

**Zeitschrift:** Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie  
**Herausgeber:** Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel  
**Band:** 52 (2011)  
**Heft:** 1

**Artikel:** MicroPoem : experimentelle Untersuchung der mikrometeorologischen Einflüsse auf die Birkenpollenemission im Rhonetal  
**Autor:** Michel, Dominik / Gehrig, Regula / Rotach, Mathias / Vogt, Roland  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1088234>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# MicroPoem: Experimentelle Untersuchung der mikrometeorologischen Einflüsse auf die Birkenpollenemission im Rhonetal

Dominik Michel, Regula Gehrig, Mathias Rotach und Roland Vogt

## *Zusammenfassung*

*Die Zahl allergischer Krankheiten hat in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen, und immer mehr Menschen sind davon betroffen. Die wichtigste Allergie ist die Pollenallergie. Wirksame Schutzmassnahmen setzen genaue Kenntnisse über die Produktion und Emission verschiedener allergener Pollenarten wie auch ihre Ausbreitung in der Atmosphäre voraus. Die grösste Schwäche existierender Pollenprognosemodelle besteht in der Beschreibung der Emissionsrate, insbesondere deren Abhängigkeit von physikalischen und biologischen Prozessen. Im vorgestellten Projekt MicroPoem werden die Einflüsse mikrometeorologischer Faktoren auf die lokale Emission und Ausbreitung von Birkenpollen einer isolierten Quelle im Rhonetal untersucht. Die Forschungsergebnisse sollen dazu beitragen, die Charakteristik der Pollenemission und -ausbreitung aufgrund meteorologischer Bedingungen besser zu verstehen und damit die Genauigkeit bestehender Prognosemodelle zu erhöhen. Die ersten Resultate zeigen deutliche Unterschiede der Pollenkonzentrationen auf der windabgewandten Seite der Quelle sowohl im zeitlichen Verlauf als auch in der räumlichen Verteilung. Diese sind einerseits auf meteorologische Bedingungen, andererseits auf physikalische Einflüsse des Birkenbestands auf die Strömung zurückzuführen.*

## 1 Einleitung

Die allgemeine Prävalenz allergischer Rhinitis in Europa beträgt etwa 15 % und nimmt stetig zu. Die Entwicklung präventiver Schutzmassnahmen erfordert sowohl die zuverlässige Abschätzung der Produktion und Emission verschiedener allergener Pollenarten als auch die Vorhersage ihrer Ausbreitung in der Atmosphäre. Eine neue Generation von Pollenvorhersagemodellen, welche

---

Adresse der Autoren: Dipl. geogr. Dominik Michel, Dr. Roland Vogt, Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, Klingelbergstrasse 27, CH-4056 Basel; E-Mail: dominik.michel@unibas.ch, roland.vogt@unibas.ch

Dr. Regula Gehrig, Bio- und Umweltmeteorologie, MeteoSchweiz, Krähbühlstrasse 58, Postfach 514, CH-8044 Zürich; E-Mail: regula.gehrig@meteoswiss.ch

Prof. Dr. Mathias Rotach, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck; E-Mail: mathias.rotach@uibk.ac.at

teilweise auf statistischen Daten, im Wesentlichen aber auf der vollständigen physikalischen Modellierung des Transports und der Ausbreitung basieren, liefern heutzutage Vorhersagen mit einer hochaufgelösten räumlichen Abdeckung (Skjøth et al. 2006, Helbig et al. 2004, Schueler & Schlünzen 2006, Sofiev et al. 2006a, b). Grundsätzlich entspricht der zentrale Teil dieser neuen Pollenprognosemodelle traditionellen Luftschadstofftransport- und ausbreitungsmodellen (Venkatram & Wyngaard 1988). Der Hauptunterschied zwischen ‘traditionellen’ Luftschadstoffen und Pollen besteht darin, dass letztere deutlich schwerer sind und daher die Gravitationskraft nicht vernachlässigt werden kann. Die grösste Schwäche in neuen Pollenprognosesystemen ist die Beschreibung der Emissionsrate, insbesondere deren Abhängigkeit von physikalischen Prozessen (z. B. der turbulenten Durchmischung der Atmosphäre oder der mittleren Strömung) und von biologischen Prozessen (z. B. der Pollenreife und der Bereitschaft der Antheren zur Abgabe der Pollen). Aus diesem Grund sind die Quantifizierung der Pollenemission und Bestimmung der massgebenden mikrometeorologischen Faktoren Gegenstand der Untersuchung in der vorgestellten laufenden Studie MicroPoem (Michel et al. 2010). Sie beinhaltet sowohl experimentelle Feldforschung als auch numerische Modellierung. Das Hauptziel ist ein besseres Verständnis der Emissions- und Ausbreitungscharakteristik von Pollen in Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen. Dies soll dazu beitragen, die Genauigkeit aktueller Prognosemodelle zu verbessern.

