

Modellierung der Ausbreitung von Ambrosiapollen mit COSMO-ART

Diplomarbeit im Fach Meteorologie

vorgelegt von

Katrin Zink

August 2009

INSTITUT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMAFORSCHUNG
UNIVERSITÄT KARLSRUHE (TH) / FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Diese Arbeit möchte ich einem ganz besonderen Menschen in meinem Leben widmen:
Meinem Opa Dr. Gerhardt Zink, der mit seiner Begeisterung für die Wunder dieser Welt und seinem
unendlichen Wissen über die Vogelwelt mein Interesse an der Wissenschaft geweckt hat.

Leider durfte er den Verlauf meines Studiums nicht mehr miterleben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung im Bereich Pollenausbreitung	5
3	Ausbreitung partikelförmiger Stoffe mit dem Modellsystem COSMO-ART	11
3.1	Das Regionalmodell COSMO	11
3.2	Pollen und ihre Ausbreitung in COSMO-ART	14
4	Grundlegendes zur Pflanze <i>Ambrosia artemisiifolia</i> L. (Asteraceae)	19
4.1	Invasive Neophyten	19
4.2	Charakteristika der Pflanze	20
4.2.1	Aussehen und Entwicklung	20
4.2.2	Pollen und Samen	20
4.2.3	Anforderungen an den Standort	23
4.3	Verbreitung in Europa	24
4.4	Schäden durch <i>Ambrosia</i>	25
5	Datengrundlage	27
5.1	Verbreitung der <i>Ambrosia</i> in Europa	27
5.2	Pollenmessungen	30
5.3	Anfangs- und Randwerte, externe Parameter	30
6	Digitalisierung der Verbreitungskarten	35
6.1	Ungarn	36
6.2	Deutschland	38
6.3	Tschechien	38
7	Simulationen	41
7.1	Simulation mit <i>Ambrosia</i> quellen in Deutschland, Ungarn, Österreich und Tschechien	45
7.1.1	Mittlere Tageskonzentrationen	45
7.1.2	Vertikalschnitt der Konzentration	48
7.2	Simulationen mit einzelnen Quellgebieten	48

7.2.1	Geographische Herkunft der Pollen	50
7.2.2	2x2 Kontingenztafel	51
7.2.3	Bedeutung der einzelnen Quellgebiete	54
8	Zusammenfassung	61
A	Abbildungsverzeichnis	65
B	Tabellenverzeichnis	67
C	Literaturverzeichnis	69
D	Anhang	75
D.1	Werte der 2x2 Kontingenztafeln und der daraus abgeleiteten Kenngrößen	75
D.2	Matlab-Code des Digitalisierungsprogrammes	77

1. Einleitung

Im September 2006 wurden an mehreren Messstationen in Ostdeutschland überdurchschnittlich viele Ambrosiapollen registriert. Die Menge der Pollen lag mit bis zu 41 Pollen pro Kubikmeter Luft deutlich über dem Schwellenwert, ab dem Allergiker mit starken Atemwegsbelastungen rechnen müssen. Dieser Schwellenwert liegt bei Ambrosiapollen weit unter demjenigen für Baum- oder Gräserpollen. Bereits sehr geringe Konzentrationen können zu allergischen Reaktionen führen. Es stellt sich daher die Frage, ob ein Ferntransport der Ambrosiapollen möglich ist, und - falls dies der Fall ist - zu welchem Grad dieser die lokalen Konzentrationen beeinflusst. Die Problematik des Ferntransports besteht darin, dass Ambrosiapollen in Gegenden transportiert werden können, in denen die Pflanze (noch) nicht heimisch ist. Allergiker müssen also auch in ambrosiafreien Regionen mit allergischen Reaktionen rechnen. Des Weiteren kann durch Ferntransport die Zeitspanne der Pollenbelastung verlängert werden, wenn Pollen vor oder nach dem Blühen der lokalen Bestände aus Gegenden mit anderen klimatischen Bedingungen herantransportiert werden. Aus diesem Grund ist eine Vorhersage der Ambrosiapollenkonzentration in der Luft von besonderer Wichtigkeit für Allergiker.

Um den Ferntransport von Pollen belegen zu können, werden in erster Linie die zeitlichen Verläufe der Pollenmessungen verwendet. Indikatoren für einen Ferntransport sind: (1) der Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Tageskonzentrationen, (2) die zeitliche Variabilität der Tagesmittelwerte der Pollenkonzentration (kontinuierliche Pollensaison oder einzelne Pollenepisoden), (3) Korrelationen zwischen den zeitlichen Verläufen der Konzentrationsmessungen an verschiedenen Messstationen oder (4) Auftreten von Pollen außerhalb der lokalen Pollensaison. Da der Ferntransport der Pollen stark vom regionalen und überregionalen Wetter abhängt, können mögliche Quellgebiete der Pollen durch Untersuchung der synoptischen Situation und durch die Berechnung von Rückwärtstrajektorien abgeschätzt werden. In Kapitel 2 werden diese Methoden und die damit durchgeführten Studien genauer beschrieben. Laut dieser Studien ist in einigen Regionen Europas der Ferntransport die Hauptursache für das Vorhandensein von Ambrosiapollen in der Luft. Die wichtigsten Quellgebiete für Ambrosiapollen in Europa stellen dabei Südungarn, Norditalien und die Gegend von Lyon dar. Dies ist wenig überraschend, da diese Regionen die am stärksten von Ambrosiabewuchs betroffenen Gegenden in Europa sind. Von diesen drei Quellgebieten ausgehend werden die Pollen durch Ferntransport in vielen Ländern Europas verteilt. Beispiele für Länder, in denen die Belastung durch Ambrosiapollen maßgeblich vom Ferntransport abhängt, sind Deutschland, Polen, das Baltikum, Schweden, die Schweiz, Zentralitalien und Nordspanien.

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Herkunft der Pollen, die erst in den letzten Jahren entwickelt wurde, ist die explizite Simulation der Pollenausbreitung mit Wettervorhersagemodellen. Dafür müssen

sämtliche Prozesse, die mit dem Einbringen der Pollen in die Atmosphäre, ihrem Transport in der Luft, sowie ihrer Entfernung aus der Atmosphäre in Zusammenhang stehen, in geeigneter Weise beschrieben werden. Dies geschieht entweder anhand von physikalischen Gleichungen, oder - wo dies nicht möglich ist - mit Hilfe von Parametrisierungen. Weiterhin muss die geographische Verteilung der untersuchten Pflanzenspezies bekannt sein. Obwohl die Unsicherheiten, die Behandlung der Pollen im Modell und die aktuelle Verteilung der Pflanzenbestände betreffend, momentan noch groß sind, zeigt diese Methode deutliche Vorteile gegenüber anderen Herangehensweisen. Die räumliche und zeitliche Entwicklung einer Pollenwolke kann durch Punktmessungen der Pollenkonzentration nicht verfolgt werden. Rückwärtstrajektorien können zwar den Ursprung der jeweiligen Luftmassen bestimmen, ob und wie lange sich in der entsprechenden Luftmasse Pollenkörner befinden, kann jedoch nicht nachgeprüft werden. Ein weiterer Vorteil der expliziten Berechnung der Pollenausbreitung mit einem Wettervorhersagesystem besteht darin, dass Prognosen auch über einen etwas längeren Zeitraum gemacht werden können. Dieser Aspekt der Anwendung ist momentan Gegenstand der Forschung und wird in Zukunft sicherlich eine noch größere Rolle spielen. Verschiedene Wettervorhersagemodelle wurden bereits um die Behandlung der Pollenausbreitung erweitert. Mit dem mesoskaligen Modellsystem COSMO-ART kann durch vorangegangene Arbeiten der Arbeitsgruppe die Ausbreitung von Hasel- und Erlenpollen (Helbig et al., 2004), sowie die Ausbreitung von Birkenpollen (Vogel et al., 2008) simuliert werden. Die Ausbreitung von Eichenpollen wurde von Schüler und Schlünzen (2006) mit dem mesoskaligen Atmosphärenmodell METRAS und von Pasken und Pietrowicz (2005) mit einer Kombination der MM5- und HYSPLIT_4-Modelle realisiert. Das Dispersionsmodell SILAM wurde für die Ausbreitung von Birkenpollen verwendet (Sofiev et al., 2006). Die Ausbreitung einer Ambrosiapollenwolke über der Stadt Montreal wurde von Goyette-Pernot et al. (2003) mit einem regionalen Klimamodell simuliert. Das Rechengebiet hatte dabei eine Größe von $100 \times 100 \text{ km}^2$. In Kapitel 2 werden die bisherigen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Pollenausbreitung in Wettervorhersagemodellen etwas genauer vorgestellt. Die Ausbreitung von Ambrosiapollen auf der überregionalen Skala (über Distanzen von mehreren 1000 km) wurde bisher noch nicht in einem Wettervorhersagemodell realisiert.

Um die Lebensqualität der Pollenallergiker entscheidend verbessern zu können, ist eine präzise und frühzeitige Pollenvorhersage vonnöten. Dies erlaubt, Medikamente gezielt und prophylaktisch einzusetzen. Des Weiteren wird die ärztliche Diagnose erleichtert, wenn die Art der Pollen und ihre aktuellen Konzentrationen bekannt sind. Momentan wird vom Deutschen Wetterdienst (DWD) eine Pollenvorhersage für 7 verschiedene Pollenarten erstellt, unter anderem für Ambrosiapollen. Die Vorhersage basiert auf den regionalen kurz- und mittelfristigen Wettervorhersagen des DWD und den von der PID (Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst) zur Verfügung gestellten Messungen der Pollenkonzentrationen. Da der Blühbeginn der Pflanzen stark von der aktuellen Witterung abhängt, werden außerdem phänologische Daten des DWD berücksichtigt. Die aus diesen Daten gewonnene Vorhersage der Pollenbelastung kann für den aktuellen Tag, sowie maximal zwei Folgetage auf einer Informationsseite des DWD im Internet bezogen werden. Die aktuell durchgeführte Pollenflugvorhersage zeigt allerdings zwei große Schwächen: (1) Sie

ist räumlich und zeitlich nur gering aufgelöst, da das Messnetz der Pollenfallen sehr grobmaschig ist. (2) Die Ausbreitung der Pollen wird nicht mit einem Modell simuliert. Die Vorhersage unterliegt daher der subjektiven Einschätzung desjenigen, der die Vorhersage macht.

Die vorliegende Arbeit stellt einen ersten Schritt zu einer operationellen Vorhersage der Ambrosiapollenkonzentration mittels Ausbreitungsrechnungen dar. Die Arbeit deckt dabei alle Schritte zur Einführung eines Pollenflugvorhersagesystems ab. Diese reichen von der Beschaffung der Verbreitungsdaten der Ambrosiapflanze über die Beschreibung der Pollen im Modellsystem COSMO-ART bis hin zur konkreten Simulation der Pollenausbreitung. COSMO-ART ist eine Erweiterung des mesoskaligen Regionalmodells COSMO (DWD), welche am Institut für Meteorologie und Klimatologie des Forschungszentrums und der Universität Karlsruhe entwickelt wurde. Die Behandlung der Pollen in COSMO-ART erfolgt analog zu den Parametrisierungen von Helbig et al. (2004) und Vogel et al. (2008). Als Fallbeispiel wird die oben erwähnte Pollenepisode im September 2006 simuliert und mit Messungen verglichen. Bei den einzelnen Simulationen werden unterschiedliche Quellgebiete der Ambrosiapollen berücksichtigt, sodass qualitativ beschrieben werden kann, welchen Einfluss die einzelnen Quellgebiete auf die Gesamtzusammensetzung der Pollenmessungen in Ostdeutschland haben.

2. Stand der Forschung im Bereich Pollenausbreitung

Die Ausbreitung von Pollen ist für zwei Interessensgruppen von Bedeutung. Zum Ersten sind dies Allergiker, die bei Kenntnis der aktuellen und zukünftigen Pollenkonzentrationen ihre Medikamente gezielter einnehmen können, beziehungsweise Aufenthalte in belasteten Regionen vermeiden können. Zum Anderen sind dies die Landwirte. Der Anbau von genmanipulierten Pflanzen stellt sie vor das Problem der Genübertragung auf andere Felder. Um die Reinhaltung der Arten gewährleisten zu können, müssen die Entfernungen bekannt sein, die die Pollen zwischen verschiedenen Feldern zurücklegen können.

Prinzipiell lassen sich in diesem Zusammenhang drei Herangehensweisen unterscheiden. Die Untersuchung von Messungen der Pollenkonzentration basiert auf dem Konzept, anhand verschiedener Charakteristika der zeitlichen Verläufe und räumlichen Unterschiede verschiedener Messungen Rückschlüsse auf die Herkunft der Pollen zu ziehen. Diese Methode hat zum Ziel, zwischen lokalen und weiter entfernten Pollenquellen zu unterscheiden.

Ist nur die Ausbreitung der Pollen in der näheren Umgebung der Pollenquelle von Bedeutung, so können unter Zuhilfenahme von Feldmessungen mathematische Modelle der Pollenausbreitung entwickelt werden. Diese Modelle können jedoch nicht ohne Weiteres auf andere Felder übertragen werden. Dennoch sind sie in der Landwirtschaft von Bedeutung.

Die dritte Methode, die Ausbreitung von Pollen zu untersuchen, bedient sich numerischer Wettervorhersagemodelle. Anhand von physikalischen Gleichungen und Parametrisierungen kann die Ausbreitung, insbesondere auch der Ferntransport, der Pollen simuliert werden. Im Folgenden werden aktuelle Arbeiten auf diesen drei Forschungsfeldern kurz dargestellt.

In zahlreichen Studien wurde versucht, den Ursprungsort der gefundenen Pollenkörner zu bestimmen. Hierbei gibt es verschiedene Ansätze, die im Folgenden kurz beschrieben werden. Um eine größere Sicherheit in der Aussage über den Ursprung der Pollenkörner zu erhalten, werden in der Regel mehrere Methoden miteinander kombiniert.

1. Über Windrosen kann die Hauptwindrichtung bestimmt werden, aus der Pollen zur Messstation transportiert werden.
2. Der Tagesverlauf der gemessenen Pollenkonzentrationen gibt einen Hinweis darauf, ob die registrierten Pollen eher aus lokalen Beständen stammen oder ob sie von entfernten Beständen heran transportiert wurden. Ambrosiapflanzen geben ihre Pollen in den frühen Morgenstunden ab, somit führen lokale Bestände zu einer maximalen Konzentration am Vormittag. Je später das Maximum registriert wird, desto weiter sind die Pollen transportiert worden. Ein Maximum am Nachmittag oder in der Nacht spricht für einen Ferntransport der Pollen.

3. Lokale Ambrosiabestände geben ihre Pollen kontinuierlich über einen längeren Zeitraum (in der Regel mehrere Wochen) ab. Unterschiede in mittleren Tageskonzentrationen lassen sich durch meteorologische Faktoren, wie Temperatur oder Niederschlag, erklären. Daher kann der Wochen- und Monatsgang der gemessenen Pollenkonzentrationen als Hinweis für Ferntransport der Pollen heran gezogen werden. Treten einzelne, klar voneinander abgegrenzte Pollenepisoden auf, so sind vermutlich keine lokalen Ambrosiabestände beteiligt. In diesem Fall sind nur geringe oder keine Korrelationen mit den lokalen meteorologischen Faktoren zu erkennen.
4. Ähneln sich die Gesamtmengen der pro Jahr registrierten Pollen an verschiedenen Messstationen über mehrere Jahre hinweg, spricht dies dafür, dass die Pollen aus der gleichen Quelle stammen. Dasselbe gilt, wenn an weit auseinander liegenden Stationen in derselben Region die Maximalkonzentrationen meist am gleichen Tag auftreten.
5. Sind die Jahresgänge in einer Messstation korreliert mit den Jahresgängen einer Referenzstation im möglichen Quellgebiet, so stammen die Pollen der zu untersuchenden Station vermutlich aus dem Gebiet der Vergleichsstation. Sedimentation der Pollen während des Ferntransports zeigt sich darin, dass die Konzentrationen im empfangenden Gebiet im Vergleich zum Quellgebiet um einen bestimmten Faktor reduziert sind. Eine zeitliche Verschiebung des Tages- oder Wochenganges kann als Indikator dafür dienen, wie lange die Pollen brauchen, um die Entfernung zwischen Quellgebiet und Messstation zurück zu legen. Sind entlang des Transportweges mehrere Pollenfallen aufgestellt, so kann anhand der Tages- und Wochengänge die Fortbewegung der Pollenwolken beobachtet werden.
6. Werden bereits vor dem Beginn der lokalen Pollensaison Pollenkonzentrationen registriert, so ist dies in der Regel auf Ferntransport zurückzuführen. Das Gleiche gilt für Pollen, die nach Ende der lokalen Pollensaison gefunden werden. Ebenso ist es wahrscheinlich, dass Pollen aus weiter entfernten Pflanzenbeständen stammen, wenn in der Nähe der Messstationen keine Ambrosiapflanzen bekannt sind.
7. Um die möglichen Quellgebiete der Pollen einzugrenzen, bieten sich mit Modellen berechnete Rückwärtstrajektorien an. Sie zeigen, ob sich die fragliche Luftmasse in den Tagen vor dem Erreichen des aktuellen Standortes in einem Gebiet mit bekannten Ambrosiabeständen befunden hat oder nicht.
8. Mit synoptischen Karten, beispielsweise der geopotentiellen Höhe der 850 hPa-Fläche, können Strömungsfelder bestimmt werden, die zu erhöhten Pollenkonzentrationen führen. Außerdem wird mit synoptischen Karten die allgemeine Strömung, und damit die Herkunft der Luftmassen, untersucht.

Mit Hilfe dieser Methoden ist es in vielen europäischen Ländern gelungen, mögliche Quellgebiete der Ambrosiapollen zu bestimmen. Die wichtigsten Ambrosiabestände finden sich demnach im südlichen

Ungarn, in Norditalien und in der Gegend von Lyon in Frankreich. Das sehr stark von Ambrosiapflanzen bewachsene Südungarn stellt dabei die Quelle für Ambrosiapollen im osteuropäischen Raum dar. Hohe Pollenkonzentrationen in Polen sind laut Piotrowska und Weryszko-Chmielewska (2006), Stach et al. (2007), Kasprzyk (2008) und Smith et al. (2008) mit Winden aus südlichen Richtungen verbunden. Puc (2006) kommt zu dem Schluss, dass die Korrelationen zwischen der gemessenen Pollenkonzentration und der Windgeschwindigkeit auf Ferntransport hindeutet. Weitergehende Untersuchungen mittels Rückwärtstrajektorien, synoptischen Karten und Auswertung der Tagesgänge der Pollenkonzentrationen an verschiedenen Stationen führen zu der Annahme, dass die Ambrosiapollen in vielen Fällen aus Tschechien, der Slowakei und Ungarn stammen. Doch auch kleinere Quellen innerhalb Polens lassen sich nachweisen (Stach et al., 2007). Die meteorologischen Bedingungen während des Ferntransports der Ambrosiapollen wurden von Smith et al. (2008) eingehend untersucht. Bei heißem, trockenem Wetter können Ambrosiapollen aus Ungarn und der Slowakei bis nach Deutschland, Dänemark, ins Baltikum und nach Schweden gelangen. Eine solche meteorologische Situation ist in der Regel mit einer großen Grenzschichthöhe (1500-2000 m) und Konvektion im Quellgebiet verbunden. Die Pollen können sich dadurch in der gesamten Grenzschicht verteilen. Die anschließende Sedimentation der Pollen aufgrund der reinen Gravitationskraft kann mehrere Tage dauern, was die weiten Transportwege erklärt (Smith et al., 2008). Im Baltikum sind zwar kleinere Bestände an Ambrosia bekannt, ihre Pollenproduktion reicht aber laut Saar et al. (2000) nicht aus, um die gemessenen Pollenkonzentrationen zu erklären. Untersuchungen der synoptischen Bedingungen und Berechnung von Rückwärtstrajektorien lassen darauf schließen, dass ein Großteil der in den baltischen Staaten registrierten Ambrosiapollen aus der Ukraine und den südlichen und südöstlichen Regionen des europäischen Teils von Russland stammen. Selbst im stark belasteten Süden von Ungarn ist Ferntransport der Ambrosiapollen nachzuweisen (Makra und Pálfi, 2007). Bereits drei Tage vor dem Beginn der lokalen Pollensaison konnten Ambrosiapollen in der Luft nachgewiesen werden. Rückwärtstrajektorien legen die Vermutung nahe, dass es sich hierbei um Pollen aus Südfrankreich, Norditalien oder Kroatien gehandelt haben könnte. Wichtiger ist jedoch der Transport in die entgegengesetzte Richtung: aus dem Balkan und Osteuropa in Richtung Italien. Cecchi et al. (2006) haben in der Toskana Ambrosiapollen gemessen, die vermutlich aus Südungarn stammen. Die weiteren Untersuchungen für Nord- und Zentralitalien (Cecchi et al., 2007) zeigen die Relevanz der Bestände in Osteuropa: allein durch Ferntransport aus diesen Gegenden übersteigen die gemessenen Pollenkonzentrationen die Schwellenwerte für allergische Reaktionen. Auch in der Schweiz spielt der Pollenfernttransport eine wichtige Rolle: im Tessin sind zwar auch lokale Bestände vorhanden, die stärksten Ambrosiapollenkonzentrationen sind jedoch mit Winden aus Italien verbunden (Köhler et al., 2006). Clot et al. (2002) konnten nachweisen, dass ein Großteil der in der Westschweiz registrierten Ambrosiapollen aus der Gegend um Lyon in Südfrankreich stammt. Diese Gegend ist die am stärksten mit Ambrosiapflanzen belastete Gegend in Westeuropa. Pollen aus diesem Gebiet werden auch in andere Gegenden Frankreichs (Laaidi und Laaidi, 1999) und in Ausnahmefällen bis nach Nordspanien (Belmonte et al., 2000) transportiert.

Wie sich Pollen in unmittelbarer Nähe ihres Quellortes ausbreiten, ist insbesondere in der Landwirtschaft von großer Bedeutung. Da die Verwendung genmanipulierter Samen in den letzten Jahren stark zugenommen hat, stellt sich die Frage, ob die genetischen Informationen dieser Pflanzen über eine Ausbreitung der Pollen auf andere Felder übertragen werden kann. Um diese Frage zu beantworten, wurden unterschiedliche Experimente mit Messungen der Pollenkonzentrationen in verschiedenen Abständen zum Quellort durchgeführt. Aus diesen Messungen können dann empirische Modelle zur Ausbreitung der Pollen im Nahfeld eines Quellortes (bis maximal wenige Kilometer Entfernung) entwickelt werden. Je nach Komplexität des Modells fließen dabei meteorologische Faktoren, beziehungsweise biologische Modelle zur Genübertragung mit ein. Da die Ausbreitung der Pollen im Nahfeld nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, wird darauf verzichtet, diese Studien und ihre Ergebnisse näher zu beschreiben. Beispiele solcher Studien sind Giddings (2000), Aylor et al. (2003), Loos et al. (2003), Meagher et al. (2003), Jarosz et al. (2004), Walklate et al. (2004), Gustafson et al. (2005), Klein et al. (2006), Shaw et al. (2006) und Chamecki et al. (2009). Lediglich die Letztgenannten haben Ambrosiapollen als Gegenstand ihrer Untersuchungen gewählt.

Der in dieser Arbeit untersuchte Ferntransport von Pollen über die Atmosphäre kann unter Zuhilfenahme von numerischen Wettervorhersagemodellen untersucht werden. Wie schon in Kapitel 1 beschrieben, basiert diese Methode auf der Verwendung physikalischer Gleichungen und Parametrisierungen, die die verschiedenen Prozesse beschreiben, denen Pollen in der Atmosphäre unterliegen. Diese werden in ein vorhandenes atmosphärisches Vorhersagemodell implementiert. Die Vorteile dieser Methode bestehen darin, dass die zeitliche und räumliche Entwicklung der Pollenkonzentration modelliert werden kann. Da die physikalischen Eigenschaften der Pollen (Dichte, Durchmesser, Form, etc.) berücksichtigt werden, kann ihre Ausbreitung realistischer simuliert werden als bei reinen Trajektorienmodellen, die lediglich die Bewegung der Luftmassen widerspiegeln. Die explizite Berechnung der Pollenausbreitung bietet zudem das Potential in die operationelle Wettervorhersage aufgenommen zu werden.

Erste Ausbreitungsrechnungen mit dem atmosphärischen Modellsystem KAMM/DRAIS/MADEsoot wurden von Helbig et al. (2004) für Hasel- und Erlenpollen durchgeführt. Der Pollenfluss von den Pflanzen in die Atmosphäre wird analog zu den Flüssen fühlbarer und latenter Wärme beschrieben. Die Freisetzung der Pollen geschieht nur bei günstigen meteorologischen Bedingungen, was über Korrekturterme kontrolliert wird. Für die Berechnung der Sedimentation der Pollen wird ihre Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit von ihrer Dichte und Größe bestimmt.

Dieselben Formulierungen und Ansätze wurden später von Vogel et al. (2008) für Birkenpollen in das Modellsystem COSMO-ART (Vogel et al., 2009) implementiert. Der Transport der Pollen in der Atmosphäre wird über eine Bilanzgleichung berechnet, in der der Transport durch turbulente Diffusion, die Sedimentation und die Auswaschung durch Niederschlag eingehen.

Die vorliegende Arbeit beruht im Wesentlichen auf den Studien von Helbig et al. (2004) und Vogel et al. (2008). Die genauen Formulierungen der verwendeten Terme sind daher in Kapitel 3 beschrieben und werden hier nicht noch einmal aufgeführt.

Pasken und Pietrowicz (2005) benutzten eine Kombination aus dem mesoskaligen Atmosphärenmodell MM5 und dem Trajektorienmodell HYSPLIT_4, um die Ausbreitung von Eichenpollen zu modellieren. Die Freisetzung der Pollen wurde nicht an meteorologische Bedingungen gekoppelt. Sie begann um 13 UTC und dauerte danach für 22 Stunden an. Die Menge der emittierten Pollen wurde proportional zum Flächenanteil der Eichenbestände jeder einzelnen Gitterzelle gewählt. Die Emissionsstärke wurde räumlich und zeitlich konstant gehalten. Die Trajektorien der Pollen wurden mittels HYSPLIT_4 berechnet, wobei Sedimentation und nasse Deposition berücksichtigt wurden. Die Simulationen wurden mit Konzentrationsmessungen an einer Messstation innerhalb des Simulationsgebietes verglichen.

