

Diss. ETH ex A

Dissertation ETH Nr. 9023

**Stationäre zweidimensionale Dichteströmungen bei kleinen Neigungen.
Einfluss der Reibung und der Tiefe**

**Abhandlung
zur Erlangung des Titels
Doktor der Technischen Wissenschaften
der
Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich**

**vorgelegt von
Daniel Benjamin Schläpfer
Dipl. Kulturingenieur ETH
geboren am 25. Februar 1957
von Herisau (AR)**

**Angenommen auf Antrag von:
Prof. Dr. T. Dracos, Referent
Prof. Dr. D. Imboden, Korreferent
Prof. Dr. E. Plate, Korreferent**



CatE

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt zweidimensionale, stationäre Dichteströmungen auf geneigten Ebenen. Unterströmungen langgestreckter, enger Stauhaltungen durch kaltes Flusswasser sind typische praktische Beispiele solcher Strömungsformen. Stauhaltungen weisen oft geringe Wassertiefen und kleine Sohlenneigungen auf. Unter solchen Bedingungen führt die Einmischung von Umgebungswasser in die abfließende Schicht zu beachtlichen Strömungen im Umgebungswasser in Richtung des Zuflusses; die Einmischung selbst wird massgeblich durch die Bodenrauigkeit bestimmt. Die Auswirkungen einer beschränkten Wassertiefe und der Bodenrauigkeit auf die Strömungsentwicklung sind demnach von besonderem Interesse.

Die durchgeführten Untersuchungen sind sowohl theoretischer als auch experimenteller Natur. Die Entwicklung eines mathematischen Modells ist in den Kapiteln 2 bis 5 abgehandelt. In Kapitel 6 sind der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und die Datenerfassung beschrieben. In Kapitel 7 schliesslich werden die erhobenen Versuchsergebnisse mit den Modellrechnungen verglichen.

Das mathematische Modell besteht aus drei Teilmodellen, einem integralen Zweischichtenmodell, einem Einmischmodell und einem Modell zur Beschreibung der Dämpfung des turbulenten Austausches in stratifizierten Strömungsverhältnissen.

Das integrale Zweischichtenmodell zur Vorhersage der Strömungsentwicklung in Hauptfliessrichtung wurde in Anlehnung an die Arbeit von Ellison und Turner (1959) entwickelt und betrachtet die Strömung zusammengesetzt aus zwei Bereichen, der abfließenden Dichteschicht und der Rückströmung im Umgebungswasser mit konstanter Dichte. Im Unterschied zu Ellison und Turners Modell erlaubt dieses aber auch die Berechnung der Umgebungsströmung. Den Herleitungen lagen die Aehnlichkeitsannahme und die Einmischhypothese nach Morton et al. (1956) zu Grunde. Ausserdem wurde das Umgebungswasser als reibungsfreie Flüssigkeit angenommen.

Die Ausbreitung der Strömung, charakterisiert durch Massstäbe für die Tiefe, den kinematischen Auftrieb und die Geschwindigkeit der abfließenden Schicht sowie die Geschwindigkeit der Rückströmung, lässt sich mit dem Integralmodell berechnen, sofern die darin enthaltenen Koeffizienten, allen voran der Einmischbeiwert, bekannt sind. Der Vorhersage dieser Grössen dient das erwähnte Einmischmodell. Ausgehend von der Untersuchung der Einmischung in freien und einseitig begrenzten, auftriebsfreien und auftriebsbehafteten, ähnlichen Scherströmungen in nichtstratifizierten und stratifizierten Verhältnissen, gelang es, durch Verknüpfung der einzelnen Speziallösungen, die Einmischung streng ähnlicher, geneigter Dichteströmungen zu modellieren. Die Herleitung basiert auf der Aehnlichkeitsannahme, der Annahme konstanter Wirbeldiffusivität und -zähigkeit in der freien Scherschicht der nichtstratifizierten Fälle, sinnvollen Profillannahmen in der Wandgrenzschicht sowie der Verwendung von Dämpfungsfaktoren an der Wirbeldiffusivität und -zähigkeit bei stratifikationsbedingter Verminderung des turbulenten Austausches quer zur Haupt-

strömungsrichtung.

Der dritte Modellteil dient der Bestimmung der angesprochenen Dämpfungsfaktoren. Die Vorstellung, dass sich eine Dichtestratifikation, unabhängig von der mittleren Strömung, immer gleich auf den turbulenten Austausch auswirkt, gestattete, das Problem an einer sehr einfachen Anordnung, einer eindimensionalen atmosphärischen Grenzschichtströmung auf horizontalem Grund mit konstantem turbulentem Auftriebs- und Impulsfluss in vertikaler Richtung zu untersuchen. Geeignete Vereinfachungen gemäss Monin (1965) und Ellison (1966) der allgemeinen Transportgleichungen sämtlicher Korrelationsgrössen der turbulenten Geschwindigkeits- und Dichteschwankungen führten auf ein einfaches Turbulenzmodell, bestehend aus rein algebraischen Gleichungen. Anhand eines umfangreichen Datenvergleichs mit Feldmessungen verschiedener Autoren in stabil und instabil geschichteten Verhältnissen, wurde das Modell geeicht. Als eines der Ergebnisse gingen die gesuchten Dämpfungsfunktionen hervor.