Die COST-Action ES0603 (EUPOL) widmet sich der Erforschung der Produktion, Ausbreitung und gesundheitlichen Einflüsse allergener Pollen in Europa. Eine Arbeitsgruppe ist auf die Pollenproduktion und -emission fokussiert und analysiert Modell- und Messdaten mit dem Ziel, die Hauptcharakteristik dieser Prozesse zu definieren. Innerhalb dieses Rahmens wurde das Projekt MicroPoem in Zusammenarbeit der MeteoSchweiz und des Instituts für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung der Uni Basel entwickelt, das vom Staatssekretariat für Bildung und Forschung (SBF) finanziell unterstützt wird.

Während der Birkenpollensaison 2009 wurde in Illarsaz im Rhonetal vom 2. bis zum 24. April ein Feldexperiment zur Quantifizierung der Pollenemission als Funktion mikrometeorologischer Bedingungen durchgeführt. Birkenpollen gehören zu den wichtigsten Allergenen in Europa. Für die Bestimmung der Emission aufgrund der gemessenen Pollenkonzentrationen ( $c_p$ ) und mikrometeorologischen Messungen wird ein dreidimensionales stochastisches Lagrange-Partikelmodell verwendet (Rotach et al. 1996, De Haan & Rotach 1998). Da es im Gegensatz zu gasförmigen Tracern sehr schwierig ist, schwere Pollen kontrolliert an die Atmosphäre abzugeben, wurde für das Experiment ein isolierter Birkenbestand als bekannte natürliche Tracerquelle verwendet. Um die Messungen zusätzlich zu erleichtern, wurde ein Talstandort gewählt, der von zwei Hauptwindrichtungen dominiert wird.

## 2 Methoden

Der Messstandort befand sich im Rhonetal in Illarsaz nahe Aigle, VD (Abb. 1). Die ebene Talsohle in der näheren Umgebung des Standorts ist entlang der Talachse in beiden Richtungen (NNW bzw. SSE) grösstenteils ungestört. In Entfernungen über 500 m stehen vereinzelte Rauigkeitselemente in Form von Gebäuden und Baumreihen. Die Pollenquelle besteht aus etwa 140 adulten Birken zweier Arten (*Betula pubescens* und *B. pendula*) von 17–22 m Höhe. Der Bestand ist quer zur Talachse ausgerichtet und etwa 200 m lang und 40 m breit. Während Perioden mit klärem Himmel und schwachen synoptischen Einflüssen stellt sich in der Regel ein Berg-Talwindssystem mit Windgeschwindigkeiten tagsüber  $>2 \text{ ms}^{-1}$  ein.

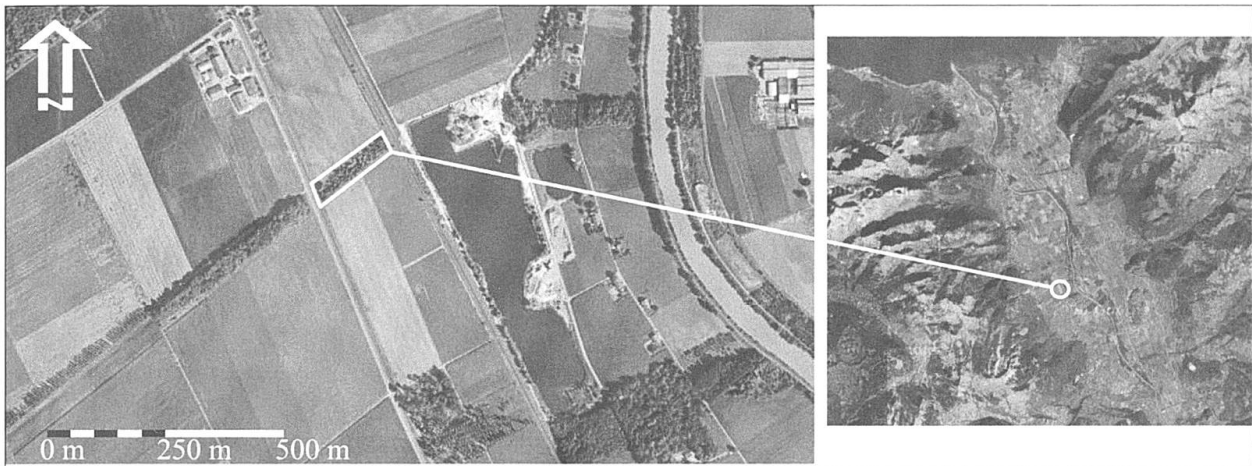


Abb. 1 Satellitenaufnahme des Messstandorts im Rhonetal (Grossaufnahme links, Übersicht rechts). Der Standort der definierten Quelle ist mit einem Rechteck bezeichnet (Google Maps, 5. März 1997).