Schüler und Schlünzen (2006) haben die Ausbreitung von Eichenpollen in das mesoskalige Atmosphärenmodell METRAS implementiert, um den Gentransport zwischen einzelnen Beständen quantifizieren zu können. Die Pollenkonzentrationen hängen hierbei von der Advektion, der turbulenten Diffusion, der Pollenemission, der Pollensedimentation und der Lebensfähigkeit der Pollen ab. In die Parametrisierung der Pollenemission gehen die jährliche Pollenproduktion, der aktuelle Tag der Pollensaison, sowie das Dampfdruckdefizit als meteorologischer Einflussfaktor ein. Da sich die biologischen Eigenschaften (z.B. Reproduktionsfähigkeit) der Pollen während des Transports ändern, wird eine Formel entwickelt, die die Lebensfähigkeit der Pollen beschreibt. Diese beinhaltet die Dauer des Transportweges und die kurzweilige Strahlung, die die Lebensfähigkeit der Pollen reduzieren. Die Sedimentation wird mit einer Sinkgeschwindigkeit von 2,9 cm/s berechnet. Ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messungen zeigt, dass die Größenordnung Pollenkonzentrationen in Messung und Simulation übereinstimmen. Auch die qualitative Abnahme der Konzentration außerhalb des Quellgebietes wird durch die Rechnungen wiedergegeben.

Mit dem finnischen Modell SILAM wurde von Sofiev et al. (2006) die Ausbreitung von Birkenpollen simuliert. Die Pollen unterliegen dabei dem Transport durch Advektion, der trockenen und der nassen Deposition. Zwei verschiedene Ansätze werden angewendet: (1) Die gemessenen Konzentrationen werden dem Modell übergeben. Dieses berechnet dann die möglichen Quellgebiete der Pollen. (2) Die Pollen werden im Modell emittiert und ihre Ausbreitung wird berechnet. Insbesondere was die Parametrisierung des Quellterms angeht, sind noch viele Fragen offen. Trotzdem zeigen die Ergebnisse beider Ansätze starke Übereinstimmungen mit Beobachtungsdaten.

Die einzige uns bekannte Simulation von Ambrosiapollen in einem regionalen Klimamodell stammt von Goyette-Pernot et al. (2003). Sie haben die zeitliche und räumliche Entwicklung einer Ambrosiapollenwolke über Montreal sowohl mit einem empirisch-statistischen Verfahren, als auch mittels Ausbreitungsrechnungen im Modell RCM-NARCM untersucht. Das Modellgebiet hat dabei eine Größe von 100 x 100 km² und eine Auflösung von 1 km. Emission, Transport und Deposition der Pollen werden simuliert. Eine genauere Formulierung der einzelnen Terme liegt uns allerdings nicht vor.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass mesoskalige Atmosphärenmodelle in der Lage sind, die Ausbreitung von Pollen zu simulieren. Das Hauptproblem dieser Anwendung besteht darin, dass die nötigen Eingabefelder (Verbreitung der Pflanze, sowie charakteristische Bedingungen, die zur Emission

der Pollen führen) nicht in ausreichender Qualität vorhanden sind. Außerdem ist das Beobachtungsnetz für Pollenkonzentrationen in Europa noch sehr grobmaschig, weshalb die Simulationen nur bedingt mit Messungen validiert werden können. Bisher wurden überregionale Ausbreitungsrechnungen für die Pollen der Birke und Eiche durchgeführt. Für Hasel-, Erlen- und Ambrosiapollen wurden bis zum heutigen Zeitpunkt Rechnungen in einem Ausschnitt von maximal $250 \times 250 \text{ km}^2$ durchgeführt.

3. Ausbreitung partikelförmiger Stoffe mit dem Modellsystem COSMO-ART

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, welche Rolle der Ferntransport von Ambrosiapollen auf lokale Pollenkonzentrationen während einer Pollenepisode in Ostdeutschland spielte. Um dieser Frage nachzugehen, werden Ambrosiapollen als zusätzliche Aerosolkomponente in das regionale Wettervorhersagesystem COSMO-ART implementiert. Anschließend wird die Ausbreitung der Pollen ausgehend von unterschiedlichen Quellgebieten simuliert. Im Folgenden werden das zugrundeliegende Modell COSMO-ART, sowie die Modellierung der Pollen in COSMO-ART vorgestellt.

3.1. Das Regionalmodell COSMO

Das *Consortium for Small-scale Modeling* (COSMO) ist ein Zusammenschluss mehrerer europäischer Wetterdienste. Mitglieder sind momentan die Wetterdienste aus Deutschland, der Schweiz, Italien, Griechenland, Polen und Rumänien, sowie militärische Einrichtungen Deutschlands und Italiens. Der russische Wetterdienst hat sich ebenfalls beworben, ist aber noch kein vollständiges Mitglied. Ziele von COSMO sind die Weiterentwicklung, Pflege und Verbesserung eines nicht-hydrostatischen atmosphärischen Regionalmodells. Während ein Globalmodell ein gröberes Gitter hat und den gesamten Globus abdeckt, wird im Regionalmodell lediglich ein kleiner Ausschnitt der Atmosphäre betrachtet, der dann in deutlich höherer Auflösung simuliert wird. Das Regionalmodell von COSMO wird sowohl im operationellen Betrieb als auch für wissenschaftliche Untersuchungen auf der Meso- β - und der Meso- γ -Skala eingesetzt. Hierfür wurde das vom Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickelte Lokal-Modell (LM) überarbeitet und ergänzt. 2007 erfolgte dann die Umbenennung in COSMO-Modell. Da das COSMO-Modell bereits in zahlreichen Arbeiten ausführlich beschrieben wird, soll hier nur eine kurze Zusammenfassung nach Schättler et al. (2008) sowie nach Adrian und Frühwald (2002) gegeben werden.

Prinzipiell kann zwischen zwei Arten von numerischen Wettervorhersagemodellen unterschieden werden: den hydrostatischen Modellen, in denen die hydrostatische Approximation angewendet wird, und den nicht-hydrostatischen Modellen, die ohne eine solche Vereinfachung auskommen. Durch die Verwendung der hydrostatischen Approximation werden unter anderem die Schallwellen als mögliche Lösungen der Modellgleichungen heraus gefiltert. Dies vereinfacht die Lösung des Gleichungssystems erheblich, weshalb globale Modelle, das heißt Modelle, die den gesamten Globus abdecken, in der Regel die hydrostatische Approximation anwenden. Dies bringt jedoch auch Probleme mit sich. In hydrostatischen Modellen sind keine Auftriebskräfte vorhanden, weshalb Konvektion nicht direkt simuliert werden kann, sondern parametrisiert werden muss. Dies zieht als weitere Folge mit sich, dass nichtlineare Wech-

selwirkungen durch Konvektion nicht beschrieben werden können. Des Weiteren werden bei der Verwendung kleiner Längenskalen der Orographie in einem hydrostatischen Modell die Wechselwirkungen zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre systematisch überschätzt. Diese Wechselwirkungen beruhen auf der Bildung interner Schwerewellen, die sich bei der Überströmung von Hindernissen bilden. Diese breiten sich - je nach Größe des Hindernisses - vertikal nach oben oder aber horizontal nach Lee aus. Bei kleineren und kleinsten Hindernissen breiten sich die internen Schwerewellen in einem hydrostatischen Modell allerdings immer vertikal aus, was nicht der Realität entspricht. Genaueres hierzu findet sich bei Adrian und Frühwald (2002).

Hydrostatische Modelle stoßen also an ihre Grenzen, wenn räumlich höher aufgelöste Simulationen gerechnet werden sollen, in denen die Konvektion eine große Rolle spielt. Dies ist beim COSMO-Modell der Fall, das für die Simulation regionaler Prozesse verwendet wird. Das COSMO-Modell wurde daher als nicht-hydrostatisches atmosphärisches Vorhersagemodell entwickelt. Es basiert auf den hydrothermodynamischen Gleichungen, mit denen die kompressiblen Strömungen innerhalb einer feuchten Atmosphäre beschrieben werden können.

Bei geographischen Koordinatensystemen besteht das Problem, dass die geometrischen Abstände der Gitterpunkte stark mit der geographischen Breite variieren. Weiterhin stellen der Nord- und der Südpol Singularitäten dar, wenn sie sich im simulierten Gebiet befinden. Um dieser Probleme Herr zu werden, wird im COSMO-Modell der Nordpol des normalen geographischen Gitters verschoben, sodass sich der Äquator und der Nullmeridian in der zu berechnenden Region befinden. Dieses gedrehte Koordinatensystem basiert immer noch auf Breiten- und Längengraden. Da das Rechengebiet nun aber in der Nähe des Äquators liegt, sind die Unterschiede in den Gitterpunktabständen geringer. Die Breitenkoordinate des gedrehten Koordinatensystems wird λ , die Längenkoordinate φ genannt. Als Höhenkoordinate wird eine generalisierte geländefolgende Koordinate ζ verwendet, die zeitunabhängig ist. Dem Nutzer stehen für die Einteilung der Höhenkoordinate mehrere Möglichkeiten zur Auswahl.

Subskalige Prozesse, also solche, die durch die Auflösung des Modells nicht direkt wiedergegeben werden können, werden parametrisiert. Dies gilt beispielsweise für Strahlungsprozesse, den Niederschlag, Wolken, feuchte Konvektion, vertikale turbulente Diffusion, Oberflächenflüsse oder Bodenprozesse. Für die zeitliche Integration stehen zwei Verfahren mit jeweils mehreren Varianten zur Verfügung: das Leapfrog-Verfahren und das Runge-Kutta-Schema. Anfangs- und Randwerte, die für den Betrieb des COSMO-Modells notwendig sind, stammen entweder aus übergeordneten Modellen oder werden vom Nutzer generiert. Bei den Anfangsdaten gibt es prinzipiell drei Möglichkeiten: Im operationellen Betrieb stammen die Daten aus der kontinuierlich durchgeführten Datenassimilation. Bei Simulationen realer Fälle werden Daten gröber aufgelöster Modelle verwendet, in der Regel sind das Reanalyse-Daten globaler Modelle. Und bei idealisierten Rechnungen können entsprechend generierte Datenfelder eingelesen werden. Die benötigten Randwerte während der Simulation entstammen gröber aufgelösten Modellen mit größerem Rechenausschnitt.

Geht man von der differentiellen Form der thermodynamischen Gleichungen aus und transformiert diese

in das gedrehte Koordinatensystem, so ergibt sich nach Abzug des stationären Grundzustandes folgendes System an prognostischen Modellgleichungen, welches mittels der Methode Finiter Differenzen gelöst wird:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - \frac{uv}{a} \tan \varphi - fv &= -\frac{1}{\rho a \cos \varphi} \left(\frac{\partial p'}{\partial \lambda} + \frac{J_\lambda}{\sqrt{G}} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + \frac{u^2}{a} \tan \varphi + fu &= -\frac{1}{\rho a} \left(\frac{\partial p'}{\partial \varphi} + \frac{J_\varphi}{\sqrt{G}} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla w &= \frac{1}{\rho \sqrt{G}} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + B + M_w \\ \frac{\partial p'}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla p' - g \rho_0 w &= -\frac{c_{pd}}{c_{vd}} pD \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T &= -\frac{p}{\rho c_{vd}} D + Q_T \\ \frac{\partial q^v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla q^v &= -(S^l + S^f) + M_{q^v} \\ \frac{\partial q^{l,f}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla q^{l,f} + \frac{1}{\rho \sqrt{G}} \frac{\partial p_{l,f}}{\partial \zeta} &= S^{l,f} + M_{q^{l,f}} \end{aligned}$$

t Zeit

\vec{v} Windvektor

u, v, w Komponenten des Windvektors

T Lufttemperatur

ρ Dichte der feuchten Luft

ρ_0 Dichte der trockenen Luft im Grundzustand

p Luftdruck

p' turbulente Fluktuationen des Luftdrucks

q^v spezifische Feuchte

$q^{l,f}$ spezifischer Anteil des flüssigen und gefrorenen Wassers

g Schwerebeschleunigung

c_{pd} spezifische Wärme trockener Luft bei konstantem Druck

c_{vd} spezifische Wärme trockener Luft bei konstantem Volumen

a Radius der Erde

f Coriolisparameter

φ, λ, ζ Koordinaten im transformierten Koordinatensystem

$J_\lambda, J_\varphi, J_\zeta$ Elemente der inversen Jakobi-Matrix

\sqrt{G} Determinante der Jakobi-Matrix

$M_u, M_v, M_w, M_{q^v}, M_{q^{l,f}}$	Einflüsse subskaliger Prozesse
Q_T	diabatische Heizungsrate auf Grund subskaliger Prozesse
$S^l, S^f, S^{l,f}$	Quellen und Senken der Feuchtevariablen
$P_{l,f}$	Niederschlagsflüsse
B	Auftriebsbeschleunigung
D	dreidimensionale Winddivergenz

3.2. Pollen und ihre Ausbreitung in COSMO-ART

Am Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) der Universität Karlsruhe und des Forschungszentrums Karlsruhe wurde in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) das online gekoppelte Modellsystem COSMO-ART (Aerosols and Reactive Trace Gases) entwickelt, um die Wechselwirkungen zwischen Aerosolen und der Atmosphäre auf der regionalen Skala untersuchen zu können. Insbesondere kann mit COSMO-ART der Einfluss von Aerosolen auf die Strahlung untersucht werden. Weitere Anwendungen des Modellsystems COSMO-ART umfassen die Simulation von Mineralstaub (Stanelle, 2008), Seesalz (Lundgren, 2006), Ruß und Pollen (Helbig et al., 2004; Vogel et al., 2008). Die räumliche und zeitliche Verteilung reaktiver Spurengase und Aerosole wird über Bilanzgleichungen der entsprechenden Substanzen beschrieben. Folgende physikalische Prozesse werden in COSMO-ART berücksichtigt: Transport, turbulente Diffusion, trockene und nasse Deposition, Koagulation, Kondensation und Sedimentation der Aerosole und reaktiven Spurengase. Die Auswaschung von Partikeln durch Niederschlagsteilchen stellt eine wichtige Partikelsenke dar. Dieser Prozess wurde von Rinke (2008) beschrieben und in COSMO-ART implementiert. Eine detaillierte Beschreibung des Modellsystems findet sich bei Vogel et al. (2009). Eine Besonderheit des Modellsystems besteht darin, dass der Transport aller skalaren Größen - meteorologische Variablen, aber auch Aerosole und Spurengase - durch identische numerische Verfahren beschrieben wird. Das Modell ist modular aufgebaut, was die gezielte Untersuchung spezieller Fragestellungen vereinfacht. So können einzelne Module zu- oder abgeschaltet oder bestimmte Parametrisierungen ausgetauscht werden.

Um die Ausbreitung von Pollen simulieren zu können, müssen verschiedene Prozesse dargestellt werden. Der Lebenszyklus von Pollen im Modell beginnt mit ihrer Freisetzung aus den Pollensäcken der Blüte. Danach werden die Pollen in der Luft weiterbewegt, bis sie schließlich an Oberflächen abgesetzt werden. Mögliche Umwandlungen ihrer chemischen, biologischen oder physikalischen Eigenschaften während des Fluges werden nicht berücksichtigt. Ein Teil dieser Prozesse wird durch die im Modellsystem COSMO-ART bereits für andere Substanzen vorhandenen Gleichungen beschrieben. Diese umfassen den Transport der Substanzen mit dem mittleren Wind, ihre Diffusion durch die atmosphärische Turbulenz, Sedimentation und Deposition, sowie Auswaschung der Substanzen durch den Niederschlag. Zusätzlich müssen Terme eingebaut werden, die den Emissionsfluss, also die Freisetzung der Pollen durch die

Pflanze, beschreiben. Für die Berechnung der Sedimentation muss außerdem die Sinkgeschwindigkeit der Pollenkörner bekannt sein. In der vorliegenden Arbeit werden für diese Terme die Parametrisierungen von Helbig et al. (2004), beziehungsweise Vogel et al. (2008) verwendet.

Die Bilanzgleichung für Ambrosiapollen umfasst Terme, die die Ausbreitung durch Advektion mit dem mittleren Wind (1), die turbulente Diffusion (2), die Sedimentation (3), sowie die Auswaschung der Ambrosiapollen durch Niederschlagsteilchen (4) beschreiben:

$$\frac{\partial \hat{q}}{\partial t} = \underbrace{-\hat{v} \cdot \nabla \hat{q}}_1 + \underbrace{\frac{1}{\rho} \nabla \cdot F_T}_2 - \underbrace{v_s \frac{\partial \hat{q}}{\partial z}}_3 - \underbrace{\overline{W}}_4 \quad [3.1]$$

Die Massendichte der Pollen q entspricht dem Quotienten aus der Anzahldichte der Pollen N_P und der Anzahldichte N aller Luftmoleküle in einem Kubikmeter Luft:

$$q = \frac{N_P}{N} \quad [3.2]$$

Das Zeichen $\hat{}$ steht für das mit der Luftdichte gewichtete Reynoldsmittel der entsprechenden Größe:

$$\hat{q} = \frac{\overline{\rho q}}{\overline{\rho}} \quad [3.3]$$

Der turbulente Pollenfluss F_T wird analog zu den turbulenten Flüssen latenter und fühlbarer Wärme beschrieben:

$$F_T = \overline{\rho v'' q''} \quad [3.4]$$

v'' und q'' stehen für die turbulenten Fluktuationen der Windgeschwindigkeit und der Massendichte der Pollen. Für die Berechnung des Sedimentationsflusses ist die Kenntnis der Sinkgeschwindigkeit erforderlich. Diese kann sowohl experimentell bestimmt als auch rechnerisch angenähert werden. Aylor (2002) hat hierfür einen Ansatz für Maispollen entwickelt. Demzufolge verändert sich die Sinkgeschwindigkeit v_s mit der relativen Feuchte. Pollen haben keine konstante Dichte und Größe, da ihr Wassergehalt von der relativen Feuchte der Umgebungsluft abhängt. Sie können hydrieren und dehydrieren. Diese Eigenschaft wird durch folgende Formel für die Sinkgeschwindigkeit berücksichtigt, die auf dem Stokes'schen Gesetz basiert:

$$v_s = \sqrt{\frac{4 \rho_P d_P g}{3 \rho c_D}} \quad [3.5]$$

Aylor (2002) hat für die Dichte ρ_P eine Formulierung gefunden, die die Abhängigkeit der Dichte vom Wassergehalt des Pollens berücksichtigt. Beim Durchmesser des Pollens wird in Aylor (2002) eine Formulierung verwendet, die die Form des Pollens einbezieht. Da eine Ambrosiapolle rund ist, ist dies in unserem Fall nicht notwendig, sodass unter d_P der trockene Durchmesser des Pollens zu verstehen ist. g steht für die Schwerkraftbeschleunigung, c_D bezeichnet den Widerstandsbeiwert.

Die Auswaschung der Pollen durch Niederschlag wird nach Rinke (2008) über den Auswaschkoeffizienten λ parametrisiert. In diesen geht die Kollisionseffizienz E nach Slinn (1983), sowie der Durchmesser D_r der Regentropfen und die Niederschlagsrate P ein:

$$\lambda(d_P) = \frac{3E(d_P, D_r)P}{2D_r} \quad [3.6]$$

Die Freisetzung der Pollen (S) aus den Blüten wird über die Divergenz des vertikalen Emissionsflusses F_e beschrieben:

$$S = -\frac{1}{N} \frac{\partial F_e}{\partial z} \quad [3.7]$$

N gibt die Anzahldichte der Luftmoleküle an. Der Emissionsfluss ist das Produkt einer charakteristischen Konzentration c_* , eines Korrekturterms für den Einfluss meteorologischer Parameter K_e , einer charakteristischen Geschwindigkeit u_e sowie eines Terms c_e , der eine „Blühparabel“ (Genaueres hierzu siehe Formel 3.12) beschreibt:

$$F_e = c_e K_e c_* u_e \quad [3.8]$$

Für die charakteristische Geschwindigkeit wird die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* eingesetzt, welche standardmäßig durch COSMO-ART berechnet wird. Die charakteristische Konzentration wird als Quotient der Pollenproduktion Q_P durch eine charakteristische Länge I_c beschrieben:

$$c_* = \frac{Q_P}{I_c} \quad [3.9]$$

Die Pollenproduktion gibt die Gesamtanzahl der Pollen an, die eine Pflanze pro Jahr im Mittel produziert. Bei Bäumen wird der Wert häufig nicht pro Baum, sondern pro Ast oder pro Quadratmeter Bodenfläche angegeben. Da in den Gleichungen ein Wert pro Quadratmeter benötigt wird, muss bei der Pollenproduktion der Ambrosiapflanzen Q_{amb} , die als Anzahl der produzierten Pollen pro Pflanze vorliegt, noch mit der Anzahl der Pflanzen pro Quadratmeter a_{amb} multipliziert werden. Für die charakteristische Länge I_c wird das Produkt aus dem Blattflächenindex LAI (leaf area index) und der Höhe der Pflanzen h_c angesetzt. Somit ergibt sich letztlich für die charakteristische Konzentration:

$$c_* = \frac{Q_{amb} a_{amb}}{LAI h_c} \quad [3.10]$$

Die Emission der Pollen hängt in erster Linie davon ab, ob sich die Blüten einer Pflanze öffnen oder nicht. Dies wird sowohl von meteorologischen als auch von biologischen Faktoren bestimmt. Zu den meteorologischen Faktoren gehört, dass bestimmte Schwellenwerte von Temperatur, relativer Feuchte und der Windgeschwindigkeit erreicht werden müssen. Dies sind pflanzenspezifische Werte, die experimentell bestimmt werden müssen. Der meteorologische Korrekturterm K_e beschreibt den Einfluss dieser Schwellenwerte:

$$K_e = 0 \quad u_* \leq u_{*te} \quad [3.11a]$$

$$K_e = \left(1 - \frac{u_{*te}}{u_*}\right) \quad u_* > u_{*te} \quad [3.11b]$$

Somit können nur dann Pollen emittiert werden, wenn die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* einen bestimmten Wert erreicht oder überschreitet. Dieser Grenzwert u_{*te} wiederum hängt von den Schwellenwerten der Temperatur, der relativen Feuchte und der Windgeschwindigkeit ab. Die genaue Formulierung

von u_{*te} kann Helbig et al. (2004) entnommen werden.

Ob sich eine Blüte öffnet oder nicht, hängt jedoch nicht nur von meteorologischen Faktoren ab. Die Pflanze muss sich auch in der entsprechenden Wachstumsphase befinden. So können selbstverständlich nur in dem Zeitraum Pollen freigesetzt werden, in dem die Pflanze Blütenstände aufweist. Dies hängt in erster Linie von der Jahreszeit ab. Jede Pflanzenart hat eine charakteristische Zeitspanne, in der Pollen freigesetzt werden. Dieser Zeitraum wird Pollensaison genannt. Außerhalb der Pollensaison werden nur vereinzelt Pollen freigesetzt. Doch auch innerhalb der Pollensaison variiert die Anzahl der emittierten Pollen stark. Zu Beginn der Pollensaison haben nur wenige Pflanzen bereits Blütenstände gebildet. Somit kann auch nur ein kleiner Anteil der vorhandenen Pflanzen Pollen emittieren. Dieser Anteil nimmt mit der Zeit zu und erreicht etwa in der Mitte der Pollensaison sein Maximum. Danach nimmt die Anzahl der Blüten, die sich öffnen können, wieder ab. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Blüte öffnet, wird daher über eine Blühparabel c_e beschrieben.

$$c_e = 4c_b \left(\frac{d}{S} - \frac{d^2}{S^2} \right) \quad [3.12]$$

Hierbei steht S für die Dauer der Pollensaison in Tagen. d ist der aktuelle Tag der Pollensaison als laufende Nummer. Der Faktor c_b wird bei Helbig et al. (2004) mit 10^{-4} angenähert.

4. Grundlegendes zur Pflanze *Ambrosia artemisiifolia* L. (Asteraceae)

4.1. Invasive Neophyten

Flora und Fauna sind auf der Erde einem ständigen Wandel unterworfen. Ein Beispiel für einen solchen Wandel ist die Einwanderung von Tier- oder Pflanzenarten in Regionen, in denen diese zuvor nicht vorkamen. Dies kann auf Grund eigener Mobilität der gebietsfremden Arten geschehen, häufig ist jedoch der Mensch für die Ausbreitung verantwortlich. So können beispielsweise Samen oder keimfähige Pflanzenteile über weite Strecken transportiert werden, wenn diese an Schiffen, Lastwägen oder Flugzeugen haften. Nachdem Amerika von Christoph Kolumbus für die Alte Welt entdeckt worden war, begann ein Zeitalter stark erhöhter Mobilität, was auch zu verstärkter Einschleppung gebietsfremder Arten führte. Dies führt zur Definition zweier Begriffe: Archäophyten sind Pflanzen, die sich schon vor der Entdeckung Amerikas ausgebreitet haben. Neophyten hingegen sind erst nach 1492 durch menschliche Aktivitäten in ein fremdes Gebiet vorgedrungen. Haben diese Arten negative Auswirkungen auf ihre neue Umgebung, so werden sie als 'invasiv' bezeichnet. So können sie in Konkurrenz zu heimischen Tier- und Pflanzenarten treten, zu Schäden in der Landwirtschaft führen oder gesundheitliche Probleme wie Allergien hervorrufen.

Die Art *Ambrosia artemisiifolia* L. (Asteraceae) ist ein Beispiel für einen solchen invasiven Neophyten. Sie stammt ursprünglich aus den Prärien Nordamerikas. Mitte des 19. Jahrhunderts wurde sie vermutlich über Getreide oder Kleesaat nach Europa eingeschleppt. In Deutschland wurden die ersten wild wachsenden Exemplare 1860 (Bundesamt für Naturschutz, 2008), beziehungsweise 1863 (Julius Kühn-Institut - Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, 2008) gefunden. Zunächst waren die noch recht kleinen Bestände auf Hafenanlagen, Bahnhöfe und Brachen beschränkt. Auch die Trümmerfelder des 2. Weltkrieges waren beliebte Standorte der Pflanzen. Erst zu Beginn der 1990er-Jahre begann die Art, sich vermehrt in Deutschland auszubreiten. Heutzutage werden die Samen hauptsächlich durch verunreinigtes Saatgut und Vogelfutter eingeschleppt. Verbreitet wird die Art außerdem durch Umschichtung kontaminierten Erdreichs, durch Haftung an landwirtschaftlichen Maschinen und Kraftfahrzeugen (Bundesamt für Naturschutz, 2008), durch Futtermitteltransporte oder durch illegales Abladen von Gartenabfällen, Vogelfutter- und Saatgutresten in der Landschaft (Alberternst und Nawrath, 2006).

Weltweit umfasst die Gattung *Ambrosia* etwa 40 Arten, von denen lediglich eine in Europa heimisch ist (*Ambrosia maritima*). Vier weitere Arten gelten mittlerweile in Europa als eingebürgert: *Ambrosia artemisiifolia* L., *Ambrosia trifida* L., *Ambrosia tenuifolia* und *Ambrosia coronopifolia*. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der *Ambrosia artemisiifolia* L., da sie zu erheblichen gesundheitlichen Proble-

men führen kann. Im deutschsprachigen Raum ist sie auch unter den Namen 'Beifußblättrige Ambrosie', 'Beifuß- oder Hohe Ambrosie' oder 'Beifußblättriges Traubenkraut' bekannt.

