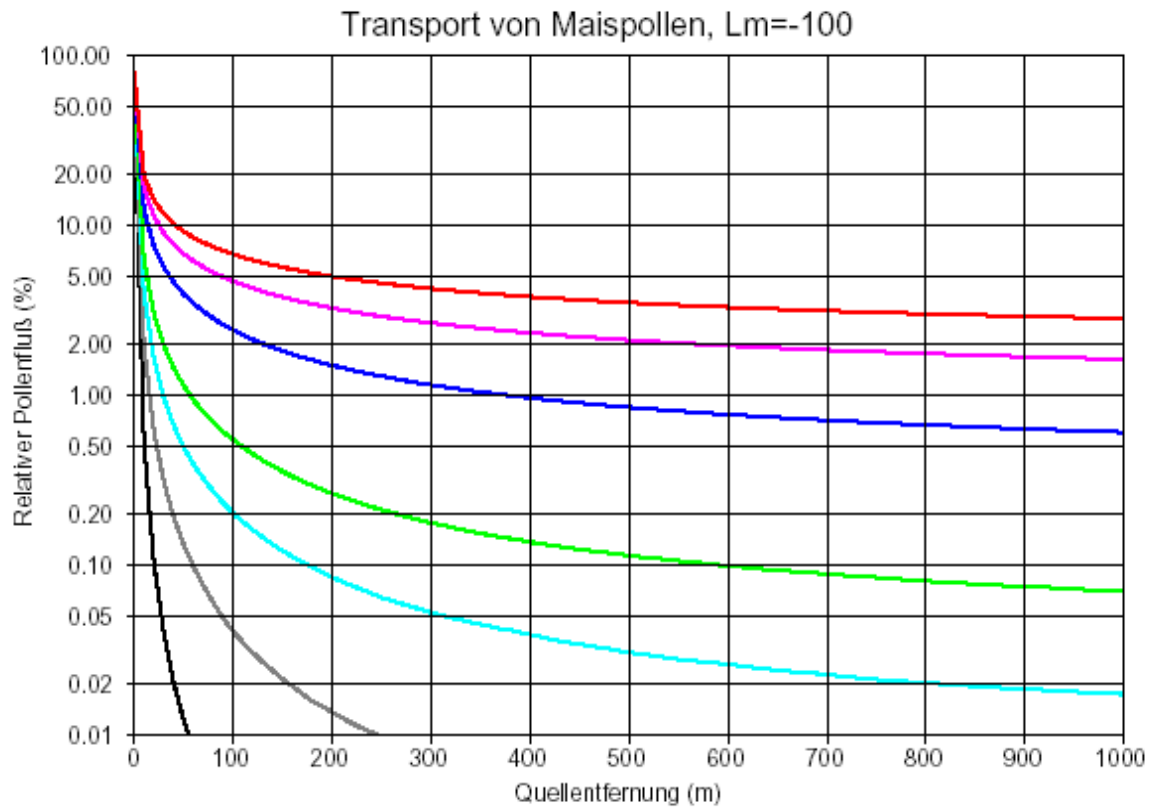


Abb. 3.3: Anteil der über eine bestimmte Entfernung hinaus transportierten Maispollen für die Monin-Obukhov-Länge $L_M = -100$ m (leicht labile Schichtung) und verschiedene Windgeschwindigkeiten u_a : 1,5 m/s (schwarz), 2,0 m/s (grau), 2,5 m/s (türkis), 3,0 m/s (grün), 4,5 m/s (blau), 6,0 m/s (violett), 7,5 m/s (rot).

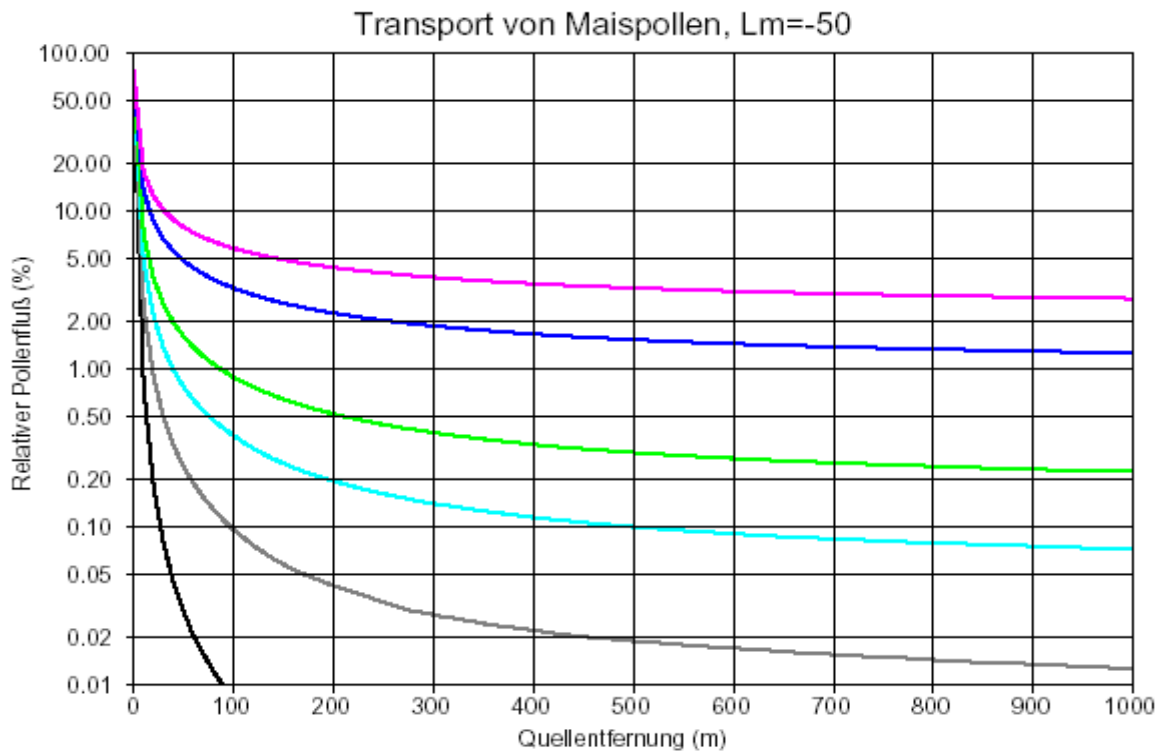


Abb. 3.4: Anteil der über eine bestimmte Entfernung hinaus transportierten Maispollen für die Monin-Obukhov-Länge $L_M = -50$ m und verschiedene Windgeschwindigkeiten u_a : 1,5 m/s (schwarz), 2,0 m/s (grau), 2,5 m/s (türkis), 3,0 m/s (grün), 4,5 m/s (blau), 6,0 m/s (violett).

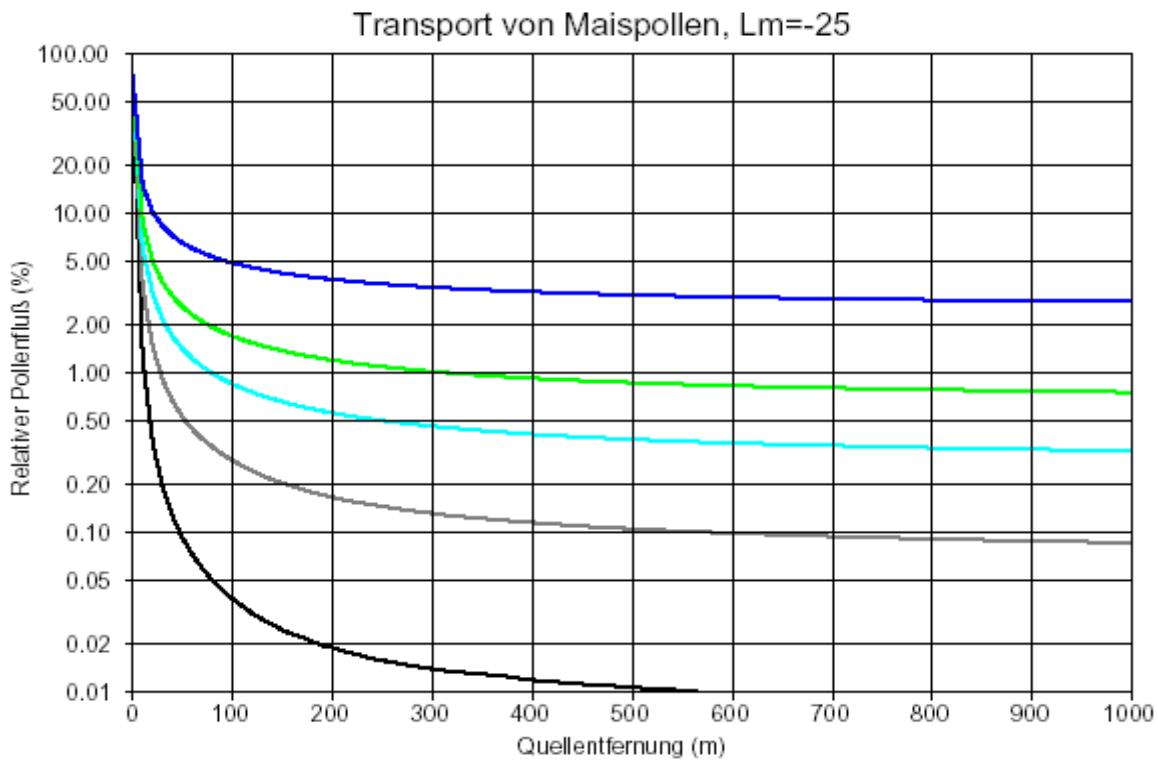


Abb. 3.5: Anteil der über eine bestimmte Entfernung hinaus transportierten Maispollen für die Monin-Obukhov-Länge $L_M = -25$ m und verschiedene Windgeschwindigkeiten u_a : 1,5 m/s (schwarz), 2,0 m/s (grau), 2,5 m/s (türkis), 3,0 m/s (grün), 4,5 m/s (blau).