Der instrumentelle Aufbau ermöglichte vertikale und horizontale (laterale sowie longitudinale) Profilmessungen mikrometeorologischer Grössen sowie die Erfassung der Pollenkonzentration  $c_P$ . Das vertikale Profil der Turbulenz und  $c_P$  wurde an drei Masten von je 18 m Höhe kontinuierlich gemessen, die 30 m nördlich sowie 100 und 350 m südlich des Birkenbestands entlang der Talachse aufgestellt wurden (Abb. 2). Die Masten waren mit drei ( $T_1$  und  $T_3$ ) bzw. fünf ( $T_2$ ) CSAT3 Ultraschall-Anemometern (Campbell Scientific Ltd.) und jeweils zwei Pollenfallen (Burkard Ltd.) auf 2 und 18 m Höhe ausgerüstet.

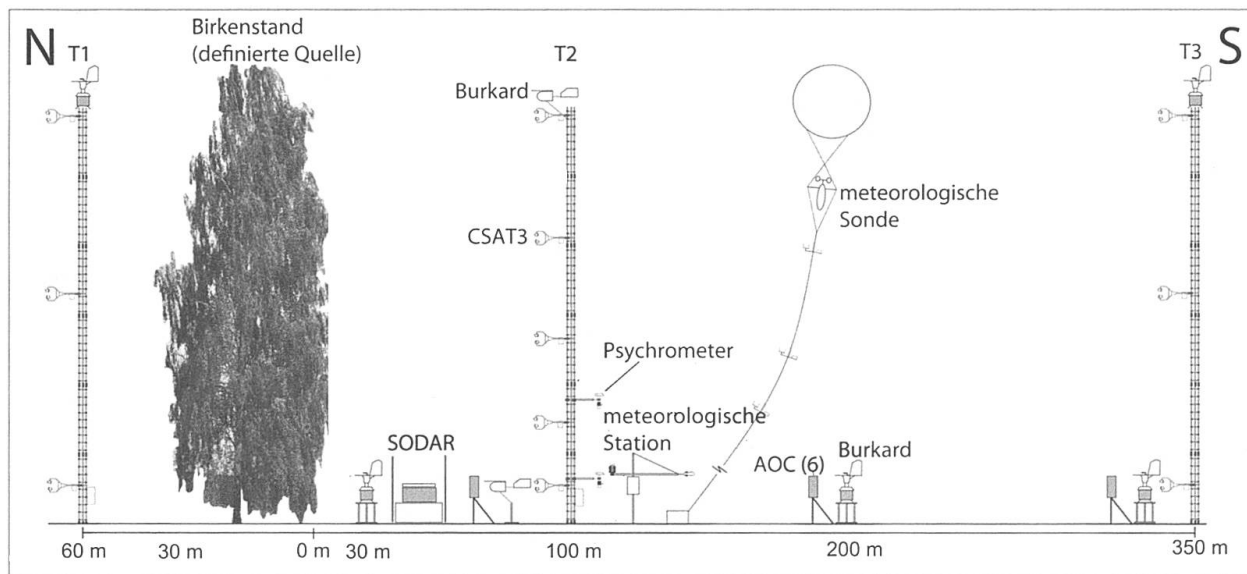


Abb. 2 Ansicht des experimentellen Aufbaus entlang der Talachse (NNW-SSE).

Die Burkard-Instrumente werden im vorgestellten Projekt aufgrund ihrer weiten Verbreitung in wissenschaftlichen Studien als Referenz für die Pollenmessung betrachtet. Das Messprinzip beruht bei allen im Projekt verwendeten Pollenmessgeräten auf einer Impaktionsfläche, bei welcher die Pollen aufgrund ihrer grösseren Massenträgheit von der Luftströmung, welche sie transportiert, getrennt werden. Die Pollen werden schliesslich manuell ausgezählt. Das im Messzeitraum durchgesetzte Luftvolumen ist bekannt, wodurch sich  $c_P$  [Pollen/m<sup>3</sup>] ermitteln lässt, die zeitliche Auflösung beträgt 120 bzw. 60 min.

