

METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER POTENZIELLEN RÄUMLICHEN HERKUNFT VON BIOAEROSOLEN

Thomas Engel, Daniel A. Pickersgill, Axel Kunz, Daniel Kunkel, Sebastian Brill, Hartmut Müller, Viviane R. Després

Zusammenfassung: Die Erforschung von Bioaerosolen stellt noch ein vergleichsweise junges Forschungsfeld dar. Die Zusammenhänge und Auswirkungen werden daher oft unterschätzt bzw. sind noch nicht hinreichend erforscht. Mithilfe von atmosphärischen Modellen wie FLEXPART und HYSPLIT ist es möglich, den Transport von Partikeln in der Atmosphäre zu simulieren. Sie geben Aufschluss darüber, von wo die Luftpakete in den jeweiligen Wochen hauptsächlich stammen. Im Folgenden werden zwei mögliche Methoden vorgestellt, um die Ergebnisse solcher Modelle mit räumlichen Informationen, beispielsweise zur Vegetation, zu kombinieren. Die erste beschriebene Methode zeigt, wie die CORINE-Landbedeckung unter HYSPLIT-Trajektorien analysiert werden kann, um Aussagen über die Verteilung der Landbedeckung zu treffen. In einer zweiten Methode werden FLEXPART-Simulationen in Kombination mit COSMO-Regendaten und Baumkarten genutzt, um Pollen-Herkunfts-Potenzialkarten zu erzeugen.

Schlüsselwörter: Bioaerosole, kinematische Windtrajektorien, atmosphärische Dispersionsmodellierung, GIS, ArcPy

METHODS FOR DETERMINING THE POTENTIAL SPATIAL ORIGIN OF BIOAEROSOLS

Abstract: Research on bioaerosols is still in its infancy. The relationships and effects are therefore often underestimated, or have not yet been sufficiently investigated. Atmospheric models such as FLEXPART and HYSPLIT enable researchers to simulate the transport of particles in the atmosphere. They provide information on where air packages originate in the respective weeks. Following, we present two methods for combining results of these models with spatial information, e. g. about vegetation. The first method shows how spatial CORINE land cover distribution can be analyzed within the boundaries of HYSPLIT trajectories. In a second method, FLEXPART simulations are used in combination with COSMO rain data and tree maps to generate maps that indicate the potential origin of bioaerosols for selected periods of time.

Keywords: Bioaerosol, kinematic wind trajectories, atmospheric dispersion modelling, GIS, ArcPy

Autoren

Thomas Engel, M. A.

Hochschule Mainz – University of Applied Sciences
i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik
Lucy-Hillebrand-Straße 2
D-55128 Mainz
E: thomas.engel@hs-mainz.de

Dipl.-Biol. Daniel A. Pickersgill

Max-Planck-Institut für Chemie
Multiphase Chemistry
Hahn/Meitner-Weg 1
D-55128 Mainz
E: d.pickersgill@mpic.de

M. Sc. Axel Kunz

Hochschule Mainz – University of Applied Sciences
i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik
Lucy-Hillebrand-Straße 2
D-55128 Mainz
E: axel.kunz@hs-mainz.de

Dr. Daniel Kunkel

Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Institut für Physik der Atmosphäre (IPA)
Becherweg 21
D-55128 Mainz
E: dkunkel@uni-mainz.de

Sebastian Brill

Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Institut für Allgemeine Botanik
Johannes-von-Müller-Weg 6
D-55128 Mainz
E: sbrill@students.uni-mainz.de

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Müller

Hochschule Mainz – University of Applied Sciences
i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik
Lucy-Hillebrand-Straße 2
D-55128 Mainz
E: hartmut.mueller@hs-mainz.de

Dr. Viviane R. Després

Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Institut für Allgemeine Botanik

Johannes-von-Müller-Weg 6

D-55128 Mainz

E: despres@uni-mainz.de

1 MOTIVATION UND ZIELE

Als Bioaerosole, oder genauer PBAP (Primary Biological Aerosol Particles), werden alle Partikel bezeichnet, die in die Atmosphäre freigesetzt werden, einen biologischen Ursprung haben und kleiner als 100 µm sind. Dazu gehören unter anderem Viren, Bakterien, Pollen und Pilzsporen, aber auch kleine Bruchstücke und Zellfragmente sowie Exkrementen von Organismen (Pöschl 2005). Der Durchmesser von PBAP reicht von wenigen Nanometern, wie beispielsweise bei Zellfragmenten, Proteinen und Viren bis hin zu mehreren Mikrometern, was häufig von Pflanzenpollen erreicht wird (Després et al. 2012).

Werden PBAP in die Atmosphäre emittiert, unterliegen sie vielen physikalischen Einflussfaktoren, was einen erheblichen Einfluss auf ihre Verweildauer in der Atmosphäre hat. Sie können in der Atmosphäre mitunter große Strecken zurücklegen. Dabei spielen viele meteorologische Faktoren wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Konvektion, Temperatur oder relative Luftfeuchtigkeit eine Rolle. Zudem hängt die Verweildauer stark von dem aerodynamischen Durchmesser der Partikel ab (Jones & Harrison 2004). Bei der Entfernung aus der Atmosphäre unterscheidet man Trocken- und Feuchtdeposition. Bei der Trockendeposition sedimentieren die PBAP, während sie bei der Feuchtdeposition durch Niederschläge ausgewaschen werden. Einen direkten Einfluss auf den Menschen haben PBAP, wenn sie als Allergene oder Krankheitserreger fungieren (Kellogg et al. 2006, Morris et al. 2011). Dadurch, dass ein immer größerer Anteil der Bevölkerung unter Allergien leidet, steigt die Bedeutung einer möglichst exakten Pollenvorhersage (Asher et al. 2006, Ait-Khaled et al. 2008). Diese wird derzeit unter anderem durch den Deutschen Wetterdienst DWD ([<http://www.dwd.de/DE/leistungen/verkehrswarnungen/pollen/verkehrswarnungenpollen.html>\) generiert, welcher bei einer bestimmten Pollenkonzentration in der Luft – für sehr große Gebiete – Warnungen ausgibt. Die Pollenkonzentration wird hierbei von der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst \(<http://www.pollenstiftung.de>\) durch mikroskopische Untersuchungen ermittelt. Diese Daten werden dann vom DWD mithilfe von Wettermodellen zu Vorwarnkarten für Pollen verarbeitet. Durch den langen Bearbeitungsweg und die geringe Zahl an Pollensammelstationen kommt es zu großen Ungenauigkeiten. Eine genauere Kenntnis der Emissions- und Transportprozesse könnte also zu einer erheblichen Verbesserung der Vorhersage führen.](http://www.dwd.de/DE/leistungen/</p>
</div>
<div data-bbox=)