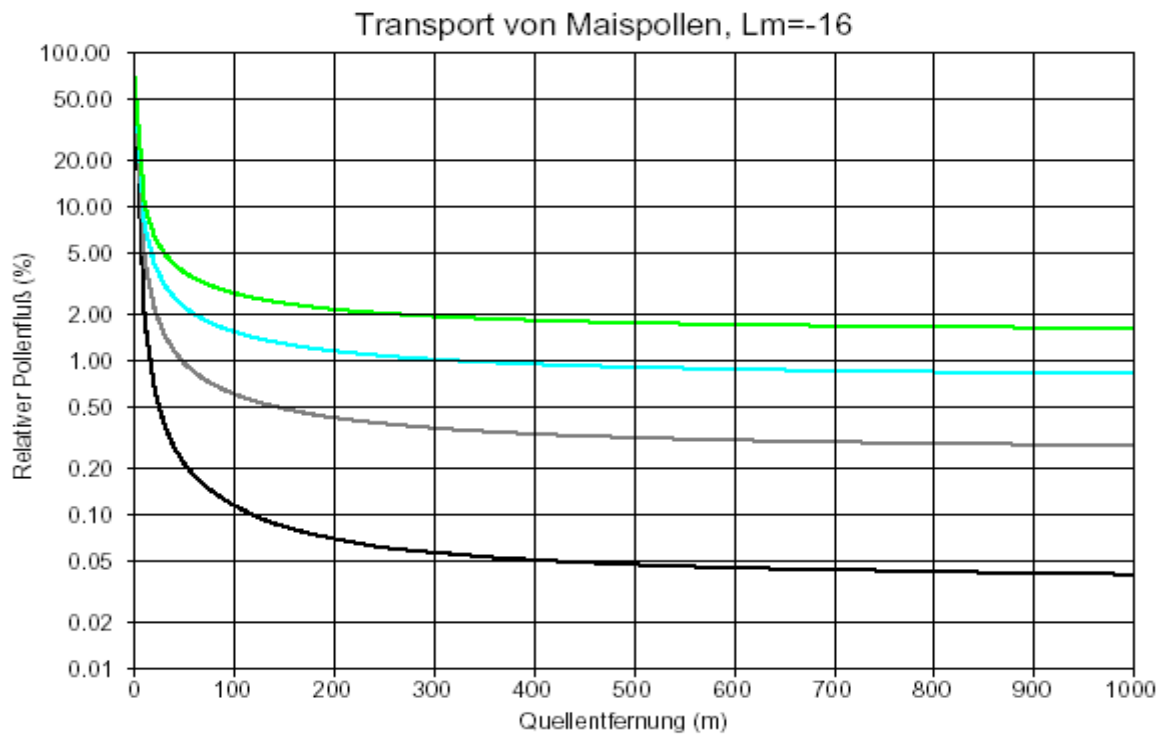


Abb. 3.6: Anteil der über eine bestimmte Entfernung hinaus transportierten Maispollen für die Monin-Obukhov-Länge $L_M = -16$ m und verschiedene Windgeschwindigkeiten u_a : 1,5 m/s (schwarz), 2,0 m/s (grau), 2,5 m/s (türkis), 3,0 m/s (grün).

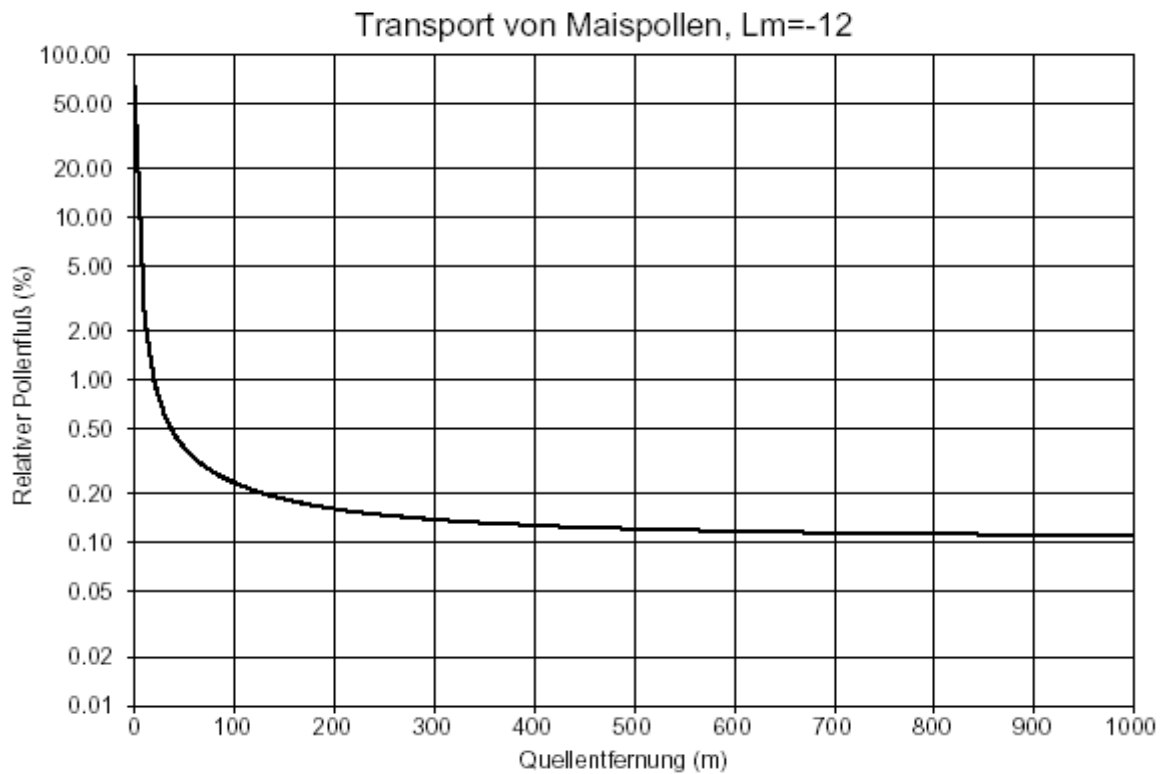


Abb. 3.7: Anteil der über eine bestimmte Entfernung hinaus transportierten Maispollen für die Monin-Obukhov-Länge $L_M = -12$ m (sehr labile Schichtung) und die Windgeschwindigkeit $u_a = 1,5$ m/s.

3.3 Transport bei einem Maisfeld unter typischen Bedingungen

Die im vorangegangenen Abschnitt durchgeführten Testrechnungen zeigen, dass bei sommerlichem Wetter mit einem erheblichen Transport der Maispollen bis über 1.000 m hinaus gerechnet werden muss. Um dies näher zu ermitteln, wurde der Transport für ein angenommen rechteckiges Maisfeld (500 x 500 m²) unter typischen meteorologischen Bedingungen mit Hilfe von Ausbreitungsrechnungen untersucht. Es wurden die bereits zuvor analysierten meteorologischen Zeitreihen über jeweils 2 Monate (Juli und August für die Jahre 2003 und 2004) verwendet. In diesem Zeitraum wurde die Emission auf die Tageszeit 9 bis 14 Uhr (lokale meteorologische Zeit) beschränkt und innerhalb dieser Zeitspanne mit 300 Pollen/(m² s) angenommen.

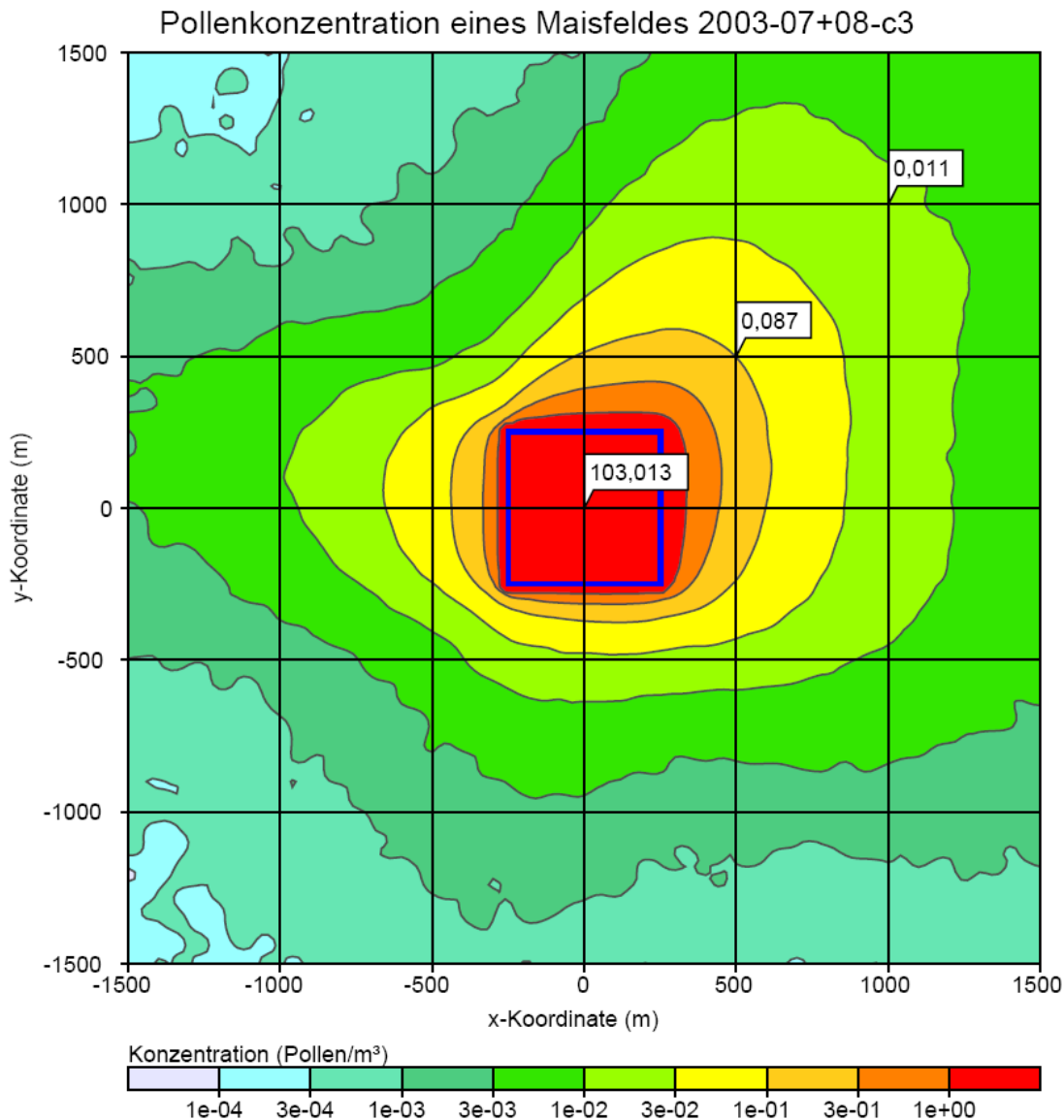


Abb. 3.8: Maispollenkonzentration in Bodennähe ($0 \leq z \leq 1$ m) in der Umgebung eines fiktiven Maisfeldes (blaues Quadrat, 500 x 500 m²), gemittelt über den Zeitraum 2003-07-01 bis 2003-08-31. Meteorologie: USAT-Zeitreihen aus Kap.3.2 für ein landwirtschaftlich geprägtes Gebiet in NRW.