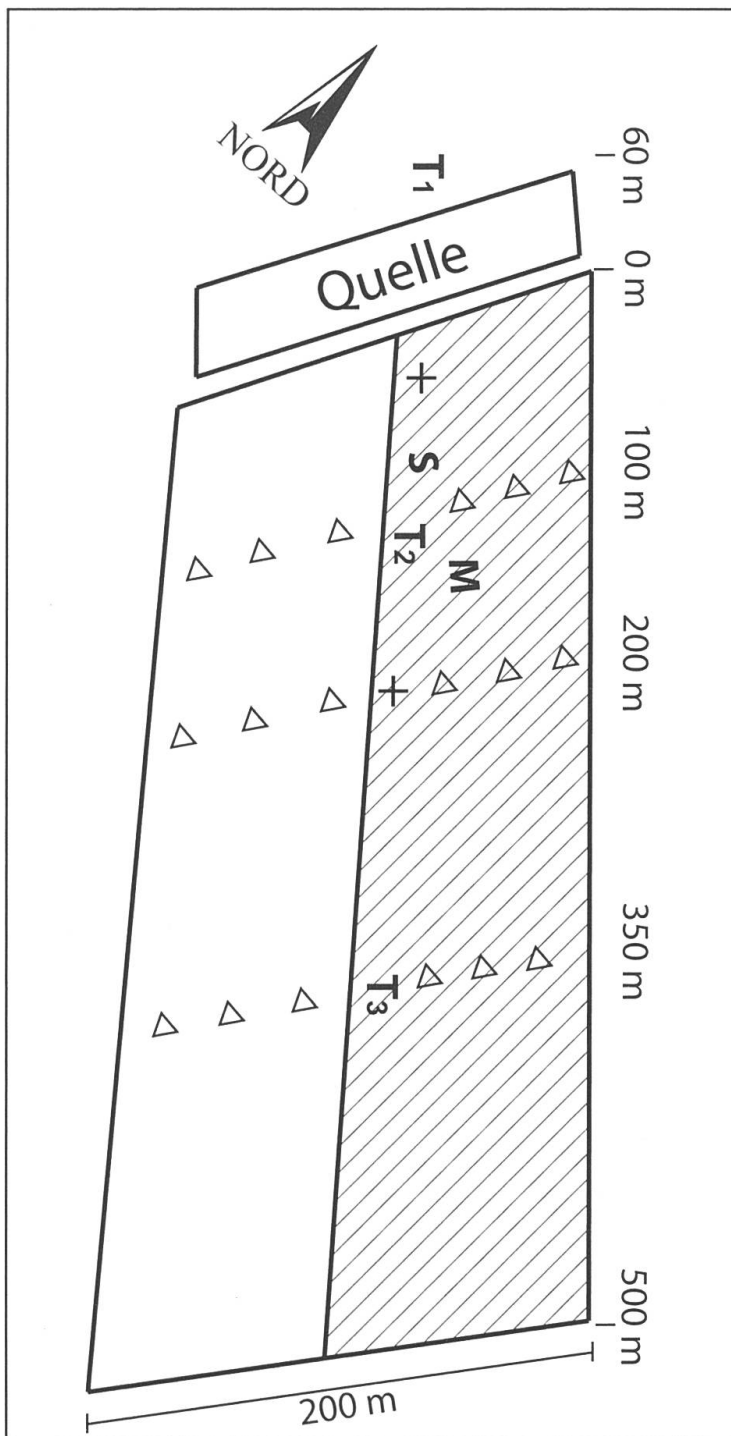


Abb. 3 Aufsicht des experimentellen Aufbaus. Die graue Fläche bezeichnet eine Grasfläche, die weiße Fläche ein mit Acrylbahnen bedecktes Kartoffelfeld.  $T_1$  bis  $T_3$  zeigen die Standorte der Messmasten, M den Standort der meteorologischen Station und S den Standort des SODAR-Systems an. Die + Symbole bezeichnen alleinstehende Burkard-Fallen, Dreiecke bezeichnen AOC-Pollenfallen.

Abbildung 3 zeigt eine Aufsicht des instrumentellen Aufbaus. Die meteorologischen Bedingungen (z. B. Strahlung, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Druck und Bodentemperatur) wurden an einer separaten Station gemessen (M). Ein SODAR-System (Scintec AG) lieferte Informationen über das Windprofil im unteren Teil der Planetaren Grenzschicht bis zu 600 m Höhe (S).

Zusätzlich wurden an insgesamt fünf Tagen (intensive operation periods, IOP) mit ausgeprägter Talwindphase 18 Air-O-Cell (AOC) Pollenfallen (Zefon Int.) auf der windabgewandten Seite des Birkenbestands betrieben, und sie lieferten tagsüber auf einer Höhe von 2 m ein longitudinales und laterales  $c_p$ -Profil (Dreieck). Während dieser Messphasen erfassten die Pollenmessungen am luvseitigen Mast  $T_1$  die Hintergrundkonzentration. Ausserdem wurden ebenfalls während der IOPs insgesamt acht Ballonsondierungen der meteorologischen Bedingungen auf einer Höhe von 300 m und Profilen der  $c_p$  mit drei Rotorod-Pollenfallen (Sampling Technologies Inc.) auf 25, 100 und 290 m über Grund durchgeführt. Die absoluten Messhöhen variierten jedoch mit der windbedingten Neigung der Fesselung. Aufgrund signifikanter Diskrepanzen zwischen den Messungen der Pollenfallen unterschiedlichen Typs wurden von 2009 bis 2010 insgesamt drei Vergleichsstudien an verschiedenen Standorten und mit verschiedenen Pollenarten durchgeführt, damit eine robuste Kalibrierung der Geräte abgeleitet werden kann.