Für lange Zeit spielten Bioaerosole in der Forschung eine eher untergeordnete Rolle. Im letzten Jahrzehnt erlaubten rasante Entwicklungen in Messmethoden, beispielsweise in der DNA-Analyse aber auch mittels fluoreszenzspektroskopischer Messungen, neue Einblicke in die hochkomplexen und dynamischen Systeme (Després et al. 2012, Fröhlich-Nowoisky et al. 2016). Zum einen ist der atmosphärische Transport ein hochkomplexes Themenfeld, zum anderen ist aber auch die Emission räumlich, je nach Biotop, wie auch zeitlich, je nach Jahreszeit, hoch variabel. Beispielsweise sieht man in Abbildung 1 den Anteil an *Alnus sp.* (Erle) DNA-Sequenzen an der Gesamtanzahl der isolierten Pflanzensequenzen, die im Frühjahr 2006 auf wochenweise analysierten Luftprobenfiltern gefunden wurden. Wie erkennbar, fällt der Anteil von Probe B zu C von ca. 70% auf 0% und steigt von Probe D zu E von 0% auf ca. 30%. Diese Ergebnisse werfen die Frage auf, ob man solch hohe Varianzen über so kurze Zeiträume anhand der Luftbewegung erklären kann.

Im Projekt BANG (BioAerosol Network and Geoinformatics) soll erstmals und umfassend das komplexe Zusammenspiel zwischen Bioaerosolen und vielfältigen geographischen, meteorologischen und biologischen Faktoren erforscht werden.

Das BANG-Projekt ist ein fachübergreifender Zusammenschluss der Biologie, Atmosphärenphysik und Geoinformatik in Mainz, der das Ziel hat, eine Verbindung zwischen zeitlich aufgelösten PBAP-DNA-Daten und potenziellen Emissionsorten zu schaffen.

Im Folgenden werden Methoden beschrieben, mit denen man von einem fest definierten Probenahmeort aus, über zeitlich rückwärts gerichtete Lagrange'sche Transportmodelle, Rückschlüsse über potenzielle Herkunftsgebiete von PBAP gewinnen kann. In Verbindung mit zweidimensionalen Rasterdaten, welche Informationen zur potenziellen Emission von PBAP enthalten, können durch Modellierung der dazwischen stattfindenden Prozesse Korrelationen zu den real beobachteten PBAP-Daten gesucht werden.

2 DATEN

2.1 PBAP-DATEN

Die Aerosole wurden über ein Jahr auf Glasfaserfilter gesammelt. Die Sammelstation befand sich auf einer Höhe von ca. 20 Meter über dem Boden auf dem Dach des alten Max-Planck-Instituts für Chemie auf dem Campus der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (49° 59' 31.36" N, 8° 14' 15.22" E). Mit einem Hochdurchsatz-Probensammler wurde ein Luftvolumen von 0,3 m³min⁻¹ gefiltert. Die Laufzeit betrug zwischen einem Tag und sieben Tagen, was einem Luftvolumen von etwa 430 m³ bis 3000 m³ entspricht. Um statistisch vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurden

für die vorliegende Arbeit ausschließlich Tagelaufzeiten verwendet. Die DNA wurde von den Luftproben extrahiert, die pflanzliche DNA isoliert und taxonomisch identifiziert. Die bislang nicht veröffentlichten Daten wurden freundlicherweise von Isabell Müller-Germann zur Verfügung gestellt. Da die pflanzlichen Bioaerosole während Pollenflugzeiten zu einem großen Prozentsatz durch Pollen gebildet werden, wird im Folgenden vereinfacht von Pollen gesprochen, auch wenn eventuell andere Pflanzenpartikel gemessen wurden. Eine genaue Beschreibung der Methodik ist in Fröhlich-Nowoisky et al. (2009) zu finden, mit der Abänderung, dass pflanzenspezifische Primer verwendet wurden.

2.2 HYSPLIT

HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) (Draxler & Rolph 2003) wird seit etwa 30 Jahren von der Community der Atmosphärenwissenschaften verwendet, um atmosphärischen Transport, Dispersion, chemische Transformation und Deposition zu berechnen. Eine Hauptaufgabe des Systems ist die Berechnung von Rückwärts-Trajektorien zur Bestimmung der Herkunft von Luftmassen. So wird es möglich, Ursache-Wirkungs-Beziehungen herzustellen. Vorwärts-Trajektorien werden hingegen verwendet, um beispielsweise die Ausbreitung vulkanischer Asche oder radioaktiver Teilchen vorherzusagen. HYSPLIT verwendet dabei einen hybriden Berechnungsansatz und setzt sowohl Lagrange'sche, als auch Eulerianische Methodik ein (Stein et al. 2015). Durch die Verwendung des READY-Systems (<http://ready.arl.noaa.gov/index.php>) lassen sich HYSPLIT-Berechnungen auch online durchführen. Meteorologische Grundlage ist dabei das von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) bereitgestellte, weltweit verfügbare „Global Data Assimilation System“ (GDAS) mit einer Auflösung von 1° und einer vertikalen Aufteilung in 23 Schichten bis in eine Höhe von 26,5 km. Als Ergebnis einer Berechnung von rückwärts gerichteten Trajektorien erhält man pro Startzeitpunkt der Berechnung je ein Line Feature, welches die vierdimensionale Information (Ort und Zeit) über ein Luftpaket enthält, dass zu einem gewissen Zeitpunkt t_0 vermessen wird. Als Ausgabeformat kann unter anderem .kmz oder .shp gewählt werden,