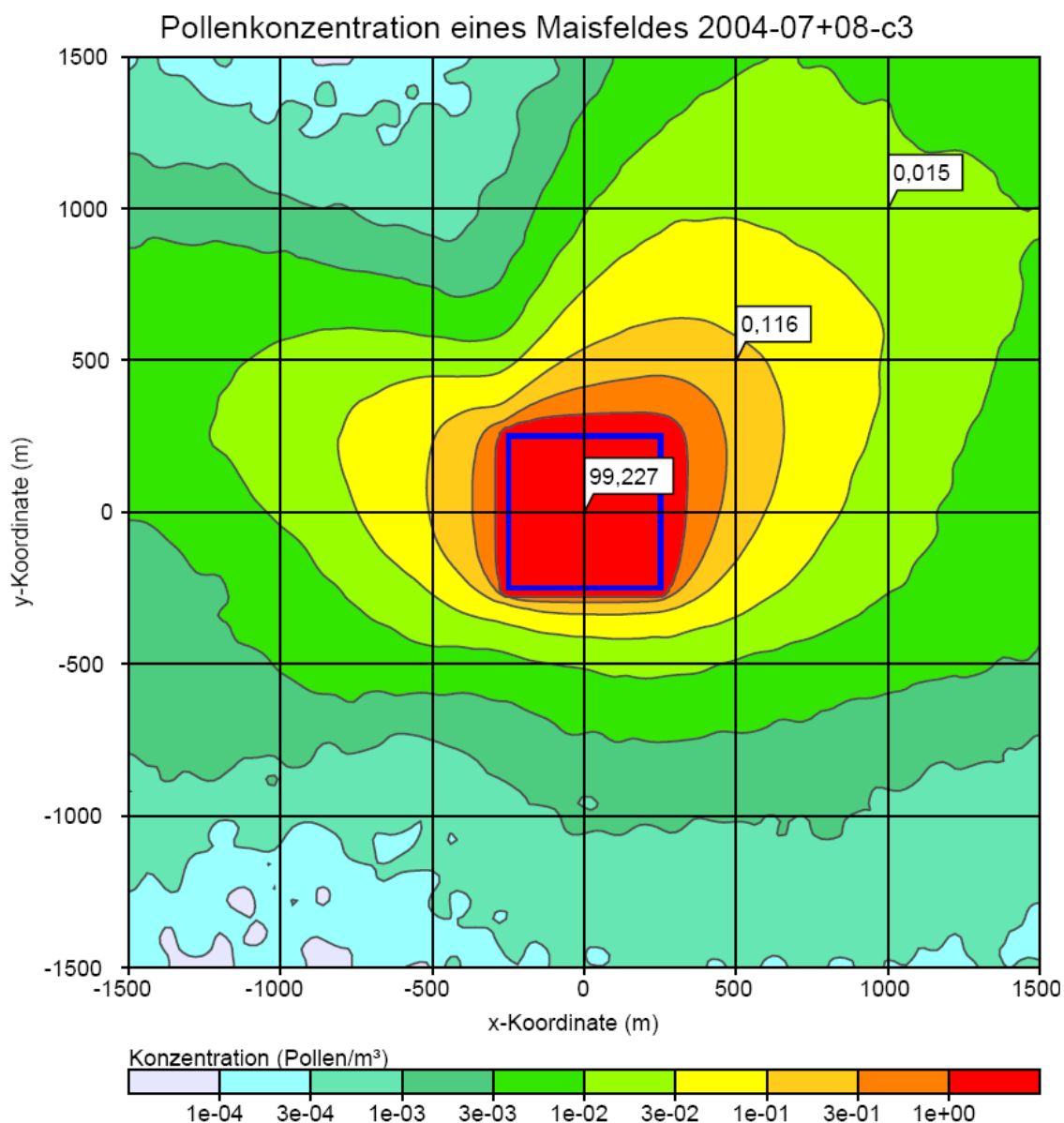


Abb. 3.9: Maispollenkonzentration in Bodennähe ($0 \leq z \leq 1$ m) in der Umgebung eines fiktiven Maisfeldes (blaues Quadrat, 500×500 m²), gemittelt über den Zeitraum 2004-07-01 bis 2004-08-31. Meteorologie: USAT-Zeitreihen aus Kap.3.2 für ein landwirtschaftlich geprägtes Gebiet in NRW.

Die Abb. 3.8 und Abb. 3.9 zeigen die bodennahe Pollenkonzentration für die beiden Jahre 2003 und 2004. Die Pollenkonzentration fällt zwar unmittelbar am Rand des Maisfeldes sehr schnell ab, aber auf niedrigem Niveau gibt es Ausläufer, die sich entsprechend der Hauptwindrichtung (Süd-West) bis über den Rand des Rechengebietes nach Nord-Osten erstrecken. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen für die beiden betrachteten Jahre sind deutlich, aber aus Erfahrung nicht ungewöhnlich.

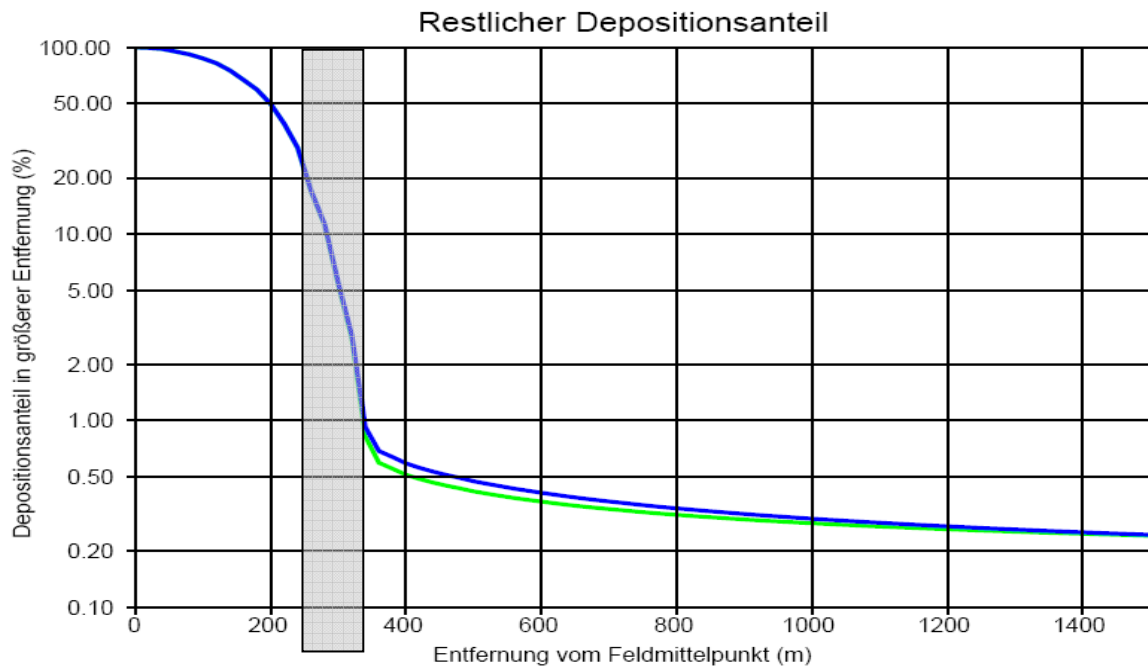


Abb. 3.10: Pollenfluss in der Umgebung eines Maisfeldes bis 1.500 m Entfernung vom Feldmittelpunkt. Aufgetragen ist der Anteil an der Gesamtemission, der in größerer als der aufgetragenen Entfernung, ausgehend vom Mittelpunkt des Maisfeldes (500 x 500 m²), deponiert wird (grün: 2003, blau: 2004). Der Maisfeldrand befindet sich richtungsabhängig in 250 m bis 350 m Entfernung (grau unterlegter Abschnitt).

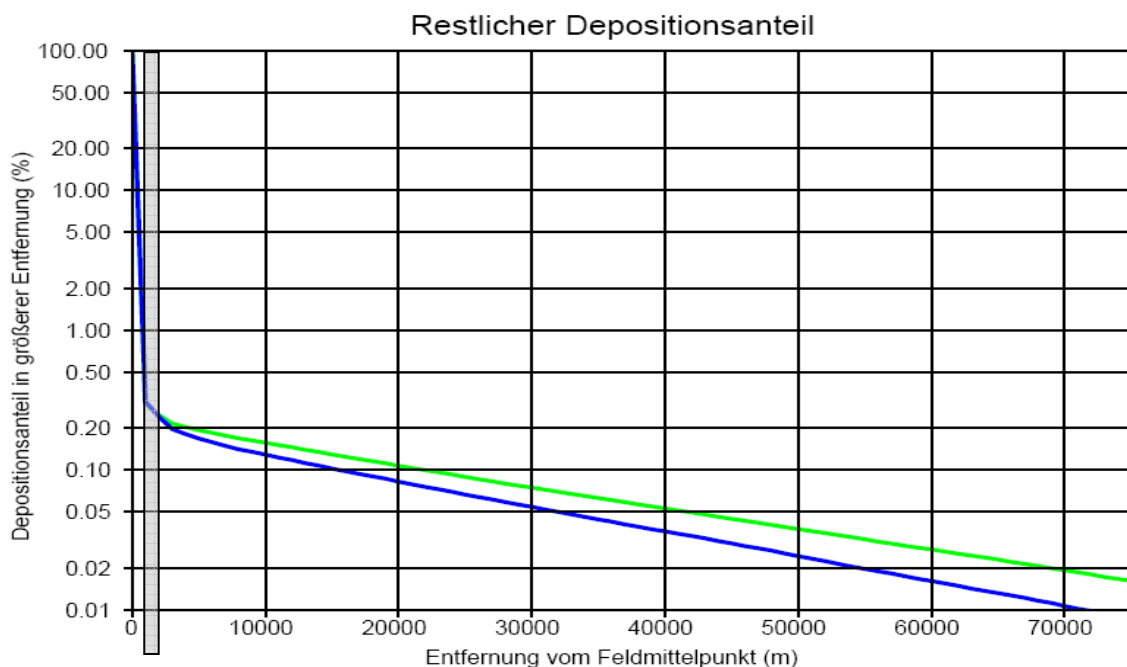


Abb. 3.11: Pollenfluss in der Umgebung eines Maisfeldes bis 75 km Entfernung vom Feldmittelpunkt. Aufgetragen ist der Anteil an der Gesamtemission, der in größerer als der aufgetragenen Entfernung vom Feldmittelpunkt (500 x 500 m²) deponiert wird (grün: 2003, blau: 2004). Der Maisfeldrand befindet sich richtungsabhängig in 250 m bis 350 m Entfernung (grau unterlegter Abschnitt).