## 3 Ergebnisse & Diskussion

### 3.1 Meteorologie

Der Himmel war während der gesamten Kampagne überwiegend klar, und nur an zwei aufeinanderfolgenden Tagen wurde Niederschlag gemessen. Dieser Umstand ist wichtig, da Pollen während solcher Ereignisse nicht emittiert bzw. aus der Atmosphäre gewaschen werden. Zumeist stellte sich ein ausgeprägtes Berg-Talwindsystem ein. Die Windbedingungen sind von speziellem Interesse, da der Transport der Pollen in der Atmosphäre von der Windgeschwindigkeit und -richtung gesteuert wird und die Zuordnung der Pollen zur definierten Quelle nur unter bestimmten Bedingungen eindeutig ist. Abbildung 4 zeigt das zeitliche Muster der Windrichtung während der IOPs. Im Zeitraum von 08:00 bis 17:00 Uhr wehte ein persistenter Talwind aus NNW-Richtung. Dies lässt erwarten, dass die Instrumente im Lee der Quelle (SSE) den Durchgang einer Pollenwolke registrierten. Die entsprechenden Windgeschwindigkeiten lagen zwischen 2 und 4  $\text{ms}^{-1}$ . Der Ast bei etwa  $160^\circ$  zwischen 15:00 und 19:00 Uhr ist auf einen Südföhdurchgang zurückzuführen, der am 11. April mit Geschwindigkeiten von bis zu  $12 \text{ ms}^{-1}$  auftrat. In den Datenreihen der Pollenmessung wird dieser Zeitraum nicht berücksichtigt. Der nächtliche Bergwind ist im dargestellten Zeitraum im Gegensatz zum Talwind nicht persistent und geht mit sehr geringen Windgeschwindigkeiten einher.

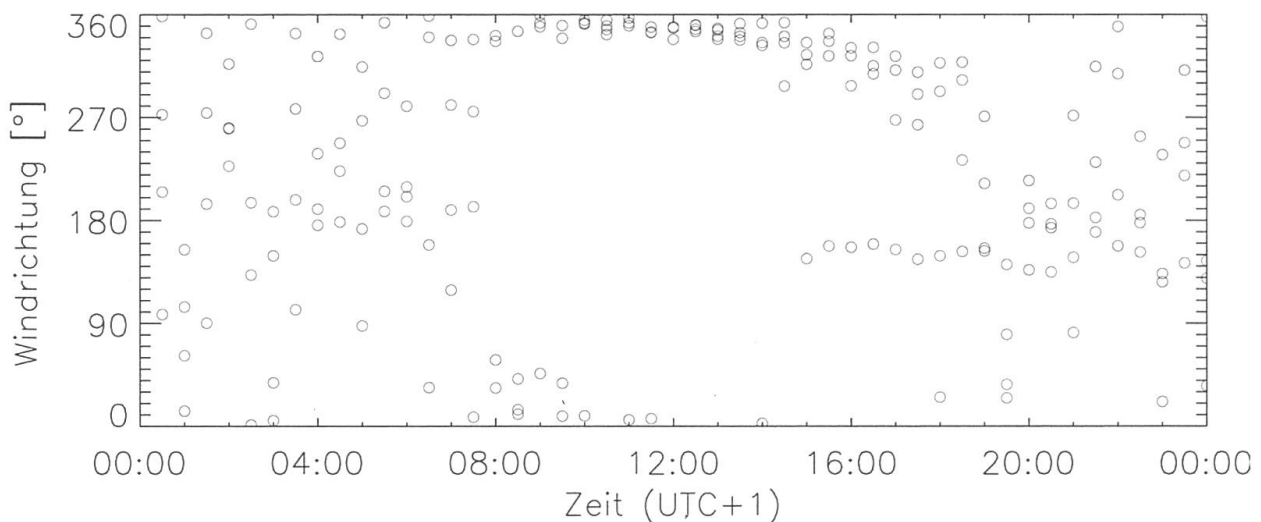


Abb. 4 Tageszyklen der 30 min-Mittel der Windrichtung (NNW-SSE) bei  $T_2$  gemessen, 100 m südlich des Birkenbestands.

### 3.2 Pollenkonzentrationen

Der Verlauf der Pollenkonzentrationen während drei IOPs zeigt einen Tagesgang mit einem Maximum tagsüber und einem Minimum nachts, ausser in der Nacht vom 12. April, als sehr hohe Konzentrationen gemessen wurden (Abb. 5). Dieses Ergebnis entspricht den Beschreibungen des zeitlichen Immissionsverlaufs von Birkenpollen (Jäger 1990, Mahura et al. 2009) und anderer Pollenarten (Ogden et al. 1969, Von Wahl & Puls 1989, Van Hout et al. 2008). Der Beginn der täglichen Emission wird demnach massgeblich von der Temperatur gesteuert.

Ausserdem zeigt sich, dass der Einfluss der definierten Pollenquelle auf die gemessene leeseitige  $c_p$  erst in einer Distanz von rund 20-facher Bestandshöhe erkennbar wird: Die Pollenkonzentration in 350 m Entfernung ist in den meisten Fällen höher als jene bei 30 und 100 m Entfernung.