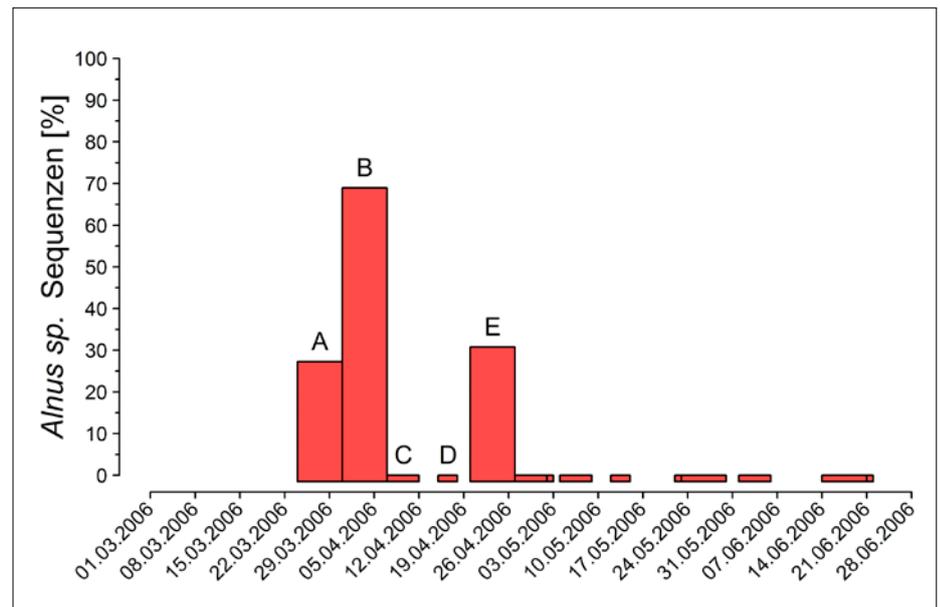


Abbildung 1: Anteil von *Alnus sp.* (Erle) DNA-Sequenzen an der Gesamtanzahl der isolierten Pflanzensequenzen die von Luftproben isoliert werden konnten, die zwischen März und Juni 2006 in Mainz, Deutschland (49° 59' 31.36" N 8° 14' 15.22" E) gesammelt wurden. Neben dem prozentualen Anteil an *Alnus sp.* Sequenzen (y-Achse / Säulenhöhe) wird die Dauer der einzelnen Luftproben anhand der Säulenbreite (x-Achse) visualisiert. Die markierten Luftproben A – E umfassen den Zeitraum der frühesten bis spätesten Identifizierung *Alnus sp.* DNA-Sequenzen in 2006. Die zugrunde liegenden Daten wurden freundlicherweise von Isabell Müller-Germann zur Verfügung gestellt.

was eine problemlose Weiterbearbeitung in Geoinformationssystemen ermöglicht.

2.3 FLEXPART

FLEXPART (FLEXible PARTicle dispersion model) (Stohl et al. 2005) ist ein Lagrange'sches Partikeldispersionsmodell zur Berechnung der Ausbreitung von Luftmassen über weite Entfernungen. Die Ausgabe der Ergebnisse kann unter anderem in der Meteorologie häufig verwendeten multidimensionalen Network Common Data Form (NetCDF)-Format erfolgen (Rew et al. 2016). Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte auf fünf Luftschichten, aufgeteilt zwischen dem Boden und 10 km Höhe, womit die gesamte Troposphäre gut abgebildet wird. Ein Partikeltyp besaß eine atmosphärische Halbwertszeit von 12 h, da dies in etwa die gemittelte atmosphärische Verweildauer von PBAP in der Größenordnung von Pollen entspricht, unter Berücksichtigung von Trocken- und Feuchtdeposition. Bei dem zweiten Partikeltyp wurde, zu Vergleichszwecken, keine Halbwertszeit eingestellt und sie stellt damit einen sogenannten Lufttracer dar. Es wurden Simulationen in täglicher Auflösung für 10 Wochen mit einer räumlichen Auflösung von 0,1° × 0,1° durchgeführt.

Als Grundlage der FLEXPART-Modellberechnung werden vierdimensionale meteorologische Rasterdatensätze benötigt, die zudem die untere Auflösungsgrenze der Ergebnisse definieren. Hierzu wurden vom DWD Analysedaten des COSMO-EU-Modells (Consortium for Small-scale Modeling 2011) verwendet (<http://www.dwd.de>). Die horizontale Auflösung der Daten beträgt 0,0625° (~7 km). Vertikal werden die Rasterzellen bis in eine Höhe von 22,5 km in 40 Schichten unterteilt. Das Gitter ist ferner rotiert, wobei der Nordpol bei 40° Breite und -170° Länge liegt.

Zusätzlich wurden Regenfelder (siehe Kapitel 3.2) aus dem COSMO-EU-Modell extrahiert. Sie enthalten Informationen über Ort, Menge und Art des Regens (konvektiv oder skalig). Dabei handelt es sich um die zu Tagessummen akkumulierten, stündlichen, totalen Regenmengen in mm.

2.4 TREE SPECIES MAPS FOR EUROPEAN FORESTS

Als Datenbasis der potenziellen Pollenemissions-Orte, wurden die vom European Forest Institute veröffentlichten „Tree species maps for European forests“ verwendet (Brus et al. 2011). Diese sind mittels statistischer Verfahren wie logistischer Regression und

Kriging generiert worden und unterscheiden sich je nach Region und nationaler Waldinventuren-Methodik. Die sich daraus ergebenden Datensätze stellen insgesamt die bis dato einzige flächige europaweite Kartierung für Baumarten dar. Jede aufgenommene Baumart wird in Form eines GeoTIFF-Rasterlayers bereitgestellt und verfügt über eine Auflösung von 1 × 1 km pro Rasterzelle. Der numerische Wert einer jeden Rasterzelle ist der Bedeckungsgrad mit der jeweiligen Spezies in Prozent.

Die Baum-Spezies- bzw. Tree-Species-Karten liegen im räumlichen Bezugssystem ETRS89/ETRS-LAEA (EPSG:3035) vor. Für die hier diskutierte Prozessierung wurden sie in das geodätische Referenzsystem WGS84 transformiert.

2.6 CORINE LAND COVER

Eine weitere Datenbasis stellt die vom Projekt „CORINE Land Cover“ der „European Environment Agency“ veröffentlichte Landnutzungskarte dar (CORINE Land Cover 2006). Die verwendete Karte zeigt die Art der Landnutzung für die beteiligten 39 EU Staaten in 100 × 100 m Rasterzellen. Hierbei wird zwischen 44 verschiedenen Landnutzungsklassen unterschieden. Die Karte liegt ebenfalls im räumlichen Bezugssystem ETRS89/ETRS-LAEA (EPSG:3035) vor und wurde für die Prozessierung ebenfalls in WGS84 transformiert.

3 ZUR ENTWICKLUNG EINER METHODIK

3.1 LANDNUTZUNGSANALYSEN AUF BASIS VON TRAJEKTORIEN (HYSPLIT)

Trajektorien geben Auskunft über Höhe, Richtung und Aufenthaltsdauer eines Luftpakets. Durch die verwendeten Rückwärtstrajektorien kann abgelesen werden, welche Bodenoberflächen überflogen wurden, bevor ein Luftpaket den Messpunkt in Mainz erreicht hat. Dies hat maßgeblichen Einfluss auf die Zusammensetzung der gesammelten Bioaerosole.

