



Doctoral Thesis

Footprint modelling in the planetary boundary layer

Author(s):

Kljun, Natascha

Publication Date:

2002

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004280768> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 14482

Footprint Modelling in the Planetary Boundary Layer

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of

Doctor of Natural Sciences

presented by
Natascha Kljun
Dipl. Natw. ETH
born January 22, 1971
citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. A. Ohmura, examiner
PD Dr. M.W. Rotach, co-examiner
Prof. Dr. H.P. Schmid, co-examiner
Prof. Dr. J.D. Wilson, co-examiner

2002

Abstract

When measuring trace gas concentrations or fluxes, it is not trivial to determine the part of the upwind area which contains the effective sources and sinks contributing to the given measurement point. In recent years, several so called footprint models have been introduced in order to describe this surface area of influence upon a trace gas measurement under various environmental and experimental conditions.

Footprint models available from the literature are usually confined to a particular stability regime, height range or both. This study presents the three-dimensional Lagrangian footprint model LPDM-B that has a much wider area of application than previous models. LPDM-B is based on the Lagrangian stochastic particle dispersion model ALLSTAR. Like ALLSTAR, LPDM-B is valid within a wide range of boundary layer stratifications and receptor heights. It allows the derivation of flux as well as concentration footprints. The model is described in detail and evaluated against other footprint models, wind-tunnel observations, and datasets from large-eddy simulations.

Two special features were developed in order to increase the model's accuracy and speed: *(i)* LPDM-B employs stochastic backward trajectories of particles, i.e., the particles are released at the receptor location and tracked backwards in time. The model's flux footprint estimates depend directly on the initial particle velocities. Therefore, a spin-up procedure during initialisation is introduced to prevent unrealistic initial velocity distributions. *(ii)* LPDM-B employs a density kernel estimation method. This statistical method allows for a decrease in the number of particles released. It results in a significant reduction of CPU-time compared to conventional footprint models.

LPDM-B is evaluated against other footprint models of the Eulerian (analytical) and the Lagrangian types. The results of the comparison confirm that LPDM-B provides good footprint predictions for a broad range of stratifications. They further reveal that the influence of streamwise turbulent diffusion is not negligible as assumed by analytical footprint models.

In order to assure that the atmospheric turbulence and flow processes are reproduced well by LPDM-B, the dispersion module of the model, ALLSTAR, is extensively tested against laboratory data obtained in a thermally stratified wind-tunnel. Additionally, datasets from large-eddy simulations (LES) conducted for the same case study are considered. The sensitivity of dispersion predictions to turbulence and flow parameterisations and modifications of the reflection scheme at the boundary layer top is examined. It is shown that ALLSTAR is able to reproduce the observed dispersion structures for a ground-level and an elevated source in the sheared convective boundary layer. The turbulence

parameterisations originally implemented in ALLSTAR are fairly robust and result in good agreement between measured and calculated concentration profiles.

The footprint model is compared to virtual footprints derived from wind-tunnel experiments and LES data. Furthermore, footprints are also derived from ALLSTAR results. The concentration footprint predictions of LPDM-B exhibit very good correspondence to the wind-tunnel observations for receptor heights covering the whole planetary boundary layer. On the other hand, footprint estimates derived from ALLSTAR and LES for receptors above the surface layer tend to underestimate the distance between receptor and the peak of the footprint.

Finally, a first attempt is presented to scale and parameterise footprint estimates for conditions covering a broad range of the planetary boundary layer. The approach is tested for footprint predictions of the Lagrangian model LPDM-B and of an analytical footprint model.

With the present Lagrangian backward footprint model LPDM-B, a tool is available to efficiently calculate the area of influence (footprint) for a possible receptor at any height within the planetary boundary layer and under almost any stability regime.

Zusammenfassung

Um denjenigen Bereich der Oberfläche zu bestimmen, der eine Spurengasmessung an einem gegebenen Messpunkt beeinflusst, wurden in den letzten Jahren einige sogenannte Footprintmodelle vorgestellt. Die meisten dieser Modelle sind allerdings nur unter bestimmten Bedingungen gültig. Je nach Modelltyp gelten beispielsweise Einschränkungen im Stabilitätsbereich und/oder der Messhöhe. In der vorliegenden Arbeit wird das dreidimensionale Lagrange'sche Footprintmodell LPDM-B vorgestellt, welches in einem viel weiteren Bereich anwendbar ist als bisher beschriebene Modelle und das Footprintvorhersagen für Fluss- sowie Konzentrationsmessungen liefert. LPDM-B ist eine modifizierte Version des stochastischen Lagrange'schen Partikel-Ausbreitungsmodelles ALLSTAR. Den beiden Modellen ist gemeinsam, dass sie in stabiler bis stark konvektiver Grenzschicht anwendbar sind, sowie auch für Messhöhen innerhalb der ganzen planetaren Grenzschicht. Dieses Modell wird detailliert beschrieben und mit Resultaten anderer Footprintmodelle, Windkanal-Daten und Large-Eddy Simulationen verglichen.