4.2. Charakteristika der Pflanze

4.2.1. Aussehen und Entwicklung

Die einjährige *Ambrosia artemisiifolia* L. gehört zur Familie der Korbblütler. Ihre Größe hängt stark von der Umgebung ab und kann zwischen 10 cm und 2 m betragen. In Deutschland erreicht sie meist eine Größe von bis zu 1,50 m (siehe Abbildung 4.1c). Ihre Blätter sehen fiedrig aus, wie man in Abbildung 4.1a erkennen kann. Sie sind behaart und auf Ober- und Unterseite grün. Es bilden sich an einer Pflanze sowohl weibliche als auch männliche Blüten aus. Die weiblichen Blüten sind sehr unscheinbar, da die Bestäubung über den Wind geschieht und keine Insekten angelockt werden müssen. Die gelbgrünen männlichen Blüten sitzen traubenförmig am Ende eines langgestreckten Blütenstandes (siehe Abbildung 4.1d). Die weiblichen Blüten sitzen unterhalb der männlichen Blüten am Stängel. Die behaarten Stängel sind bei jungen Pflanzen meistens grün, bei älteren sind sie rotbraun.

Die Keimung der Samen beginnt im Frühjahr, wenn sich der Boden auf 13 °C erwärmt hat (Kleinbauer et al., 2006). In Deutschland ist dies etwa ab März der Fall. Zunächst wachsen die Pflanzen nur sehr langsam, die Hauptwachstumszeit beginnt Mitte bis Ende Juni. Dann entwickelt sich die Pflanze sehr rasch. Dies macht eine Bekämpfung durch Schnitt sehr schwierig. Wird zu früh geschnitten, so erholt sich die Pflanze rasch und treibt erneut aus. Wird zu spät geschnitten, so haben sich möglicherweise bereits Blüten entwickelt und Pollen können freigesetzt werden. Experimente zur Bestimmung des idealen Schnittzeitpunktes wurden von Bohren et al. (2005) in der Schweiz durchgeführt.

Die Hauptblüte der Ambrosia, und damit die größte Pollenfreisetzung, findet zwischen August und Oktober statt. Geringere Mengen an Pollen werden jedoch auch im Juli und im November produziert. Die Untersuchungen von Stark et al. (1997) ergeben für die Pollensaison in Michigan eine Dauer von etwa 80 Tagen.

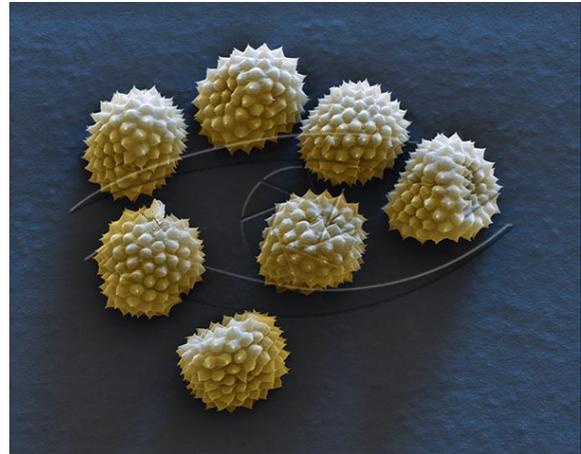
Die einjährigen Pflanzen sterben im Herbst ab, sobald die Temperaturen unter -5 °C fallen (Dahl et al., 1999).

4.2.2. Pollen und Samen

Pflanzen, die ihre Pollen durch den Wind verbreiten (Anemophilie), produzieren sehr viele Pollen, da nur ein geringer Prozentsatz sein Ziel, eine weibliche Blüte, erreicht. Bei der Ambrosia beträgt die Pollenproduktion, das ist die Gesamtmenge der pro Jahr von einer Pflanze produzierten Pollen, etwa eine Milliarde (Fumanal et al., 2007). Eine deutlich größere Pollenproduktion von 2,5 Milliarden Pollen wird bei Laaidi et al. (2003) angegeben. Die Größe der Pollen liegt nach Fumanal et al. (2007) zwischen $13.02 \pm 0.12 \mu\text{m}$ und $14.86 \pm 0.16 \mu\text{m}$. Tamarcaz et al. (2005) geben einen Durchmesser von 18 bis $22 \mu\text{m}$, Laaidi et al. (2003) von $25 \mu\text{m}$ an. Die Dichte der trockenen Pollen - inklusive der luftgefüllten Hohlräume -



(a) Blatt



(b) Pollen



(c) Pflanze



(d) männliche Blütenstände

Abb. 4.1.: Aussehen der *Ambrosia artemisiifolia* L., Quellen: Alberternst und Nawrath (2006) (a, c, d), Meckes und Ottawa GbR (2008) (b)

wird von Mandrioli et al. (2003) mit $0,83 \text{ g/cm}^3$ angegeben. Die festen Bestandteile der Pollen haben allerdings eine deutlich höhere Dichte von $1,30 \text{ g/cm}^3$. Da die Pollen zu einem Drittel aus Hohlräumen bestehen, ist ihre Dichte stark von der relativen Feuchte abhängig. Steigt die relative Feuchte auf Werte größer 75 %, so nimmt die Dichte der Pollen zu. Sind die Pollen für längere Zeit einer relativen Feuchte von 100 % ausgesetzt, so quellen sie auf und die luftgefüllten Hohlräume werden kleiner. Folglich steigt die Pollendichte auf Werte von $1,2 \text{ g/cm}^3$. Solange sich die Pollen in den Pollensäcken befinden, sind sie wassergesättigt. Nach ihrer Emission verlieren sie ihre überschüssige Feuchte sehr rasch. Gemäß Mandrioli et al. (2003) erreicht die Evaporation des Wassers in den Pollen nahezu die gleiche Größenordnung wie die Evaporation eines gleich großen Wassertropfens.

Die Pollen besitzen kleine flache Stacheln, wie in Abbildung 4.1b zu sehen ist. Diese befinden sich in den Pollensäcken (Antheren) der männlichen Blüten, welche unter bestimmten Bedingungen platzen und dabei die Pollen in die Umgebungsluft freisetzen. Voraussetzungen für ein Platzen der Pollensäcke sind eine hohe Lufttemperatur und niedrige relative Feuchte. Die Pollen werden daher hauptsächlich bei sonnigem, trockenem Wetter emittiert (Dahl et al., 1999). Bianchi et al. (1959) haben die Freisetzung der Pollen genauer untersucht. Sie fanden heraus, dass jede Blüte nur ein einziges Mal Pollen freisetzen kann, danach öffnet sie sich nicht mehr. Zwischen dem Aufgehen der ersten Blüte und der maximalen Anzahl geöffneter Blüten vergehen nach Bianchi et al. (1959) zwischen 30 Minuten und 2 Stunden. Die Pollenfreisetzung fand bei allen untersuchten Pflanzen zwischen 6.30 Uhr und 8.00 Uhr morgens statt, also in einer Zeit, in der die Temperaturen steigen und die relative Feuchte abnimmt. Exakte Schwellenwerte für Temperatur und relative Feuchte konnten nicht bestimmt werden. Ab einer Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte unter 60 % konnte eine deutliche Pollenabgabe beobachtet werden. Dies wird von Puc (2006) bestätigt, der nur an Tagen mit einer Maximaltemperatur über $20 \text{ }^\circ\text{C}$ Ambrosiapollen fand. Doch Bianchi et al. (1959) konnten auch vor Erreichen dieser Schwellenwerte eine - wenn auch geringere - Freisetzung der Pollen beobachten. Welchen Einfluss Temperatur, Feuchte und Wind auf die Pollenfreisetzung haben, ist umstritten. Tamarcaz et al. (2005) haben nur einen geringen Einfluss der Temperatur und der relativen Feuchte auf die Anzahl der gefangenen Ambrosiapollen feststellen können. Niederschlag und die Schichtung der Atmosphäre haben ihnen zufolge weitaus größere Auswirkungen auf die Pollenkonzentration in der Luft. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch Peternel et al. (2006). Puc (2006) hingegen findet Korrelationen zwischen der Pollenkonzentration und den meteorologischen Parametern relative Feuchte, Temperatur und maximale Windgeschwindigkeit. Zwischen dem Niederschlag und der Pollenkonzentration herrsche dagegen keine Korrelation. Stefanic et al. (2005) finden schwache Korrelationen zwischen der Pollenkonzentration und der Maximal-, sowie der Minimaltemperatur, der Temperaturspanne ($T_{max} - T_{min}$), der Sonnenscheindauer, der relativen Feuchte und dem Niederschlag. Starke Korrelationen sind dagegen nur zwischen der Pollenkonzentration und der mittleren Temperatur gegeben.

Einige der physikalischen Eigenschaften von Ambrosiapollen wurden durch Raynor et al. (1970) untersucht. Die Sinkgeschwindigkeit liegt im Mittel bei $1,56 \text{ cm/s}$. Sie beschreibt die Endgeschwindigkeit

eines fallenden Teilchens in einem Fluid, die sich aufgrund des Gleichgewichts zwischen Gravitations- und Reibungskraft einstellt. Die Depositionsgeschwindigkeit berücksichtigt zusätzlich den Prozess der Entfernung eines Teilchens aus dem Fluid. Hierbei sind - je nach Art des Teilchens und des Fluides - verschiedene Mechanismen wirksam. Ein Beispiel für einen solchen Mechanismus ist die Auswaschung des Teilchens durch Niederschlag. Nach Raynor et al. (1970) beträgt die Depositionsgeschwindigkeit von Ambrosiapollen im Mittel 5,05 cm/s.

Werden die weiblichen Blüten bestäubt, so kann sich pro Blüte eine Frucht mit einem einzelnen Samenkorn entwickeln. Große Pflanzen können so bis zu 62000 Samen produzieren. Im Normalfall liegt die Zahl bei 3000 bis 4000 Samen pro Pflanze (Julius Kühn-Institut - Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, 2008). Fumanal et al. (2007) geben als mittlere Samenproduktion pro Pflanze und Jahr 2518 ± 271 an. Die Anzahl der Samen korreliert stark mit der Trockenmasse und dem Volumen der Pflanze. Im Boden bleiben die Samen bis zu 39 Jahre keimfähig (Toole und Brown, 1946). Sie besitzen keinen Mechanismus, mit dem sie sich selbst fortbewegen könnten (Autochorie). Daher sind sie auf eine Ausbreitung durch den Menschen (Hemerochorie) oder über Wasserwege (Hydrochorie) angewiesen. Eine Ausbreitung an Tieren ist ebenfalls denkbar (Zoochorie).

4.2.3. Anforderungen an den Standort

Viel Licht und Wärme sind wichtig für das Wachstum der Ambrosia, was sich in der bevorzugten Standortwahl offener Flächen zeigt. Sie ist deshalb häufig in Neubaugebieten, auf Brachen, in Industriegebieten, an Straßenrändern, auf Baustellen, Schutthalden und Mülldeponien zu finden. Weitere typische Standorte umfassen Hausgärten, Vogelfutterplätze, Parkanlagen und Äcker (Alberternst und Nawrath, 2006). An die Böden werden keine besonderen Ansprüche gestellt. Der pH-Wert kann von sauer bis basisch reichen (Bundesamt für Naturschutz, 2008). Auch salzhaltige Böden sind kein Hindernis für die Ambrosia. Sie wächst hauptsächlich bis in Höhen von etwa 400 bis 500 m über Normalnull (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2009).

Über die Notwendigkeit ergiebiger Sommerniederschläge finden sich in der Literatur widersprüchliche Meinungen. So wird der Pflanze vom Bundesamt für Naturschutz (2008) eine recht hohe Toleranz gegenüber Trockenheit attestiert. Dies sei eine Folge davon, dass die Ambrosia ursprünglich aus den nordamerikanischen Prärien stammt. Auf der anderen Seite benötigt die Pflanze laut Alberternst und Nawrath (2006) ausreichende Sommerniederschläge, weshalb sie im sommertrockenen Mittelmeerraum nicht anzutreffen sei. Einzelne Pflanzen könnten jedoch auch in trockenen Regionen an Straßenrändern wachsen, da die Straße die Niederschläge sammelt und die Straßenränder somit lokal über einen leicht erhöhten Wassergehalt verfügen.

Für die Bildung keimfähiger Samen ist eine genügend lange Wachstumsphase mit mindestens 150 frostfreien Tagen nötig. Zusätzlich müssen die Samen im Winter Frost ausgesetzt sein, damit sie im Frühjahr keimen können.

Mögliche Auswirkungen des Klimawandels wurden von Ziska et al. (2007) untersucht. Es ergab sich,

dass bei höherer Temperatur und gestiegenen CO₂-Konzentrationen die Wachstumsphasen länger sind. Da laut Fumanal et al. (2007) die Trockenmasse der Pflanze mit ihrer Pollenproduktion korreliert ist, ergibt sich damit eine erhöhte Pollenbelastung durch den Klimawandel. Dies stimmt mit den Untersuchungen von Wayne et al. (2002) überein, die bei verdoppeltem CO₂-Gehalt der Luft eine Erhöhung der Pollenproduktion um 63 % festgestellt haben. Einen Vergleich zwischen der Pollenproduktion unter vorindustrieller, heutiger und zukünftiger CO₂-Konzentration ist bei Ziska und Caulfield (2000) zu finden. Ihre Studie belegt, dass im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten die heutige Pollenproduktion auf 131 % gestiegen ist. Mit einer weiteren Zunahme der CO₂-Konzentration ist mit einer Erhöhung der Pollenproduktion auf 320 % des vorindustriellen Niveaus zu rechnen. Die Auswirkungen eines gestiegenen CO₂-Gehaltes in der Luft - und damit eines zusätzlichen Angebots an Kohlenstoff - auf Pflanzen in dichten Beständen wurde von Stinson und Bazzaz (2006) untersucht. Ihnen zufolge werden die Unterschiede zwischen über- und untergeordneten Pflanzen eines Bestandes angeglichen, was dazu führt, dass eine größere Anzahl Einzelpflanzen an der Pollen- und Samenproduktion beteiligt ist. Insgesamt erhöht sich damit die Anzahl der Pollen und Samen, die in einem Bestand produziert werden können.

4.3. Verbreitung in Europa

Die genaue Verbreitung der *Ambrosia artemisiifolia* L. ist nicht bekannt. Dies liegt insbesondere daran, dass gefundene Bestände in einigen Ländern zerstört werden müssen. Da die Samen im Boden mehrere Jahrzehnte keimfähig bleiben, ist dies allerdings keine Garantie dafür, dass diese Standorte in Zukunft frei von Ambrosiapflanzen sein werden. Nur wenige der Bestände sind etabliert und bilden in jedem Jahr an der gleichen Stelle einen Bewuchs aus, was daran liegt, dass nur wenige Bestände keimfähige Samen bilden können (Chauvel et al., 2006). Die meisten Bestände sind demzufolge der Unachtsamkeit des Menschen zuzuschreiben.

Ein weiteres Problem ist die schlechte Qualität der Bestandsangaben. Häufig fehlen die Jahreszahlen der Funde, ebenso wie Angaben über die Größe und Beständigkeit des Bewuchses (Alberternst et al., 2006). Über einzelne Pflanzen in Hausgärten, die durch verunreinigtes Vogelfutter entstanden sind, gibt es nur selten Angaben. Gerade diese Bestände sind häufig nur in einzelnen Jahren vorhanden und pflanzen sich nicht selbst fort. Sie stellen jedoch auf Grund ihrer großen Nähe zu menschlichen Wohnorten ein erhöhtes Risiko für allergische Menschen dar.

Die ersten größeren Ambrosia-Bestände Europas haben sich in Ungarn und Südfrankreich etabliert. Von diesen Gegenden ausgehend hat sich die Pflanze mittlerweile in fast allen Ländern Mittel- und Osteuropas angesiedelt (siehe Tabelle 4.1). Besonders stark betroffen sind jedoch nach wie vor Ungarn (siehe Abbildung 5.1f), die Gegend um Lyon in Frankreich und die Poebene in Italien. Alberternst et al. (2006) haben die Verbreitung der Ambrosia in Deutschland untersucht. Sie haben eine Karte der Landkreise erstellt, in denen Bestände von mindestens 100 Pflanzen vorkommen (Abbildung 5.1c). Demzufolge ist die Ambrosia mittlerweile besonders in Süd- und in Ostdeutschland eingebürgert. Alberternst et al. (2006) vermuten, dass kleinere Vorkommen meistens durch verunreinigtes Vogelfutter entstehen und unbestän-

dig sind. Ihre systematische Erfassung und Darstellung in Verbreitungskarten ist daher äußerst schwierig.

Tab. 4.1.: Länder Europas, in denen Ambrosiabestände nachgewiesen wurden

Land	Quelle
Ungarn	Járai-Komlódi (2000); Makra et al. (2004)
Frankreich	Laaidi et al. (2003); Laaidi und Laaidi (1999)
Italien	Zanon et al. (2002); Mandrioli et al. (1998)
Deutschland	Alberternst et al. (2006)
Schweiz	Tamarcaz et al. (2005); Köhler et al. (2006)
Österreich	Jäger (2000)
Spanien	M. d. M. Trigo und García-Sánchez (2006)
Bulgarien	Yankova et al. (2000)
Baltikum	Saar et al. (2000)
Tschechien	Rybníček et al. (2000)
Ukraine	Song und Prots (1998)
Polen	Stepalska et al. (2002); Piotrowska und Weryszko-Chmielewska (2006); Stach et al. (2007)
ehemaliges Jugoslawien	Laaidi et al. (2003)
Schweden	Dahl et al. (1999)

4.4. Schäden durch Ambrosia

Die negativen Auswirkungen der Ambrosiapflanzen sind beträchtlich. Sie reichen von Einbußen in der Landwirtschaft durch Verunreinigung der Felder bis hin zu gesundheitlichen Problemen in der Bevölkerung.

Treten Ambrosiapflanzen in einem bewirtschafteten Feld auf, so führt dies zu einer Verminderung des Ertrags. In manchen Ländern Europas ist der Landwirt in einem solchen Fall sogar verpflichtet, die gesamte Ernte auf diesem Feld zu zerstören, um eine Ausbreitung der Ambrosia zu verhindern. Als Beispiel sei hier die Schweiz genannt, wo die Ambrosia als besonders gefährliches Unkraut angesehen wird (SR 916.20 Verordnung über Pflanzenschutz).

Was die Allgemeinheit jedoch noch stärker betrifft, sind die gesundheitlichen Aspekte. Die Ambrosia hat das weltweit stärkste bekannte Allergen. Bereits bei einer Menge von 5 bis 10 Ambrosiapollen/m³ können allergische Reaktionen auftreten (Tamarcaz et al., 2005). Sehr empfindliche Menschen können jedoch auch bereits bei 1 bis 3 Pollen/m³ gesundheitliche Probleme bekommen. Tabelle 4.2 zeigt einen Vergleich zwischen den Belastungsklassen für Ambrosiapollen und für Gräserpollen.

Symptome der Pollenallergie umfassen Fließschnupfen, Bindehautentzündungen, Asthma, Abgeschlagenheit, Müdigkeit und Kopfschmerzen. Zudem sind nicht nur die Pollen der *Ambrosia* allergen, die Berührung der Pflanze kann Kontaktdermatitis (Hautreizungen) hervorrufen. In Gegenden ohne *Ambrosia*-bestände sind meist nur wenig Menschen gegen ihre Allergene allergisch. Nach einer Etablierung der Pflanzen entwickeln aber viele Menschen eine Sensibilisierung gegenüber *Ambrosia*-pollen. Bis zu 12 % der Bevölkerung sind in Gegenden mit *Ambrosia*-vorkommen allergisch (Tamarcaz et al., 2005). Ein weiteres Problem stellen Kreuzallergien dar. Menschen, die eine Allergie gegen *Ambrosia* entwickelt haben, können danach auch gegen andere Pflanzen allergisch sein, die ihnen vorher keine Probleme bereitet haben (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2009). Dies können andere Korbblütler sein, aber auch Nahrungsmittel wie die Melone können bei einer *Ambrosia*-allergie zu Gesundheitsbeschwerden führen. Die *Ambrosia* blüht sehr spät im Jahr, wenn die meisten anderen allergen wirkenden Pflanzen bereits verblüht sind. Daher verlängert sich der Zeitraum, in dem Allergiker mit Gesundheitsproblemen rechnen müssen (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2009). Die medizinische Versorgung eines Allergikers kostet im Jahr etwa 630 Euro. Insgesamt beläuft sich heutzutage der Schaden auf Grund von *Ambrosia*-pflanzen in der Bundesrepublik auf 19 bis 50 Millionen Euro jährlich (Reinhardt et al., 2003). Auf Grund dieser enormen Kosten gilt die *Ambrosia* als der teuerste aller invasiven Neophyten (Julius Kühn-Institut - Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, 2008).

Tab. 4.2.: Belastungsklassen für *Ambrosia*- und Gräserpollen im Vergleich (Zahlenangaben in Pollen pro m³ Luft).
Quelle: Köhler et al. (2006)

Belastungsklasse	Ambrosia	Gräser
gering	1-5	1-19
mäßig	6-10	20-49
stark	≥ 11	≥ 50

5. Datengrundlage

5.1. Verbreitung der Ambrosia in Europa

Es ist äußerst schwierig, an aktuelle Daten zur Verbreitung der Ambrosia in Europa zu kommen. Dies hat mehrere Gründe. Da die Pflanze einjährig ist, können sich nur dann Bestände bilden, wenn keimfähige Samen vorhanden sind. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten: im Vorjahr waren Ambrosiapflanzen an derselben Stelle vorhanden und die Witterungsbedingungen haben die Bildung keimfähiger Samen ermöglicht. Oder die Samen wurden durch menschliche Aktivitäten ausgebracht. Die meisten der kleineren Bestände an Ambrosia in Europa wachsen vermutlich aus Samen, die von Menschen versehentlich oder durch Unwissenheit verbreitet wurden. Es ist einsichtig, dass diese Bestände nur sehr schwer zu erfassen sind. Des Weiteren werden in vielen Ländern Europas Ambrosiabestände zerstört, sobald sie lokalisiert wurden. So ist selbst im Jahr des Fundes nicht gewährleistet, dass sich auch während der Pollensaison noch Pflanzen am Fundort befinden. Um die Ausbreitung der Pollen berechnen zu können, ist außerdem neben dem Fundort auch die Größe des Bestandes, also entweder die Anzahl der Pflanzen oder der Anteil der Landoberfläche, der mit Ambrosia bewachsen ist, von großem Interesse. Diese Angaben fehlen in den meisten Fällen. Die Kenntnisse über die Verbreitung der Ambrosia sind also weder aktuell noch präzise.

Einige Länder Europas haben im Internet offizielle Informationsseiten über die Ambrosia erstellt. Auf diesen Seiten finden sich häufig Karten, die die Verbreitung der Ambrosia im jeweiligen Land anzeigen. Des Weiteren sind für einige Länder Informationen über die Verbreitung der Pflanze in wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu finden. Die Qualität der Karten variiert allerdings stark (Abbildung 5.1). So wurde uns von Apatini et al. (2006) für Ungarn eine sehr detaillierte Karte zur Verfügung gestellt, auf der für einzelne Regionen angegeben wird, welcher Prozentsatz der Landoberfläche mit Ambrosia bewachsen ist. Um auf die Menge der potentiell für Emission vorhandenen Pollenkörner zu kommen, muss lediglich eine Annahme über die Anzahl der Ambrosiapflanzen pro Quadratmeter Land gemacht werden. Für Frankreich sind mehrere Karten im Internet zu finden. Zum einen handelt es sich dabei um Karten, in denen einzelne Ambrosiabestände (teilweise mit Angabe des Fundjahres) eingezeichnet sind. Über die Größe und Beständigkeit der jeweiligen Bestände ist allerdings nichts zu erfahren. Zum anderen gibt es Karten, in denen durch flächenhafte Einfärbung der Grad des Ambrosiabefalls wiedergegeben ist. Die Abstufungen hierbei sind 'starkes Vorkommen', 'häufiges Vorkommen', 'gelegentliches Vorkommen' und 'punktuelles Vorkommen'. Wie diese Angaben quantitativ zu interpretieren sind, bleibt ungeklärt. Auch für Deutschland sind verschiedene Karten vorhanden. Eine detaillierte Karte von Otto et al. (2008) zeigt durch flächenhafte Einfärbungen an, ob in einem Landkreis Ambrosiabestände vorkommen. Die

Farbe liefert dabei die Information über die Größe des Bestandes. Die Anzahl der Bestände innerhalb eines Landkreises ist unbekannt. Weitere Informationen sind als Schraffuren eingezeichnet. Eine weitere Karte zeigt die Landkreise an, in denen große Bestände mit mehr als 100 Pflanzen wachsen. Auch hier fehlt eine Angabe darüber, wieviele dieser Bestände in den einzelnen Landkreisen vorkommen. Auch für die Schweiz und Tschechien konnten Verbreitungskarten der Ambrosia gefunden werden. In diesen sind wiederum die Standorte einzelner Ambrosiabestände enthalten, jedoch ohne Angabe der Größe und Beständigkeit.

Zusätzlich zu den Verbreitungskarten steht ein digitaler Datensatz mit Standorten von Ambrosiabeständen in Österreich und Deutschland zur Verfügung. Diesen haben wir freundlicherweise vom VINCA-Institut (Vienna Institute for Nature Conservation and Analyses) erhalten. Er enthält neben der geographischen Lage der Fundorte auch das Jahr des Fundes, sowie eine Statusangabe, inwieweit die Ambrosiabestände eingebürgert sind. Sämtliche Fundorte in Deutschland gehören dem Status 0 (fraglich, ob überhaupt relevant) oder dem Status 1 (unbeständig) an. Da es sich hierbei offensichtlich um kurzlebige Ambrosiabestände handelt, werden Fundorte mit diesen beiden Statusangaben in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet.

Eine Zusammenstellung aller Informationen zur Verbreitung findet sich in Tabelle 4.1.