Um quantitative Aussagen zu erhalten, welcher Anteil der Pollen wie weit transportiert wird, wurde aus den Simulationsergebnissen der Anteils der Pollen berechnet, die über eine bestimmte Entfernung (Kreis mit dem Mittelpunkt des Feldes als Mittelpunkt) hinaus transportiert werden. Abb. 3.10 zeigt, dass mehr als 99 % der Pollen deponiert sind, wenn die maximale Ausdehnung des Feldes (Kreis mit dem Radius 350 m durch Feldeckpunkte) erreicht ist.¹¹ Aber bis in 1.500 m Entfernung werden immer noch 0,2 % der Pollen transportiert, dies sind im vorliegenden Beispiel 150.000 Pollen pro Sekunde.¹²

Betrachtet man eine größere Entfernungsskala (Abb. 3.11), dann erkennt man einen langsamen exponentiellen Abfall des Pollenflusses, der aber - abhängig von der Wetterlage - noch 0,01 % in 75 km Entfernung betragen kann.

3.4 Entfernungabhängigkeit der bodennahen Konzentration

Für weitere Vergleiche ist anstelle der Darstellung des Gesamtpollenflusses über einen bestimmten Entfernungsbereich hinweg wie im vorigen Abschnitt eine Darstellung der Entfernungabhängigkeit der bodennahen Konzentration (im Folgenden das Mittel zwischen 1 m und 2 m über Grund) zweckmäßig.¹³

Abschnitt 3.4.1 diskutiert die Pollenausbreitung ausgehend von einem Einzelfeld unter den normalen meteorologischen Bedingungen der gemessenen Zeitreihe aus dem vorherigen Abschnitt 3.3. Abschnitt 3.4.2 betrachtet dann die Maispollenausbreitung für einzelne Wittersituationen unter Worst-Case-Annahmen, wobei auch der Einfluss einer thermischen Überhöhung diskutiert wird. Abschnitt 3.4.3 untersucht den Einfluss von mehreren Feldern.

Die Ausbreitungsrechnungen in den Abschnitten 3.4.1 bis 3.4.3 wurden bis in eine Entfernung von 2.000 m mit einer Maschenweite des Rechengitters von praktikablen 20 m durchgeführt. Die angegebene Konzentration in 10 m Entfernung entspricht also einem Mittel über den Entfernungsbereich 0 m bis 20 m von der Feldkante.

Für eine feinere Auflösung des unmittelbaren Nahbereiches müsste auch der Einfluss der Maisfeldkante auf das Strömungsfeld berücksichtigt werden. Das ist mit dem in LASAT integrierten Windfeldmodell zwar möglich, die Rechnungen sind jedoch wesentlich aufwän-

¹¹ Red. Anm.: Da es sich um ein quadratisches Feld handelt, liegt bei einer Kantenlänge von 500 m die Feldkante je nach Richtung zwischen 250 m bis ca. 350 m vom Feldmittelpunkt entfernt. Beim Umkreis von 350 m über die Eckpunkte ist ca. ein Drittel der Fläche außerhalb des Feldes zuzuordnen, so dass die 99% nicht mit der Deposition innerhalb des Feldes gleichzusetzen sind. Bei 250 m, der kürzesten Entfernung vom Feldmittelpunkt zum Feldrand (Innenkreis), sind ca. 80% der Pollen deponiert. Bei 280 m Entfernung, einem flächengleichen Kreis entsprechend, beträgt die Pollenmenge ca. 90%.

¹² Red. Anm.: Der Pollenfluss in 1.000 m Entfernung von der Feldmitte (0.2%) beträgt etwa 1/5 seines Wertes am Feldrand (1%)

¹³ Red. Anm.: Konzentration und Deposition stehen in Verhältnis zueinander, so dass hier die rechnerisch direkt ermittelbare Konzentration für Vergleiche des Ausbreitungsverhaltens der Pollen herangezogen werden kann.

diger.¹⁴ Da in dieser Studie nicht dieser unmittelbare Nahbereich interessiert, wurde hierauf verzichtet.

3.4.1 Mittel über einen längeren Zeitraum bei mittleren Bedingungen, Einzelfeld

Um die Situation im Mittel über einen längeren Zeitraum untersuchen zu können, wurden wie in Abschnitt 3.3 die zwei meteorologischen Zeitreihen durchgerechnet und der Mittelwert der bodennahen Konzentration über die zwei Monate betrachtet. Das Maisfeld (vertikale Ausdehnung 0,5 m, kein thermischer Auftrieb) ist kreisförmig definiert zur einfacheren Festlegung des Abstandes in jeder Himmelsrichtung und hat denselben Flächeninhalt wie ein quadratisches Feld mit 200 m Kantenlänge. Es werden ansonsten die gleichen Parameterwerte wie im vorigen Abschnitt verwendet. Die Konzentrationswerte werden jeweils als Mittelwert über einen vollständigen Kreisbogen um den Feldmittelpunkt bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.12 dargestellt. Für die beiden betrachteten Jahre ergeben sich nur geringfügige Unterschiede.

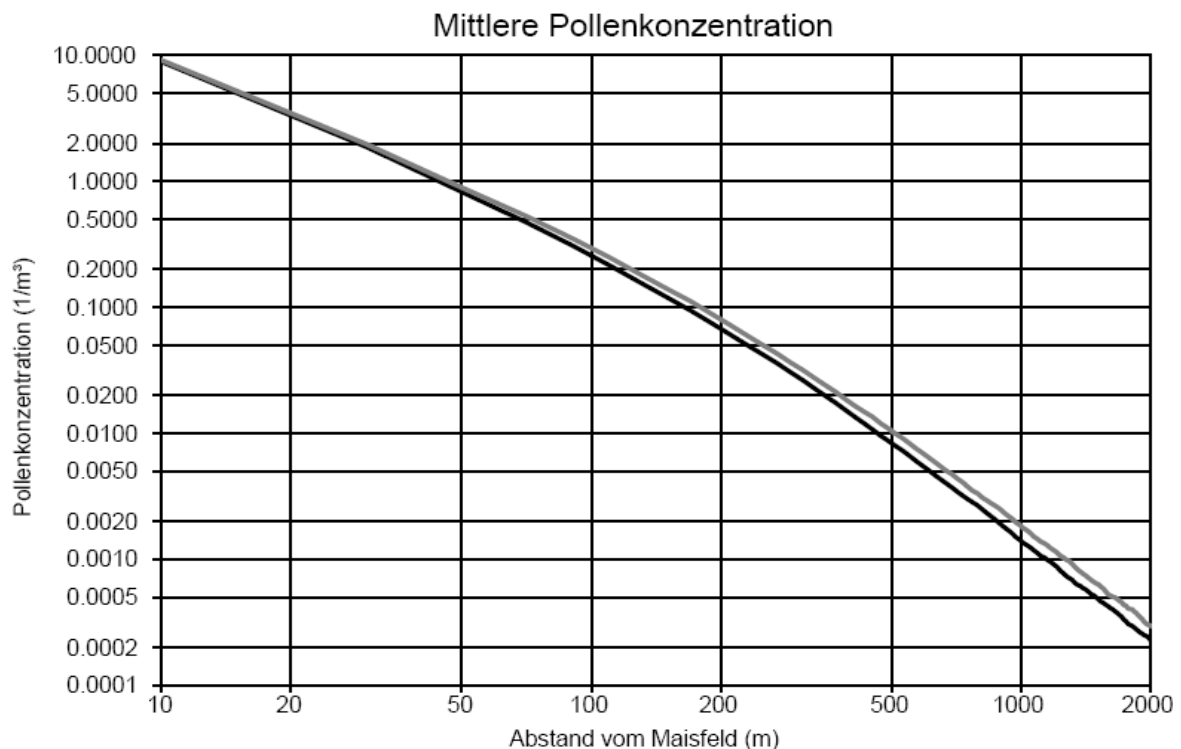


Abb. 3.12: Mittlere bodennahe Konzentration der Maispollen als Funktion der Entfernung vom Rand eines kreisförmigen Maisfeldes für zwei Zeitreihen über jeweils 2 Monate (Juli und August) unter mittleren Bedingungen. Die vertikale Quellausdehnung ist 0,5 m. Schwarz: Jahr 2003; grau: Jahr 2004. Die Konzentrationswerte sind über einen vollständigen Kreisbogen um den Feldmittelpunkt gemittelt.

¹⁴ Red.Anm.: siehe beispielsweise bei Jarosz et al. 2004 und 2005.

3.4.2 Meteorologische Einzelsituationen unter Berücksichtigung von Worst-Case-Annahmen, Einzelfeld

Pollenmessungen zeigen, dass die Ausschüttung der Maispollen in der Regel schlagartig und an wenigen Tagen erfolgt. Dieses Zeitverhalten kann in einer Zeitreihenrechnung berücksichtigt werden, wenn die Zeitreihen von Emission und Meteorologie genau bekannt sind. Die im vorangegangenen Abschnitt und Abschnitt 3 angenommene konstante Emissionsstärke an jedem Tag zwischen 9 und 14 Uhr unterschätzt daher tendenziell den Einfluss einzelner kurzzeitiger Wettersituationen.

Als Worst-Case wird daher der Konzentrationsabfall bei einer einzelnen Wettersituation betrachtet, für die die höchsten Konzentrationswerte zu erwarten sind. Diese Wettersituation ist allerdings nicht eindeutig festlegbar, denn sie hängt von der Entfernung ab, in der man die Konzentrationswerte beurteilt. So ist aufgrund der Abb. 3.1 und Abb. 3.2 zu erwarten, dass schwach labile Schichtung ($L_M = -100$ m, $u_a = 7,5$ m/s) und hohe Windgeschwindigkeit im Entfernungsbereich unter 1 km, stark labile Schichtung ($L_M = -16$ m, $u_a = 3,0$ m/s) dagegen in größerer Entfernung zu höheren Werten führt.

Zusätzlich wird untersucht, wie sich bei sehr labiler Schichtung ein starker thermischer Auftrieb über dem Maisfeld, verursacht durch die geringere Feuchte und damit höhere Temperatur oberhalb der Maispflanzen bei trockenem Wetter, auswirken würde. Hierzu wird in zwei zusätzlichen Rechnungen die vertikale Ausdehnung der Quelle von 0,5 m auf 50 m bzw. 500 m vergrößert. Dieser Wertebereich erscheint bei Vertikalgeschwindigkeiten in Konvektionszellen von 1 bis zu 10 m/s und Transportzeiten über ein Maisfeld von mehreren 10 Sekunden realistisch. Da jeweils nur eine Windrichtung betrachtet wird, wird das Maisfeld in den Simulationen wieder als quadratisch mit der Kantenlänge 200 m angesetzt.