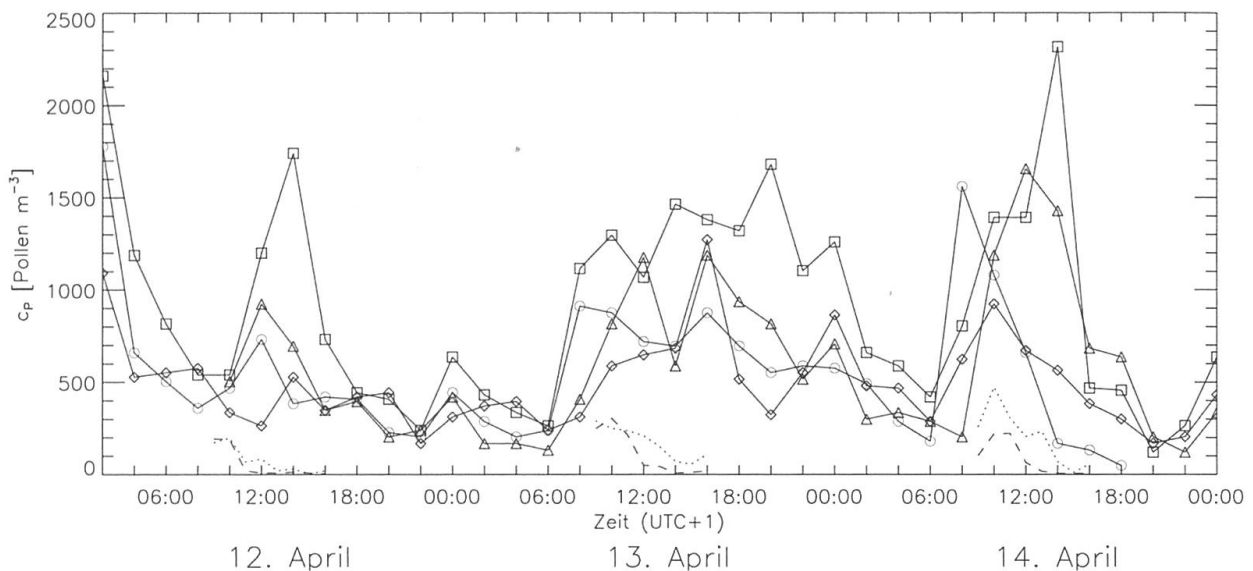


Abb. 5 Tagesgang der Pollenkonzentrationen, gemessen in einer Höhe von 2 m während drei IOPs. Durchgezogene Linien bezeichnen zweistündliche Daten. Burkard-Daten bei 30 m nördlich (Kreise), 30 m südlich (Rhomben), 100 m südlich (Quadrate) und 350 m südlich (Dreiecke). Die Linien ohne Symbol bezeichnen stündliche AOC-Daten bei 100 (gepunktet) bzw. 200 m (gestrichelt) südlich des Birkenbestands als Mittelwert jeweils der zwei mittleren Sensoren (Abb. 3).

Die quellennahen Werte entsprechen ungefähr der Hintergrundkonzentration. Die Hintergrundkonzentration könnte einerseits durch den Bestand hindurch advektiert und andererseits lateral durch Leewirbel in die windabgewandte Seite des Bestands eingemischt werden. Ausserdem scheinen die schweren Birkenpollen der definierten Quelle nicht so schnell abzusinken wie angenommen. Durch diese Umstände wird die Zuordnung der gemessenen Pollen zur definierten Quelle erschwert. Um die Strömungsverhältnisse um den porösen Bestand besser zu verstehen, werden deshalb zusätzlich ein CFD- (Computational Fluid Dynamics) Modell und ein dreidimensionales stochastisches Lagrange-Footprint-Modell (*Kljun et al. 2002*) herangezogen, welches die Absinkgeschwindigkeit der schweren Pollen berücksichtigt (*Guilod 2009*).

Des Weiteren zeigt die Abb. 5 deutlich, dass die Diskrepanzen zwischen den AOC- und Burkard-Messungen, wie oben bereits erwähnt, beträchtlich sind. Da die Burkard-Pollenfallen als Referenz gelten, ist ein Vergleich der Pollenkonzentrationen nur nach extensiver relativer Kalibrierung der AOC aussagekräftig. Dieses Resultat stimmt nicht mit den Erkenntnissen einer Laborstudie durch *Aizenberg et al. (2000)* überein, die eine signifikant bessere Übereinstimmung für die betreffenden Instrumente ergab. Eine robuste Kalibrierung der AOC-Pollenfallen mit Felddaten wird zurzeit durchgeführt. Erste Resultate weisen auf eine starke Abhängigkeit der Messgenauigkeit von der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit hin. Nach dem aktuellen Kenntnisstand ergibt sich der Einfluss der Windgeschwindigkeit aus dem unterschiedlichen Aufbau der Pollenfallen. Während der Lufteinlass der Burkard-Pollenfallen horizontal ausgerichtet ist und mittels einer Windfahne gegen die Windrichtung gestellt wird, ist die Öffnung der AOC-Falle vertikal ausgerichtet. Horizontal transportierte Pollen müssen im Falle der AOC in die Vertikale abgelenkt werden. Die Sammeleffizienz wird aufgrund der Massenträgheit der Pollen herabgesetzt.