Die mithilfe von HYSPLIT berechneten Rückwärtstrajektorien mit einer zeitlichen Auflösung von 2-4 h liegen zunächst als Line Features vor und bieten somit keine flächenhafte Information, die als Berechnungsgrundlage dienen könnte. Als Behelfslösung wurden die Features zunächst mit 0,1 ° gepuffert. Diese unter Berücksichtigung der

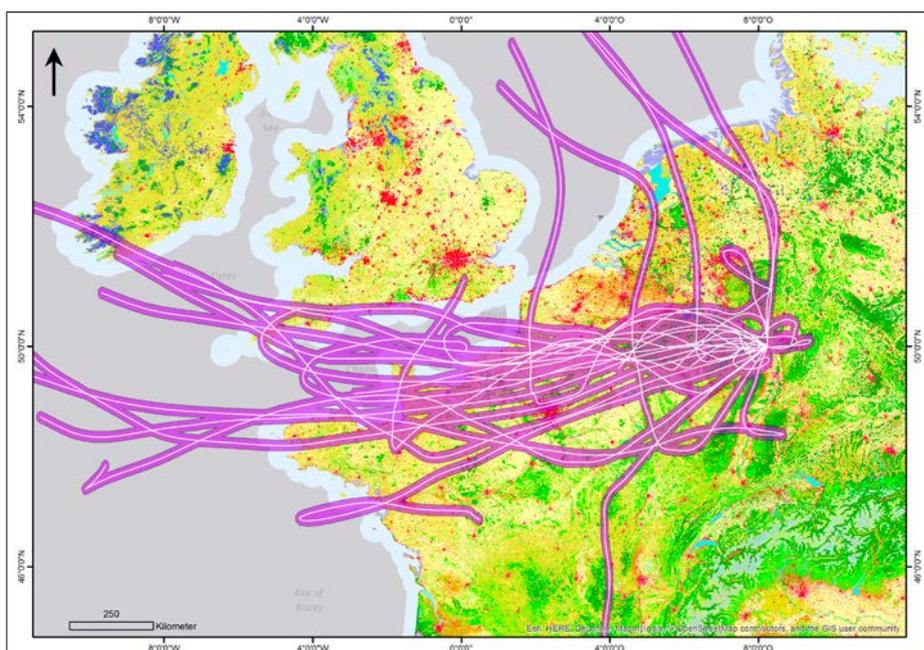


Abbildung 2: HYSPLIT-Trajektorien (Linien) und deren Puffer über CORINE-Landbedeckung

niedrigen Auflösung des zugrunde liegenden GDAS-Modells dimensionierten Puffer wurden in einem zweiten Schritt als Basis genommen, um die jeweils darunter liegenden Flächenanteile der CORINE-Landnutzungsklassen zu berechnen, wie in Abbildung 2 ersichtlich. Die gewonnenen „Ausschnitte“ des Gesamtdatensatzes konnten daraufhin statistisch den real gemessenen Pollendaten gegenübergestellt werden.

3.2 POLLEN-HERKUNFTS-POTENZIALKARTEN

FLEXPART-Simulationen geben wie auch HYSPLIT Aufschluss über die Verweildauer von Luftpaketen, die an einem Messpunkt angekommen sind. Diese Verweildauer wird im Unterschied zu den HYSPLIT-Trajektorien nicht nur linienhaft (für einzelne Zeitpunkte) berechnet, sondern für einen ganzen Zeitraum als Raster. Man erhält also zusätzlich zu Ort und Zeit die flächige Information, wie lange sich die Luftpakete in einem Gebiet aufgehalten haben. Somit ist es möglich, zeitlich und räumlich verschieden durchquerte Gebiete unterschiedlich zu gewichten.

Wie in Kapitel 2 dargestellt, sind tägliche FLEXPART-Simulationsergebnisse im meteorologisch häufig genutzten multidimensionalen NetCDF-Format für die Untersuchungszeiträume verfügbar. Die Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf den Transport von Luftpaketen hin zur Messstelle ist aufgrund der hohen Anzahl an möglichen zwei-

dimensionalen Rasterdarstellungen sehr zeitaufwendig. Es ist deshalb sinnvoll, die Prozessierungsschritte zu automatisieren. Diese umfassen den Export der Informationen aus den NetCDF-Dateien in ein Rasterformat zur weiteren Verarbeitung in einem GIS, die anschließende Prozessierung dieser Raster inklusive der Extraktion von Regentagen sowie die Kombination dieser Informationen mit Baumbedeckungsgraden (siehe Kapitel 2). Ziel ist die Erstellung von Karten, die durch die Kombination von Verweildauer von Luftpaketen über Baumbeständen die Aussagen über das Herkunftspotenzial von Bioaerosolen ermöglichen.

Das Extrahieren der FLEXPART-Ergebnisse (Abbildung 3) erfolgt mithilfe von ArcPy, einer Python-Bibliothek, die Werkzeuge zur Analyse und Konvertierung von geographischen Daten bereitstellt (Environmental Systems Research Institute 2016). Unter Verwendung von Werkzeugen aus der Multidimension-Toolbox in Esri ArcGIS 10.3.1 werden für alle benötigten Kombinationen aus Zeitraum, Höhe der Luftpakete und Tracer die entsprechenden räumlichen Informationen extrahiert und als Rasterdatei im GeoTIFF-Format gespeichert. Die Auswahl der benötigten Dimensionen ist bei komplexen NetCDF-Dateien oft schwierig. Deshalb wurde im Rahmen einer Masterarbeit ein ArcGIS-Werkzeug entwickelt, das die Auswahl der Dimensionen aus NetCDF-Dateien und den anschließenden Export deutlich vereinfacht (Paukstadt 2015). Die generier-