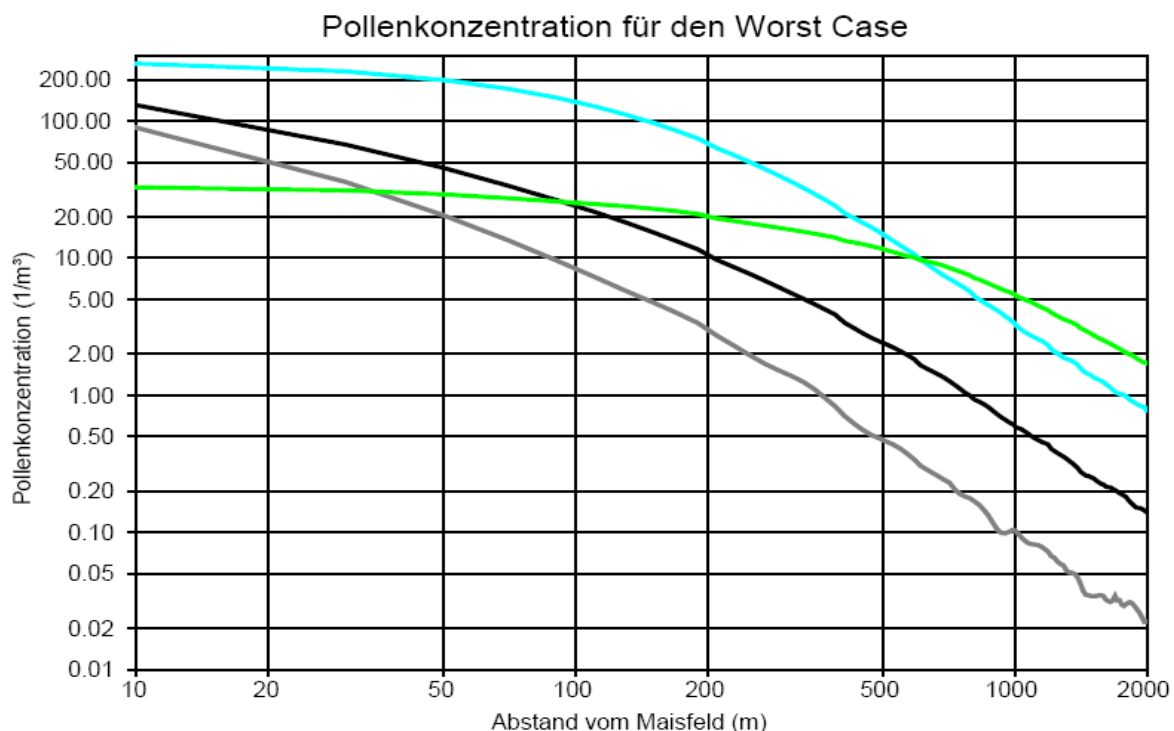


Abb. 3.13: Bodennahe Konzentration in der Fahnenmitte als Funktion der Entfernung vom leeseitigen Feldrand (Einzelfeld) unter Berücksichtigung von Worst-Case-Annahmen. Schwarz: schwach labile Schichtung mit stärkeren Winden ($L_M = -100$ m, $u_a = 7,5$ m/s) und vertikale Quellausdehnung 0,5 m. Die anderen Farben entsprechen stark labiler Schichtung ($L_M = -16$ m, $u_a = 3,0$ m/s) bei unterschiedlicher vertikaler Quellausdehnung (thermische Überhöhung); grau: 0,5 m; türkis: 50 m; grün: 500 m.

Abb. 3.13 zeigt die bodennahe Maispollenkonzentration in der Fahnenmitte als Funktion der Entfernung vom leeseitigen Feldrand. Die Ergebnisse weisen aus, dass sich die Maispollenkonzentration bei stark labiler Schichtung je nach Modellierung der Thermik um bis zu zwei Größenordnungen unterscheiden kann. Eine entsprechende Streuung der Konzentrationswerte ist daher auch bei den Messwerten zu erwarten.

Gegenüber dem in Abschnitt 3.4.1 betrachteten zeitlichen Mittel über eine Zeitreihe von Meteorologie und Emission über zwei Monate sind die Konzentrationswerte hier um bis zu drei Größenordnungen höher. Das liegt daran, dass in Abschnitt 3.4.1 Wettersituationen mit geringem Transport überwiegen, dort nur in etwa 21 % des betrachteten Zeitraums emittiert wird (gegenüber einer konstanten Emission hier), und dort über den gesamten Kreisumfang (also einschließlich der Bereiche abseits der Hauptwindrichtung) gemittelt wird, während hier die Konzentration auf der Fahnenachse betrachtet wird.

3.4.3 Meteorologische Einzelsituationen, Einfluss weiterer Maisfelder

Nach Abb. 3.13 ist für den Fall mit thermischer Überhöhung die Konzentration in 1.000 m Entfernung auf etwa 1/30 ihres Wertes bei 10 m abgefallen (Mittelwert zwischen der grünen und türkisfarbigen Kurve). Das bedeutet, dass ein Dutzend Felder in 1.000 m Entfernung einen Beitrag zur Konzentration liefern können, der von der gleichen Größenordnung ist wie der Beitrag des nächstliegenden Feldes. Dieser Effekt ist umso stärker, je weiter man sich vom Feld entfernt.

Um den Einfluss weiterer Felder auf den Konzentrationsabfall am Messpunkt näher zu untersuchen, wurde in einem einfachen Ansatz, mit dem die Einwirkung benachbarter Felder eher überschätzt wird, wie folgt vorgegangen (zweidimensionale Modellierung mit periodischen Randbedingungen):

- Da die weiteren Maisfelder im Prinzip in jeder Richtung um einen Messpunkt herum liegen können, wurden nur eine Windrichtung und hierbei nur die Maisfelder im Luv des Messpunktes betrachtet.
- Alle Maisfelder wurden im Luv des Messpunktes als Streifen angeordnet. Die Streifen haben eine Ausdehnung von 200 m, eine Flächendeckung von 20 % (d.h. alle 1.000 m ein Streifen) und erstrecken sich im Luv über ein Gebiet von 10 km. Die Flächendeckung ist hoch, aber nicht untypisch für eine Mais-Anbauregion. Quer zur Windrichtung wurde wie in Abschnitt 3.2 mit periodischen Randbedingungen gerechnet, d.h. hier haben die Maisfelder praktisch eine beliebig große Ausdehnung.

Abb. 3.14 zeigt die Ergebnisse der Modellierung. Im Nahbereich bis etwa 100 m Entfernung hat sich der Konzentrationsverlauf im Vergleich zu Abb. 3.13 nur wenig (ohne Überhöhung praktisch gar nicht) verändert. Mit zunehmender Entfernung macht sich dagegen der Einfluss

der weiteren Maisfelder bemerkbar und der Abfall der Maispollenkonzentration ist schwächer als für das Einzelfeld. Ohne thermische Überhöhung (schwarze und graue Kurve) ergibt sich ein ähnlicher Abfall, wie er bei Hofmann (2007) aus Messdaten-Erhebungen abgeleitet wurde (siehe Abb. 4.1). Kommt thermische Überhöhung hinzu, ist der Abfall fast vollkommen unterdrückt.

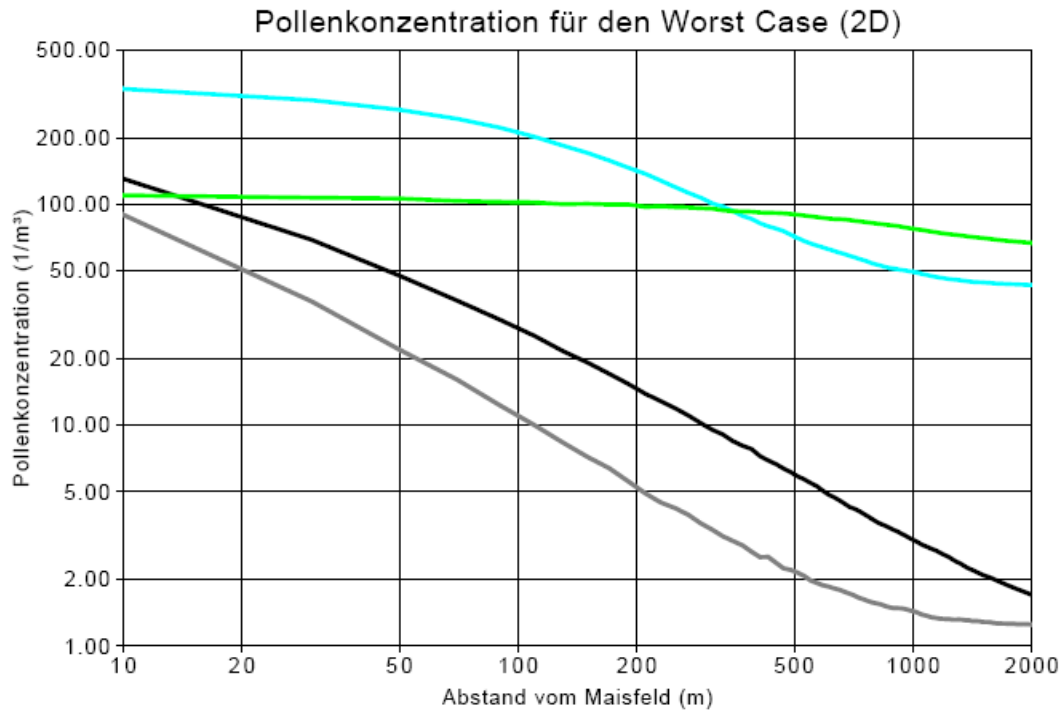


Abb. 3.14: Bodennahe Konzentration als Funktion der Entfernung vom Feldrand für mehrere Felder (20% Feldabdeckung Maisanbau, 2D-Modellierung). Einzelne Wettersituationen wie in Abb. 3.13: schwarz: Schwach labile Schichtung ($L_M = -100$ m, $u_a = 7,5$ m/s) und vertikale Quellausdehnung 0,5 m. Die anderen Farben entsprechen stark labiler Schichtung ($L_M = -16$ m, $u_a = 3,0$ m/s) bei unterschiedlicher vertikaler Quellausdehnung; grau: 0,5 m; türkis: 50 m; grün: 500 m.