Da für die meisten Länder keine digitalen Funddaten zur Verfügung stehen, wurden einige der vorhandenen Karten so gut wie möglich in digitale Daten umgewandelt. Die Vorgehensweise bei der Digitalisierung wird in Kapitel 6 genauer beschrieben. Da die Digitalisierung der Karten viel Zeit beansprucht, konnten nicht alle vorhandenen Karten verwendet werden. Die Karten wurden anhand von zwei Kriterien ausgewählt: (1) Aufwand bei der Digitalisierung und (2) Relevanz für die untersuchte Pollenepisode. Das erste Kriterium kommt bei den vorhandenen Deutschlandkarten zum Tragen: Abbildung 5.1d beinhaltet deutlich detailliertere Informationen als Abbildung 5.1c. Allerdings sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Farbtönen nicht groß, sodass die Auswahl von Flächen gleicher Farbe schwierig ist. Des Weiteren sind zusätzliche Informationen als Schraffuren eingearbeitet, was die eindeutige Einteilung der Flächen nach Farben noch deutlich schwieriger macht. Eine Digitalisierung der Abbildung 5.1c kann dagegen recht gut realisiert werden. Die eigentliche Information steckt in den roten Flächen. Als weitere Farben sind nur schwarz und weiß vorhanden, sodass die Auswahl der roten Flächen sehr einfach zu bewerkstelligen ist. Bei den Verbreitungskarten für Frankreich und die Schweiz greift dagegen das zweite Auswahlkriterium. Da eine Pollenepisode in Nordostdeutschland untersucht wird, während der die Winde hauptsächlich aus südöstlichen Richtungen kamen, sind Ambrosiastandorte im Westen und Südwesten von Deutschland nicht von Belang. Somit beschränkt sich die Digitalisierung der Verbreitungskarten auf je eine Karte für Deutschland, Ungarn und Tschechien (siehe Abb. 6.2).

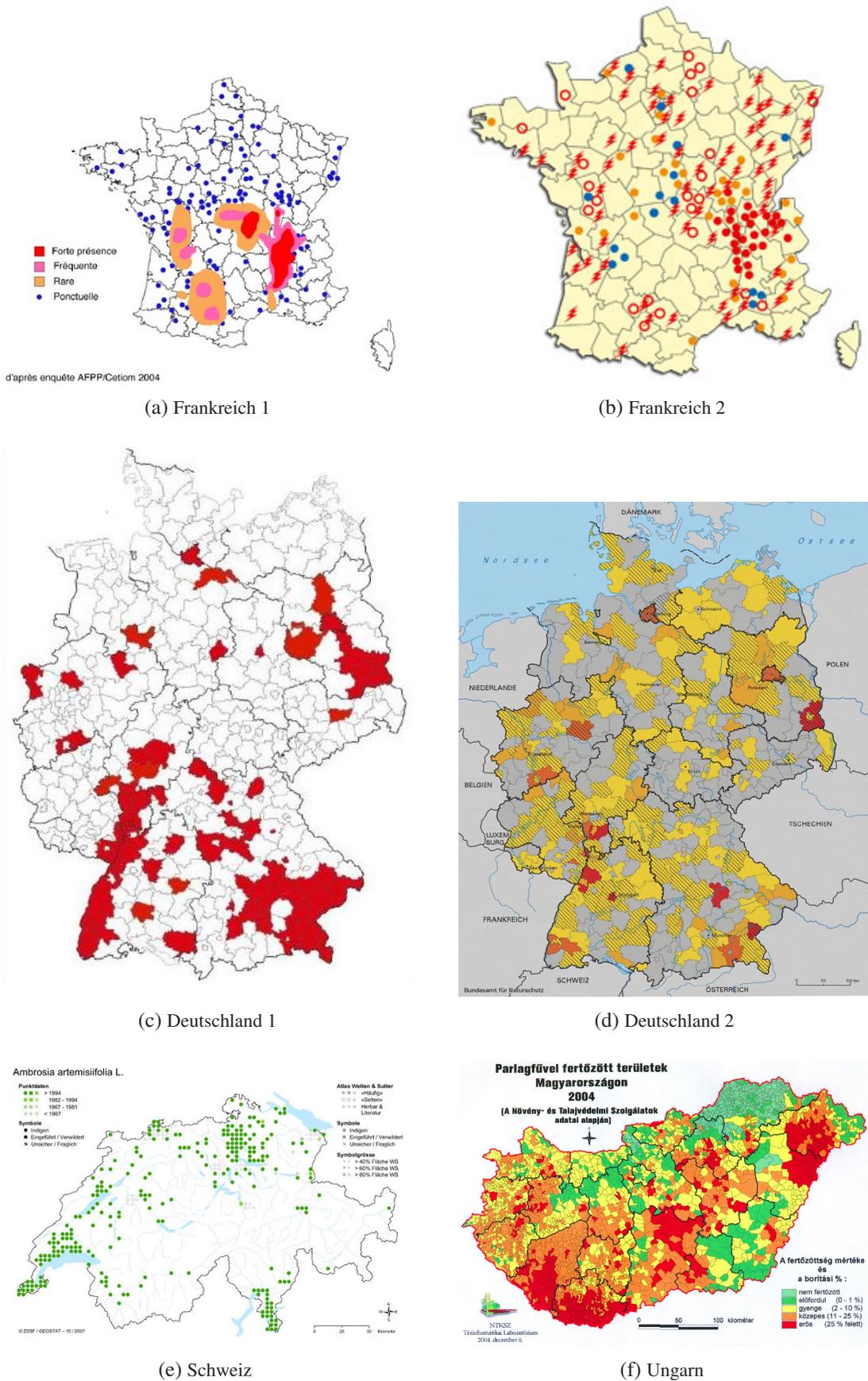


Abb. 5.1.: Beispiele für im Internet verfügbare Verbreitungskarten der Ambrosia in Europa. Man erkennt deutlich die unterschiedliche Qualität der verschiedenen Karten, sowie den stark variierenden Informationsgehalt der Karten. Diese Abbildung dient lediglich als Übersicht über die verschiedenen Kartentypen, weshalb keine Erklärung der einzelnen Symbole oder Farbcodierungen angegeben ist.

5.2. Pollenmessungen

Die Pollenkonzentration in der Luft kann mit Burkhard-Pollenfallen gemessen werden (Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst, 2009). Dabei wird Luft angesaugt und über einen Haftstreifen geleitet, auf dem sich die Pollen absetzen. Der Haftstreifen befindet sich auf einer sich drehenden Trommel, wodurch eine zeitliche Zuordnung der abgesetzten Pollen möglich ist. Eine Windfahne, die mit der Ansaugvorrichtung verbunden ist, sorgt dafür, dass die angesaugte Luft aus der aktuellen Windrichtung stammt. Zur Auswertung der Messungen werden die Haftstreifen entfernt und unter einem Mikroskop untersucht. Da das Volumen der angesaugten Luft bekannt ist, kann aus der Anzahl der abgesetzten Pollen die Konzentration ermittelt werden.

Die Konzentrationen der Ambrosiapollen in der Luft werden von der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (PID) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) an einigen Pollenmessstationen innerhalb Deutschlands gemessen. Für das Jahr 2006 stehen uns Konzentrationsmessungen an 43 Stationen zur Verfügung. Es handelt sich um Tagesmittelwerte der Ambrosiapollenkonzentration. Eine Auflistung aller Messstationen findet sich in Tabelle 5.1, ihre Lage zeigt Abbildung 5.2.

Auch für Ungarn stehen uns Messungen der Pollenkonzentration im Jahr 2006 zur Verfügung. Diese stammen von Apatini et al. (2006) und umfassen Messungen an 16 Stationen. Die Lage der Messstationen zeigt Abbildung 5.3, die Koordinaten sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

5.3. Anfangs- und Randwerte, externe Parameter

Für Simulationen mit einem numerischen Ausschnittsmodell wie COSMO-ART sind Anfangs- und Randwerte der meteorologischen Felder notwendig. Diese stammen vom European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (2009) in Reading. Auf eine Beschreibung des Modells soll hier verzichtet werden. Eine Dokumentation findet sich auf der Homepage des ECMWF unter:

<http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY31r1/index.html>

Um die Wechselwirkungen zwischen Erde und Atmosphäre simulieren zu können, sind weitere Informationen über die Eigenschaften der Erdoberfläche notwendig. Hierzu zählen die Orographie, die Landnutzung, die Bodenarten und die Jahresmitteltemperatur nahe der Erdoberfläche. Aus diesen können weitere Daten bestimmt werden, die ebenfalls benötigt werden: die Rauigkeitslänge, der Landanteil, Pflanzencharakteristika, Wälder und thermische und hydraulische Parameter des Bodens.



Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst

Pollenmessstationen



LEGENDE

Stand: November 2006

- PID-Referenzmessstelle
(ganzjährige Pollenanalyse)
- aktive PID-Pollenmessstationen
(saisonale Pollenanalyse)
- ▲ inaktive PID-Pollenmessstationen
(saisonale Pollenanalyse)

Abb. 5.2.: Lage der Pollenmessstationen in Deutschland. Quelle: Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (2009)

Tab. 5.1.: Übersicht über die Messstationen in Deutschland und Ungarn

Station	geogr. Länge	geogr. Breite	Station	geogr. Länge	geogr. Breite
Aukrug	54,0667	9,7333	Neustadt	51,5830	11,0000
Bad Lippspringe	51,7800	8,8166	Neustrelitz	53,3660	13,0830
Berlin	52,5000	13,4000	Norderney	53,7200	7,1500
Binz	54,3830	13,4160	Oberjoch	47,5150	10,4050
Bochum	51,5000	7,2000	Potsdam	52,3550	13,1010
Bonn	50,7500	7,1000	Prerow	54,4330	12,5830
Buxtehude	53,4500	9,7000	Rostock	54,1000	12,1000
Chemnitz	50,8500	12,9000	Soest	51,5500	8,1000
Delmenhorst	53,0510	8,8320	Treuenbrietzen	52,1000	12,8660
Dresden	51,0500	13,7455	Vechta	52,7160	8,2830
Erlangen	49,5890	11,0040	Wangen	47,6880	9,8120
Flensburg	54,7820	9,4366	Westerloge	53,0330	8,5330
Freiburg	48,0000	7,9000	Zusmarshausen	48,3970	10,6140
Fulda	50,7850	9,8000	Budapest-Buda	19,04	47,50
Garz	54,3040	13,3780	Budapest-Pest	19,04	47,50
Gerlingen	48,8300	9,1010	Debrecen	21,64	47,53
Göttingen	51,5660	9,9200	Eger	20,37	47,90
Greifswald	54,1000	13,3830	Gyor	17,64	47,68
Hagen	51,4000	7,5000	Kecskemét	19,69	46,91
Hannover	52,4000	9,7500	Miskolc	20,79	48,10
Heidelberg	49,4100	8,6500	Mosdós	17,99	46,36
Jena	50,9500	11,5700	Nyíregyháza	21,73	47,95
Kiel	54,4000	10,1200	Pécs	18,23	46,07
Königsfeld	48,2500	8,4200	Salgótarján	19,79	48,09
Löwenstein	49,0500	9,4200	Szeged	20,15	46,25
Lübeck	53,9000	10,6800	Szekszárd	18,70	46,36
Magdeburg	52,1000	11,6000	Szolnok	20,18	47,17
Mönchengladbach	51,2400	6,4800	Szombathely	16,62	47,24
München	48,2000	11,7000	Tatabánya	18,39	47,59
Münnerstadt	50,2510	10,1660			



Abb. 5.3.: Lage der Pollenmessstationen in Ungarn. Quelle: Apatini et al. (2006)

6. Digitalisierung der Verbreitungskarten

Für die Berechnung der Pollenausbreitung ist es notwendig, die Menge der emittierten Pollen an jedem Gitterpunkt zu kennen. Um diese Pollenmenge zu ermitteln gibt es zwei Möglichkeiten, die sich nach der Art der vorhandenen Informationen richten. Wenn die genaue Lage eines Bestandes und seine Größe bekannt sind, ergibt sich die Pollenmenge als Produkt aus der Anzahl der Pflanzen im Bestand und der Pollenproduktion pro Pflanze. Ist dagegen bekannt, welcher Anteil der Gesamtfläche mit Ambrosiapflanzen bewachsen ist, so berechnet sich die Pollenmenge aus der Pollenproduktion pro Pflanze, der Anzahl der Pflanzen pro Quadratmeter und der Größe der bewachsenen Fläche. Prinzipiell lassen sich bei den Verbreitungskarten drei Typen unterscheiden:

- Typ I: der prozentuale Anteil der mit Ambrosia bewachsenen Fläche ist angegeben
- Typ II: die Lage einzelner Ambrosiabestände ist eingezeichnet
- Typ III: es ist angegeben, ob in einer bestimmten Region Ambrosiabestände vorkommen oder nicht

Die Qualität der Informationen variiert stark zwischen den einzelnen Verbreitungskarten. Im ersten Fall kann direkt eine Pollenmenge pro Gitterpunkt ermittelt werden, die Genauigkeit ist dabei durch die Einteilung der Farbskala und die räumliche Auflösung der Karte limitiert. Sind in der Karte einzelne Bestände eingezeichnet, so ist zwar ihre genaue Lage bekannt, Informationen über die Größe der Bestände fehlen allerdings. Man muss zusätzliche Annahmen machen, um eine Pollenmenge angeben zu können. Karten, die lediglich Regionen anzeigen, in denen Ambrosiabestände vorkommen, bieten die geringste Information. Weder die genaue Lage der Pflanzen, noch die Anzahl der Pflanzen oder die Dichte des Bewuchses sind bekannt. Es ist daher fraglich, ob Karten diesen Typs verwendet werden können.

Bei digitalen Bildern sind prinzipiell zwei Farbschemata zu unterscheiden: CMY und RGB. Das CMY-Farbmodell erklärt die Entstehung unterschiedlicher Farben durch Subtraktion einzelner Farbanteile (Cyan, Magenta, Yellow). Auf eine genauere Beschreibung wird hier verzichtet, da dieses Schema in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet wurde. Beim RGB-Modell werden die Farben durch Addition der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau beschrieben. Je nach Anteil der einzelnen Farben ergibt sich die neue Farbe. Diese Vorstellung basiert auf der Biologie des menschlichen Auges: die auf Farbe sensitiven Zapfen im Auginneren können die drei Farben Rot, Grün und Blau unterscheiden. Wird ein digitales Bild im bitmap-Format gespeichert, so werden drei Matrizen für die Farbanteile Rot, Grün und Blau angelegt. Jedes Element dieser drei Matrizen gibt für einen bestimmten Bildpunkt den Anteil der roten, grünen und blauen Farbe an. Somit können Informationen, die sich in der Farbe eines Bildpunktes ausdrücken, dadurch digitalisiert werden, dass die drei Farbmatrizen ausgewertet werden.

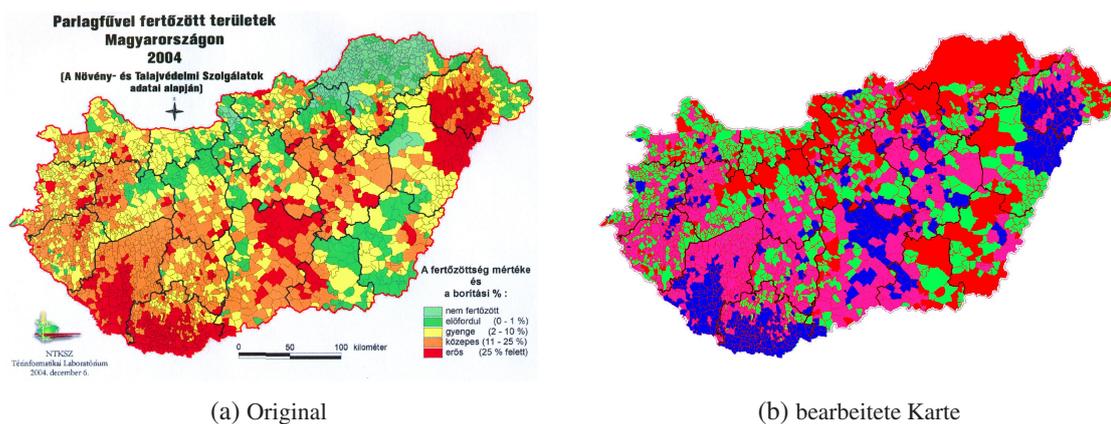
6.1. Ungarn

Mithilfe eines bildverarbeitenden Programmes wurde ein einfaches Verfahren entwickelt, um Verbreitungskarten in digitale Daten umwandeln zu können. Dieses Verfahren wird im Folgenden vorgestellt. Die Verbreitungskarte für Ungarn gehört zum Typ I der Karten und bietet die detailliertesten Informationen. Flächenhafte Einfärbungen zeigen an, welcher Anteil der Gesamtfläche einer Region von Ambrosia bewachsen ist. Es werden dabei fünf verschiedene Bewuchsdichten unterschieden:

- hellgrün: kein Bewuchs durch Ambrosia
- dunkelgrün: 0 - 1 % der Fläche durch Ambrosia bewachsen
- gelb: 2 - 10 % der Fläche durch Ambrosia bewachsen
- orange: 11 - 25 % der Fläche durch Ambrosia bewachsen
- rot: mehr als 25 % der Fläche durch Ambrosia bewachsen

Das Problem besteht darin, die Farbe jedes einzelnen Bildpunktes zu bestimmen. Allerdings sind in der Originalkarte die Farbflächen nicht homogen, sodass nicht alle Punkte der gleichen Bewuchsklasse die gleiche Farbe haben. Als erstes müssen daher die verschiedenen Flächen neu eingefärbt werden, sodass alle Bildpunkte innerhalb einer Bewuchsklasse die gleiche Farbe besitzen. In einem Bildbearbeitungsprogramm können Flächen gleicher Farbe markiert werden. Indem die Farbtiefe reduziert wird, können dabei auch Flächen ähnlicher Farbe bestimmt werden. Diese Flächen werden dann mit einer einheitlichen Farbe belegt und somit der Status der Fläche vereinheitlicht. Um bei der späteren Digitalisierung der Karte lediglich eine Matrix auswerten zu müssen, wird der Wert des blauen Farbanteils der neuen Farben so gewählt, dass er der Bewuchsklasse der jeweiligen Fläche entspricht. Die beiden Klassen mit dem geringsten Ambrosiabewuchs werden dabei in einer Klasse zusammengefasst. Außerhalb der Ländergrenzen Ungarns beinhaltet die Verbreitungskarte keine Information über die Dichte des Ambrosiabewuchses. Da sämtliche Bildpunkte außerhalb der Ländergrenzen weiß sind, können sie eindeutig bestimmt werden. Ihnen wird der Status 0 zugewiesen, der für Flächen ohne Ambrosiabewuchs steht. Weiterhin muss die Umrandung der Verbreitungskarte entfärbt werden, da diese die gleiche Farbe hat wie der höchste Status. Abbildung 6.1 zeigt das Originalbild und das bearbeitete Bild.

Um den Bildpunkten der Karte geographische Koordinaten zuordnen zu können, muss die geographische Lage der Eckpunkte der Verbreitungskarte bekannt sein. Das Programm 'Google Earth' enthält das Werkzeug 'Bild-Overlay'. Damit kann über eine programminterne Landkarte ein beliebiges Bild gelegt werden. Dieses Bild kann in seiner Größe verändert werden, kann gedreht und verzerrt werden, und kann beliebig transparent gemacht werden. Um die Eckpunkte der Ambrosiaverbreitungskarte zu bestimmen, wird diese mittels 'Bild-Overlay' über die Landkarte Ungarns gelegt. Die Transparenz der Verbreitungskarte wird so stark erhöht, dass sowohl die Ländergrenzen der Landkarte als auch die Ländergrenzen der Verbreitungskarte zu erkennen sind. Durch Verschieben und Drehen der Verbreitungskarte werden



(a) Original

(b) bearbeitete Karte

Abb. 6.1.: Original und bearbeitete Verbreitungskarte für Ungarn

die Ländergrenzen beider Karten zur Deckung gebracht. Da die Projektionen der beiden Karten nicht übereinstimmen, ist dies nicht exakt möglich. Sobald die beste Position der Verbreitungskarte gefunden ist, können die geographischen Koordinaten ihrer Eckpunkte in der Landkarte abgelesen werden.

Für die eigentliche Digitalisierung der Karte wird die bitmap-Datei der bearbeiteten Verbreitungskarte mit dem Programm 'Matlab' eingelesen. Dabei werden drei Matrizen angelegt, je eine für die roten, grünen und blauen Farbanteile der einzelnen Bildpunkte. Da die Bewuchsklasse durch den blauen Farbanteil eindeutig festgelegt ist, müssen die Matrizen der roten und grünen Farbanteile nicht weiter bearbeitet werden. Als nächstes werden zwei weitere Matrizen erstellt, in denen später die Längen- und Breitengrade der einzelnen Bildpunkte stehen werden. Die Anzahl der Elemente und der Abstand zwischen den Elementen stimmen hierbei mit der Blaumatrix überein. Den äußersten Bildpunkten dieser beiden Matrizen werden die geographischen Koordinaten der Eckpunkte der Verbreitungskarte (Tabelle 6.1) zugeordnet. Mittels linearer Interpolation wird nun jedem Element in den beiden Koordinatenmatrizen eine geographische Länge, bzw. geographische Breite zugewiesen.

Es sind nun 3 Matrizen gleicher Form vorhanden: die Blaumatrix, die die Informationen über den Sta-

Tab. 6.1.: Geographische Koordinaten der Eckpunkte der Verbreitungskarte Ungarn

Bildpunkt	geogr. Länge	geogr. Breite
(1,1)	16,03°	45,47°
(1,2)	22,85°	45,47°
(2,1)	16,03°	48,80°
(2,2)	22,85°	48,80°

tus der Ambrosiabestände beinhaltet, und 2 Koordinatenmatrizen, die die Lage der Ambrosiabestände angeben. Im nächsten Schritt müssen diese Informationen dem Rechengitter in COSMO-ART zugewiesen werden. Hierfür werden sämtliche Gitterpunkte des Modells bestimmt, die sich im Bereich der Ambrosiaverbreitungskarte von Ungarn befinden. Ist ihre geographische Lage bekannt, so kann mittels

Nächster-Nachbar-Interpolation der nächstgelegene Bildpunkt ermittelt werden. Dem Gitterpunkt des Modells wird sodann die Bewuchsklasse des jeweiligen Bildpunktes zugewiesen. Der Quellcode des verwendeten Matlab-Programmes befindet sich im Anhang.

6.2. Deutschland

Die Digitalisierung der Deutschlandkarte 5.1c erfolgt analog zur Ungarnkarte. Die Gründe für die Auswahl dieser Karte, die weniger detaillierte Informationen bietet als Karte 5.1d, sind in Kapitel 5.1 aufgeführt. In der digitalisierten Karte sind alle Landkreise eingefärbt, in denen mindestens ein großer Ambrosiabestand (mehr als 100 Pflanzen) gemeldet wurde. Die Bildbearbeitung gestaltet sich hier recht einfach, da lediglich eine Farbe zu verändern ist. Die Koordinaten der Eckpunkte der Karte sind in Tabelle 6.2 aufgelistet.

Tab. 6.2.: Geographische Koordinaten der Eckpunkte der Verbreitungskarte Deutschland

Bildpunkt	geogr. Länge	geogr. Breite
(1,1)	5,76°	47,02°
(1,2)	15,15°	47,02°
(2,1)	5,76°	55,18°
(2,2)	15,15°	55,18°

6.3. Tschechien

Im Gegensatz zu Ungarn liegt für Tschechien lediglich eine Karte vor, in der einzelne Ambrosiafundorte markiert sind. Informationen über Größe und Fortbestehen der Bestände fehlen. Da die Karte außerdem nur in schwarz-weiß vorliegt und demzufolge die Grenzen und die Symbole der Ambrosiabestände die gleiche Farbe haben, kann das für Ungarn entwickelte Programm nicht angewendet werden. Die Ungenauigkeit der Abbildung und die geringe Anzahl an Fundorten führten letztlich zu dem Entschluss, diese Karte von Hand zu digitalisieren. Dafür wird wiederum im Programm 'Google Earth' die Verbreitungskarte mit der tschechischen Landkarte zur Deckung gebracht. Die geographischen Koordinaten der Fundorte können dann einzeln abgelesen werden. Da für die numerischen Simulationen der Flächenanteil der Ambrosiabestände an der Gesamtfläche eines Gitterelementes des Modells bekannt sein muss, wird nun den Fundorten ein fiktiver Flächenanteil zugewiesen. Dieser Wert wird für alle Fundorte gleich gewählt und beträgt 6 %. Die Ambrosiabestände Tschechiens werden somit ungarischen Beständen geringer Größe (2-10 % Flächenanteil des Ambrosiabewuchses) gleich gestellt. Da die Belastung durch Ambrosiapflanzen in Ungarn europaweit am Höchsten ist, scheint eine Einordnung der tschechischen Bestände in der unteren Hälfte der ungarischen Skala plausibel.

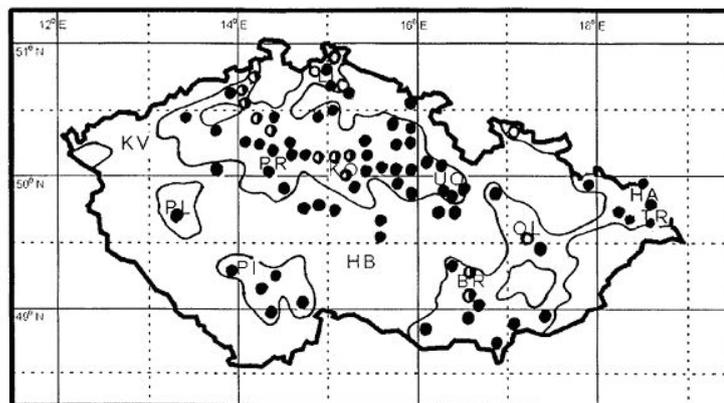


Abb. 6.2.: Verbreitung der Ambrosia in Tschechien. Schwarze Kreise: neuere Fundorte der *Ambrosia artemisiifolia* L.. Weiße Kreise: neuere Fundorte der *Ambrosia trifida* L.. Schwarz-weiße Kreise: beide Spezies. Quelle: Rybníček et al. (2000)

7. Simulationen

Zwischen dem 11. und 21. September 2006 wurden in zahlreichen Pollenmessstationen Nordostdeutschlands ungewöhnlich hohe Konzentrationen an Ambrosiapollen registriert (vgl. Tab. 7.1). Diese gingen einher mit Winden aus südöstlichen Richtungen. Berechnungen von Rückwärtstrajektorien (Gabrio et al., 2008) legen nahe, dass die Pollen durch Ferntransport aus Ungarn nach Deutschland kamen. Eine quantitative Aussage über die Bedeutung des Ferntransports konnte bislang jedoch nicht gemacht werden. Um dieser Frage nachzugehen, wurde die Ausbreitung der Pollen mit dem Modellsystem COSMO-ART simuliert, wobei verschiedene Quellgebiete berücksichtigt wurden. Hierfür wurden die Verbreitungsdaten der Ambrosiapflanzen für Deutschland, Österreich, Ungarn und Tschechien verwendet (vergleiche Abb. 7.1). Betrachtet man die maximalen Tageskonzentrationen während dieser Pollenepisode, so stellt man fest, dass in Dresden in einem Zeitraum von acht Tagen sehr hohe Pollenkonzentrationen gemessen wurden, mit einem Maximum von 41 Pollen/m^3 am 12.09.2006. An den übrigen Messstationen werden die Maximalwerte wenige Tage später erreicht, meist am 14. und 15. September. Hierzu zählen die Stationen in Berlin, Garz, Jena, Potsdam, Prerow, Rostock und Treuenbrietzen. Da auch in Dresden die Pollenkonzentrationen an diesen beiden Tagen sehr hoch sind, starten unsere Simulationen am 12.09.2006, 00 UTC, und enden am 16.09.2006, 22 UTC. Das Modellgebiet hat eine Größe von $2640 \times 1735 \text{ km}^2$. Es umfasst im Wesentlichen die Länder Mitteleuropas, sowie angrenzende Gebiete. Die Simulationen werden mit einem gedrehten Koordinatensystem durchgeführt, dessen Nordpol bei $170,0^\circ\text{W}$ und $32,5^\circ\text{N}$ liegt. Die Anzahl der Gitterpunkte in x-Richtung beträgt 360 und in y-Richtung 250, mit einer horizontalen Maschenweite von $0,0625^\circ$. Dies entspricht einer räumlichen Auflösung von etwa 7 km. Es werden 40 Höhenschichten verwendet und mit einem Zeitschritt von 40 Sekunden gerechnet.