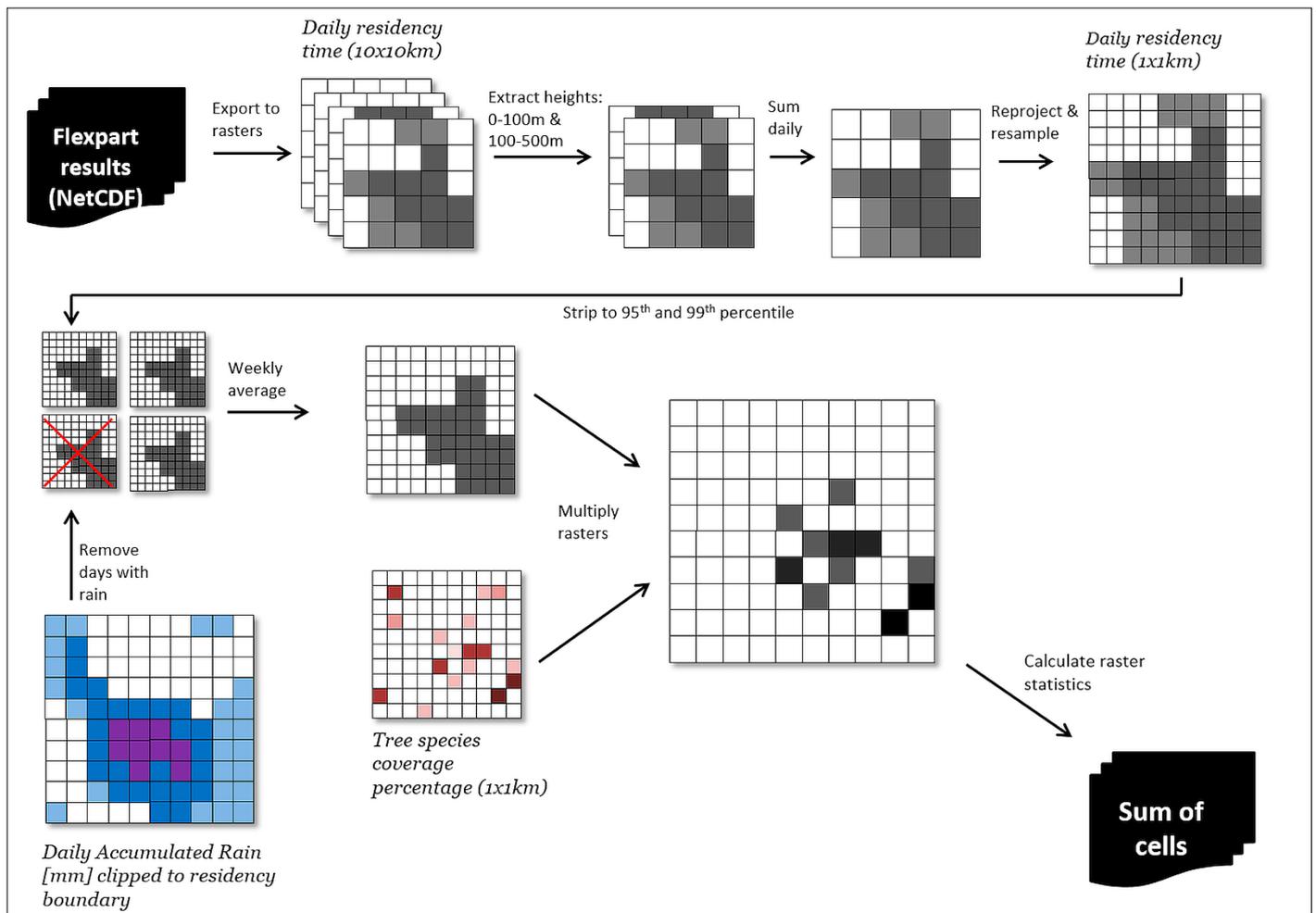


Abbildung 3: Schematische Darstellung der wichtigsten Prozessierungsschritte

ten Rasterlayer enthalten die tägliche Verweildauer der Luftpakete in einer Auflösung von 10×10 km.

Nachdem einzelne Layer für jeden Zeitschritt generiert wurden, müssen diese nun weiterverarbeitet werden. Für die nachfolgenden Schritte werden nur die beiden unteren Luftschichten betrachtet. Man geht davon aus, dass die Luft und die enthaltenen Partikel innerhalb der sogenannten atmosphärischen Grenzschicht (Boundary Layer) relativ homogen durchmischt werden (Stull 1988). Die Grenzschicht baut sich tagsüber bei Sonneneinstrahlung auf und ist je nach Bedingungen in der Höhe variabel, sollte sich aber im Normalfall oberhalb von 500 m befinden. Daher werden die beiden unteren Luftschichten von 0 bis 500 m extrahiert, aufsummiert und im Folgenden als gemeinsame Schicht betrachtet.

Da die Baumbedeckungsdaten in einer anderen Projektion und einer höheren Auflösung (1×1 km) vorliegen, werden die Raster der Aufenthaltszeit entsprechend umprojiziert und resampled. Das Umprojizieren

bewirkt, dass Pixel direkt übereinanderliegen und es somit nicht zu Fehlern bei der Multiplikation kommen kann. Das Resampling führt zwar nicht zu einer tatsächlichen Verbesserung der Auflösung, jedoch sind die letztendlich erzeugten Daten multiplizierbar.

Die zeitliche Auflösung der Auswertungen der Pollenproben-Sampler beträgt meist 7 Tage, daher müssen auch die täglichen Aufenthaltszeiten gemittelt werden. Zuvor ist es jedoch sinnvoll, Regentage zu identifizieren und diese vom Mittel auszuschließen, da Tage mit Regenereignissen durch Feuchtd deposition Einfluss auf die Verbreitung von Pollen in der Luft haben (Seinfeld & Pandis 2006).

Hierzu werden stündliche Regenfelder im Rasterformat aus dem COSMO-Modell genutzt (siehe Kapitel 2). Diese liegen im nativen Modellgitter von COSMO vor und müssen zunächst räumlich rotiert werden. Anschließend werden die Regenraster auf die Ausdehnung der FLEXPART-Ergebnisse zum jeweiligen Zeitraum zugeschnitten, um

Regen in unbeteiligten Gebieten nicht zu berücksichtigen. Anschließend werden von den übrigen Regenzellen Tagessummen gebildet. Überschreitet der Wert einer Tagessumme 2 mm Niederschlag pro Tag – ein als konservative Abschätzung zu betrachtender, frei gewählter Wert –, wird die Luftverweildauer für diesen Tag entfernt, also nicht im wöchentlichen Mittel berücksichtigt.

In Abbildung 4 ist die Differenz der Emissionssensitivität zweier Wochen dargestellt (positiv – negativ). Die Emissionssensitivität kann auch als Aufenthaltszeit in Sekunden oder Stunden angegeben werden. Aus der Differenz kann man nun erkennen, dass in der einen Woche Luft eher aus westlicher Richtung nach Mainz strömte (positive Werte; rot). In der anderen Woche kamen die Luftmassen eher aus nördlicher bis östlicher Richtung (negative Werte; blau). Je nach Ausbreitung von Landbedeckungsklassen und Baumbestand erhofft man daraus erschließen zu können, wie sich die Pollenkonzentration in Mainz zusammensetzt.

Zunächst wurden, analog zur Trajektorien-Methode, Landbedeckungsstatistiken unter den Luftpaketflächen abgeleitet. Aufgrund der großen räumlichen Ausdehnung, die durch später erzeugte wöchentliche Mittel entstehen, waren die erzeugten Statistiken jedoch wenig aussagekräftig und ermöglichten es nicht, die wahrscheinlichsten Pollen-Herkunftsflächen zu lokalisieren. Deshalb wurde anschließend versucht, die Fläche durch Extrahieren der 99. und 95. Perzentile zu verkleinern, um aussagekräftige Statistiken zu generieren. Trotzdem blieb das Problem, dass alle übrigen überflogenen Flächen gleichberechtigt behandelt werden.