3.5 Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse

Die Ergebnisse aus Abschnitt 3.2 für meteorologische Einzelsituationen zeigen, dass unter normalen Ausbreitungsbedingungen mehr als 0,1% der freigesetzten Pollen über Entfernungen von mehreren Kilometern transportiert werden können.

Im zeitlichen Mittel über viele meteorologische Situationen (Abschnitte 3.3 und 3.4.1) fällt die Pollenkonzentration mit der Entfernung stärker ab als für eine meteorologische Einzelsituation. In diesen Betrachtungen wurde allerdings die starke zeitliche Varianz der Pollenausschüttung nicht berücksichtigt, durch die einzelne, den Pollentransport begünstigende Wetter-situationen (Worst-Cases) mehr Einfluss gewinnen können.

Für so einen Worst-Case (Abschnitt 3.4.2) ist der Konzentrationsabfall geringer als im Langzeitmittel über viele meteorologische Situationen und die bodennahe Pollenkonzentration in 1.000 m Entfernung ist um fast zwei Größenordnungen höher als in dem in Abschnitt 3.4.1 bestimmten Langzeitmittel. Die Modellrechnungen zeigen, dass eine thermische Überhöhung der Pollenwolke, verursacht z.B. durch Konvektion und Thermik, den Abfall der Pollenkonzentration mit der Entfernung erheblich abschwächen kann (Abschnitt 3.4.2).

Modellrechnungen, in denen der Einfluss benachbarter Felder berücksichtigt wird (Abschnitt 3.4.3), zeigen, dass diese ab einer Entfernung von einigen 100 m eine Rolle spielen und dem Konzentrationsabfall entgegenwirken. Dieser Effekt ist bei einem Vergleich mit der Messdatenerhebung (Hofmann 2007) ebenfalls zu berücksichtigen, da dort normale, komplexe Anbausituationen zu Grunde lagen.

Neben den Aussagen über die Einflussgrößen, welche die Pollenausbreitung begünstigen, zeigen die durchgeführten Modellrechnungen, dass es grundsätzlich möglich ist, den aus der Messdatenerhebung (Hofmann 2007) abgeleiteten Konzentrationsabfall zu reproduzieren, wenn thermische Effekte oder der Einfluss weiterer Felder oder eine Kombination aus beidem berücksichtigt werden. Die Berechnungen zeigen, dass unter bestimmten Bedingungen (Worst-Case) der Konzentrationsabfall von Maispollen aus Einzelfeldern, insbesondere in einem Bereich bis 1 km, geringer ausfallen kann als aus der Messdatenerhebung hervorgeht. Die damit verbundene höhere Konzentration von Maispollen in Entfernungen von 100-1.000 m kann, wie bereits ausgeführt, bis zu zwei Größenordnungen über den Langzeitmittelwerten liegen.

Für eine detailliertere Betrachtung und Abschätzung der Pollenausbreitung unter Worst-Case-Annahmen werden folgende begleitende Messungen und Untersuchungen empfohlen:

- Zeitaufgelöste Messung der Meteorologie, am sinnvollsten mit einem Ultraschall-Anemometer, das auch detaillierte Informationen über den Stabilitätszustand der Atmosphäre liefert.
- Erfassung von Zeitgang und Stärke der Pollenausschüttung parallel zum Zeitgang der Meteorologie.
- Erfassung der Lage des betrachteten Feldes und Lage weiterer Felder, auf denen zeitgleich eine Pollenausschüttung stattfindet.



- Abschätzung des thermischen Auftriebes über dem Maisfeld auf Basis begleitender meteorologischer Messungen, beispielsweise mit Hilfe von zwei Ultraschall-Anemometern (eines über dem Maisfeld, eines daneben).

4 Vergleich der Ergebnisse aus der Ausbreitungsmodellierung für Einzelfelder unter Worst-Case-Annahmen mit den Freilandmessdaten unter normalen Anbaubedingungen

Die vorangestellten Ergebnisse aus der Ausbreitungsmodellierung für Maispollen für Einzelfelder unter Berücksichtigung von Worst-Case-Annahmen sollen im Folgenden mit den Ergebnissen aus der Regressionsanalyse von überregionalen Freilandmessungen zur Maispollendeposition (siehe Abb. 4.1) verglichen werden. Die Regressionsanalyse basiert auf Daten zur Maispollendeposition in Relation zum Abstand vom nächstgelegenen Maisfeld, die an 122 Messpunkten in den Jahren 2001 bis 2006 in verschiedenen geographischen Gebieten Deutschlands und der Schweiz nach demselben, gemäß VDI-Richtlinie 4330 Bl. 4 (2007) standardisierten Verfahren der Pollensammlung mit dem PMF erhoben wurden.

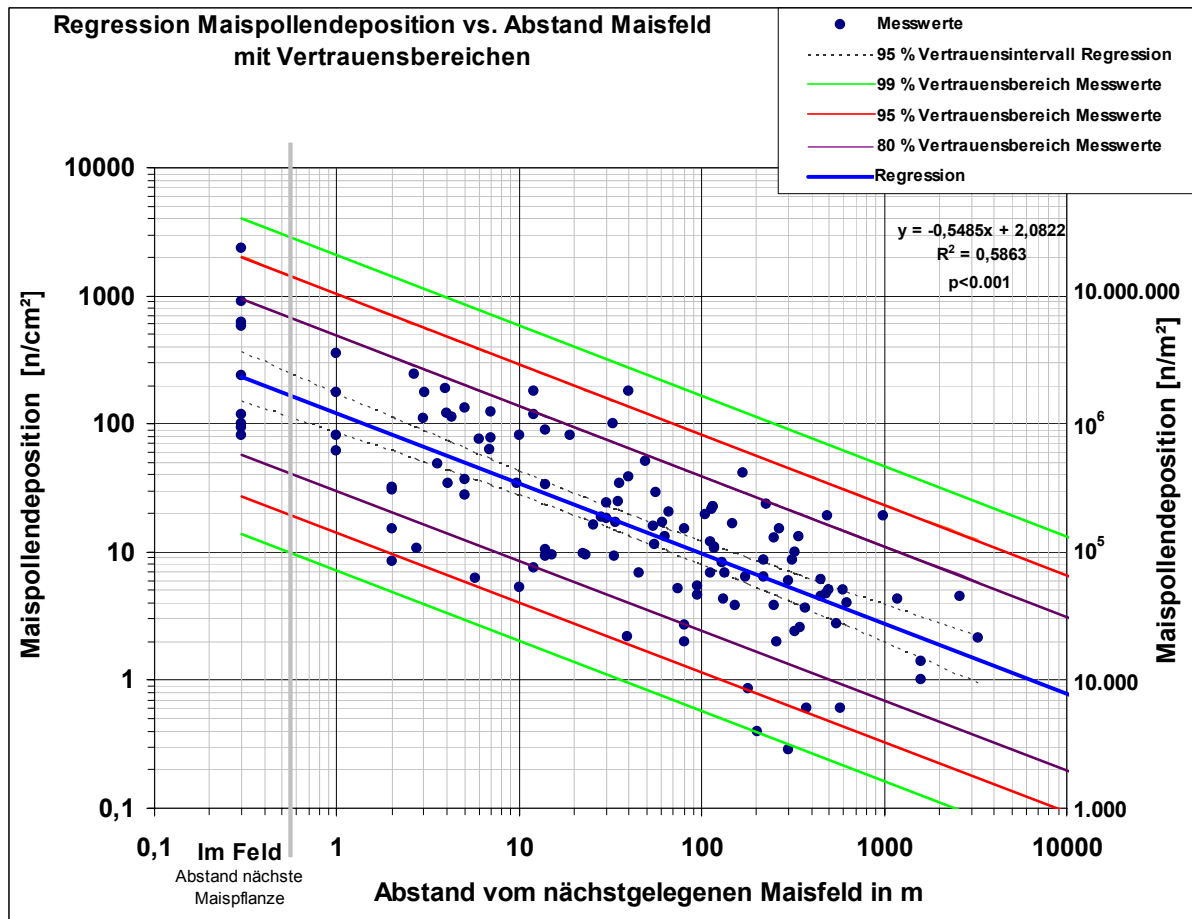


Abb. 4.1: Ergebnisse der Regressionsanalyse zur Beziehung zwischen der Maispollendeposition und dem Abstand vom nächstliegenden Maisfeld (aus Hofmann 2007). Die Datenbasis beruht auf 122 Messpunkterhebungen aus Deutschland und der Schweiz aus den Jahren 2001-2006. Die Messungen mittels PMF (VDI-Richtlinie 4330 BL. 3, 2007) umfassen den gesamten Blühzeitraum.