Für die direkte Simulation des Pollenflugs sind charakteristische Größen der Ambrosiapollen notwendig:

- Die Literaturangaben für den Durchmesser der Ambrosiapollen reichen von 13 bis $25 \mu\text{m}$ (Fumanal et al., 2007; Laaidi et al., 2003; Tamarcaz et al., 2005). In den Simulationen wird ein Mittelwert von $20 \mu\text{m}$ verwendet.
- Mandrioli et al. (2003) geben als Dichte der trockenen Pollenkörner 830 kg/m^3 an.
- Die Pollenproduktion ist die Gesamtanzahl der Pollen, die eine Pflanze im Mittel pro Jahr produziert. Sie wird von den meisten Autoren mit einer Milliarde Pollen pro Pflanze und Jahr angegeben, nur Laaidi et al. (2003) geben den 2,5-fachen Wert an. Für die Simulationen wird als Pollenproduktion der erste Wert genommen.

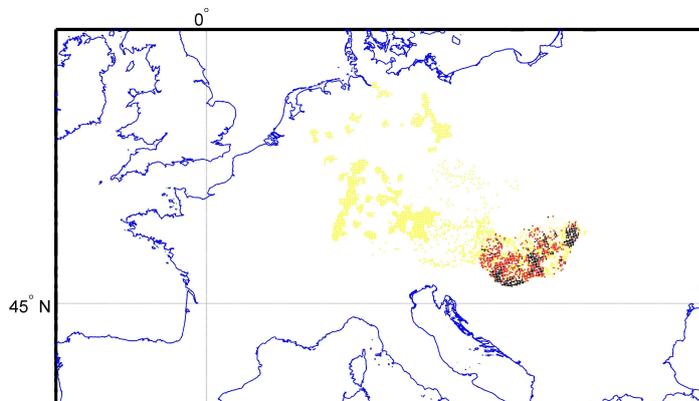


Abb. 7.1.: Verbreitung der Ambrosiabestände, wie sie in den Simulationen verwendet wurde. Die Farben geben an, welcher Anteil der Fläche mit Ambrosiapflanzen bewachsen ist. Gelb: 6 %. Rot: 18 %. Schwarz: 30 %.

- Da die Pollenproduktion im Modellsystem in Pollen pro Quadratmeter benötigt wird, muss eine Annahme über die Bewuchsdichte der Ambrosia gemacht werden. Da uns hier konkrete Literaturwerte fehlen, gehen wir von einer Bewuchsdichte von 5 Pflanzen pro Quadratmeter aus.
- Für den Blattflächenindex der *Ambrosia artemisiifolia* L. ist uns kein Literaturwert bekannt. Aus diesem Grund wurde der Blattflächenindex der *Ambrosia trifida* nach Abul-Fatih et al. (1979) verwendet. Sie haben Felder mit unterschiedlichen Bewuchsdichten untersucht und dabei Werte für den Blattflächenindex zwischen 3,5 und 12,0 ermittelt. Da wir mit einer Bewuchsdichte von 5 Pflanzen pro Quadratmeter rechnen und dies im unteren Bereich der Bewuchsdichten von Abul-Fatih et al. (1979) liegt, wird ein Blattflächenindex von 5,0 für die *Ambrosia artemisiifolia* L. gewählt.
- Als mittlere Dauer der Pollensaison werden 90 Tage angenommen. Dies basiert auf Angaben verschiedener Autoren über den Beginn und das Ende der Pollensaison (Járai-Komlódi, 2000; Makra et al., 2004). Allerdings variiert die Länge der Pollensaison stark zwischen den Jahren und unterscheidet sich außerdem in den verschiedenen Quellgebieten. Dies kann aber momentan im Modell (noch) nicht berücksichtigt werden.
- Ambrosiapflanzen geben ihre Pollen vormittags frei, was von vielen Autoren beschrieben wird. In den Experimenten von Bianchi et al. (1959) fand die Freisetzung der Pollen nur zwischen 6:30 und

Tab. 7.1.: Pollenkonzentrationen an ausgewählten Messstationen in Deutschland während der Pollenepisode im September 2006. Es handelt sich um Tagesmittelwerte in Pollen/m³. Aufgeführt sind alle Tage, an denen Konzentrationen größer als 5 Pollen/m³ gemessen wurden.

Stationsname	Datum	Konzentration	Stationsname	Datum	Konzentration
Berlin	15.09.2006	17	Kiel	17.09.2006	6
Dresden	11.09.2006	32	Kiel	18.09.2006	6
Dresden	12.09.2006	41	Mönchengladbach	13.09.2006	6
Dresden	13.09.2006	34	Neustrelitz	12.09.2006	7
Dresden	14.09.2006	29	Potsdam	12.09.2006	13
Dresden	15.09.2006	30	Potsdam	13.09.2006	18
Dresden	16.09.2006	6	Potsdam	14.09.2006	17
Dresden	17.09.2006	22	Potsdam	15.09.2006	36
Dresden	18.09.2006	37	Potsdam	16.09.2006	11
Garz	13.09.2006	10	Potsdam	17.09.2006	17
Garz	14.09.2006	26	Prerow	14.09.2006	8
Garz	15.09.2006	14	Rostock	13.09.2006	14
Greifswald	18.09.2006	7	Rostock	14.09.2006	21
Heidelberg	16.09.2006	9	Treuenbrietzen	12.09.2006	16
Jena	15.09.2006	8	Treuenbrietzen	15.09.2006	30
Kiel	12.09.2006	6			

8:00 morgens statt. Wir haben einen Schalter bei der Berechnung der Pollenfreisetzung eingebaut, der Emissionen nur zwischen 6 und 10 UTC erlaubt.

- Als Bestandshöhe wird die in Europa maximale Größe der Pflanzen von zwei Metern eingesetzt. Die Parametrisierungen der Pollenemission von Helbig et al. (2004) wurden für Bäume mit einer mittleren Bestandshöhe von etwa 20 Metern entwickelt. Wir haben daher einen Korrekturfaktor aufgrund der geringen Bestandshöhe der Ambrosiapflanzen eingeführt. Dieser reduziert die Pollenemissionen im Modell und hat einen Wert von 0,015.
- Bianchi et al. (1959) geben für die Temperatur einen ungefähren Schwellenwert, ab dem Pollen emittiert werden, von 20 °C an. Auch bei niedrigeren Temperaturen werden Pollen freigesetzt, was durch die spezielle Formulierung der Pollenfreisetzung im Modell ebenfalls der Fall ist. Fällt die relative Feuchte unter 60 %, so wird nach Bianchi et al. (1959) eine deutliche Pollenemission beobachtet, daher wird dieser Wert als Schwellenwert für die Emission verwendet.
- Für den Schwellenwert der Windgeschwindigkeit konnte kein Literaturwert gefunden werden. Es wird daher der Wert für Erlenpollen nach Helbig et al. (2004) verwendet. Er liegt bei 2,9 m/s.

- Es wurde noch nicht genauer untersucht, welcher der drei oben genannten meteorologischen Einflussfaktoren die größte Bedeutung für die Pollenemission hat. Aus diesem Grund wurden die Wichtungsfaktoren c_1 , c_2 und c_3 der meteorologischen Schwellenwerte Temperatur, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit auf eins gesetzt. Genaueres zur Formulierung des meteorologischen Korrekturtermes, in den diese Wichtungsfaktoren eingehen, findet sich bei Helbig et al. (2004).
- Bei den Verteilungen der Ambrosiabestände ist die Angabe eines Flächenanteils der Pflanzen bezogen auf die Gesamtfläche des Gitterelementes notwendig. Nur die Verbreitungskarte für Ungarn liefert diese Information. Bei den übrigen Daten ist nur die Information 'Pflanzen vorhanden: ja oder nein' vorhanden. Da Ungarn die höchste Dichte an Ambrosiapflanzen in ganz Europa aufweist, werden die Funde in den übrigen Ländern im unteren Bereich der Bewuchsklassen Ungarns eingeordnet. Sind an einem Gitterpunkt Ambrosiapflanzen vorhanden, so wird dem entsprechenden Gitterelement ein Flächenanteil von 6 % Ambrosiapflanzen zugewiesen.

Eine tabellarische Aufstellung der charakteristischen Kenngrößen für die Ambrosia findet sich in Tabelle 7.2.

Tab. 7.2.: Überblick über die Werte der charakteristischen Kenngrößen der Ambrosiapflanzen und -pollen, welche in den Simulationsrechnungen verwendet wurden.

Kenngröße	Wert	Quelle
Dichte eines Pollenkorns	830 kg/m ³	Mandrioli et al. (2003)
Durchmesser eines trockenen Pollenkorns	20 μ m	Fumanal et al. (2007); Laaidi et al. (2003); Taramarcaz et al. (2005)
Blühzeit	6 bis 10 Uhr	Bianchi et al. (1959)
Länge der Pollensaison	90 Tage	Járai-Komlódi (2000); Makra et al. (2004)
Blattflächenindex	5	Abul-Fatih et al. (1979)
Bewuchsdichte	5 Pflanzen pro Quadratmeter	
Pollenproduktion	10 ⁹ Pollen pro Jahr und Pflanze	Fumanal et al. (2007)
Bestandshöhe	2 m	
Schwellenwerte für die Emission:		
Temperatur	293 K	Bianchi et al. (1959)
Relative Feuchte	60 %	Bianchi et al. (1959)
Windgeschwindigkeit	2,9 m/s	Helbig et al. (2004)

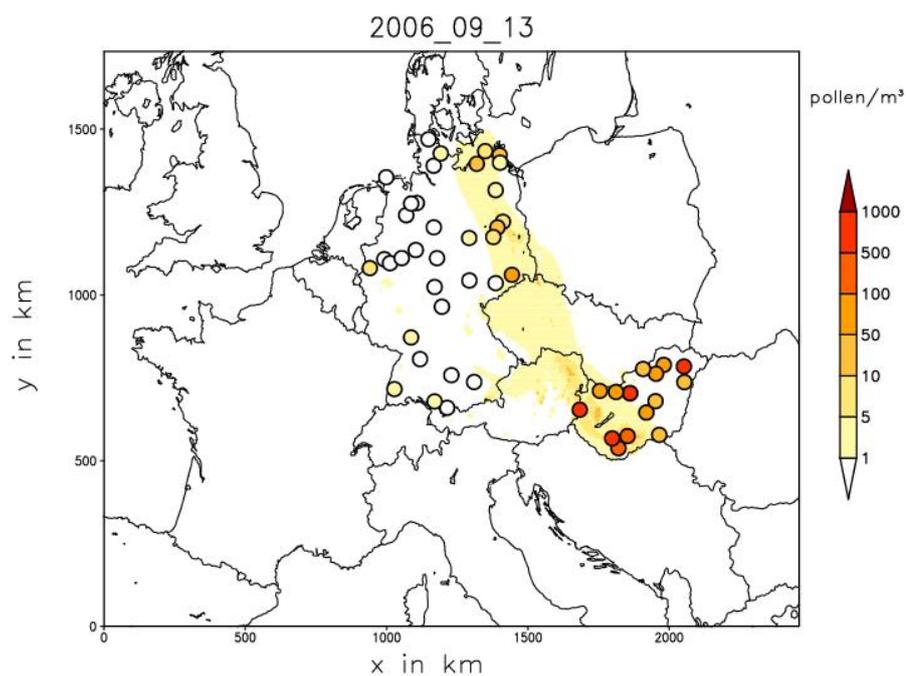
7.1. Simulation mit Ambrosiaquellen in Deutschland, Ungarn, Österreich und Tschechien

Zunächst wurde anhand einer Simulation mit allen Quellgebieten (Deutschland, Österreich, Ungarn, Tschechien) die qualitative Übereinstimmung von Simulation und Messungen überprüft. Hierfür wurden zunächst die simulierten mittleren Tageskonzentrationen mit Messwerten in Deutschland und Ungarn verglichen. Auf diese Weise kann die räumliche Verteilung der Pollenkonzentrationen validiert werden. In einem zweiten Schritt wurde untersucht, bis in welche Höhe Ambrosiapollen im Modell zu finden sind. Dies ist interessant, da nur Pollen im oberen Bereich der Grenzschicht am Ferntransport teilnehmen können.

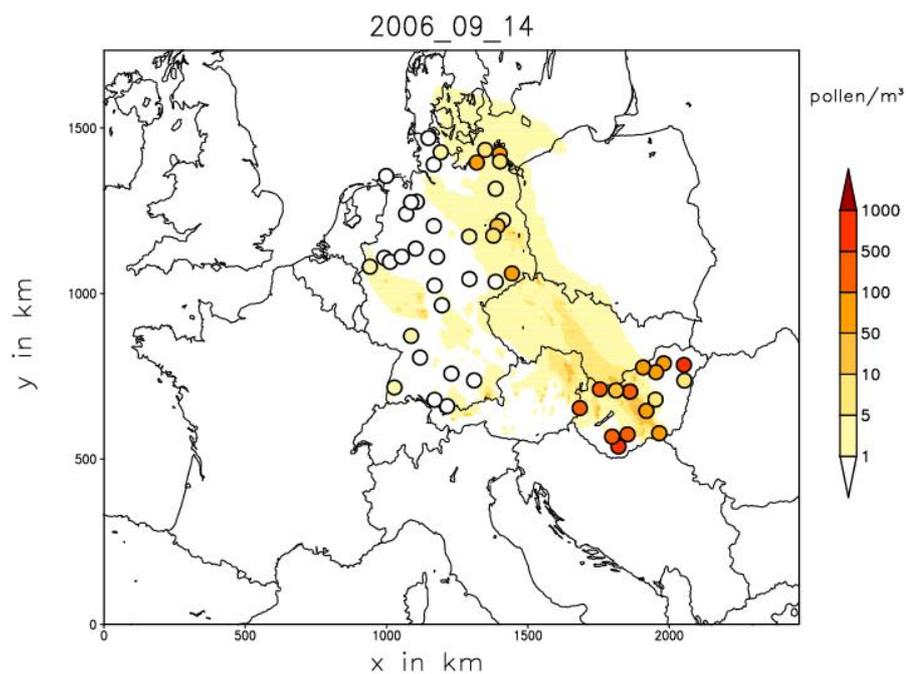
7.1.1. Mittlere Tageskonzentrationen

In den Abbildungen 7.2 und 7.3 sind die räumlichen Verteilungen der Pollenkonzentrationen an verschiedenen Tagen dargestellt. Man erkennt deutlich, wie sich eine Pollenwolke von Ungarn ausgehend zunächst über dem nordöstlichen Bereich Deutschlands ausbreitet. Am 13. und 14. September 2006 werden an vielen Stationen in dieser Region Pollenkonzentrationen in der Größenordnung von bis zu 50 Pollen/m³ gemessen. Alle diese Stationen liegen im Einflussbereich der Pollenwolke aus Ungarn, während Messstationen weiter im Süden und Westen der Republik nicht in ihrem Einflussbereich liegen. Dort werden auch keine Ambrosiapollen gemessen. Einzelne Stationen in Süd- und Westdeutschland melden geringe Belastungen durch Ambrosia, diese werden vermutlich durch lokale Bestände ausgelöst. Ein Vergleich zwischen den Messungen der Pollenkonzentration und der Simulation für das Gebiet von Ungarn zeigt, dass die Messwerte deutlich über den simulierten Konzentrationen liegen. Dabei muss allerdings bedacht werden, dass die reinen Zahlenwerte nicht direkt vergleichbar sind. Die Messungen stellen Punktwerte dar, während die Simulation ein Flächenmittel liefert. Des Weiteren werden die Messungen stark vom Standort der Messgeräte beeinflusst. Gibt es beispielsweise in unmittelbarer Nähe Ambrosiabestände, so kann die Messung stark von diesen lokalen Beständen bestimmt werden, die im Modell nicht aufgelöst werden. Ferner fällt auf, dass im Osten Ungarns zwar höhere Pollenkonzentrationen gemessen werden, diese aber durch die Simulation nicht wiedergegeben werden. Die meteorologischen Bedingungen sind in dieser Region und in diesem Zeitraum ungünstig, was dazu führt, dass im Modell keine oder nur sehr geringe Mengen an Pollen freigesetzt werden. Dass trotzdem Pollen gemessen werden, könnte durch Ferntransport der Pollen aus Gebieten hervorgerufen werden, die südöstlich von Ungarn liegen. Da aus diesen Regionen, beispielsweise Rumänien, keine Daten vorhanden sind, kann diese Theorie allerdings nicht nachgeprüft werden.

Am 15. und 16. September drehen die Winde auf östliche Richtungen, was dazu führt, dass sich die Pollenwolke aus den südlichen Quellgebieten im Vergleich zu den beiden Vortagen nach Süden verlagert. Sie erfasst nun den mittleren und südlichen Bereich Deutschlands. Insbesondere am 16. September, aber auch schon am 15. September, erfassen einige Messstationen in Zentraldeutschland eine mäßige

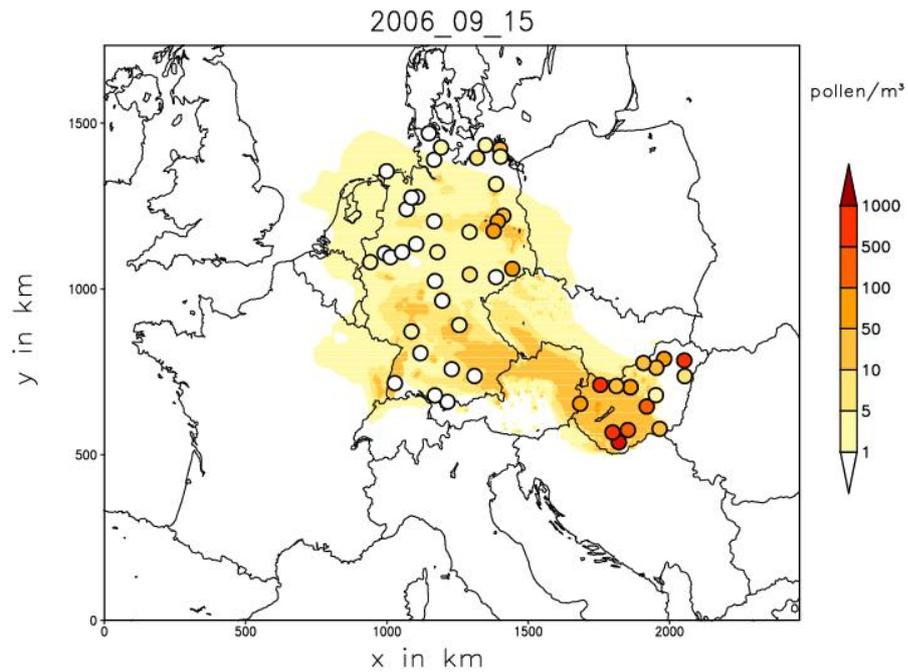


(a) 13. September 2006

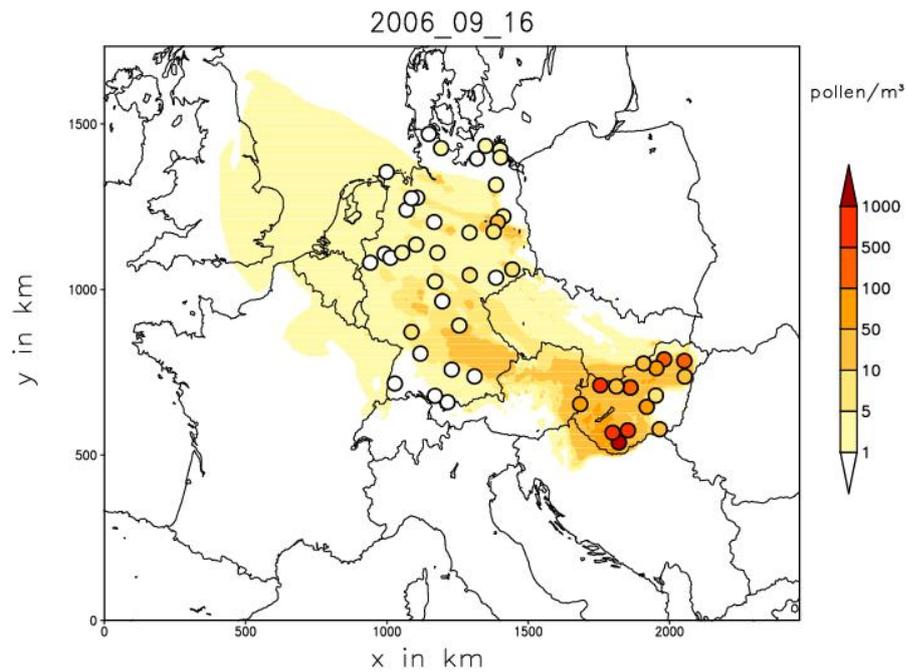


(b) 14. September 2006

Abb. 7.2.: Simulierte und gemessene Pollenkonzentration am 13. und 14. September 2006. Es handelt sich um Tagesmittelwerte der Ambrosiapollenkonzentration in Pollen/m^3 . Als Kreise eingezeichnet sind Messungen in Deutschland und Ungarn. Die flächenhafte Einfärbung im Hintergrund stellt die numerischen Werte der Simulation dar.



(a) 15. September 2006



(b) 16. September 2006

Abb. 7.3.: Simulierte und gemessene Pollenkonzentration am 15. und 16. September 2006. Es handelt sich um Tagesmittelwerte der Ambrosiapollenkonzentration in Pollen/m^3 . Als Kreise eingezeichnet sind Messungen in Deutschland und Ungarn. Die flächenhafte Einfärbung im Hintergrund stellt die numerischen Werte der Simulation dar.

Konzentration an Ambrosiapollen. Diese kann durch Ferntransport aus Ungarn schlüssig erklärt werden. Allerdings registrieren viele der Messstationen in diesem Gebiet keine Pollen, obwohl sie im Einflussbereich der simulierten Pollenwolke liegen. Die immer noch sehr hohen Pollenkonzentrationen in Nordostdeutschland können durch lokale Ambrosiabestände erklärt werden. Die Hauptwindrichtung Ost könnte ein Indiz dafür sein, dass außerdem Ambrosiabestände östlich von Deutschland eine größere Bedeutung erlangen, beispielsweise in Polen oder der Slowakei.

Abschließend lässt sich sagen, dass der Ferntransport von Ambrosiapollen, die ihren Ursprung in Ungarn haben, nach Deutschland eine große Rolle spielt. Die räumliche Verteilung der Pollenkonzentrationen kann durch die Simulation recht gut wiedergegeben werden. Quantitativ liegen die Werte allerdings zum Teil doch weit auseinander.

7.1.2. Vertikalschnitt der Konzentration

Die Effektivität des Ferntransports hängt insbesondere von der Höhe der Grenzschicht und damit ihrer Durchmischung ab (Smith et al., 2008). Die Pollen werden insbesondere dann weit transportiert, wenn sie sich in der ganzen Grenzschicht verteilt haben, was bei konvektiven Bedingungen der Fall ist. Sind die Pollen erst einmal im oberen Bereich der Grenzschicht angelangt, so kann es Tage dauern, bis sie aufgrund der Schwerkraft wieder am Boden sedimentieren. Abbildung 7.4 zeigt Horizontal- und Vertikalschnitte am 15. September 2006 zu verschiedenen Zeiten. Die beiden oberen Bilder zeigen die Situation um 6 UTC, also genau zu dem Zeitpunkt, an dem die Pollenemissionen wieder einsetzen. Die Pollen befinden sich in einer Schicht mit einer maximalen Dicke von etwa 1000 Metern, wobei die höchsten Konzentrationen unterhalb von 300 Metern zu finden sind. Die höchsten Höhen werden dabei in Nordostdeutschland erreicht, weit entfernt von den Hauptquellgebieten in Ungarn. Die Pollenemission endet vier Stunden später, um 10 UTC. Die Bilder in der mittleren Reihe zeigen diesen Zeitpunkt. Man erkennt deutlich die sehr hohen Pollenkonzentrationen von bis zu 200 Pollen/m^3 im Quellgebiet Ungarns. Diese reichen in eine Höhe von etwa 600 Metern. Auch die Pollen, die in Tschechien emittiert werden, erreichen eine Höhe von etwa 900 Metern, die Konzentrationen liegen dort aber nur in einem Bereich von bis zu 20 Pollen/m^3 . Vier Stunden nach Ende der Pollenemission haben sich die Ambrosiapollen im Einzugsbereich der ungarischen Quellgebiete bis in Höhen von über 1500 Metern ausgebreitet. Die Pollen aus Tschechien erreichen Höhen von etwa 1200 Metern.

