

Diss. ETH Nr. 9439

TURBULENCE WITHIN AND ABOVE AN URBAN CANOPY

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels eines
DOKTORS DER NATURWISSENSCHAFTEN
der
Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

vorgelegt von
MATHIAS WALTER JAKOB ROTACH
Dipl. Natw. ETH Zürich
geboren am 31. März 1960
von Herisau AR

Aufgenommen auf Antrag von:
Prof. Dr. A. Ohmura, Referent
Prof. Dr. H.C. Davies, Korreferent
Prof. Dr. T.R. Oke (UBC, Vancouver), Korreferent

Zürich 1991

Erscheint unter dem gleichen Titel als Heft 45 der ZUERCHER
GEOGRAPHISCHE SCHRIFTEN, Verlag vdf, 240 S., Zürich, 1991

Zusammenfassung

Die Turbulenzstruktur nahe einer städtischen Oberfläche wird in einer experimentellen Fallstudie untersucht. Dazu werden Messungen an je einem Turm über Dachniveau (20 m) und in der angrenzenden Strassenschlucht während fast zweier Jahre herangezogen. Neben der Untersuchung der mittleren Profile von Windgeschwindigkeit, Temperatur und spezifischer Feuchte liegt das Schwergewicht dieser Arbeit auf der Charakterisierung der Turbulenzstruktur in diesen untersten Schichten der städtischen Atmosphäre (Canopy- oder Bestandsschicht und "Roughness Sublayer"). Zwei Ultraschall-Anemometer, eingesetzt in verschiedenen Höhenkombinationen liefern dazu die zeitlich hochaufgelösten Werte der drei Windgeschwindigkeits-Komponenten und der Temperatur.

Da eine konsistente Beschreibung der Turbulenz im betrachteten Höhenbereich bis heute fehlt, wird in numerischen Modellen oft die Monin-Obukhov-Aehnlichkeitstheorie für die Bodennahe Grenzschicht (surface layer) verwendet, obwohl die Voraussetzungen dafür nicht erfüllt sind. Die Resultate werden deshalb ebenfalls unter diesem Aspekt diskutiert. Die wichtigste Charakteristik der Turbulenz im Roughness Sublayer ist die festgestellte Abnahme des Impulsflusses je näher die Oberfläche erreicht wird. Auf einer Höhe nahe der Nullflächenverschiebung wird im Mittel kein Impulsfluss mehr beobachtet. Druckunterschiede im Strömungsnachlauf (wake) von einzelnen Gebäuden führen dabei zum Aufbrechen der organisierten Scherströmung in kleinere Wirbel. Die verschiedenen Beiträge zum Impulsfluss werden mit Hilfe einer Quadranten Analyse untersucht. Vorallem innerhalb der Strassenschlucht und unmittelbar darüber erfolgt der Impulsfluss vorwiegend durch Abwärtstransport von Ueberschuss-Impuls (sogenannte Sweeps). Je näher an der "Oberfläche", desto stärker ist die Tendenz zu grossen, sich teilweise aufhebenden Beiträgen der vier Quadranten. Durch die nahe Dachoberfläche (Erwärmung und Abkühlung) ergibt sich für den turbulenten Transport von sensibler Wärme eine kompliziertere vertikale Struktur.

Wenn das Konzept der lokalen Skalierung angewendet wird, können für den Roughness Sublayer viele der halbempirischen Funktionen zur Beschreibung der Turbulenz (in der Bodennahen Grenzschicht) unverändert übernommen werden. Die Energiespektren der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten und die Cospektren für Impuls- und Wärmefluss sind nicht nur von einer einzelnen Längenskala abhängig (Messhöhe oder Mischungsschichthöhe), sondern werden zusätzlich durch die Bebauungsgeometrie bestimmt. Die Peak-Frequenzen entsprechen auf allen Höhen Wellenlängen, die viel kleiner sind als über homogenem Terrain beobachtet. Während die "-5/3-Steigung" im hochfrequenten Bereich der Spektren recht gut erhalten bleibt

(Roughness Sublayer), kann aufgrund des Verhältnisses der spektralen Dichten von longitudinalen und vertikalen Geschwindigkeits-Komponenten trotzdem nicht von einem Inertial Subrange gesprochen werden.

Innerhalb der Canopy-Schicht ist die Turbulenz stark von der Stabilität der Ueberdach-Strömung abhängig. Insbesondere die Profile der vertikalen Geschwindigkeits-Varianzen und der turbulenten kinetischen Energie unterscheiden sich drastisch zwischen neutralen und stark instabilen Situationen. Der Luftaustausch zwischen der Canopy-Schicht und der darüberliegenden "freien" Strömung geschieht zu einem grossen Teil aufgrund von vereinzelt Luftstössen, die in die Strassenschlucht einzudringen vermögen. Darüber hinaus scheinen aufsteigende "Blasen" von warmer Luft aus der Strassenschlucht ebenfalls zum Luftaustausch beizutragen.

Abstract

The structure of Turbulence close to an urban surface is investigated in an experimental case study. For this purpose, measurements of almost two years duration on a tower located on the roof-top of a building and on another tower situated within the adjacent street canyon are used. Apart from the description of mean profiles of wind speed, temperature and specific humidity, the main emphasis of this study is put on the characterization of turbulence in the lowest two layers of the urban atmosphere (canopy layer and roughness sublayer). Two ultrasonic anemometers, used in various height configurations, provided the required turbulence data of the three wind speed components and temperature.

Due to the lack of a consistent theory for the description of turbulence in the considered height range, Monin-Obukhov similarity theory for the surface layer is often used in numerical models although the conditions for which it is valid are clearly not met. The results of the present study are therefore also discussed with a view to this aspect. The outstanding characteristic of turbulence in the roughness sublayer is found to be the decrease of Reynolds stress when approaching the "surface". At a height close to the zeroplane displacement height turbulent momentum transport vanishes on average. Pressure effects in the wake of single buildings lead to the break-up of the organized shear flow into smaller, less correlated eddies. Using the conditional sampling technique (quadrant analysis), the various contributions to the transport of momentum are investigated. Within the street canyon and directly above it, sweeps clearly dominate over ejections. The tendency to large, partly offsetting contributions from the four quadrants is increasing when approaching the "surface". The turbulent transport of sensible heat shows a more complex vertical structure due to the vicinity of the roof (heating and cooling).

If the concept of local scaling is applied, it is possible to adopt many of the semi-empirical functions evaluated for the inertial sublayer for the use in the roughness sublayer. Energy spectra for the velocity components and also cospectra for Reynolds stress and sensible heat flux are not only dependent on a single length scale (measurement height or mixed layer height), but are also determined by the building geometry. At all heights, the peak frequencies correspond to a wave length considerably smaller than observed over homogeneous terrain. Although the "-5/3" slope in the high frequency range of the spectra is preserved (even in the roughness sublayer), this constitutes no true inertial subrange since the ratio of vertical to longitudinal spectral densities does not approach the value $4/3$ as required by theory.

Within the canopy the structure of turbulence is strongly dependent on the stability of the flow above roof level. In particular, profiles of vertical velocity variance and turbulent kinetic energy vary significantly for near-neutral and strongly unstable situations. The exchange of air between the canopy and the roughness sublayer above is dominated by intermittent bursts that may penetrate into the canyon. In addition, it seems that also "bubbles" of warm canyon air contribute to the ventilation of a street canyon.