Die Genauigkeit und die Geschwindigkeit des Modelles wurden verbessert, indem zwei Eigenschaften neu eingeführt wurden: (i) LPDM-B beruht auf der Berechnung von stochastischen 'Rückwärts'-Trajektorien, d.h. die Partikel werden am Messpunkt selber gestartet und rückwärts in der Zeit verfolgt. Fluss-Footprint Berechnungen nach diesem Ansatz sind direkt abhängig von den verwendeten Partikel-Anfangsgeschwindigkeiten. Um die Verteilung dieser Anfangsgeschwindigkeiten möglichst realistisch zu modellieren, wurde ein sogenannter Spin-up eingeführt. (ii) Weiter wurde die Kernel-Dichteschätzungsmethode eingesetzt. Diese statistische Methode erlaubt es, die Anzahl der zu simulierenden Partikeltrajektorien massiv zu reduzieren, was – verglichen mit herkömmlichen Lagrange'schen Footprintmodellen - zu einer signifikant verkürzten Laufzeit der Simulationen führt.

Die mit LPDM-B berechneten Footprints wurden mit Resultaten anderer Footprintmodelle des Eulerschen (analytischen) sowie des Lagrange'schen Ansatzes verglichen. Diese Vergleiche bestätigen, dass LPDM-B für weite Stabilitätsbereiche der planetaren Grenzschicht sehr gute Footprintvorhersagen liefert. Ausserdem wird gezeigt, dass die longitudinale turbulente Diffusion durchaus einen sichtbaren Einfluss auf Footprintvorhersagen ausübt und nicht – wie in analytischen Modellen – vernachlässigt werden sollte.

Um sicher zu stellen, dass Turbulenzstruktur und Strömungsprozesse innerhalb der planetaren Grenzschicht von LPDM-B erfolgreich reproduziert werden, wurde die Ausbreitungsversion des Modelles, ALLSTAR, ausgiebig mit Daten einer Windkanalstudie verglichen. Diese Studie wurde in einem thermisch stratifizierten Windkanal mit gleichzeitig vorhandener, mechanisch erzeugter Turbulenz (Scherung) durchgeführt. Zusät-

zlich standen Daten von Large-Eddy Simulationen (LES) für dem Windkanal entsprechende Verhältnisse zur Verfügung. Die Sensitivität der simulierten Dispersion auf verwendete Turbulenz- und Strömungsparameterisierungen sowie auf Änderungen des Reflexionschemas an der Inversionsschicht wurde detailliert untersucht. Es wird gezeigt, dass ALLSTAR-Simulationen die gemessenen Strömungs- und Ausbreitungsstrukturen für eine Boden- sowie für eine erhöhte Quelle in der konvektiven Grenzschicht sehr gut darstellen können.

Das Footprintmodell LPDM-B wurde weiter mit virtuellen Footprints verglichen, welche aus Windkanal- und LES-Daten, sowie aus Resultaten des ALLSTAR-Modelles berechnet wurden. Die Footprints von LPDM-B für Konzentrationsmessungen zeigen sehr gute Übereinstimmung zu den Windkanalbeobachtungen für Messhöhen innerhalb der ganzen Grenzschicht. Die aus LES-Daten berechneten Footprints hingegen, sowie die Footprints aus ALLSTAR-Simulationen, unterschätzen die Distanz Messstandort – Footprint-Maximum für Messhöhen überhalb des Surface Layer.

Es wird ein Ansatz vorgestellt, um Footprintschätzungen für einen grossen Bereich verschiedener Bedingungen der planetaren Grenzschicht zu skalieren und zu parameterisieren. Diese Methode wurde für Footprintvorhersagen von LPDM-B sowie von einem analytischen Modell getestet.

Alles in allem steht mit dem hier vorgestellten Lagrange'schen Footprintmodell LPDM-B ein effizientes Werkzeug zur Verfügung, um den Einflussbereich einer Messung auf einer beliebigen Höhe innerhalb der planetaren Grenzschicht unter fast jeder Stabilitätsbedingung zu bestimmen.