In einem neuen Ansatz wird nun die wöchentliche Verweildauer der Luftpakete mit den prozentualen Bedeckungsgraden einzelner Baumarten wie *Alnus sp.* oder *Betula sp.* multipliziert. Flächen mit zeitlich hoher Verweildauer und hohen Bedeckungsgraden ergeben dabei die höchsten Werte. Flächen mit niedriger Verweildauer und niedrigem Bedeckungsgrad sind durch niedrige Werte gekennzeichnet. Somit werden nicht nur Bereiche ignoriert, die nur kurz überflogen wurden und somit nicht maßgeblich an der Luftzusammensetzung am Messpunkt beteiligt sind, sondern es werden auch Bereiche ignoriert, die zwar lange überflogen wurden, in denen die jeweilige Baumart aber nicht vorkommt. Die dadurch entstandenen Potenzialkarten zeigen also Baumbestände, die innerhalb einer bestimmten Woche potenziell Quellen für Pollen sein könnten (Abbildung 5).

Die entstandenen wöchentlichen Potenzialkarten können nun visuell interpretiert werden. Aufgrund der hohen Anzahl an möglichen Potenzialrastern wäre es jedoch sinnvoll, einen numerischen Wert zur automatisierten Auswertung anzusetzen. Eine Möglichkeit bietet die Aufsummierung aller Rasterzellenwerte. Demnach sollten sich für Wochen mit hohem Pollenaufkommen höhere Summen ergeben.

4 DISKUSSION UND AUSBLICK

Die im Rahmen des BANG-Projekts entwickelten Methoden bieten der Bioaerosolforschung neue Möglichkeiten zur Analyse von Langstreckentransportprozessen. Hierbei war die Herausforderung, eine quantifizierbare Verbindung zwischen den nur punktuell vorhandenen, aber zeitlich aufgelösten PBAP-Daten und den räumlich auf-

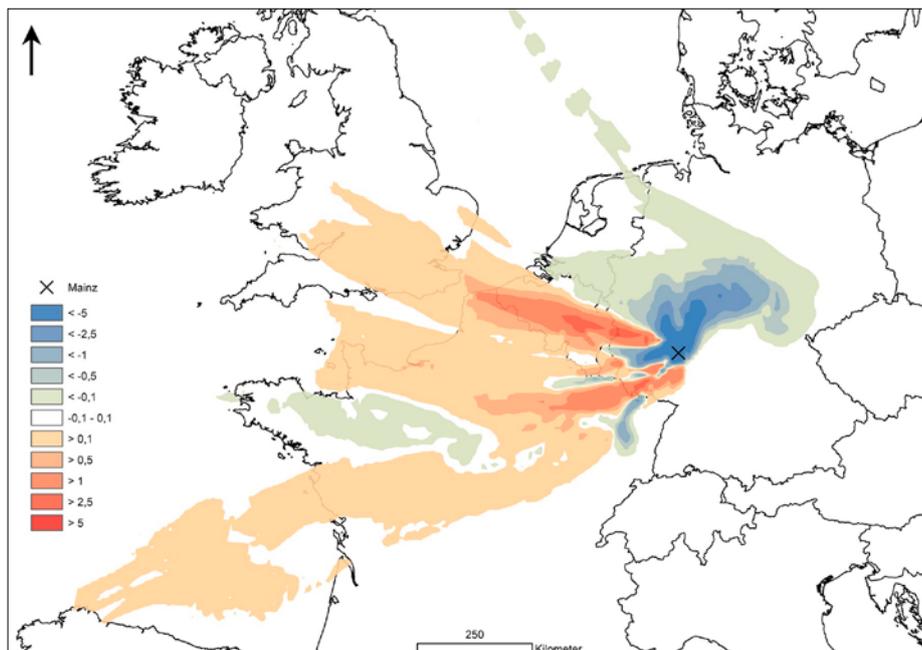


Abbildung 4: Vergleich zwischen zwei Wochen. Dargestellt ist die Differenz der Aufenthaltsdauer der Luft in h pro Woche. Die erste Woche ist in Rot koloriert, die zweite in Blau.

gelösten, aber zeitlich konstanten GIS-Rasterkarten zu schaffen. Hierbei haben sowohl die zeitlich als auch die räumlich aufgelösten Dispersionsmodelle als Verbindungselemente fungiert, die sich unter anderem in der Wettervorhersage vielfach bewährt haben. Durch Betrachtung der bodennahen Luftbewegung wird es möglich, die potenziellen Emissionsgebiete stark einzugrenzen. Aus den Rasterkarten lassen sich so flexibel und zeitlich aufgelöst für jeden Probenahmezeitraum Berechnungen durchführen.

Die von FLEXPART generierte Verweildauer von Luftpaketen wird im Unterschied zu HYSPLIT-Trajektorien nicht zu einzelnen Zeitpunkten, sondern für ganze Zeiträume angegeben – anstatt Line Features werden Raster generiert. So wird es möglich, Bereiche, die nur kurz überflogen wurden, schwächer zu gewichten. Zudem werden bei FLEXPART die Luftströmungen in den unteren Atmosphärenschichten realistischer berücksichtigt. Ein weiterer Vorteil gegenüber HYSPLIT ist die höhere räumliche und zeitliche Auflösung des antreibenden Datensatzes (GDAS vs. COSMO-EU).

Durch die Multiplikation mit dem Grad der Baumbedeckung können, je nach Vorkommen der betrachteten Baumart, Bereiche von potenziellen Emissionsorten hervorgehoben oder vernachlässigt werden. Die resultierenden Flächen der Potenzialkarten zeigen konsequenterweise nur Baumbestän-

de, die innerhalb einer bestimmten Woche potenziell Quellen für Pollen sein könnten. Einen weiteren Vorteil bietet die Berücksichtigung von Regen, da man bei konvektiven und andauernden skaligen Schauern davon ausgehen kann, dass die Aerosole am Ort des Geschehens effizient entfernt werden.