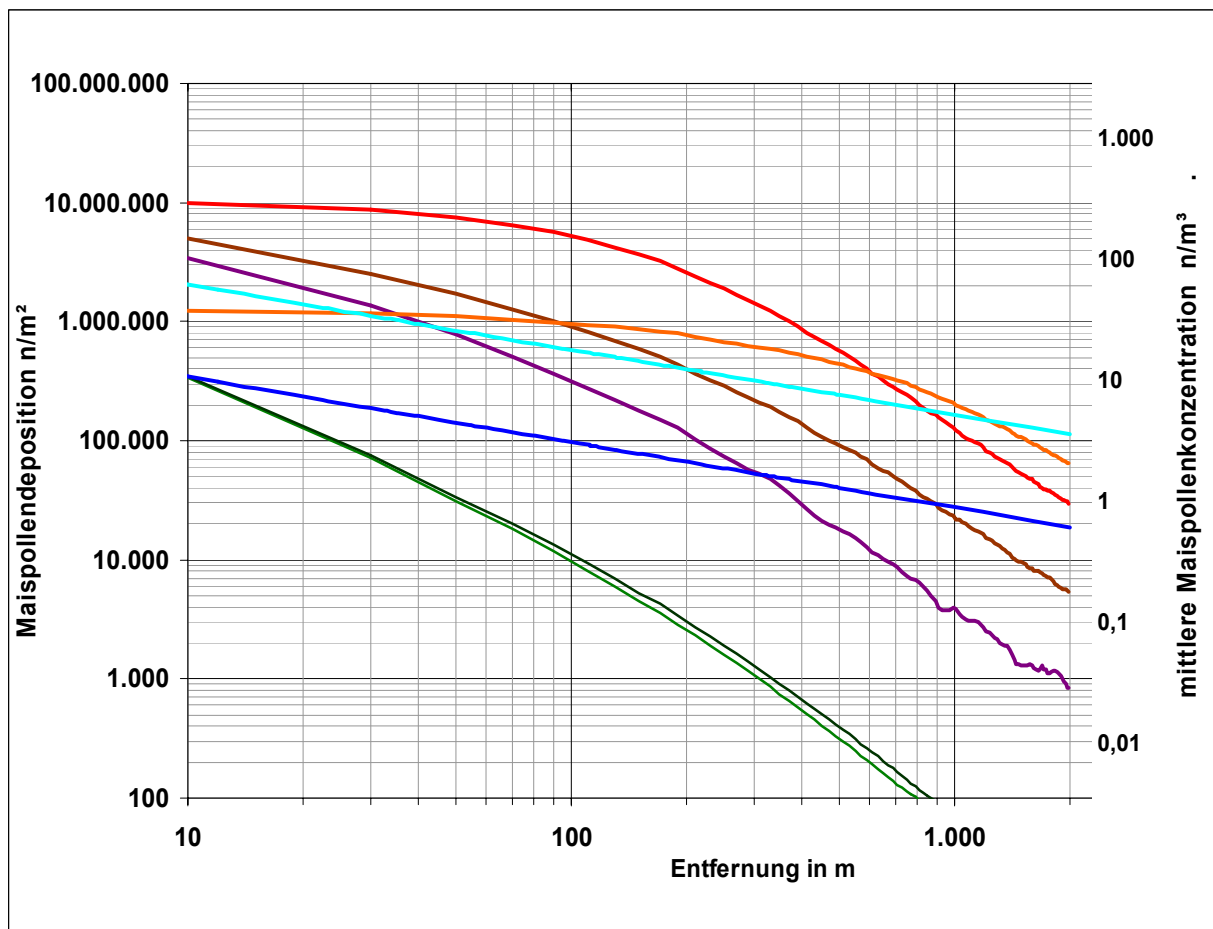


Abb. 4.2: Vergleich der Gradienten aus der Ausbreitungsmodellierung von Maispollen für Einzelfelder unter Berücksichtigung von Worst-Case-Annahmen mit den Ergebnissen aus der Regressionsanalyse von Freilandmessungen zur Maispollendeposition (Hofmann 2007) – Vergleich der Gradienten, Bezug der mittleren Kurven bei 10 m Entfernung vom Feldrand. Ausbreitungsrechnungen: Konzentration; Freilandmessungen: Deposition; Entfernung vom Feldrand in m:

- grüne Kurven: Ausbreitungsmodellierung, Einzelfeld, mittlere Annahmen, gemittelt über Zeitraum und alle Richtungen (aus Abb. 3.12)
- braun: Ausbreitungsmodellierung, Einzelfeld, Einzelsituation (Worst-Case-Annahme), schwach labile Schichtung mit stärkeren Winden ($L_M = -100$ m, $u_a = 7,5$ m/s) und vertikale Quellausdehnung 0,5 m (aus Abb. 3.13)
- lila: Ausbreitungsmodellierung, Einzelfeld, Einzelsituation (Worst-Case-Annahme), stark labile Schichtung ($L_M = -100$ m, $u_a = 3,0$ m/s) und Überhöhung 0,5 m (aus Abb. 3.13)
- orange: Ausbreitungsmodellierung, Einzelfeld, Einzelsituation (Worst-Case-Annahme), stark labile Schichtung ($L_M = -100$ m, $u_a = 3,0$ m/s) und Überhöhung 500 m (aus Abb. 3.13)
- rot: Ausbreitungsmodellierung, Einzelfeld, Einzelsituation (Worst-Case-Annahme), stark labile Schichtung ($L_M = -100$ m, $u_a = 3,0$ m/s) und Überhöhung 50 m (aus Abb. 3.13)
- blau: Freilandmessungen, mittlere Regressionsgerade (aus Abb. 4.1)
- cyan: Freilandmessungen, oberes 90%-Vertrauensintervall für Einzelfälle (aus Abb. 4.1)

In Abb. 4.2 werden die Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierung denen aus den Freilandmessungen gegenübergestellt. Da eine Abschätzung der absoluten Deposition auf Grund der zu treffenden Annahmen (z.B. Quellstärke) mit entsprechenden Unwägbarkeiten verbunden wäre, wurde ein Gradientenvergleich der Ergebnisse aus der Ausbreitungsrechnung zu den Freilandmessdaten vorgenommen. Der Bezug der Größen erfolgte hierbei anhand der jeweils mittleren Kurven bei 10 m Entfernung¹⁵, so dass die mittlere Konzentration aus der Simulation für Einzelfelder (grüne Kurven) auf das statistische Mittel der Maispollendeposition aus den Freilandmessdaten (blaue Regressionsgerade der Freilanddaten) bei 10 m Entfernung vom Feldrand bezogen wurde und die Kurven im weiteren Verlauf über die Entfernung (Gradienten) verglichen werden können.

In Abb. 4.2 sind die Ergebnisse aus der Modellierung zu einer Ausbreitungssituation als mittlere Situation (Kurven: hellgrün, dunkelgrün; vgl. Abb. 3.12) sowie die Simulationen zu den Worst-Case-Annahmen (Windstärke, thermischer Auftrieb) (Kurven: rot, orange, braun, violett, vgl. Abb. 3.13) dargestellt. Für die über die PMF-Messungen im Freiland ermittelte Maispollendeposition über den Blühzeitraum sind die Ergebnisse der statistischen Regressionsanalyse für den mittleren Zusammenhang zur Entfernung (blaue Gerade) eingezeichnet sowie das dazu gehörige obere 90%-Vertrauensintervall (cyane Linie). Die zu den Ergebnissen der Ausbreitungsmodellierung korrespondierende Einheit der Maispollenkonzentration [n Maispollen/ m^3] wird über die rechte senkrechte Achse gekennzeichnet. Die linke senkrechte Achse gibt die über die PMF-Messungen im Freiland ermittelte Maispollendeposition über den Blühzeitraum in n Maispollen/ m^2 an.

Die Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierung im Vergleich zu den Freilandmessungen zeigen, dass die Verläufe für die klassische Abschätzung für Einzelfelder unter normalen mittleren Verhältnissen (grüne Kurven) steiler abfallen als die mittlere Regressionsgerade der Freilandmessungen (blaue Kurve) sich unter normalen komplexen Anbauverhältnissen real darstellt.

Die Ergebnisse dieser, weitergehenden, Modellierungen zeigen jedoch auch, dass Abschätzungen, die bestimmte Worst-Case-Annahmen berücksichtigen, erheblich von der mittleren Betrachtung abweichen. Im Vergleich führen Simulationen, die Thermik oder Feldüberlagerungen bzw. Kombinationen berücksichtigen, zu einem wesentlich flacheren Abfall der Konzentrationskurve und somit zu höheren Depositionswerten in Entfernungen von 100-1000 m. Die Simulationsergebnisse unter Worst-Case-Annahmen können dabei zu flacheren Gradienten und damit zu höheren Depositionen führen als dies über die Freilandmessungen zu erwarten wäre. Erst in ca. 800 – 1.200 m Entfernung beginnen die Kurven für die Worst-Case-Annahmen unter Berücksichtigung thermischer Überhöhung das obere 90%-Vertrauensintervall der Freilandmessungen zu schneiden. Damit weist der Vergleich der Gradienten aus, dass die Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierung unter Worst-Case-Annahmen bis in den 1-km-Abstandsbereich deutlich ungünstiger ausfallen können als das obere 90%-Vertrauensintervall aus den Freilandmessungen.

Dies kann damit begründet werden, dass die Ausbreitungsrechnungen unter mittleren Verhältnissen besondere biologische und meteorologische Aspekte, die bei der Maispollenaus-

¹⁵ gemäß Rechengitter der Modellierung nächster Mittelwert vom Feldrand (0-20 m) (siehe Kap. 3).

breitung als relevant diskutiert werden, nicht angemessen berücksichtigt. Weiterhin repräsentieren die Freilanddaten normale Anbauverhältnisse, die Einzelfelder bis hin zu komplexen Mehrfeldsituationen einschließen, so dass mit Überlagerungseffekten vor allem im weiteren Entfernungsbereich zu rechnen ist.

Für Mais wurde der flachere Gradient von Freilandmessdaten im Vergleich zur Ausbreitungsmodellierung unter mittleren Bedingungen, auch in Bezug auf Einzelfelder, mehrfach in der Literatur beschrieben (Aylor et al. 2003; Loos et al. 2003, Brunet et al. 2003; Richter & Seppelt 2004; Boehm et al. 2008).

Die Ergebnisse dieses Vorhabens bestätigen, dass die Ausbreitung von Maispollen unter den Bioaerosolen eine gewisse Sonderstellung einnimmt. Die Modellierung bedarf daher eine genauere Datengrundlage als üblich.

5 Bedeutung der Ergebnisse für die Expositions- und Risikoabschätzung

Im vorliegenden Gutachten wurde herausgearbeitet, welche Faktoren die Ausbreitung von Maispollen begünstigen. Hierzu wurden die Einflüsse auf Intensität und raum-zeitliche Variation von Pollenschüttung und –deposition betrachtet und Worst-Case-Annahmen abgeleitet. Nachfolgend wurden bestimmte meteorologische Situationen und Feldanordnungen wurden per Ausbreitungsmodellierung näher untersucht und die Ergebnisse mit den mehrjährigen Freilanddaten des PMF verglichen, die unter normalen Anbaubedingungen gewonnen wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass unter Worst-Case-Annahmen die Ausbreitungsgradienten der Maispollen ausgehend von einzelnen Freisetzungsfeldern deutlich ungünstiger ausfallen können als aus den Freilandmessungen des PMF unter normalen Anbaubedingungen zu erwarten wäre. Erst im km-Bereich (ca. 800 m bis 1.200 m) nähern sich die Kurven unter Worst-Case-Annahmen dem oberen 90%-Vertrauensintervall für Einzelfälle aus den Freilandmessdaten an und unterschreiten es.

Für eine Validierung der Modellergebnisse fehlen derzeit geeignete Freilanddaten zur Ausbreitung und Deposition von Maispollen. Weiterhin fehlen meteorologischen Feindaten, die Aufschluss über die Bedeutung thermischer Konvektionszellen über Maisfelder geben.

Die Abschätzung der Exposition von Nichtzielorganismen spielt für die Risikoabschätzung eine wichtige Rolle. Das gilt sowohl für GVO, die zur allgemeinen Marktzulassung beantragt werden, als auch für experimentelle GVO.