7.2. Simulationen mit einzelnen Quellgebieten

Um der Frage nachzugehen, welchen Einfluss der Ferntransport auf lokale Pollenkonzentrationen hat, wurden im nächsten Schritt mehrere Simulationen mit verschiedenen Quellgebieten für die Ambrosiapollen gerechnet. Auf diese Weise ist es möglich, zwei Fragen zu beantworten:

1. Wie groß ist der Einfluss des Ferntransports von Ambrosiapollen auf lokale Pollenkonzentrationen?

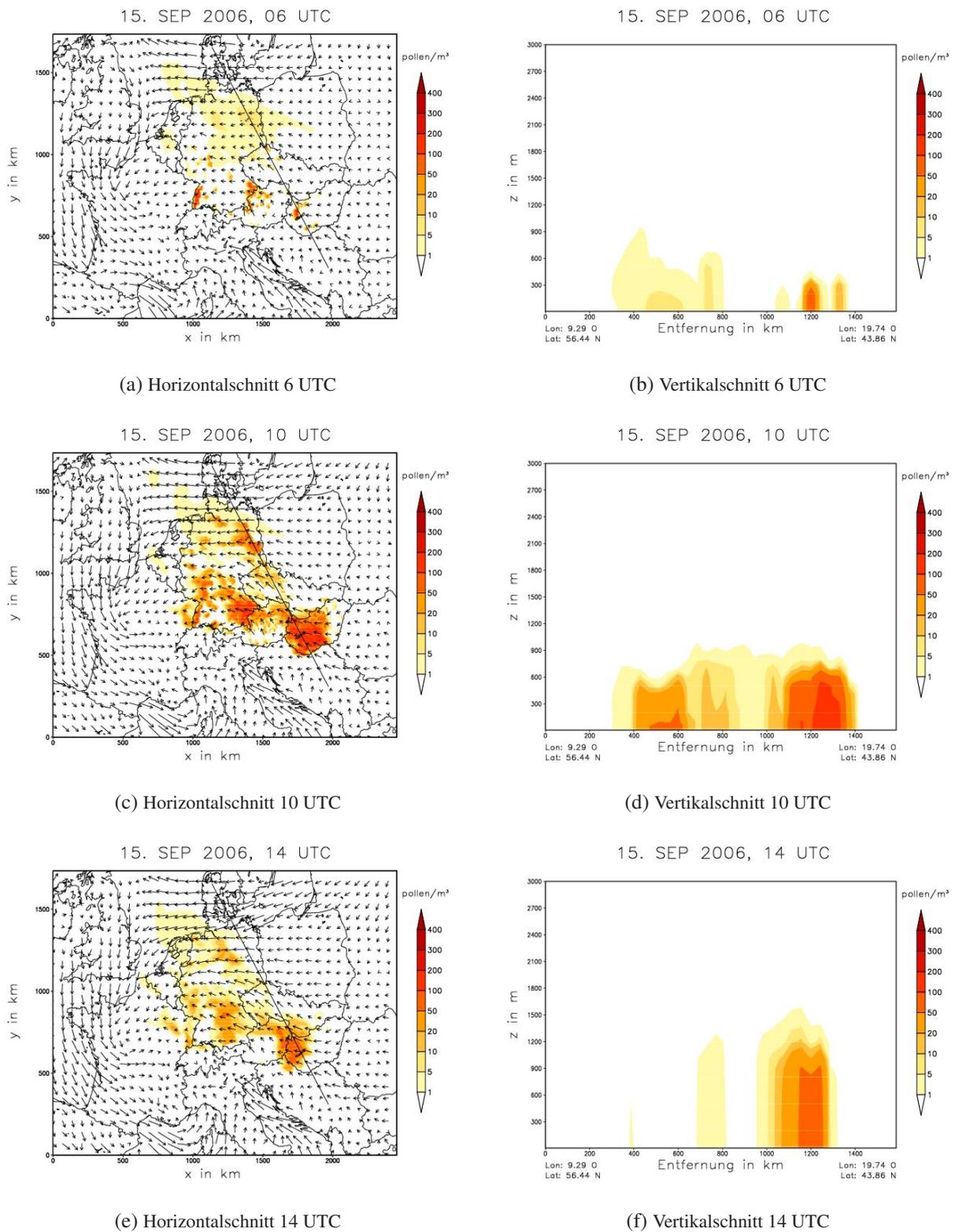


Abb. 7.4.: Räumliche Verteilung der Pollenkonzentration am 15.09.2006. Links Horizontalschnitte auf dem untersten Rechenlevel: schwarz eingezeichnet die Lage der Vertikalschnitte. Rechts Vertikalschnitte.

2. Kann die Qualität der Pollenvorhersage verbessert werden, wenn auch weit entfernte Quellgebiete in die Simulation einfließen?

Die erste Frage wird beantwortet, indem die Pollenausbreitung ausgehend von den vier möglichen Quellgebieten (Deutschland, Österreich, Ungarn, Tschechien) separat simuliert wird. Für einzelne Gitterpunkte kann die resultierende Pollenkonzentration in allen vier Fällen verglichen werden, es ergibt sich die 'geographische' Zusammensetzung der Konzentration. Die zweite Frage lässt sich unter Verwendung einer 2x2 Kontingenztafel beantworten. Diese Methode wird in der Meteorologie angewendet, wenn nicht-quantitative Vorhersagen untersucht werden. Eine genaue Beschreibung der Methode findet sich unter 7.2.2.

7.2.1. Geographische Herkunft der Pollen

Die geographische Herkunft der Pollen an einem bestimmten Gitterpunkt kann bestimmt werden, indem Simulationen mit jeweils nur einem einzelnen Quellgebiet durchgeführt werden. Die Gesamtkonzentration ergibt sich durch Addition der Einzelkonzentrationen. Somit kann die prozentuale Aufteilung der Gesamtkonzentration auf die einzelnen Quellgebiete angegeben werden. Einige Messstationen in Deutschland registrierten am 15.09.2006 mehr als 10 Pollen/m³, was einer starken Belastung für Allergiker entspricht. Tabelle 7.3 zeigt die 'geographische' Zusammensetzung der Pollenkonzentration dieser Beispielstationen.

Deutlich zu erkennen ist der starke Einfluss der deutschen Quellgebiete. In drei der fünf ausgewählten Stationen liegt ihr Beitrag bei über 80 % der Gesamtkonzentration. Somit geht ein Großteil der Pollenbelastung auf lokale Ambrosiabestände zurück. Anders bei der Station 'Dresden': sie liegt nahe der tschechischen Grenze, weshalb bei einer Anströmung aus südöstlichen Richtungen nur wenige der deutschen Ambrosiabestände einen Einfluss auf die dortige Pollenkonzentration haben. Dies erklärt den hohen Anteil von Pollen aus Ungarn und Tschechien im Dresdner Raum. In Tschechien tritt die Ambrosia - genauso wie in Deutschland - bislang nur punktuell auf. Dennoch können auch diese Quellgebiete einen Einfluss auf die Pollenkonzentrationen haben, insbesondere in grenznahen Gebieten, wie das Beispiel 'Dresden' zeigt.

Die Station 'Garz' hingegen liegt außerhalb des Bereichs der modellierten Pollenwolke. Die prozentualen Angaben der Pollenherkunft beruhen in diesem Fall auf minimalen Konzentrationen. Die Werte dieser Station werden daher nicht berücksichtigt.

Die ungarischen Quellgebiete zeigen trotz ihrer großen Entfernung einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Gesamtmengen an Pollen. Abgesehen von der Station 'Dresden', wo die aus Ungarn stammenden Pollen mehr als 50 % ausmachen, werden Werte von bis zu 17,50 % erreicht. Dies zeigt, dass die Freisetzung in Ungarn keineswegs zu vernachlässigen ist, wenn eine belastbare Vorhersage der Pollenkonzentration gemacht werden soll.

Auffällig ist die geringe Bedeutung der österreichischen Quellgebiete. Dies mag an der allgemeinen Wetterlage liegen, die mit Winden aus südöstlichen Richtungen dafür sorgt, dass die österreichischen Pollen

nicht nach Nordostdeutschland transportiert werden.

Die unterschiedliche Qualität der Verbreitungskarten lässt allerdings keine genaue Analyse des Einflusses der einzelnen Gebiete zu. So wird die Bedeutung der deutschen Quellgebiete vermutlich überschätzt, da die Verbreitungskarte alle Landkreise angibt, in denen Bestände mit mehr als 100 Pflanzen vorkommen. Die tatsächliche Anzahl der Pflanzen, sowie die Anzahl der großen Bestände in den jeweiligen Landkreisen ist jedoch unbekannt. Aus diesem Grund wurde für diese Regionen ein flächenhafter Bewuchs angenommen, der 6 % der jeweiligen Landfläche bedeckt. Dieser Wert ist fiktiv. Er liegt im unteren Bereich der Belastung in Ungarn, ist aber für Deutschland möglicherweise zu hoch. Man kann also davon ausgehen, dass der Einfluss der deutschen Quellgebiete in der Realität geringer ist. Dies führt gleichzeitig dazu, dass der Einfluss ungarischer Quellgebiete steigt.

Tab. 7.3.: Prozentualer Anteil der einzelnen Quellgebiete an der Gesamtkonzentration für ausgewählte Messstationen am 15.09.2006.

Station	Ungarn	Deutschland	Österreich	Tschechien
Berlin	11,35	88,17	0,28	0,21
Dresden	56,35	0,00	0,00	43,65
Garz	50,00	0,00	0,00	50,00
Potsdam	16,56	81,99	0,72	0,72
Treuenbrietzen	17,50	80,07	0,70	1,74

7.2.2. 2x2 Kontingenztafel

Eines der gängigen Verfahren bei der Validierung von Wettervorhersagen besteht darin, eine Kontingenztafel aufzustellen und diese statistisch auszuwerten. Kontingenztafeln sind insbesondere dann von großem Wert, wenn das Eintreten eines Ereignisses von Bedeutung ist, nicht aber die Intensität des Ereignisses. Beispiele für typische Anwendungen dieser Methode sind Fragen wie: 'Wird es regnen?', 'Wird es hageln?', 'Wird ein bestimmter Schwellenwert einer Variable überschritten?'. Werden diese Fragen auf die Übereinstimmung der Vorhersage mit den anschließend beobachteten Ereignissen bezogen, so sind vier Antworten möglich:

a: Ein Ereignis wird vorhergesagt und tritt ein (Treffer).

b: Ein Ereignis wird vorhergesagt, tritt aber nicht ein (falscher Alarm).

c: Ein Ereignis tritt ein, obwohl es nicht vorhergesagt wurde (verpasstes Ereignis).

d: Es wird korrekt vorhergesagt, dass das Ereignis nicht eintritt. Dies wird auch als Auftreten eines Nicht-Ereignisses bezeichnet (korrekte Verneinung).

Die Häufigkeit der einzelnen Antworten wird in einer 2x2 Kontingenztafel (auch als Viererfeld bekannt) aufgetragen (vergleiche Tabelle 7.4). Aus einer solchen Kontingenztafel können viele Kenngrö-

Tab. 7.4.: Aufbau eines Viererfeldes mit der Frage: Wird ein bestimmtes Ereignis eintreten?

		Beobachtung		
		ja	nein	
Vorhersage	ja	a	b	a + b
	nein	c	d	c + d
		a + c	b + d	N = a + b + c + d

ßen und Maßzahlen für die Güte der Vorhersage in Bezug auf die tatsächlich eingetroffenen Ereignisse abgeleitet werden. Die Gängigsten davon werden im Folgenden vorgestellt. Kenngrößen beschreiben im Allgemeinen die Güte der Vorhersage in Bezug auf die tatsächlich eingetroffenen Ereignisse, bzw. Nicht-Ereignisse. Skill Scores dagegen vergleichen die Qualität der Vorhersage in Bezug auf eine Referenzvorhersage, meist einer Zufallsvorhersage. Sämtliche Formulierungen folgen dem Standardwerk von Wilks (2006). Auf die Herleitung der Formulierungen wird hier verzichtet.

PC (engl. Proportion Correct) - Trefferzahl

$$PC = \frac{a + d}{N} \quad [7.1]$$

Die Kenngröße PC gibt den Prozentsatz der korrekten Vorhersagen an. Es wird dabei nicht unterschieden, ob es sich dabei um die Vorhersage des Ereignisfalles oder des Nicht-Ereignisfalles handelt. Dies hat einen entscheidenden Nachteil: Werden Ereignisse untersucht, die sehr selten auftreten, so wird die Kenngröße PC stark von den häufig auftretenden und korrekt vorhergesagten Nicht-Ereignissen beeinflusst. Es kann also der Eindruck entstehen, dass eine Vorhersage gute Ergebnisse liefert, obwohl die seltenen Ereignisse häufig nicht erkannt werden.

PC kann Werte zwischen null und eins annehmen. Eine perfekte Vorhersage, die alle Ereignisse und Nicht-Ereignisse korrekt vorhersagt, hat einen PC-Wert von eins. Eine völlig falsche Vorhersage, die keine Übereinstimmung zwischen Vorhersage und Beobachtung aufweist, hat einen PC-Wert von null.

TS (engl. Threat Score) - kritischer Trefferindex

$$TS = \frac{a}{a + b + c} \quad [7.2]$$

Die Kenngröße TS - auch CSI (critical succes index) genannt - ist dann zu bevorzugen, wenn ein Ereignis sehr selten auftritt und somit der Gebrauch der Kenngröße PC nicht empfehlenswert ist. TS gibt den

Anteil der korrekt vorhergesagten Ereignisse an, ohne die große Anzahl der vorhergesagten und eingetroffenen Nicht-Ereignisse zu berücksichtigen.

Auch TS kann Werte zwischen null und eins annehmen. Eine eins bezeichnet eine perfekte Vorhersage, eine null die schlechteste Vorhersage.

B (engl. Bias) - Vorhersageindex

$$B = \frac{a+b}{a+c} \quad [7.3]$$

Um herauszufinden, ob die Vorhersage die Anzahl der Ereignisse über- oder unterschätzt, ist die Berechnung der Kenngröße B sinnvoll. Sie entspricht dem Quotienten aus der Anzahl der vorhergesagten und der Anzahl der eingetroffenen Ereignisse. Es wird dabei nicht berücksichtigt, ob die Ereignisse korrekt vorhergesagt wurden oder nicht. B kann daher nicht als Maß für die Güte der Vorhersage herangezogen werden.

Nimmt B Werte größer eins an, so überschätzt die Vorhersage die Anzahl der Ereignisse. Ist B kleiner eins, so werden zu wenig Ereignisse vorhergesagt. Für $B = 1$ ist die Anzahl der vorhergesagten gleich der Anzahl der eingetroffenen Ereignisse.

H (engl. Hit Rate) - kritische Trefferrate

$$H = \frac{a}{a+c} \quad [7.4]$$

Die Trefferquote H geht davon aus, dass lediglich das Eintreten des Ereignisses von Bedeutung ist. Der Nicht-Ereignisfall wird daher vernachlässigt. H gibt demnach die Anzahl der korrekten Vorhersagen des Ereignisses bezogen auf die Anzahl der beobachteten Ereignisse an.

Für $H = 1$ werden alle beobachteten Ereignisse vorhergesagt, für $H = 0$ keines.

F (engl. False Alarm Rate) - Fehlalarmrate

$$F = \frac{b}{b+d} \quad [7.5]$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein falscher Alarm ausgelöst wird, kann über die Kenngröße F beschrieben werden. Sie gibt die Anzahl der falschen Alarme bezogen auf die Gesamtanzahl der Nicht-Ereignisse an. F wird auch als POFD (probability of false detection) bezeichnet.

F kann im Bereich zwischen null und eins liegen. Umso kleiner der Wert von F ist, desto seltener wird ein falscher Alarm ausgelöst.

HSS (engl. Heidke Skill Score) - Heidke Index

$$HSS = \frac{2(ad - bc)}{(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)} \quad [7.6]$$

Beim HSS wird die Güte der Vorhersage in Bezug auf eine Zufallsvorhersage bestimmt. Eine perfekte Vorhersage erhält den Wert eins. Wird durch die Vorhersage keine Verbesserung der Genauigkeit im Vergleich mit einer Zufallsvorhersage erreicht, so hat der HSS einen Wert von null. Ist die Vorhersage sogar schlechter als der Zufall, so wird der HSS negativ.

7.2.3. Bedeutung der einzelnen Quellgebiete

Um die Frage zu beantworten, welche Quellgebiete zu berücksichtigen sind, um möglichst gute Vorhersagen der Pollenkonzentrationen machen zu können, wurden verschiedene Simulationen mit jeweils anderem Quellgebiet durchgeführt. Tabelle 7.5 im Anhang zeigt einen Überblick über alle 15 realisierten Kombinationen, die mit den vorhandenen Daten möglich sind. Für jede Simulation wird eine 2x2 Kontingenztafel erstellt, indem die Tagesmittelwerte der Konzentrationsmessungen mit den Tagesmittelwerten des jeweils nächstgelegenen Gitterpunktes in der Simulation verglichen werden. Hierfür werden die Werte des zweiten bis fünften Tages der Simulation verwendet. Der erste Tag wird nicht berücksichtigt, da die Pollen noch nicht genug Zeit hatten, sich über weite Strecken auszubreiten. Vergleicht man nun die Güte der einzelnen Simulationen, so kann die Bedeutung der einzelnen Quellgebiete bestimmt werden. Da bei Ambrosiapollen bereits bei sehr geringen Konzentrationen allergische Reaktionen auftreten können, ist die Menge der an einem bestimmten Punkt vorhandenen Pollen von untergeordneter Bedeutung. Wichtig ist: Sind Pollen vorhanden oder nicht? Als Schwellenwert für das Ereignis 'ja - es sind Pollen vorhanden' wird eine Konzentration von einer Polle pro Kubikmeter Luft gewählt, da sehr sensible Menschen bereits bei dieser geringen Konzentration Symptome bekommen können. Die entsprechenden Werte der Viererfelder für alle Simulationen sind im Anhang zu finden.

Als Vergleichsgrößen für die Simulationen stehen Messungen der Pollenkonzentration in Deutschland und in Ungarn zur Verfügung. In einem ersten Schritt wurden die Simulationen nur mit den Messungen in Deutschland verglichen. Hierfür konnten alle vorhandenen Simulationen verwendet werden. Im zweiten Schritt wurden auch die Messungen in Ungarn berücksichtigt. Allerdings konnten dabei nur noch die Simulationen ausgewertet werden, die Ungarn als Pollenquelle berücksichtigen, da die Messungen in Ungarn zum größten Teil von den Quellgebieten innerhalb Ungarns abhängen. Es würde daher das Ergebnis stark verfälschen, wenn Simulationen ohne das Quellgebiet 'Ungarn' mit in den Vergleich aufgenommen würden.

PC und TS

Sowohl PC als auch TS geben an, welcher Anteil der Vorhersagen eingetroffen ist. Werden nur die Messungen in Deutschland beachtet, so zeigt sich, dass die Kenngröße TS deutlich schlechtere Werte liefert

Tab. 7.5.: Übersicht über alle realisierten Simulationen. Es werden jeweils andere Quellgebiete berücksichtigt: H - Ungarn, D - Deutschland, A - Österreich, CZ - Tschechien.

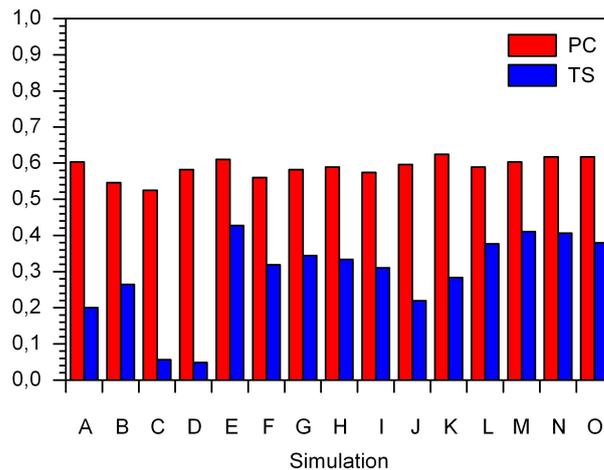
Simulation	Quellgebiete	Simulation	Quellgebiete
A	H	I	A, H
B	D	J	A, CZ
C	A	K	H, CZ
D	CZ	L	D, A, CZ
E	H, D, A, CZ	M	D, A, H
F	D, A	N	D, H, CZ
G	D, H	O	A, H, CZ
H	D, CZ		

als die Kenngröße PC (vgl. Abb. 7.5a). Die Nicht-Ereignisse 'es gibt keine Pollen' werden also sehr viel besser vorhergesagt als die Pollenereignisse. Für Allergiker ist die Vorhersage von Nicht-Ereignissen allerdings deutlich weniger wichtig als die Vorhersage von Ereignissen. Die gesundheitlichen Probleme aufgrund der Allergie beeinträchtigen den Alltag eines Allergikers viel stärker als die möglichen Nebenwirkungen der Medikamente. Somit ist die Kenngröße TS für Allergiker aussagekräftiger. Insgesamt liegt die Trefferquote der besten Simulationen zwischen 30 und 43 %. Die schlechteste Prognose liefert die Simulation mit dem Pollenquellgebiet Tschechien, die beste die Simulation mit allen Pollenquellgebieten.

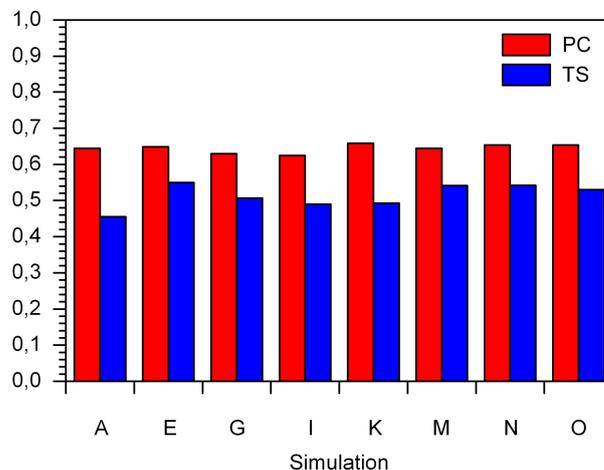
Berücksichtigt man nicht nur die Messungen der Pollenkonzentrationen in Deutschland, sondern auch die Messungen in Ungarn, so nimmt der Unterschied zwischen PC und TS ab. Dies liegt daran, dass bei allen Messungen in Ungarn Pollenkonzentrationen größer als eine Polle pro Kubikmeter Luft vorliegen. Der Fall 'd' (korrekt vorhergesagtes Nicht-Ereignis) kommt daher nicht vor, wenn lediglich die Messungen in Ungarn berücksichtigt werden. Alle Ereignisse, die vorhergesagt werden, treten auch ein. Somit kann sich auch der Fall 'b' (falsch vorhergesagtes Ereignis) nicht ereignen. In diesem Fall sind PC und TS genau gleich groß. Sie liegen bei 0,73.

H, F und B

Die Kenngrößen H, F und B müssen immer zusammen betrachtet werden, wenn eine Aussage über die Qualität einer Simulation gemacht werden soll. Der Bias (B) gibt nur an, ob die Anzahl der eingetroffenen Ereignisse in der Simulation über- oder unterschätzt wird. Es fließt jedoch nicht in die Berechnung des Bias mit ein, ob die vorhergesagten Ereignisse mit den eingetroffenen übereinstimmen. Hierfür muss die Trefferquote H herangezogen werden. Sie gibt an, welcher Anteil der eingetroffenen Ereignisse auch tatsächlich vorhergesagt wurde. Bei einer Simulation, die pauschal immer ein Ereignis vorhersagt, liegt die Trefferquote H bei eins (alle Ereignisse werden vorhergesagt). Dies ist allerdings keine gute Vorher-



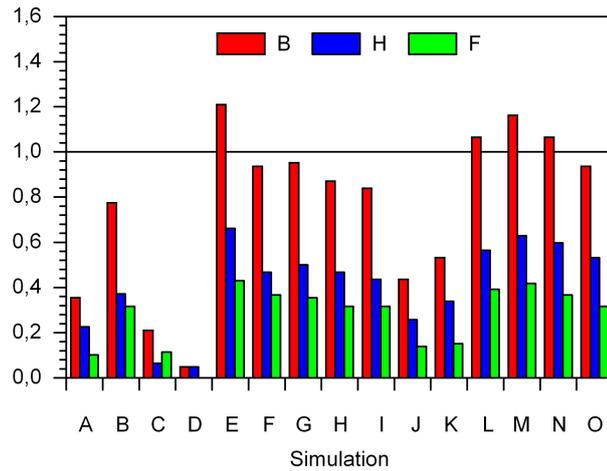
(a) Alle Simulationen, Vergleich nur mit Messungen in Deutschland.



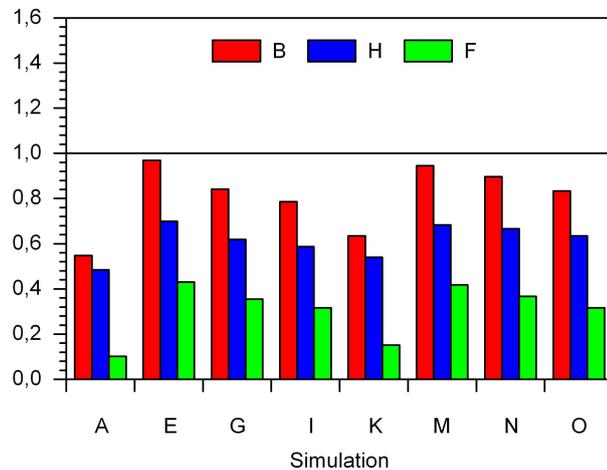
(b) Nur Simulationen mit Ungarn als Quellgebiet, Vergleich mit Messungen in Deutschland und Ungarn.

Abb. 7.5.: Proportion Correct und Threat Score

sage, da auch sehr viele falsche Alarme ausgelöst werden. In der Praxis führt dies dazu, dass Warnungen nicht mehr ernst genommen werden. Es muss also zusätzlich die Kenngröße F beachtet werden, die die Wahrscheinlichkeit angibt, dass ein falscher Alarm ausgelöst wird. Auch F kann jedoch nicht isoliert betrachtet werden, da eine Vorhersage ohne Ereignisse keinen falschen Alarm auslöst. Dennoch handelt es sich auch in diesem Fall nicht um eine gute Vorhersage, da vor dem eigentlichen Ereignis nicht gewarnt wird. Ein Beispiel hierfür ist Simulation D (Ambrosiaquellen nur in Tschechien): es wurde kein einziger falscher Alarm ausgelöst. Alle drei vorhergesagten Ereignisse traten ein. Dennoch liegt die Trefferquote bei unter 5 %, da die übrigen 59 Ereignisse nicht vorhergesagt wurden. Dementsprechend liegt der Bias bei einem Wert von 0,05. Als Orientierungshilfe für Allergiker ist diese Simulation also unbrauchbar. Vergleicht man die Modellergebnisse mit den Pollenmessungen in Deutschland, so zeigt sich zunächst, dass der Bias immer dann besonders hoch ist, wenn die deutschen Quellgebiete berücksichtigt werden.



(a) Alle Simulationen, Vergleich nur mit Messungen in Deutschland.



(b) Nur Simulationen mit Ungarn als Quellgebiet, Vergleich mit Messungen in Deutschland und Ungarn.