Das in diesem Fall stark vereinfachte Herausfiltern von Regenfeldern ist jedoch noch mit Unsicherheiten behaftet. Überschreitet die totale Regenmenge an einem Tag den gesetzten Schwellwert, wird die Verweildauer aller Luftpakete für diesen Tag nicht im wöchentlichen Mittel berücksichtigt. Zum einen ist der Schwellwert festgesetzt und zum anderen wird die temporale Verteilung der Niederschläge vernachlässigt, ebenso wie die Art des Niederschlags. Ein zeitlich kurzer starker konvektiver Niederschlag mit einer Gesamtmenge von über 2 mm ist gleich einem skaligen Niederschlag, der sich über mehrere Stunden verteilt. Zudem wird auch die räumliche Verteilung des Niederschlags nur wenig beachtet. Zwar werden nur Regenfelder berücksichtigt, in denen Luftpakete verweilt haben, jedoch wird innerhalb der bedeckten Fläche nicht gewichtet. Bei der üblichen hohen räumlichen Ausdehnung der Verweildauer werden somit Niederschläge in unterschiedlich großen Entfernungen zum Messpunkt gleich gewichtet. Ebenso werden bei lokal sehr begrenzten Niederschlagsereignissen trotzdem alle Verweildauern für diesen Tag entfernt.

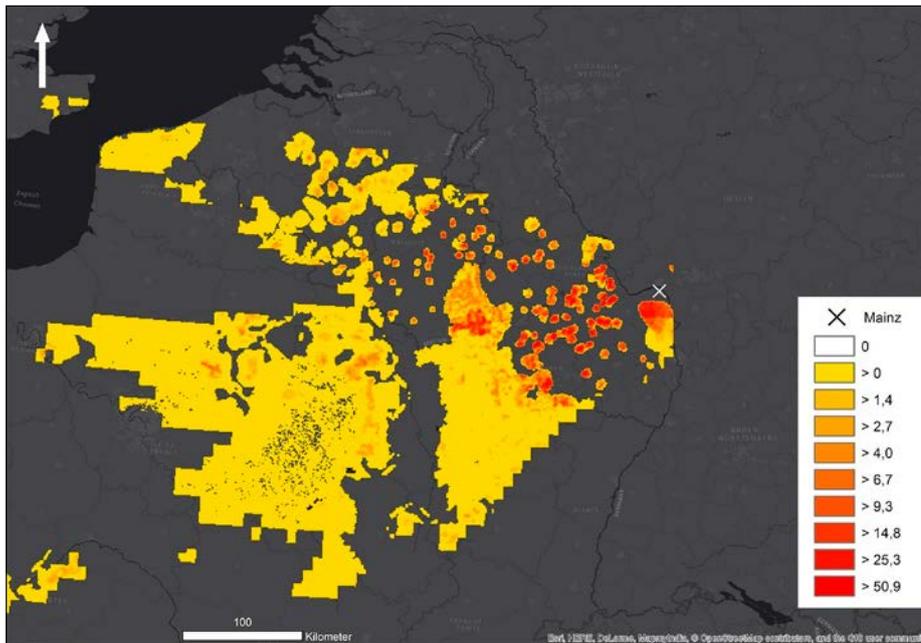


Abbildung 5: Potenzialkarte. Rot: hohes Potenzial, gelb: niedriges Potenzial, transparent: kein Potenzial, da kein Baumbestand oder nicht überflogen. Die dimensionslosen Werte ergeben sich aus Multiplikation aus Baumbedeckungsgrad in% und durchschnittlicher Aufenthaltsdauer der Luft in h/Woche.

Allgemein liegt die Problematik der angewandten Methode bislang darin, dass es in mehreren Bereichen noch nicht möglich ist, reale Bedingungen ausreichend genau zu beschreiben bzw. zu simulieren. Im Rahmen dieses Beitrags werden daher bewusst noch keine abschließenden Ergebnisse besprochen, da eine Validierung maßgeblich von diesen Unsicherheiten abhängt.

Eine deutliche Verbesserung der Methodik würde sich durch die Berücksichtigung von Regenfeldern auf Trajektorienebene ergeben. Dafür müsste man für jedes Luftpaket

zu jedem Zeitpunkt untersuchen, ob es sich in einem Regenfeld befindet. Falls sich ein Luftpaket durch ein Regenfeld bewegt hat, würde die Trajektorie dieses Luftpaketes entfernt und somit nicht bei der Berechnung der Gesamtaufenthaltszeit berücksichtigt werden.

Weiterhin sind zumindest Zweifel angebracht, ob die verwendeten „Tree species maps“ auf einer für den Anwendungszweck ausreichenden Datenbasis beruhen. Diese scheinen nach ersten Untersuchungen abhängig von der nationalen Herkunft eine schwankende Qualität aufzuweisen.

Die atmosphärischen Konvektions- und Transportprozesse sind hochkomplexe Vorgänge, über deren Ablauf man in den vergangenen Jahren viele neue Erkenntnisse gewonnen hat. Dadurch können auch hochkomplexe Zusammenhänge, wie der Transport von PBAP in der Atmosphäre mit deren physikalischen und biologischen Auswirkungen sowie den Interaktionen mit bestimmten Bereichen des Ökosystems, untersucht und bewertet werden. Durch stetig besser werdende Bioaerosol-Daten sowie detailliertere Modellberechnungen, bessere Rechenleistung und genauere geographische Datensätze könnten die Transportprozesse von PBAP in der Atmosphäre genauer analysiert werden, was zu einer Präzisierung der Vorhersage führen könnte. Diese neuen Möglichkeiten und Erkenntnisse könnten dann dazu genutzt werden, bessere und lokalere Vorhersagen über die Pollenbelastung zu machen. Dadurch wäre es möglich, die Auswirkungen von PBAP auf den Menschen, das Ökosystem und das Klima besser abzuschätzen und entsprechende Warnungen frühzeitig auszugeben, um negative Folgen möglichst gering zu halten.

Danksagung

Die Autoren möchten an dieser Stelle ausdrücklich Prof. Dr. Ulrich Pöschl (MPI-C, Mainz), Prof. Dr. Peter Hoor (Institut für Physik der Atmosphäre, JGU Mainz), Dr. Janine Fröhlich Nowoisky (MPI-C, Mainz) und dem gesamten Mainz BioAerosol Laboratory (MBAL) für die vielfältige Unterstützung des Projekts danken.