Die Abb. 6 zeigt die vertikalen  $c_P$ -Profile der Ballonsondierungen in 130 m Entfernung vom Birkenbestand. Auffällig ist, dass die Konzentration auch in höheren Lagen beträchtlich ist. Hier werden erst die Resultate des Lagrange- und CFD-Modells Aufschluss darüber geben können, ob ein Teil – bzw. welcher Teil – der gemessenen Pollen von der definierten Quelle stammt. Überdies zeigt der Vergleich der bodennahen Profile bei f) bis h) einen positiven  $c_P$ -Gradienten zwischen 2 und 18 m Höhe. Dies könnte damit in Zusammenhang stehen, dass das Emissionspotential der

Quelle räumlich nicht homogen verteilt ist. Die Birken weisen in der oberen Baumhälfte generell eine höhere Antherendichte auf. Das  $c_P$ -Profil bei  $T_2$  würde somit dem vertikalen potentiellen Emissionsprofil des Birkenbestands entsprechen. Die Pollenmessungen in den höheren Lagen  $>18$  m weisen durchgehend tiefere Werte auf. Es scheint, dass der Einfluss des Birkenbestands auf die leeseitige  $c_P$  vor allem auf der Höhe des grössten Emissionspotentials bemerkbar ist. Dies lässt wiederum den Schluss zu, dass die Absinkgeschwindigkeit der transportierten Pollen relativ gering und die Durchmischung der Atmosphäre relativ schwach ist.

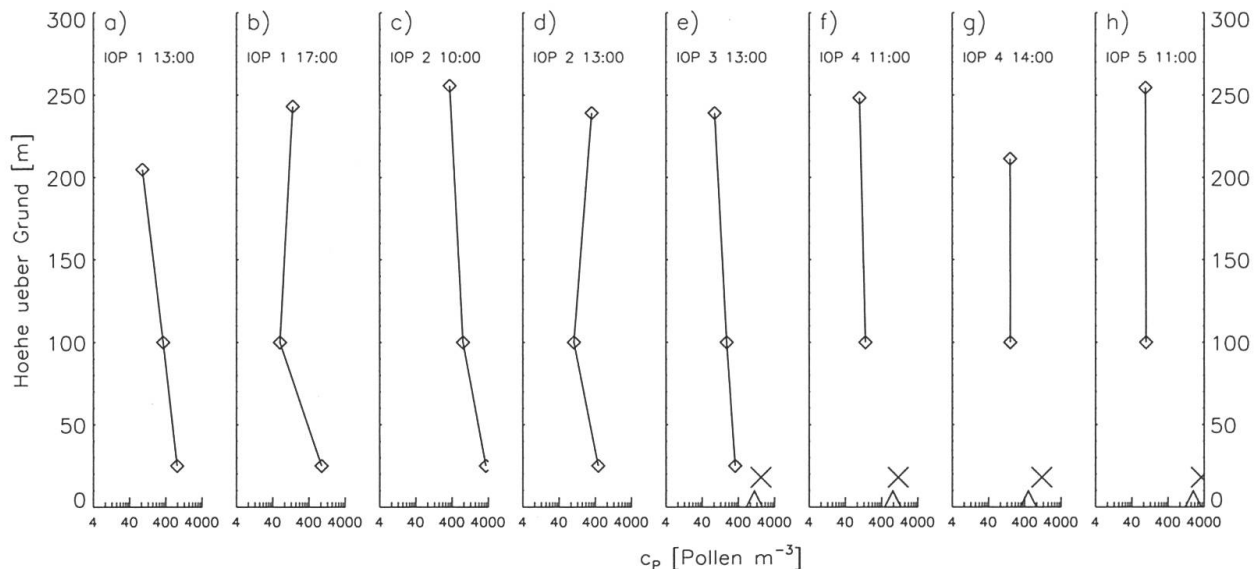


Abb. 6 Vertikale Profile der stündlichen Pollenkonzentration gemessen mit Rotorod-Pollenfallen am Fesselballon 130 m südlich des Birkenbestands, gezeichnet auf einer logarithmischen Abszisse. Die Dreiecke und 'X'-Symbole bezeichnen stündliche Pollenkonzentrationen, gemessen mit Burkard-Fallen in einer Höhe von 2 resp. 18 m bei  $T_2$ , 100 m südlich des Birkenbestands. Die Daten der untersten Profilhöhe fehlen in f) bis h) aufgrund eines Geräteausfalls. Ebenso fehlen die Burkard-Daten von  $T_2$  aufgrund von Gerätefehlern.

## 4 Fazit

Die meteorologischen Bedingungen während des Feldexperiments entsprachen den Voraussetzungen für die Messung der Pollenverteilung auf der Leeseite einer definierten Quelle. Unsicher ist bislang jedoch die eindeutige Zuordnung der zeitlich und räumlich hochaufgelösten Pollenkonzentrationen zu dieser Quelle. Die räumliche Variabilität der Pollenverteilung ist signifikant, sowohl in longitudinaler als auch in lateraler Richtung, sofern nur ein Pollenfallentyp betrachtet wird. Die Verteilung und Stärke der Konzentration wird einerseits durch meteorologische Bedingungen und andererseits durch die Struktur des Quellenbestands beeinflusst. Der Beitrag der definierten Quelle zur gemessenen Konzentration ist erst in relativ grosser Entfernung bemerkbar. Der horizontale Transport der emittierten schweren Birkenpollen ist demnach effektiver und deren Absinkgeschwindigkeit kleiner als angenommen.