Abb. 7.6.: Bias, Hit Rate und False Alarm Rate

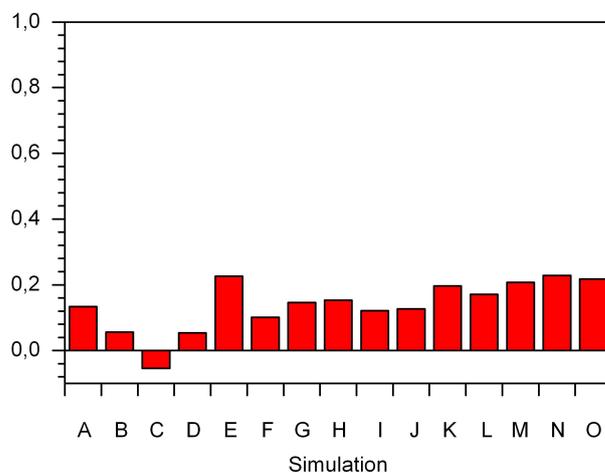
In einigen dieser Fälle werden sogar mehr Pollenereignisse vorhergesagt als tatsächlich stattfinden. Dies lässt darauf schließen, dass die deutschen Quellgebiete in der jetzigen Form überschätzt werden. Einige der Simulationen zeigen sehr wenige Falschmeldungen, allerdings unterschätzen sie die Anzahl der Pollenereignisse stark und haben dementsprechend auch nur geringe Trefferzahlen. Es handelt sich dabei um die Simulationen A, C, D, J und K (vgl. Abb. 7.6a). Gemeinsames Merkmal aller fünf Simulationen ist das Fehlen von Deutschland als Quellgebiet. Die meisten Pollen, die in Deutschland gemessen werden, stammen demnach aus lokalen Quellen. Dennoch sollte die Wichtigkeit Ungarns als Quellgebiet nicht unterschätzt werden. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn sowohl Deutschland als auch Ungarn berücksichtigt wird. Dies zeigt sich bei den Simulationen E (alle Quellgebiete), M (Deutschland, Ungarn und Österreich) und N (Deutschland, Ungarn und Tschechien). Ihre Trefferquoten sind deutlich höher als die der Simulation B (nur Deutschland). Gleichzeitig steigt die Wahrscheinlichkeit eines falschen

Alarmes nur wenig an, wenn Ungarn zusätzlich berücksichtigt wird. Für eine gute Pollenvorhersage ist es demnach unerlässlich, die Ambrosiastandorte in Ungarn mit einzubeziehen.

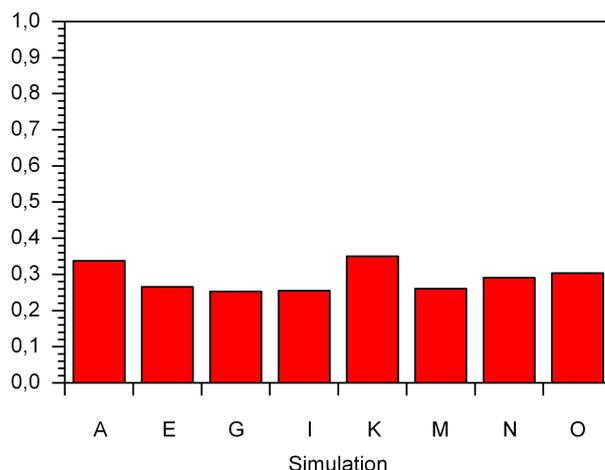
Werden nun auch die Pollenmessungen in Ungarn berücksichtigt, so fällt zunächst einmal auf, dass die Werte der drei Kenngrößen deutlich weniger streuen. Der Bias nimmt nur noch Werte größer 0,5 an. Selbst bei der schlechtesten Simulation liegt die Trefferquote nur noch knapp unter 50 %, in den drei besten Simulationen werden mehr als 65 % der Pollenereignisse vorhergesagt. Insgesamt ist zu bemerken, dass die Anzahl der Falschmeldungen größer wird, wenn die Trefferquote H steigt. Wenn mehr Ereignisse vorhergesagt werden, steigt also auch die Gefahr eines Fehlalarmes.

HSS

Der Heidke Skill Score gibt an, wie gut die Simulation im Vergleich zu einer Zufallsvorhersage ab-



(a) Alle Simulationen, Vergleich nur mit Messungen in Deutschland.



(b) Nur Simulationen mit Ungarn als Quellgebiet, Vergleich mit Messungen in Deutschland und Ungarn.

Abb. 7.7.: Heidke Skill Score

schneidet. Negative Werte bedeuten, dass die Simulation schlechter ist als der Zufall. Ein solches Ergebnis liefert die Simulation C (Quellen in Österreich). Liegt der HSS bei null, so liefert die Simulation eine Vorhersage mit der gleichen Qualität wie eine Zufallsvorhersage. Positive Werte deuten auf eine Verbesserung der Vorhersage in Bezug auf die Zufallsvorhersage hin, wobei ein Wert von eins für eine perfekte Vorhersage steht.

Werden nur die Messungen in Deutschland betrachtet, so ergeben sich recht niedrige Heidke Skill Scores mit einem maximalen Wert von 0,23. Werden die Messungen in Ungarn hinzugenommen, so verbessern sich die Werte des HSS deutlich: der minimale Wert liegt dann bei 0,25 - also bereits über dem besten Wert, der durch die Messungen in Deutschland erreicht wird. Der maximale Wert liegt dann bei 0,35. Die Streuung der HSS-Werte beträgt also lediglich 0,1, die Unterschiede zwischen den einzelnen Simulationen sind demnach gering. Am schlechtesten schneiden die Simulationen G (Deutschland und Ungarn) und I (Ungarn und Österreich) ab, gefolgt von den Simulationen M (Ungarn, Deutschland und Österreich) und E (alle Quellgebiete). Alle vier erreichen Werte unter 0,28. Das beste Ergebnis mit einem Wert von 0,35 wird erzielt, wenn Ungarn und Tschechien als Quellgebiete berücksichtigt werden. Ebenfalls gute Ergebnisse erzielen die Simulationen A (Ungarn) und O (Ungarn, Tschechien und Österreich). Eine zusätzliche Einbeziehung der deutschen Quellen verschlechtert das Ergebnis leicht auf einen Wert von 0,29.

Fazit

Werden alle Kenngrößen berücksichtigt, so heben sich drei Simulationen von den übrigen ab: Simulation E (alle Quellgebiete), M (Deutschland, Ungarn und Österreich) und N (Deutschland, Ungarn und Tschechien). Es ist eindeutig erkennbar, dass sowohl die Ambrosiastandorte in Deutschland als auch die in Ungarn unabdingbar sind für eine qualitativ hochwertige Pollenvorhersage. Der Großteil der Pollen, die in Deutschland gemessen werden, stammt gemäß der Untersuchung in Abschnitt 7.2.1 aus lokalen Beständen. Dies zeigt sich auch darin, dass die Simulationen, die Deutschland als Quellgebiet berücksichtigen, die Anzahl der Pollenereignisse besser wiedergibt als die Simulationen ohne Deutschland. Dennoch verbessert sich die Vorhersage erheblich, wenn außerdem die ungarischen Quellgebiete einbezogen werden. Dies liegt sicherlich an der außergewöhnlich hohen Bewuchsdichte in Ungarn, die zur Freisetzung erheblicher Pollenmengen führt. Diese können über Ferntransport bis nach Nordostdeutschland transportiert werden. Des Weiteren zeigt sich, dass die Ambrosiastandorte in Tschechien und Österreich bei der untersuchten Pollenepisode von untergeordneter Bedeutung sind. Dies hat unterschiedliche Gründe: Die Pollen aus Österreich werden bei Winden aus südöstlichen Richtungen nicht nach Nordostdeutschland transportiert. Sie beeinflussen daher lediglich die Pollenkonzentrationen in den süddeutschen Messfallen. Die tschechischen Ambrosiabestände hingegen sind sehr klein, weshalb sie nicht in der Lage sind, große Mengen an Pollen zu emittieren. Doch die geographische Nähe steigert ihre Bedeutung für die Pollenkonzentrationen in Nordostdeutschland.

8. Zusammenfassung

Die aus Nordamerika stammende *Ambrosia artemisiifolia* L. breitet sich seit etwa zwei Jahrzehnten verstärkt in Mitteleuropa aus. In Ungarn, sowie in Teilen Frankreichs und Italiens, gilt sie mittlerweile als eingebürgert und zeigt zum Teil flächenhaften Bewuchs. Doch auch in fast allen übrigen Ländern Mittel- und Osteuropas sind Bestände der Pflanze bekannt. Dies hat gravierende Folgen für die Gesundheit der Bevölkerung, da die Pollen der *Ambrosia artemisiifolia* L. stark allergen wirken. Es wird erwartet, dass mit steigendem CO₂-Gehalt der Luft die allergische Wirkung, sowie die Gesamtmenge der Pollen zunehmen. Bei der Behandlung eines Allergikers ist eine möglichst präzise Vorhersage der zu erwartenden Pollenbelastung von großer Bedeutung. Da die Pollen mit den Luftströmungen über weite Strecken transportiert werden, sollten dabei nicht nur lokale Bestände der Pflanzen berücksichtigt werden.

Der Ferntransport der Ambrosiapollen wird bisher hauptsächlich über die Auswertung von Messreihen belegt. Auch die Berechnung von Rückwärtstrajektorien wird häufig angewendet, um die Quellgebiete der Pollen zu bestimmen. Es gibt bislang nur wenige Ansätze, bei denen die Ausbreitung von Pollen (allerdings nicht der *Ambrosia artemisiifolia* L.) direkt in einem numerischen Wettervorhersagesystem simuliert wird. Der Ferntransport von Ambrosiapollen wurde noch nicht in einem Wettervorhersagesystem realisiert.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Behandlung der Ausbreitung von Ambrosiapollen in das mesoskalige Wettervorhersagesystem COSMO-ART eingebaut. Die Beschreibungen von Emission, Transport und Sedimentation der Pollen erfolgte analog zu den Ansätzen von Helbig et al. (2004) und Vogel et al. (2008) in Form einer Bilanzgleichung. Der Emissionsfluss wurde in Annäherung an den latenten und fühlbaren Wärmestrom beschrieben, wobei meteorologische Faktoren als limitierendes Element eingesetzt wurden. Biologische Faktoren, wie beispielsweise die Länge der Pollensaison, wurden ebenfalls berücksichtigt.

Der entscheidende Faktor einer guten Pollenvorhersage mittels Wettervorhersagesystem liegt in der Bereitstellung aktueller und hoch aufgelöster Bestandskarten. Nur wenn Größe und Lage der Pflanzenbestände bekannt sind, kann die Ausbreitung der von ihnen freigesetzten Pollen realistisch simuliert werden. Zur Zeit sind Bestandskarten für die *Ambrosia artemisiifolia* L. weder flächendeckend noch in ausreichender Qualität vorhanden. Um dennoch Ausbreitungsrechnungen für Ambrosiapollen durchführen zu können, wurden Daten zur Verbreitung der Pflanze in Ungarn, Österreich, Deutschland und Tschechien zusammen getragen. Teilweise stammen die Funddaten aus wissenschaftlichen Veröffentlichungen, teilweise wurden sie uns zur Verfügung gestellt. Diese Daten wurden digitalisiert und als Grundlage für die Ausbreitungsrechnungen in COSMO-ART verwendet. Die damit simulierten Pollenkonzentrationen

wurden schließlich mit gemessenen Konzentrationen in Ungarn und Deutschland verglichen.

Die Simulation der Pollenausbreitung mittels COSMO-ART soll zwei Fragen bezüglich einer Pollenepisode im Jahr 2006 beantworten:

1. Wie groß war der Anteil des Ferntransportes an der Gesamtkonzentration an Ambrosiapollen? Oder anders formuliert: Aus welchen geographischen Regionen stammen die Pollen, die in Deutschland registriert wurden?
2. Welche Regionen müssen als Quellgebiete der Ambrosiapollen berücksichtigt werden, um eine möglichst gute Pollenvorhersage durchführen zu können?

Um diese beiden Fragen beantworten zu können, wurden verschiedene Simulationen durchgeführt. Als zeitlicher Rahmen wurde eine Pollenepisode im September 2006 gewählt, während der es in Ostdeutschland zu ungewöhnlich hohen Ambrosiapollenkonzentrationen kam. Zunächst wurden alle vorhandenen Quellgebiete berücksichtigt und die resultierende Pollenverteilung mit Messdaten verglichen. Schon hier stellte sich heraus, dass die Ambrosiapollen aus den ungarischen Quellgebieten selbst in weit von Ungarn entfernten Gegenden von Bedeutung sind. Die räumliche Verteilung der Ambrosiapollen konnte durch die Simulation recht gut wiedergegeben werden. Besonders in den ersten beiden Tagen der Simulation wurden sowohl die Regionen mit sehr geringen Pollenbelastungen als auch die Gegenden mit hoher Belastung treffend reproduziert. Quantitative Vergleiche zeigten, dass die Pollenkonzentrationen in den Quellgebieten Ungarns vom Modell deutlich unterschätzt werden. Und auch die Menge der in Ostdeutschland gemessenen Pollen überstieg die simulierten Konzentrationen teilweise um eine Größenordnung. Hierfür können verschiedene Gründe angeführt werden:

1. Bei einer Wetterlage mit überwiegenden Süd- und Südostwinden kann es auch zu Ferntransport von Ambrosiapollen nach Ungarn kommen. Der Anteil des Ferntransportes an den Pollenkonzentrationen in Ungarn ist sicherlich nicht vergleichbar mit den Verhältnissen in Deutschland, da Ungarn die größte Ambrosiapollenquelle in Europa darstellt. Der Hauptanteil der Pollenkonzentration wird daher von lokalen Beständen verursacht. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein bestimmter Prozentsatz der Pollenkonzentration durch Ferntransport verursacht wird, was im Modell allerdings nicht berücksichtigt wird, da keines der Länder südlich und östlich von Ungarn als Quellgebiet zugelassen wird.
2. Die Messungen der Pollenkonzentration werden stark von der Umgebung des Messgerätes beeinflusst. Befindet sich beispielsweise ein Ambrosiabestand in der Nähe eines Messgerätes, so kann es zu einer lokal überhöhten Pollenkonzentration kommen, die jedoch nicht repräsentativ für ein größeres Gebiet ist.
3. Außerdem muss beachtet werden, dass die Werte der Pollenkonzentration im Modell und in einer Messung nicht direkt übertragbar sind. Die Modellwerte stellen einen Mittelwert über die Fläche eines Gitterelementes dar, während die Messung den Wert an einem diskreten Punkt repräsentiert.

-
4. Die Parametrisierung der Pollenemission im Modell beinhaltet einige Faktoren, deren genaue Werte nicht bekannt sind. Hierzu zählen unter Anderem die Pollenproduktion pro Quadratmeter, die genaue Form der Blühparabel, der Blattflächenindex für *Ambrosia artemisiifolia* L. und die meteorologischen Schwellenwerte, ab denen die Emission der Pollen möglich ist. Alle diese Faktoren beeinflussen die Menge der emittierten Pollen und damit die Höhe der Pollenkonzentrationen.

Die ersten visuellen Auswertungen der Simulation deuteten darauf hin, dass Ferntransport einen nicht zu vernachlässigenden Anteil der Pollenkonzentrationen in Deutschland bestimmt.

In einem nächsten Schritt wurde je eine Simulation für die vier Quellgebiete 'Deutschland', 'Ungarn', 'Österreich' und 'Tschechien' realisiert. Jede dieser Simulationen führte zu einer bestimmten Verteilung der Pollenkonzentrationen im Simulationsgebiet. Anhand ausgewählter Gitterpunkte in Nordostdeutschland konnte damit die Herkunft der Pollen prozentual bestimmt werden. Es stellte sich heraus, dass der überwiegende Teil (etwa 80 %) der Ambrosiapollen in Ostdeutschland während der untersuchten Pollenepisode aus lokalen Quellen stammte. Doch auch die ungarischen Quellgebiete hatten mit einem Anteil von etwa 20 % einen bedeutenden Einfluss auf die Pollenkonzentration in Nordostdeutschland. Bei einer gemessenen Pollenkonzentration von $40 \text{ Pollen}/m^3$ entspricht dies einem Wert von $8 \text{ Pollen}/m^3$, der durch Ferntransport bedingt ist. Bei Ambrosiapollen verursacht eine solche Konzentration bereits mäßige Belastungen bei Allergikern. In Regionen, die nahe der tschechischen Grenze liegen, sind auch die tschechischen Quellgebiete von großer Bedeutung. Österreich hingegen hat bei der untersuchten Wetterlage keinen nennenswerten Einfluss auf die Pollenkonzentrationen in Nordostdeutschland.

Es muss allerdings beachtet werden, dass die verwendeten Verbreitungskarten in ihrer Qualität stark variieren. Die Verbreitungskarte für Deutschland zeigt diejenigen Landkreise an, in denen mindestens ein Bestand mit mehr als 100 Ambrosiapflanzen zu finden ist. Die tatsächliche Anzahl der Pflanzen, beziehungsweise die Anzahl der großen Bestände sind jedoch nicht bekannt. Für die Landkreise mit großen Beständen wird ein flächenhafter Bewuchs angenommen, der 6 % der Fläche bedeckt. Dieser fiktive Wert mag für Deutschland zu hoch sein. Dies führt dazu, dass die deutschen Quellgebiete vermutlich überschätzt werden. Daraus wiederum folgt, dass der Einfluss des Ferntransportes aus Ungarn vermutlich stärker ist, als die Ergebnisse nahe legen.

Im letzten Schritt wurden weitere Simulationen mit verschiedenen Kombinationen der möglichen Quellgebiete realisiert. Die Güte der einzelnen Simulation wurde anhand einer 2x2 Kontingenztafel und der dazugehörigen Kenngrößen bestimmt. Da Ambrosiapollen bereits in sehr geringen Konzentrationen zu gesundheitlichen Problemen führen können, wurde zur Aufstellung der 2x2 Kontingenztafel die Frage 'Sind Pollen an einem bestimmten Gitterpunkt vorhanden oder nicht?' verwendet. Die Menge der möglicherweise vorhandenen Pollen wurde nicht beachtet. Eine Zusammenschau aller berechneten Kenngrößen zeigte, dass drei Simulationen deutlich bessere Ergebnisse lieferten als die übrigen Simulationen. Dies waren:

- Simulation E mit den Quellgebieten 'Deutschland', 'Ungarn', 'Tschechien' und 'Österreich'
- Simulation M mit den Quellgebieten 'Deutschland', 'Ungarn' und 'Österreich'

- Simulation N mit den Quellgebieten 'Deutschland', 'Ungarn' und 'Tschechien'

Demzufolge sollten sowohl die lokalen Quellen in Deutschland als auch der Ferntransport von Pollen aus Ungarn berücksichtigt werden, will man bei Wetterlagen mit südöstlichen Windrichtungen eine zuverlässige Pollenvorhersage über die Belastung durch Ambrosiapollen erstellen. Insgesamt zeigt sich, dass die Güte der Vorhersage zunimmt, umso mehr Quellgebiete berücksichtigt werden. Ferntransport ist im Falle der Ambrosia also nicht zu vernachlässigen. Die tschechischen Quellgebiete sind recht klein, weshalb ihr Einfluss begrenzt ist. Dennoch können auch sie in grenznahen Gebieten Nordostdeutschlands einen bedeutenden Anteil der Pollenkonzentration ausmachen. Die österreichischen Quellen sind bei der untersuchten Wetterlage von untergeordneter Bedeutung, da ihre Pollen nicht nach Nordostdeutschland transportiert werden. Sie beeinflussen lediglich die Messungen im südlichen Raum Deutschlands, der aber bei der untersuchten Pollenepisode nicht betroffen war.

Diese Arbeit ist ein erster Schritt zu einer operationellen Vorhersage der Ambrosiapollenkonzentration, basierend auf Ausbreitungsrechnungen in dem erweiterten Wettervorhersagesystem COSMO-ART. Weiterführende Arbeiten sollten sich auf die genauere Bestimmung der charakteristischen Größen der Ambrosiapollen und -pflanzen, sowie auf genauere, aktuelle und räumlich ausgedehntere Verbreitungskarten der Ambrosiabestände konzentrieren.

Zurück zum Anfang: Die Fragen, die mit dieser Diplomarbeit beantwortet werden sollen, lauteten:

1. Wie groß war der Anteil des Ferntransportes an der Gesamtkonzentration an Ambrosiapollen? Oder anders formuliert: Aus welchen geographischen Regionen stammen die Pollen, die in Deutschland im September 2006 registriert wurden?
2. Welche Regionen müssen als Quellgebiete der Ambrosiapollen berücksichtigt werden, um eine möglichst gute Pollenvorhersage durchführen zu können?

Sie können wie folgt beantwortet werden:

1. Der Ferntransport stellt eine wichtige Quelle für Ambrosiapollen in Deutschland dar. Bei der untersuchten Pollenepisode waren dabei die Ambrosiastandorte in Ungarn mit einem Anteil von etwa 20 % von größter Bedeutung. Die übrigen Pollen stammten vorwiegend aus lokalen Quellen.
2. Eine belastbare Pollenvorhersage für Deutschland ist bei der untersuchten Wetterlage nur möglich, wenn Deutschland und Ungarn als Quellgebiete berücksichtigt werden. Die Einbeziehung von Österreich und Tschechien verbessert die Vorhersage zusätzlich.

A. Abbildungsverzeichnis

4.1	Aussehen der <i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.	21
5.1	Beispiele für im Internet verfügbare Verbreitungskarten der Ambrosia in Europa	29
5.2	Lage der Pollenmessstationen in Deutschland	31
5.3	Lage der Pollenmessstationen in Ungarn	33
6.1	Original und bearbeitete Verbreitungskarte für Ungarn	37
6.2	Verbreitung der Ambrosia in Tschechien	39
7.1	Verbreitung der Ambrosiabestände in den Simulationen	42
7.2	Pollenkonzentration am 13. und 14. September 2006	46
7.3	Pollenkonzentration am 15. und 16. September 2006	47
7.4	Räumliche Verteilung der Pollenkonzentration am 15.09.2006	49
7.5	Proportion Correct und Threat Score	56
7.6	Bias, Hit Rate und False Alarm Rate	57
7.7	Heidke Skill Score	58

B. Tabellenverzeichnis

4.1	Länder Europas, in denen Ambrosiabestände nachgewiesen wurden	25
4.2	Belastungsklassen für Ambrosia- und Gräserpollen im Vergleich	26
5.1	Übersicht über die Messstationen in Deutschland und Ungarn	32
6.1	Geographische Koordinaten der Eckpunkte der Verbreitungskarte Ungarn	37
6.2	Geographische Koordinaten der Eckpunkte der Verbreitungskarte Deutschland	38
7.1	Pollenkonzentrationen an ausgewählten Messstationen in Deutschland während der Pollen-episode im September 2006	43
7.2	Überblick über die Werte der charakteristischen Kenngrößen der Ambrosiapflanzen und -pollen, welche in den Simulationsrechnungen verwendet wurden.	44
7.3	Prozentualer Anteil der einzelnen Quellgebiete an der Gesamtkonzentration	51
7.4	Aufbau eines Viererfeldes	52
7.5	Übersicht über alle realisierten Simulationen	55
D.1	2x2 Kontingenztafeln und Kenngrößen, Deutschland	75
D.2	2x2 Kontingenztafeln und Kenngrößen, Deutschland und Ungarn	76

C. Literaturverzeichnis

- Abul-Fatih, H. A., F. A. Bazzaz und R. Hunt (1979). The biology of *Ambrosia trifida* L. - III. Growth and biomass allocation. *New Phytol.* 83, 829–838.
- Adrian, G. und D. Frühwald (2002). Design der Modellkette GME/LM. Meteorologische Fortbildung 27. Jahrgang, Heft 3/4, Deutscher Wetterdienst. Promet: Die neue Modellkette des DWD I.
- Alberternst, B. und S. Nawrath (2006). InfoPage Beifuß-Ambrosie. <http://www.ambrosiainfo.de/> (16.12.2008).
- Alberternst, B., S. Nawrath und F. Klingenstein (2006). Biologie, Verbreitung und Einschleppungswege von *Ambrosia artemisiifolia* in Deutschland und Bewertung aus Naturschutzsicht. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* 58(11), 279–285.
- Apatini, D., E. Replyuk, E. Novák, E. Józsa und A. Páldy (2006). Annual report of the Hungarian Aerobiological Network 2006. Techn. Ber., National Environmental Institute, Budapest.
- Aylor, D. E. (2002). Settling speed of corn (*Zea mays*) pollen. *J. Aerosol Sci.* 33, 1601–1607.
- Aylor, D. E., N. P. Schultes und E. J. Shields (2003). An aerobiological framework for assessing cross-pollination in maize. *Agric. For. Meteorol.* 119, 111–129.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2009). LfU: Bayerisches Landesamt für Umwelt. <http://www.lfu.bayern.de/> (20.02.2009).
- Belmonte, J., M. Vendrell, J. M. Roure, J. Vidal, J. Botey und A. Cadahía (2000). Levels of *Ambrosia* pollen in the atmospheric spectra of Catalan aerobiological stations. *Aerobiologia* 16, 93–99.
- Bianchi, D. E., D. J. Schwemmin und W. H. Wagner (Jr.) (1959). Pollen release in the common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*). *Bot. Gaz.* 120, 235–243.
- Bohren, C., N. Delabays, G. Mermillod, C. Keimer und C. Kündig (2005). *Ambrosia artemisiifolia* in der Schweiz - eine herbologische Annäherung. *AGRARForschung* 12 (2), 71–78.
- Bundesamt für Naturschutz (2008). FloraWeb. <http://www.floraweb.de/> (16.12.2008).
- Cecchi, L., T. T. Malaspina, R. Albertini, M. Zanca, E. Ridolo, I. Usberti, M. Morabito, P. D. Aglio und S. Orlandini (2007). The contribution of long-distance transport to the presence of *Ambrosia* pollen in central northern Italy. *Aerobiologia* 23, 145–151.