IMPRESSUM // PUBLICATION INFORMATION

gis.Science – Die Zeitschrift für Geoinformatik ISSN 1869-9391 // Redaktion: Gerold Olbrich, olbrich@vde-verlag.de, Tel.: +49(0)69-840006-1121 // Hauptschriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill, ralf.bill@uni-rostock.de, Tel +49(0)381-498-3200 // Editorial Board: Prof. Dr. Lars Bernard, TU Dresden; Dr. Andreas Donaubauer, TU München; Prof. Dr. Max Egenhofer, University of Maine Orono; Prof. Dr. Manfred Ehlers, Universität Osnabrück; Prof. Dr. Klaus Greve, Universität Bonn; Dr. Stefan Lang, Universität Salzburg; Prof. Dr. Stephan Nebiker, Fachhochschule Nordwestschweiz, Prof. Dr. Josef Strobl, Universität Salzburg // Anzeigen: Katja Hanel, VDE VERLAG GMBH, Telefon +49(0)69/840006-1341, hanel@vde-verlag.de // Anschrift für Zeitschriftenabonnements: Vertriebsunion Meynen GmbH & Co. KG, Cem Küney, Große Hub 10, 63344 Eltville am Rhein, Tel. +49(0)61 23/92 38-234, Fax +49(0)61 23/92 38-244, vde-leserservice@vuservice.de // gis.Science erscheint im: Wichmann Verlag im VDE VERLAG GMBH, Bismarckstraße 33, 10625 Berlin, Tel. +49(0)30/34 80 01-0, Fax +49(0)30/34 80 01-9088, www.wichmann-verlag.de // Geschäftsführung: Dr.-Ing. Stefan Schlegel, Margret Schneider // Verlagsleiter Zeitschriften: Ronald Heinze // Druck: Bosch-Druck GmbH, Ergolding // Erscheinungsweise: 10 x jährlich, davon 4 Ausgaben gis.Science, 6 Ausgaben gis.Business // Jahresabonnement (10 Hefte): Inland 157,25 EUR inkl. Versandkosten, europäisches Ausland 166 EUR, sonstiges Ausland 178 EUR inkl. Versandkosten, Studenten/Auszubildende 89,00 EUR inkl. Versandkosten, Mitglieder des Deutschen Dachverbandes für Geoinformation e.V. (DDGI) erhalten das Abo im Rahmen ihrer Mitgliedschaft // Bezugszeitraum: Ein Abonnement gilt für mindestens ein Jahr und verlängert sich jeweils um weitere 12 Monate, wenn es nicht bis spätestens 6 Wochen vor Ablauf des Bezugszeitraums gekündigt wurde. Bei Nichterscheinen aus technischen Gründen oder höherer Gewalt entsteht kein Anspruch auf Ersatz. // Alle in gis.Science erscheinenden Beiträge, Abbildungen und Fotos sind urheberrechtlich geschützt. Reproduktion, gleich welcher Art, können nur nach schriftlicher Genehmigung des Verlags erfolgen. // © 2017 VDE VERLAG, Berlin • Offenbach. Die gis.Science ist seit 2004 in der internationalen Zitationsdatenbank Scopus gelistet.

Literatur

Ait-Khaled, N.; Pearce, N.; Anderson, H. R.; Ellwood, P.; Montefortet, S. et al. (2009): Global map of the prevalence of symptoms of rhinoconjunctivitis in children: The International Study of Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC) Phase Three. In: *Allergy Eur J Allergy Clin Immunol*, 64 (1), S. 123-148.

Asher, M. I.; Montefort, S.; Björkstén, B.; Lai, C. K. W.; Strachan, D. P.; Weiland, S. K.; Williams, H. (2006): Worldwide time trends in the prevalence of symptoms of asthma, allergic rhinoconjunctivitis, and eczema in childhood: ISAAC Phases One and Three repeat multicountry cross-sectional surveys. In: *Lancet*, 368 (9537), S. 733-743.

Brus, D. J.; Hengeveld, G.; Walvoort, D. J. J.; Goedhart, P. W.; Heidema, A. H. et al. (2011): Statistical mapping of tree species over Europe. In: *European Journal of Forest Research*, 131.1, S. 145-157.

CORINE Land Cover (2006): Corine Land Cover 2006 raster data. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-3>.

Consortium for Small-scale Modelling (2011): General Description of the COSMO-Model. <http://www.cosmo-model.org/content/model/general/default.htm>, Zugriff 10/2016.

Després, Viviane R.; Huffman, J. A.; Burrows, S. M.; Hoose, C.; Safatov, A. S. et al. (2012): Primary biological aerosol particles in the atmosphere. A review. In: *Tellus*, B 64 (1). DOI:10.3402/tellusb.v64i0.15598.

Draxler, R. R.; Rolph, G. D. (2003): HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, Zugriff 10/2016.

Environmental Systems Research Institute, Inc. (2016): What is ArcPy? <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/arcpy/get-started/what-is-arcpy.htm>, Zugriff 10/2016.

Fröhlich-Nowoisky, J.; Pickersgill, D. A.; Despres, V. R.; Pöschl, U. (2009): High diversity of fungi in air particulate matter. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106 (31), S. 12814-12819. DOI: 10.1073/pnas.0811003106.

Jones, A. M.; Harrison, R. M. (2004): The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations – a review. In: *The Science of the total environment*, 326 (1-3), S. 151-180. DOI:10.1016/j.scitotenv.2003.11.021.

Kellogg, C. A.; Griffin, D. W. (2006): Aerobiology and the global transport of desert dust. In: *Trends in ecology & evolution*, 21 (11), S. 638-644. DOI:10.1016/j.tree.2006.07.004.

Morris, C. E.; Sands, D. C.; Bardin, M.; Jaenicke, R.; Vogel, B. et al. (2011): Microbiology and atmospheric processes. Research challenges concerning the impact of airborne microorganisms on the atmosphere and climate. In: *Biogeosciences*, 8 (1), S. 17-25. DOI:10.5194/bg-8-17-2011.

Müller-Germann, I.; Vogel, B.; Vogel, H.; Pauling, A.; Fröhlich-Nowoisky, J.; Pöschl, U.; Despres, V. R. (2015): Quantitative DNA Analyses for Airborne Birch Pollen. In: *PloS one*, 10 (10), e0140949. DOI:10.1371/journal.pone.0140949.

Paukstadt, A. (2015): Extraktion meteorologischer Daten aus NetCDF für räumliche Analysen. Masterarbeit, Hochschule Mainz. <http://apps.gi.hs-mainz.de/abschlussarbeiten/dokumente/KM059/website/index.html>, Zugriff 01/2017.

Pöschl, U. (2005): Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. In: *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 44 (46), S. 7520-7540. DOI:10.1002/anie.200501122.

Rew, R.; Davis, G.; Emmerson, S.; Davies, H.; Hartnett, E.; Heimbigner, D.; Fisher, W. (2016): What is NetCDF? <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/index.html>, Zugriff: 10/2016.

Seinfeld, J. H.; Pandis, S. N. (2006): *Atmospheric Chemistry and Physics*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

Stein, A. F.; Draxler, R. R.; Rolph, G. D.; Stunder, B. J. B.; Cohen, M. D.; Ngan, F. (2015): NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. In: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96 (12), S. 2059-2077. DOI:10.1175/BAMS-D-14-00110.1.

Stohl, A.; Forster, C.; Frank, A.; Seibert, P.; Wotawa, G. (2005): Technical Note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. In: *Atmos. Chem. Phys.*, 5, S. 2461-2474.

Stull, R. (1988): *An Introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.