Zur Prüfung, inwieweit eine Pollenexposition von Schutzgebieten in der Umgebung von GVO-Maisanbauflächen gegeben ist, wurden 2007 und 2008 in Brandenburg im FFH-Schutzgebiet Ruhlsdorfer Bruch mit der technischen und biologischen Pollensammlung gemäß VDI-Richtlinien 4330 Bl. 3 und 4 entsprechende Untersuchungen durchgeführt (Landesumweltamt Brandenburg 2008; Hofmann et al. 2008; Landesumweltamt Brandenburg 2009 [in Arbeit]). Die Untersuchungen belegten hierbei erhebliche Maispolleneinträge aus dem umgebenden Bt-Maisanbau bis in das Zentrum des Schutzgebietes hinein. Hierbei wurden Entfernungen bis zu 240 m vom Feldrand berücksichtigt, die Ergebnisse zur Maispollendeposition fügten sich in beiden Jahren in die in Abb. 4.1 dargestellte Regressionsbeziehung aus Hofmann (2007).

Bis zum Vorliegen einer entsprechend hinreichenden Datengrundlage empfehlen wir vorsorglich ausreichend große Abstände zwischen GVO-Flächen und Schutzgebieten einzuhalten. Beurteilt man die Ergebnisse des vorliegenden Gutachtens, bedeutet dies konkret, dass zur Abschätzung der Exposition ausgehend von einzelnen Freisetzungsfeldern unter Worst-Case-Annahmen die oberen Vertrauensbereiche der PMF-Freilandmessungen (Hofmann 2007), die unter normalen, komplexen Anbaubedingungen gewonnen wurden, bis in den 1-km-Bereich herangezogen werden können.

Um für Einzelfälle mit einer 95%-Sicherheit auszuschließen, dass höhere Expositionen unter Worst-Case-Annahmen auftreten, wäre das obere 90%-VI aus der Regressionsanalyse der

PMF-Messungen heranzuziehen. Erst ab einer Entfernung von ca. 800 bis 1.200 m ist plausibel anzunehmen, dass auch unter Worst-Case-Annahmen aus Einzelfeldern das Risiko unter die Schwelle des empirisch ermittelten 90%-Vertrauensintervalls für Einzelfälle aus den PMF-Freilandmessungen absinkt. Bis in diesen Entfernungsbereich können unter Worst-Case-Annahmen erheblich höhere Einträge vorkommen, wobei die Überschreitungen ohne genauere Datenbasis derzeit nicht exakt abgeschätzt werden können.

Die Anwendung von Maispollenausbreitungsrechnungen mit LASAT für die Risikobewertung ist grundsätzlich zielführend. Das Gutachten legt jedoch nahe, dass für eine Anwendung noch bestimmte Anpassungen der Modellierung erfolgen sollten, die detailliertere Daten zum biologischen Blüh- und Ausbreitungsverhalten von Maispollen sowie zu den mikrometeorologischen Bedingungen über Maisfelder einbeziehen.



6 Literatur

- Axenfeld, F., Janicke, L. (1884): Entwicklung eines Modells zur Berechnung des Staubbiederschlags. Forschungsbericht 104 02 562, Dornier System GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes
- 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., 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
- 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. (2002): Settling speed of corn (*Zea mays*) pollen. *J. Aerosol Sci.* 33: 1599–1605
- Bahmann, W., Schmonsees, N., Janicke, L. (2006): Studie zur Anwendbarkeit des Ausbreitungsmodells AUSTAL2000 mit Windfeldmodell TALdia im Hinblick auf die Gebäudeeffekte bei Ableitung von Rauchgasen über Kühltürme und Schornsteine. VGB Forschungsprojekt Nr. 262. http://www.vgb.org/data/vgborg_/Forschung/FE262.pdf
- 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
- Boehm, M.T., Aylor, D.E., Shields, E.J. (2008): Maize Pollen Dispersal under Convective Conditions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Volume 47 (1), pp. 291-307.
- Bøhn, T., Primicerio, R., Hessen, D.O., Traavik, T. (2008): Reduced fitness of *Daphnia magna* fed a Bt-transgenic maize variety. *Archives of Environmental toxicology and chemistry*. Published online 18. march.: DOI 10.1007/s00244-008-9150-5
- 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 gravity sampling, counting and volumetric interpretation of results. *Allergy* 17: 79-86
- Edmonds, R. L. (1979): *Aerobiology: The Ecological systems approach*. US/IBP Synthesis 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 distances 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

- Fonseca, A.E.; Westgate, M.E.; Grass, L.; Dornbos, D.L. (2003): Tassel Morphology as an Indicator of Potential Pollen Production in Maize. Online. Crop Management doi: 10.1094/CM-2003-0804-01-RS 20.4.2008
- 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
- Hilbeck, A., Jänsch, S., Meier, M., Römbke, J. (2008): Analysis and validation of present ecotoxicological test methods and strategies for the risk assessment of genetically modified plants. BfN-Skripten 236
- 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
- Hirtl, M., Baumann-Stanzer, K. (2007): Evaluation of two dispersion models (ADMS-Roads and LASAT) applied to street canyons in Stockholm, London and Berlin. *Atmospheric Environment* 41, 5959-5971
- Hofmann (2007): Kurzgutachten zur Abschätzung der Maispollendeposition in Relation zur Entfernung von Maispollenquellen mittels technischem Pollensammler PMF. BfN, Bonn. www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/agrogentechnik/07-05-31_Gutachten_Pollendeposition_end.pdf
- 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
- Hofmann, F.; Epp, R.; Kalchschmid, A.; Kruse, L.; Kuhn, U.; Maisch, B.; Müller, E.; Ober, S.; Radtke, J.; Schlechtriemen, U.; Schmidt, G.; Schröder, W.; von der Ohe, W.; Vögel, R.; Wedl, N.; Wosniok, W. (2008a): GVO-Pollenmonitoring zum Bt-Maisanbau im Bereich des NSG/FFH-Schutzgebietes Ruhlsdorfer Bruch. *Z. Umweltwissenschaften Schadstoffforschung* 20 (4), 275 - 289
- Janicke, L. (1983): Particle simulation of inhomogeneous turbulent diffusion. *Air Pollution Modeling and its Application, II*, (ed. Weber). Plenum Press, N.Y., 527-535.
- Janicke, L. (1985): Particle simulation of dust transport and deposition and comparison with conventional models. *Air Pollution Modeling and its Application, IV*, (ed. C. de Wispelaere). Plenum Press, N.Y., 759-769
- Janicke, L. (1987): Echtzeit-Ausbreitungsrechnung mit dem Lagrange-Modell LASAT. Fünftes Symposium über die Kernreaktorfernüberwachung. Karlsruhe, 4.–5. Mai
- Janicke, L., Janicke, U. (2000): Vorschlag eines meteorologischen Grenzschichtmodells für Lagrangesche Ausbreitungsmodelle. *Berichte zur Umweltphysik Nummer 2, Auflage 1*, Ingenieurbüro Janicke, ISSN 1439-8222.
- Janicke, L., Janicke, U. (2003): Entwicklung eines modellgestützten Beurteilungssystems für den anlagenbezogenen Immissionsschutz. UFOPLAN 200 43 256, im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA).
- Janicke, U., Janicke, L. (2004): Weiterentwicklung eines diagnostischen Windfeldmodells für den anlagenbezogenen Immissionsschutz (TA Luft). UFOPLAN 200 43 256, im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA).
- Janicke, U., Janicke, L. (2007): Lagrangian particle modeling for regulatory purposes; A survey of recent developments in Germany. *Proceedings of the 11th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modeling for Regulatory Purposes*, Cambridge, England. Siehe <http://www.harmo.org>
- 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

- Kuparinen, A. (2006): Mechanistic models for wind dispersal. Review. *Trends in Plant Science* 11(6): 296-301
- Kuparinen, A., Schurr, F., Tackenberg, O., O'Hara, R.B (2007): Air mediated Pollen flow from genetically modified to conventional crops. *Ecological Applications* 17(2): 431-440
- Landesumweltamt Brandenburg (2008): Durchführung eines Pollenmonitorings von Mais im Naturschutzgebiet Ruhlsdorfer Bruch 2007. Fachbeiträge des Landesumweltamtes Brandenburg, Heft 109, Potsdam: http://www.mluv.brandenburg.de/cms/media.php/2320/fb_109.pdf (Juli 2008)
- 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
- Nowakowski, J.; Morse, R. (1982): The behaviour of honey bees in sweet corn fields in New York state. *American Bee Journal*, January: 13-16.
- 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
- Paterniani, E.; Stort, A.C. (1974): Effective maize pollen dispersal in the field. *Euphytica*, 23: 129 - 134
- 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. (1979): Sampling techniques in aerobiology. In: Edmonds, R.L.: *Aerobiology: The Ecological systems approach*. US/IBP Synthesis 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
- Reiber, M. (2008): Wetterkunde. In: *Die Bedeutung des Windes für das Fliegen und Ballonfahren*, Teil 6. (www.DrMReiber.de, 20.5.2008)
- Richter, O.; Seppelt, R. (2004): Flow of genetic information through agricultural ecosystems: a generic modelling framework with application to pesticide-resistance weeds and genetically modified crops. *Ecological Modelling* 174: 55-66
- Rosi-Marshall, E.J.; Tank, J.L.; Royer, T.V.; Whiles, M.R.; Evans-White, M.; Chambers, C.; Griffiths, N.A.; Pokelsek, J.; Stephen, M.L. (2007): Toxins in transgenic crop byproducts may affect headwater stream ecosystems. *Proc Natl Acad Sci USA* 104(41):16,204–16, 208
- Sachverständigenrat für Umweltfragen [SRU] (2008): *Umweltgutachten 2008 – Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels*. Erich Schmidt Verlag, Berlin. http://www.umweltrat.de/02gutach/download02/umweltg/UG_2008.pdf (Juni 2008)
- 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
- TA LUFT (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24.06.2002. *GMBI.* 2002, Heft 25-29, S.511-605. www.bmu.de/files/taluft.pdf.



- 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 Research Unit, University College Worcester: <http://www.soilassociation.org> [→Library → GMO] Jan. 2000
- Tully, A. (1985): Sicherheitsanalyse der Transporte von radioaktiven Materialien für den Verkehrsträger Straße. Dornier System GmbH im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie. Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Fachband 8
- VDI-Richtlinie 3782 Blatt 5 (2006): Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Depositionsparameter. Beuth-Verlag, Berlin. -
- VDI-Richtlinie 3945 Blatt 3 (2000): Umweltmeteorologie; Atmosphärische Ausbreitungsmodelle; Partikelmodell. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI-Richtlinie 4330 Blatt 3 (2007): Monitoring der Wirkungen von gentechnisch veränderten Organismen (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
- Zscheischler, J. (1990): Handbuch Mais. DLG-Verlag Frankfurt (Main).