Die Messungen verschiedener Pollenfallentypen weisen eine inkonsistente Verteilungscharakteristik auf. Wenn die Burkard-Pollenfalle als Referenz betrachtet wird, unterschätzen die AOC die Konzentrationen massiv. Die Kenntnis der Ungenauigkeit der einzelnen Messmethoden ist essentiell für eine robuste Analyse der Pollenverteilung und daher Gegenstand der laufenden Arbeit.



Die aus dieser Studie resultierende Charakterisierung der lokalen Pollenemission und -verteilung, sowie die Bestimmung der steuernden Prozesse leisten einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Genauigkeit von Pollenprognosemodellen wie z. B. COSMO-ART, welches für die numerische Modellierung der Birkenpollenverteilung weiterentwickelt wurde (Helbig et al. 2004, Vogel et al. 2008). Ausserdem liefert die Studie neue Erkenntnisse im Bereich der Pollenmessung unter natürlichen Bedingungen, die zu einer verbesserten Vergleichbarkeit von Pollendaten unterschiedlicher Studien beitragen werden. Schon heute stützen sich Ärzte bei der Diagnose und Behandlung auf Messungen und Prognosen der Pollenkonzentration allergener Arten. Schliesslich sollen Allergie-Betroffene schneller und genauer über zu erwartete Extremereignisse informiert werden können.

## Literatur

- Aizenberg V., Reponen T., Grinshpun S. & Willeke K. 2000. Performance of Air-O-Cell, Burkard and Button Samplers for total enumeration of airborne spores. *American Industrial Hygiene Association* 61: 855–864.
- De Haan P. & Rotach M. 1998. A novel approach to atmospheric dispersion modelling: The Puff-Particle-Model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 124: 2771–2792.
- Guillod B. 2009. *Footprint modeling for heavy particles*. Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich, 1–89.
- Helbig N., Vogel B., Vogel H. & Fiedler F. 2004. Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale. *Aerobiologia* 3: 3–19.
- Michel D., Rotach M., Gehrig R. & Vogt R. 2010. Experimental investigation of micrometeorological influences on birch pollen emission. *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz* 230: 1–37.
- Jäger S. 1990. Tageszeitliche Verteilung und langjährige Trends bei allergiekompetenten Pollen. *Allergologie* 13: 159–182.
- Kljun N., Rotach M. & Schmid H. 2002. A three-dimensional backward Lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications. *Boundary-Layer Meteorology* 103: 205–226.
- Mahura A., Baklanov A. & Korsholm U. 2009. Parameterization of the birch pollen diurnal cycle. *Aerobiologia* 25: 203–208.
- Ogden E., Hayes J. & Raynor G. 1969. Diurnal patterns of pollen emission in Ambrosia, Phleum, Zea and Ricinus. *American Journal of Botany* 56: 16–21.
- Rotach M., Gryning S.-E. & Tassone C. 1996. A two-dimensional Lagrangian stochastic dispersion model for daytime conditions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 122: 367–389.
- Schueler S. & Schlünzen K. 2006. Modeling of oak pollen dispersal on the landscape level with a mesoscale atmospheric model. *Environmental Modeling and Assessment* 11: 179–194.
- Skjøth C., Brandt J., Christensen J., Løfstrøm P., Frohn L., Geels C., Hvidberg M., Frydendall J. & Hansen K. 2006. THOR: An operational and integrated model system for air pollution and pollen forecasts. *Proceedings of 8th International Congress on Aerobiology, "Towards a comprehensive vision"*.
- Sofiev M., Siljamo P., Ranta H. & Rantio-Lehtimäki A. 2006a. Towards numerical forecasting of long-range air transport of birch pollen: theoretical considerations and a feasibility study. *International Journal of Biometeorology* 50: 392–402.
- Sofiev M., Siljamo P., Valkama I., Ilvonen M. & Kukkonen J. 2006b. A dispersion modelling system SI-LAM and its evaluation against ETEX data. *Atmospheric Environment* 40: 674–685.
- Van Hout R., Chamecki M., Brush G., Katz, J. & Parlange M. 2008. The influence of local meteorological conditions on the circadian rhythm of corn (*Zea mays* L.) pollen emission. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1078–1092.
- Venkatram A. & Wyngaard J. 1988. *Lectures on air pollution modeling*. Boston, 1–390.
- Vogel H., Pauling A. & Vogel B. 2008. Numerical simulation of birch pollen dispersion with an operational weather forecast system. *International Journal of Biometeorology* 52: 805–814.
- Von Wahl P.-G. & Puls K. 1989. The emission of mugwort pollen (*Artemisia vulgaris* L.) and its flight in the air. *Aerobiologia* 5: 55–63.