- Cecchi, L., M. Morabito, M. P. Domeneghetti, A. Crisci, M. Onorari und S. Orlandini (2006). Long distance transport of ragweed pollen as a potential cause of allergy in central Italy. *ANNALS OF ALLERGY, ASTHMA & IMMUNOLOGY* 96, 86–91.
- Chamecki, M., C. Meneveau und M. B. Parlange (2009). Large eddy simulation of pollen transport in the atmospheric boundary layer. *Aerosol Science* 40, 241–255.
- Chauvel, B., F. Dessaint, C. Cardinal-Legrand und F. Bretagnolle (2006). The historical spread of *Ambrosia artemisiifolia* L. in France from herbarium records. *J. Biogeogr.* 33, 665–673.
- Clot, B., D. Schneiter, P. Tercier, R. Gehrig, A. Peeters und M. Thibaudon (2002). *Ambrosia* pollen in Switzerland—produced locally or transported? *Allerg Immunol* 34(4), 126–128.
- Dahl, A., S.-O. Strandhede und J.-A. Wihl (1999). Ragweed - An allergy risk in Sweden? *Aerobiologia* 15, 293–297.
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (2009). ECMWF-Homepage. <http://www.ecmwf.int/> (07.05.2009).
- Fumanal, B., B. Chauvel und F. Bretagnolle (2007). Estimation of pollen and seed production of common ragweed in France. *Ann Agric Environ Med* 14, 233–236.
- Gabrio, T., B. Alberternst, H. Behrendt, K. Bucher, J. Huss-Marp, U. Kaminski, S. Nawrath und U. Weidner (2008). Einfluss klimatischer Faktoren und ihrer bisherigen sowie erwarteten Änderung bezüglich der Zunahme von Sensibilisierungen am Beispiel von *Ambrosia*-Pollen. Statusseminar zum Forschungsvorhaben "Herausforderung Klimawandel Baden-Württemberg". URL http://www.herausforderung-klimawandel-bw.de/images/stories/Vortrag_Gabrio_Ambrosia_StatSem_KA_080929.pdf.
- Giddings, G. (2000). Modelling the spread of pollen from *Lolium perenne*. The implications for the release of wind-pollinated transgenics. *Theor Appl Genet* 100, 971–974.
- Goyette-Pernot, J., R. Munoz-Alpizar, J. P. Blanchet, S. Goyette und M. Beniston (2003). Analysing ragweed pollen cloud over Montreal City Center. *Proceedings of the 5th International Conference on Urban Climate, Lodz*.
- Gustafson, D. I., M. J. Horak, C. B. Rempel, S. G. Metz, D. R. Gigax und P. Hucl (2005). An Empirical Model for Pollen-Mediated Gene Flow in Wheat. *Crop Sci.* 45, 1286–1294.
- Helbig, N., B. Vogel, H. Vogel und F. Fiedler (2004). Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale. *Aerobiologia* 3, 3–19.
- Jarosz, N., B. Loubet und L. Huber (2004). Modelling airborne concentration and deposition rate of maize pollen. *Atmos. Environ.* 38, 5555–5566.

- Jäger, S. (2000). Ragweed (*Ambrosia*) sensitisation rates correlate with the amount of inhaled airborne pollen. A 14-year study in Vienna, Austria. *Aerobiologia* 16, 149–153.
- Járai-Komlódi, M. (2000). Some details about ragweed airborne pollen in Hungary. *Aerobiologia* 16, 291–294.
- Julius Kühn-Institut - Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (2008). jKi: Julius Kühn-Institut. <http://www.jki.bund.de/> (16.12.2008).
- Kasprzyk, I. (2008). Non-native *Ambrosia* pollen in the atmosphere of Rzeszów (SE Poland); evaluation of the effect of weather conditions on daily concentrations and starting dates of the pollen season. *Int. J. Biometeorol.* 52, 341–351.
- Köhler, B., R. Gehrig, B. Clot, V. Ciotti und G. Maspoli (2006). Ambrosialuftpollenmessungen in der Schweiz: Quantifizierung des Gefahrenpotentials und Indikator für die Ausbreitung der Pflanze. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* 58, 299–303.
- Klein, E. K., C. Lavigne, H. Picault, M. Renard und P.-H. Gouyon (2006). Pollen dispersal of oilseed rape: estimation of the dispersal function and effects of field dimension. *Journal of Applied Ecology* 43, 141–151.
- Kleinbauer, I., S. Dullinger, F. Essl und J. Peterseil (2006). Ein allergener Neophyt und seine potentielle Ausbreitung in Österreich - Arealodynamik der Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*) unter dem Einfluss des Klimawandels. Techn. Ber., V.I.N.C.A. - Institut für Naturschutzforschung und Ökologie G.m.b.H. und Umweltbundesamt Ges.m.b.H. 7.
- Laaidi, K. und M. Laaidi (1999). Airborne pollen of *Ambrosia* in Burgundy (France) 1996-1997. *Aerobiologia* 15, 65–69.
- Laaidi, M., M. Thibaudon und J.-P. Besancenot (2003). Two statistical approaches to forecasting the start and duration of the pollen season of *Ambrosia* in the area of Lyon (France). *Int. J. Biometeorol.* 48, 65–73.
- Loos, C., R. Seppelt, S. Meier-Bethke, J. Schiemann und O. Richter (2003). Spatially explicit modelling of transgenic maize pollen dispersal and cross-pollination. *Journal of Theoretical Biology* 225, 241–255.
- Lundgren, K. (2006). *Numerical Simulation of the Spatial and Temporal Distribution of Sea Salt Particles on the Regional Scale*. Diplomarbeit, Department of Meteorology, Stockholm University.
- Makra, L., M. Juhász, E. Borsos und R. Béczi (2004). Meteorological variables connected with airborne ragweed pollen in Southern Hungary. *Int. J. Biometeorol.* 49, 37–47.

- Makra, L. und S. Pálfi (2007). Intra-regional and long-range ragweed pollen transport over southern Hungary. *ACTA CLIMATOLOGICA ET CHOROLOGICA 40-41*, 69–77.
- Mandrioli, P., G. Caneva und C. Sabbioni (Hrsg.) (2003). *Cultural Heritage and Aerobiology: Methods and Measurement Techniques for Biodeterioration Monitoring*. Kluwer Academic Publishers. 113.
- Mandrioli, P., M. D. Cecco und G. Andina (1998). Ragweed pollen: The aeroallergen is spreading in Italy. *Aerobiologia 14*, 13–20.
- Meagher, T. R., F. C. Belanger und P. R. Day (2003). Using empirical data to model transgene dispersal. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 358*, 1157–1162.
- Meckes und Ottawa GbR (2008). eye of science. <http://www.eyeofscience.de/> (16.12.2008).
- Otto, C., B. Alberternst, F. Klingenstein und S. Nawrath (2008). Verbreitung der Beifußblättrigen Ambrosie in Deutschland - Problematik und Handlungsoptionen aus Naturschutzsicht. BfN-Skripten 235, Bundesamt für Naturschutz. 22.
- Pasken, R. und J. A. Pietrowicz (2005). Using dispersion and mesoscale meteorological models to forecast pollen concentrations. *Atmos. Environ. 39*, 7689–7701.
- Peternel, R., J. Culig, I. Hrga und P. Hercog (2006). Airborne ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) pollen concentrations in Croatia, 2002-2004. *Aerobiologia 22*, 161–168.
- Piotrowska, K. und E. Weryszko-Chmielewska (2006). Ambrosia pollen in the air of Lublin, Poland. *Aerobiologia 22*, 151–158.
- Puc, M. (2006). Ragweed and mugwort pollen in Szczecin, Poland. *Aerobiologia 22*, 67–78.
- Raynor, G. S., E. C. Ogden und J. V. Hayes (1970). Dispersion and Deposition of Ragweed Pollen from Experimental Sources. *J. Appl. Meteorol. 9*, 885–895.
- Reinhardt, F., M. Herle, F. Bastiansen und B. Streit (2003). Ökonomische Folgen der Ausbreitung von Neobiota. Forschungsbericht 201 686 211, Umweltbundesamt. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. UBA-FB 000441. Seiten 23-29.
- Rinke, R. (2008). *Parametrisierung des Auswaschens von Aerosolpartikeln durch Niederschlag*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Institut für Meteorologie und Klimaforschung.
- Rybníček, O., B. Novotná, E. Rybníková und K. Rybníček (2000). Ragweed in the Czech Republic. *Aerobiologia 16*, 287–290.
- Saar, M., Z. Gudzinskas, T. Ploompuu, E. Linno, Z. Minkiene und V. Motiekaityte (2000). Ragweed plants and airborne pollen in the Baltic states. *Aerobiologia 16*, 101–106.

- Schüler, S. und K. H. Schlünzen (2006). Modeling of oak pollen dispersal on the landscape level with a mesoscale atmospheric model. *Environ. Model. Assess.* 11, 179–194.
- Schättler, U., G. Doms und C. Schraff (2008). A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part VII: User's Guide. Documentation, Consortium for Small-Scale Modelling. 1-28.
- Shaw, M. W., T. D. Harwood, M. J. Wilkinson und L. Elliott (2006). Assembling spatially explicit landscape models of pollen and spore dispersal by wind for risk assessment. *Proc. R. Soc. B* 273, 1705–1713.
- Slinn, W. G. N. (1983). Air-to-sea transfer of particles. *Air-Sea Exchange of Gases and Particles*, (Hrsg.) P. S. Liss und W. G. N. Slinn. Reidel, Dordrecht, 299–405.
- Smith, M., C. Skjoth, D. Myszkowska, A. Uruska, M. Puc, A. Stach, Z. Balwierz, K. Chlopek, K. Piotrowska, I. Kasprzyk und J. Brandt (2008). Long-range transport of Ambrosia pollen to Poland. *Agric. For. Meteorol.* 148, 1402–1411.
- Sofiev, M., P. Siljamo, H. Ranta und A. Rantio-Lehtimäki (2006). Towards numerical forecasting of long-range air transport of birch pollen: theoretical considerations and a feasibility study. *Int. J. Biometeorol.* 50, 392–402.
- Song, J.-S. und B. Prots (1998). Invasion of Ambrosia artemisiifolia L. (Compositae) in the Ukrainian Carpathians Mts. and the Transcarpathian Plain (Central Europe). *Korean J Biol Sci* 2, 209–216.
- Stach, A., M. Smith, C. A. Skjoth und J. Brandt (2007). Examining Ambrosia pollen episodes at Poznan (Poland) using back-trajectory analysis. *Int. J. Biometeorol.* 51, 275–286.
- Stanelle, T. (2008). *Wechselwirkungen von Mineralstaubpartikeln mit thermodynamischen und dynamischen Prozessen in der Atmosphäre über Westafrika*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Institut für Meteorologie und Klimaforschung.
- Stark, P. C., L. M. Ryan, J. L. McDonald und H. A. Burge (1997). Using meteorologic data to predict daily ragweed pollen levels. *Aerobiologia* 13, 177–184.
- Stefanic, E., V. Kovacevic und Z. Lazanin (2005). Airborne ragweed pollen concentration in north-eastern Croatia and its relationship with meteorological parameters. *Ann. Agric. Environ. Med.* 12, 75–79.
- Stepalska, D., K. Szczepanek und D. Myszkowska (2002). Variation in Ambrosia pollen concentration in Southern and Central Poland in 1982-1999. *Aerobiologia* 18, 13–22.
- Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (2009). PID. <http://www.pollenstiftung.de/> (20.04.2009).

- Stinson, K. A. und F. A. Bazzaz (2006). CO₂ enrichment reduces reproductive dominance in competing stands of *Ambrosia artemisiifolia* (common ragweed). *Oecologia* 147, 155–163.
- Taramarcaz, P., C. Lambelet, B. Clot, C. Keimer und C. Hauser (2005). Ragweed (*Ambrosia*) progression and its health risks: will Switzerland resist this invasion? *SWISS MED WKLY* 135, 538–548.
- Toole, E. H. und E. Brown (1946). Final results of the Duvel buried seed experiment. *J. Agric. Res.* 72, 201–210.
- Trigo, M. d. M. und J. García-Sánchez (2006). *Ambrosia artemisiifolia* L., nueva especie para la flora alóctona invasora de Andalucía (España). *Acta Botanica Malacitana* 31, 203–205.
- Vogel, B., H. Vogel, D. Bäumer, M. Bangert, K. Lundgren, R. Rinke und T. Stanelle (2009). The comprehensive model system COSMO-ART - Radiative impact of aerosol on the state of the atmosphere on the regional scale. Submitted to *Atmos. Chem. Phys.*
- Vogel, H., A. Pauling und B. Vogel (2008). Numerical Simulation of Birch Pollen Dispersion with an Operational Weather Forecast System. *Int. J. Biometeorol.* 52, 805–814.
- Walklate, P. J., J. C. R. Hunt, H. L. Higson und J. B. Sweet (2004). A model of pollen-mediated gene flow for oilseed rape. *Proc. R. Soc. Lond. B* 271, 441–449.
- Wayne, P., S. Foster, J. Connolly, F. Bazzaz und P. Epstein (2002). Production of allergenic pollen by ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) is increased in CO₂-enriched atmospheres. *Annals of Allergy, Asthma and Immunology* 8, 279–282.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. International geophysics series ; 91. Academic Press, Amsterdam, zweite Aufl. 260-276.
- Yankova, R., V. Zlatev, D. Baltadjieva, T. Mustakov und B. Mustakov (2000). Quantitative dynamics of *Ambrosia* pollen grains in Bulgaria. *Aerobiologia* 16, 299–301.
- Zanon, P., E. Chiodini und D. Berra (2002). Allergy to Ragweed in Northern Italy and Prevention Strategies. *Monaldi Arch Chest Dis* 57:2, 144–146.
- Ziska, L. H. und F. A. Caulfield (2000). Rising CO₂ and pollen production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*), a known allergy-inducing species: implications for public health. *Aust. J. Plant Physiol.* 27, 893–898.
- Ziska, L. H., K. George und D. A. Frenz (2007). Establishment and persistence of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) in disturbed soil as a function of an urban-rural macro-environment. *Glob. Chang. Biol.* 13, 266–274.

D. Anhang

D.1. Werte der 2x2 Kontingenztafeln und der daraus abgeleiteten Kenngrößen

Tab. D.1.: Übersicht über alle Simulationen. Es werden jeweils andere Quellgebiete berücksichtigt: H - Ungarn, D - Deutschland, A - Österreich, CZ - Tschechien. a, b, c, d: Werte der 2x2 Kontingenztafeln für alle Simulationen. Es werden nur die Messungen der Pollenkonzentration in Deutschland berücksichtigt. Gesamtzahl der Validierungspunkte: N = 141. Werte der Kenngrößen und des Heidke Skill Score, die anhand der 2x2 Kontingenztafel ermittelt werden. Farblich hinterlegt ist in jeder Spalte der beste, zweit- und drittbeste, schlechteste und zweit- und dritt schlechteste Wert. Sind in diesem Zusammenhang zwei Werte gleich groß, so sind beide farblich hinterlegt. Die Reihenfolge wurde bestimmt, bevor die numerischen Werte gerundet wurden.

Simulation	Quellgebiete	a	b	c	d	PC	TS	B	H	F	HSS
A	H	14	8	48	71	0,60	0,20	0,35	0,23	0,10	0,13
B	D	23	25	39	54	0,55	0,26	0,77	0,37	0,32	0,06
C	A	4	9	58	70	0,52	0,06	0,21	0,06	0,11	-0,05
D	CZ	3	0	59	79	0,58	0,05	0,05	0,05	0,00	0,05
E	H, D, A, CZ	41	34	21	45	0,61	0,43	1,21	0,66	0,43	0,23
F	D, A	29	29	33	50	0,56	0,32	0,94	0,47	0,37	0,10
G	D, H	31	28	31	51	0,58	0,34	0,95	0,50	0,35	0,15
H	D, CZ	29	25	33	54	0,59	0,33	0,87	0,47	0,32	0,15
I	A, H	27	25	35	54	0,57	0,31	0,84	0,44	0,32	0,12
J	A, CZ	16	11	46	68	0,60	0,22	0,44	0,26	0,14	0,13
K	H, CZ	21	12	41	67	0,62	0,28	0,53	0,34	0,15	0,20
L	D, A, CZ	35	31	27	48	0,59	0,38	1,06	0,56	0,39	0,17
M	D, A, H	39	33	23	46	0,60	0,41	1,16	0,63	0,42	0,21
N	D, H, CZ	37	29	25	50	0,62	0,41	1,06	0,60	0,37	0,23
O	A, H, CZ	33	25	29	54	0,62	0,38	0,94	0,53	0,32	0,22

Tab. D.2.: Übersicht über die Simulationen mit Ungarn. Es werden jeweils andere Quellgebiete berücksichtigt: H - Ungarn, D - Deutschland, A - Österreich, CZ - Tschechien. a, b, c, d: Werte der 2x2 Kontingenztafeln für die Simulationen mit Ungarn. Es werden die Messungen der Pollenkonzentration in Deutschland und Ungarn berücksichtigt. Gesamtzahl der Validierungspunkte: N = 205. Werte der Kenngrößen und des Heidke Skill Score, die anhand der 2x2 Kontingenztafel ermittelt werden. Farblich hinterlegt ist in jeder Spalte der **beste**, **zweitbeste**, **schlechteste** und **zweitschlechteste** Wert. Sind in diesem Zusammenhang zwei Werte gleich groß, so sind beide farblich hinterlegt. Die Reihenfolge wurde bestimmt, bevor die numerischen Werte gerundet wurden.

Simulation	Quellgebiete	a	b	c	d	PC	TS	B	H	F	HSS
A	H	61	8	65	71	0,64	0,46	0,55	0,48	0,10	0,34
E	H, D, A, CZ	88	34	38	45	0,65	0,55	0,97	0,70	0,43	0,27
G	D, H	78	28	48	51	0,63	0,51	0,84	0,62	0,35	0,25
I	A, H	74	25	52	54	0,62	0,49	0,79	0,59	0,32	0,25
K	H, CZ	68	12	58	67	0,66	0,49	0,63	0,54	0,15	0,35
M	D, A, H	86	33	40	46	0,64	0,54	0,94	0,68	0,42	0,26
N	D, H, CZ	84	29	42	50	0,65	0,54	0,90	0,67	0,37	0,29
O	A, H, CZ	80	25	46	54	0,65	0,53	0,83	0,63	0,32	0,30

D.2. Matlab-Code des Digitalisierungsprogrammes

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
this is ambrosia_read.m %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% This function uses information from a given bitmap-file to assign
% emission status values to gridnodes of the COSMO-model given in another
% input file. Results are then stored in a file, whose name is given as an
% argument of the function. The bitmap-file which is used, contains
% information in map view.
% Prior to calling this function, the bitmap file has to be created by
% whatever means, the list of gridnodes in the COSMO model has to be
% created and corner points of the map given in the bitmap-file have to be
% determined.
% In the B-matrix of the bitmap file, numbers indicating the emission
% status are stored, R- and G- matrices are not important. This function
% interpolates the corner longitudes and latitudes to the elements in the
% B-matrix using linear interpolation and assigns the status value to the
% COSMO-gridnodes using nearest-neighbour interpolation.
%
% USE ambrosia_read('bitmap_filename',ro_lon,ro_lat,ll_lon,ll_lat,
'node_list_filename', 'output_filename')
%
% INPUT
%   bitmap_filename: name of the bitmap file
%   ro_lon: longitude of the right upper corner
%   ro_lat: latitude of the right upper corner
%   ll_lon: longitude of the lower left corner
%   ll_lat: longitude of the lower left corner
%   node_list_filename: file with the node list (see example file for formatting)
%   output_filename: filename of the output file
% OUTPUT
%   there is no MATLAB output produced, but the output file is saved to the
%   same directory where ambrosia_read is stored (see example file for format)
% AUTHOR:
%   Marcel Thielmann
% ADDITIONALLY NEEDED FILES:
%   the nearestneighbor code by Richard Brown has to be stored in the same
%   directory
% CHANGES :
%   - 25.01.09: creation of the function
%   - 24.05.09: added comments and cleaned up the code
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function ambrosia_read(bitmap_filename,ro_lon,ro_lat,ll_lon,ll_lat,
node_list_filename, output_filename)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% read in bitmap file
IM = imread(bitmap_filename,'bmp');

% for a RGB- picture, there are three matrices with the R,G,B -values
% respectively
for i = 1:3 % go through every colour matrix
```

```

    IM(:,:,i) = flipud(IM(:,:,i)); % flip each matrix upside down
end

%-----
% interpolate coordinates from corner points to pixels
%-----

% create coordinate matrices
[ny,nx] = size(IM(:,:,1)); % determine the number of elements/pixels in the colour
matrix

dx = 1/(nx-1); % calculate the distance between the pixels if the map has a unit
width and height of 1
dy = 1/(ny-1);

[x,y] = meshgrid(0:dx:1,0:dy:1); % create coordinate grid for pixels with unit width
and height

[x_geo,y_geo] = meshgrid(0:1:1,0:1:1); % create 2,2- grid with values from 0 to 1 for
corner points
lat_val = zeros(size(x_geo)); % create matrix for latitude values of corner points
lon_val = zeros(size(x_geo)); % create matrix for longitude values of corner points

lat_val(1,1) = ll_lat;
lat_val(1,2) = ll_lat;
lat_val(2,1) = ro_lat;
lat_val(2,2) = ro_lat;

lon_val(1,1) = ll_lon;
lon_val(1,2) = ro_lon;
lon_val(2,1) = ll_lon;
lon_val(2,2) = ro_lon;

% interpolate latitude and longitude to pixels
lon = interp2(x_geo,y_geo,lon_val,x,y);
lat = interp2(x_geo,y_geo,lat_val,x,y);

%-----
% take B-values and transfer them to phase values (0-3)
% phase 4 : highest, B-value 240
% phase 3 : 2nd highest, B-value 160
% phase 2 : 2nd lowest , B- value 80
% phase 1 : lowest, B- value 0
%-----

IM_VALUES = double(floor(IM(:,:,3)./80))+1;
% find all white pixels and set them to phase 0
ind_white = find(IM(:,:,1) == 255 & IM(:,:,2) == 255 & IM(:,:,3) == 255);
IM_VALUES(ind_white) = 0;

%-----
% interpolate status values from pixels to COSMO gridnodes
%-----
mat = load(node_list_filename);

```

```
% Numbers of the grid nodes
x_number = mat(:,1);
y_number = mat(:,2);

% coordinates of the grid nodes
coord_lon = mat(:,3);
coord_lat = mat(:,4);

% size of the area around each gridnode where bitmap pixels have to be
% searched
dx = 0.1;
dy = 0.0625;

grid_values = zeros(size(coord_lon)); % Vektor für Statuswerte

for ipoint = 1:length(coord_lon) % ipoint goes from 1 to the number of COSMO grid
nodes
    % create polygon for area around the gridpoint
    poly_x = [coord_lon(ipoint)-dx/2 coord_lon(ipoint)-dx/2 coord_lon(ipoint)+dx/2
coord_lon(ipoint)+dx/2 coord_lon(ipoint)-dx/2];
    poly_y = [coord_lat(ipoint)-dy/2 coord_lat(ipoint)+dy/2 coord_lat(ipoint)+dy/2
coord_lat(ipoint)-dy/2 coord_lat(ipoint)-dy/2];

    ind_in = inpolygon(lon(:),lat(:),poly_x,poly_y); % find all pixels in the area

    id = nearestneighbour( [coord_lon(ipoint); coord_lat(ipoint)], [lon
(ind_in)'; lat(ind_in)']); % find the index of the pixel closest to the grid node
    VAL_TEMP = IM_VALUES(ind_in); % temporary array for values in polygon
    grid_values(ipoint) = VAL_TEMP(id); % assign status value of closest pixel to grid
point
end

% organise results
SAVE_MAT = [x_number, y_number, coord_lon, coord_lat, mat(:,5), mat(:,6),
grid_values];

% save results to output file
fid = fopen(output_filename,'wt');
fprintf(fid,'%3d %-3d %-8g %-8g %-8g %-8g %-1d\n',SAVE_MAT');
fclose(fid);

% EOF
```

Danksagung

Wie immer sind zum Abschluss einer Arbeit einige Leute zu nennen, ohne die das Vorhaben 'Diplom in Meteorologie' nicht durchführbar gewesen wäre.

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn Prof. Dr. Christoph Kottmeier für die Vergabe dieser spannenden Diplomarbeit. Frau Prof. Dr. Sarah Jones danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Herrn Dr. Bernhard Vogel danke ich für den Vorschlag dieses hochaktuellen und zukunftsweisenden Themas. Seine konstruktive Kritik in den Arbeitsgruppenbesprechungen war immer sehr hilfreich. Zahlreiche Diskussionen und Gespräche mit Frau Dr. Heike Vogel sind in die Erstellung dieser Arbeit eingeflossen. Sie war stets für Fragen aller Art offen. Ich bedanke mich dafür.

Meine Zimmergenossen Dr. Tanja Stanelle und Max Bangert haben dafür gesorgt, dass das gemeinsame Büro nicht nur ein Ort der Arbeit war. Die sofortige Hilfe bei akuten Problemen hat vieles erleichtert und beschleunigt. Frau Gabi Klinck hat stets dafür gesorgt, dass Computerprobleme rasch gelöst wurden. Danke dafür. Meiner gesamten Arbeitsgruppe danke ich für viele hilfreiche Tipps und Tricks, sowie die freundliche Aufnahme in die Gruppe.

Diese Arbeit beruht im Wesentlichen auf Funddaten der Ambrosiapflanzen und auf Pollenmessungen. Daten hierzu wurden mir von Herrn Magyar, Herrn Kaminski und Frau Kleinbauer zur Verfügung gestellt. Weiterhin bekam ich die Erlaubnis, in meiner Arbeit Fotos der Ambrosiapflanzen zu verwenden. Diese stammen von der Webseite 'www.ambrosiainfo.de' von Frau Alberternst und Herrn Nawrath. Die Nahaufnahmen der Ambrosiapollen wurden mir von Eye of Science zur Verfügung gestellt.

Das Programm, mit dem die Verbreitungskarten für Ungarn und Deutschland digitalisiert wurden, habe ich in Zusammenarbeit mit Herrn Marcel Thielmann entwickelt. Herzlichen Dank für die wertvolle Hilfe.

Besonderer Dank gebührt Herrn Dr. Norbert Kalthoff für seine Unterstützung während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskraft. Mein Auslandsaufenthalt in Chile wäre ohne ihn nicht möglich gewesen.

Die konstruktive Kritik meiner Korrekturleser Dr. Johannes Grimm, Fabienne Thielmann, Max Bangert und Regina Kohlhepp hat meine Diplomarbeit bereichert und ihre Lesbarkeit erhöht. Auch ihnen gebührt mein Dank.

Weiterhin sind noch ein paar Kommilitonen zu nennen, die zwar nicht direkt zur erfolgreichen Durchführung der Diplomarbeit beigetragen haben, die jedoch das zurückliegende Jahr für mich sehr angenehm gemacht haben. Frau Regina Kohlhepp bereicherte die Mittagspause durch das gemeinsame Kochen, Essen und Diskutieren. Herr Aaron Weis verkürzte die Heimfahrten mit dem Fahrrad durch seine Beglei-

tung.

Meinen Eltern sei an dieser Stelle für die finanzielle Unterstützung während des Studiums gedankt. Dank ihrer stetigen Ermutigung, moralischen Unterstützung und ihrem Glauben an mich konnte ich meinen Weg gehen.

Mein letztes Dankeschön gilt meinem Mann Marcel Thielmann. Es würde den Rahmen dieser Danksagung sprengen, wollte ich alles aufzählen, was er in den letzten Jahren für mich getan und bedeutet hat. Danke, dass Du da bist.

Katrin Zink
Bachstraße 40
76185 Karlsruhe

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen, Internet-Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen –, die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass diese Arbeit in die Bibliothek eingestellt wird. Außerdem ist erlaubt, diese Arbeit zu vervielfältigen.

Karlsruhe, den 30. August 2009

Katrin Zink