Zur Ueberprüfung des mathematischen Modells wurden Laborversuche in einer neigbaren, vorgängig mit Frischwasser gefüllten Rinne durchgeführt. Die Dichteströmungen wurden durch Einleitung gekühlten Salzwassers am oberen Rinnenrand erzeugt. Geschwindigkeitsmessungen in zwei sowie Temperaturmessungen zur Dichtebestimmung in vier Vertikalprofilen und einem Längenprofil lieferten die wesentlichsten Vergleichswerte. Ergänzt wurden diese Daten durch Auswertungen photographisch erfasster interner Farbfronten, aus welchen weitere Informationen bezüglich der Geschwindigkeit und der Zunahme der Abflusstiefe der Dichteströmung hervorgingen.

Die gemessenen und gerechneten Dichte- und Geschwindigkeitsverteilungen decken sich in den meisten Fällen recht gut. Einzig bei sehr schwachem Sohlengefälle, verbunden mit grosser Bodenreibung, stellten sich Differenzen zwischen vorhergesagten und gemessenen Dichteverteilungen des wandnahen Bereichs ein. Die Abweichungen lassen sich auf zu einschneidende Modellannahmen bezüglich der Dichteverteilung in der Wandgrenzschicht zurückführen.

Die Uebereinstimmung berechneter und aus den Messungen bestimmter Massstäbe für die Tiefe, den kinematischen Auftrieb und die Geschwindigkeit der Dichteströmung sowie der Geschwindigkeit der Rückströmung im Umgebungswasser ist ebenfalls in den meisten Fällen sehr gut. Einzig bei grösseren Neigungen, verbunden mit sehr geringer Bodenrauigkeit, wird die Einmischung durch das Modell überschätzt. Dies schlägt sich in einer Vorhersage eines zu grossen Schichtdickenwachstums, eines zu starken Abfalls des kinematischen Auftriebs sowie betragsmässig zu grossen Rückströmungsgeschwindigkeiten nieder.

Abstract

In the present study plane and steady density currents on inclines are analyzed. Similar flows can be observed, when cold rivers enter long and narrow reservoirs. In shallow reservoirs the entrainment of ambient water into the underflow induces a noticeable return flow in the upper fluid layer. For small slopes typical for reservoirs the entrainment is also increased by bottom shear. The present investigation focusses on the steady part of such flows, and considers the effects of the return flow in the ambient, and the effects of the bottom roughness on the entrainment.

The theoretical treatment of the problem is presented in the first part, chapter 2 to 5, of this study. A series of experiments were performed to verify the model predictions. Chapter 6 gives a description of the experimental facilities. In chapter 7 the experimental results are discussed and compared with the theory.

The mathematical model consists essentially of three parts: An integral two-layer model, an entrainment model and a turbulence model which describes the impact of stratification on the turbulent exchange.

The integral model considers the flow field as consisting of two layers, a dense underflow and a return flow in the ambient. It is set up along the lines suggested by Ellison and Turner (1959), but by accounting for a streamwise variation of the velocity in the upper layer. The model makes use of the similarity assumption and the entrainment hypothesis by Morton et al (1956). In addition, the flow in the upper layer is assumed to be inviscid. Provided that integral constants and the entrainment coefficient are known, the model allows predictions of the characteristic depth, density and velocity of the underflow as well as of the velocity in the return flow.

A new entrainment model was developed to predict these coefficients. First, the entrainment was determined for pure boundary layer flows and free shear layers with and without buoyancy under neutral and stably stratified conditions. A general entrainment relation resulted from the combination of the asymptotic solutions. The treatment of the free shear layers is based on the constant eddy viscosity/diffusivity concept. In order to take into account the influence of stratification for inclined flows, the eddy viscosity/diffusivity coefficients were multiplied with so called damping functions. Suitable profiles were assumed to calculate the boundary layer flows.

In the last model part, the turbulent exchange in a flow under stratified conditions was studied. The model is based on the assumption that the influence of the stratification on the turbulent exchange is nearly independent of the mean flow. This allowed to investigate a very simple flow, the atmospheric boundary layer on plane ground with constant turbulent momentum and buoyancy fluxes. According to Monin (1965) and Ellison (1966), the dynamical equations for all second moments of the velocity and density fluctuations could be reduced to a simple turbulence model consisting of a set of algebraic equations only. The model was then calibrated, based

on a large number of field data collected by different authors. Among the results of the model predictions are the two damping functions mentioned above.

In order to verify the theoretical calculations, a series of experiments has been carried out. In a tiltable channel, suspended in a larger tank filled with fresh water, dense underflows were produced by releasing an inflow of cold salt water into the channel. Velocity distributions were measured in two cross sections. Density profiles were determined from temperature measurements in four cross sections and along the bottom. Photographs from an internal dye front gave additional information on the growth and on the velocity of the underflow.

In most cases the calculated and measured density and velocity profiles coincide quite well. Only for very small slopes, combined with a high bottom roughness, differences between predicted and measured density profiles near the wall can be observed. This is due to inadequacies in the profile assumption.

The agreement between calculated and measured characteristic widths, densities and velocities of the underflow and the velocities in the upper layer is also satisfactory. Only in cases of steeper slopes in combination with low bottom roughness the model predicts excessive entrainment rates which also leads to an overestimate of the ambient velocity and of the growth rate of the underflow.