

Diss. ETH No. 14361

High-Resolution Simulations of Particle-Driven Gravity Currents

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZÜRICH

for the degree of
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

FRIEDER NECKER

Dipl.-Ing. (TU Karlsruhe)
born March 15th, 1970
citizen of Germany

Accepted on the recommendation of
Prof. Dr. L. Kleiser, examiner
PD Dr. C. Härtel, co-examiner
Prof. Dr. E. Meiburg, co-examiner
2001

Abstract

Three-dimensional high-resolution simulations of particle-driven gravity currents are conducted in order to examine fundamental aspects of such flows which could not be addressed in previous experimental, theoretical and numerical studies. Simplified prototype configurations are considered where a finite volume of particle suspension is released in a plane channel. Upon release, an intrusion front forms which travels along the lower wall. The study concentrates on dilute flows with small density differences between particle-laden and clear fluid, such that the Boussinesq approximation can be applied. Moreover, monodisperse particles are considered which have negligible inertia but a finite settling velocity, and which are much smaller than the smallest length scales of the buoyancy-induced fluid motion. For the mathematical description of the particulate phase, an Eulerian approach is employed with a transport equation for the local particle concentration. The governing equations are integrated numerically with a high-order mixed spectral/spectral-element technique, in order to capture all relevant time and length scales of the flow.

In the analysis, special emphasis is placed on the sedimentation of particles and the influence of particle settling on the flow dynamics. It is shown that the early stages of the flow development are essentially unaffected by particle sedimentation and develop very similarly to what is seen in density-driven gravity currents. On the other hand, the flow at later times is strongly influenced by the settling of particles. This is seen, for example, from the front speed which, after an initial transient phase, decays much more rapidly in a particle-driven gravity current than in a density-driven flow. Eventually, the particle-driven front comes to rest when all particles have settled. Concerning the accumulation of particles at the lower wall of the channel, it is shown that the mass flux of sedimenting particles steadily increases during the early flow stages, before decreasing rapidly at later times.

Fundamental to the motion of gravity currents is the conversion of potential energy into kinetic energy, which, in turn, is subject to viscous dissipation. A detailed analysis is made of the temporal evolution of potential and kinetic energy, along with the dissipative losses in the flow, and a direct comparison is undertaken of the respective results for density-driven and particle-driven currents. An important difference between these flows is that in particle-driven gravity currents energy is dissipated not only by macroscopic convective motion, but also by the microscopic Stokes flow around the particles. In the cases studied, up to 50% of the initially available potential energy is 'lost' due to particle settling.

Two-dimensional and three-dimensional computations are compared which reveal that, for the present configuration, a two-dimensional model can predict reliably the flow development at early times. However, concerning the long-time evolution of the flow, more substantial differences exist between 2D and 3D simulations. Finally, the issue of mixing between interstitial fluid (i.e. the fluid that initially carried the particles) and ambient fluid is addressed. It is shown that this mixing is strongly enhanced at later times, when all particles have settled and the stratification in the channel has disappeared.

Zusammenfassung

Partikelgetriebene Dichteströmungen werden mittels hochauflösender, dreidimensionaler numerischer Simulationen untersucht. Die Strömung wird in einem ebenen Kanal simuliert, in welchem anfangs eine senkrechte Trennwand schweres (partikelbeladenes) von leichtem

(klarem) Fluid trennt. Nach Entfernen der Trennwand entwickelt sich aufgrund der Schwerkraft eine Austauschströmung, bei der sich eine partikelbeladene Front entlang der unteren Wand des Kanals ausbreitet. Betrachtet wird der Fall geringer Dichteunterschiede zwischen partikelbeladenem und klarem Fluid. Die Partikel haben vernachlässigbare Trägheit und einen Durchmesser, der sehr viel kleiner ist als die kleinsten Längenskalen der in Gang gesetzten Strömung. Für die Beschreibung der Partikelphase wird ein Eulerscher Ansatz gewählt, der eine Transportgleichung für die lokale Partikelkonzentration verwendet. Die numerische Integration der Grundgleichungen geschieht mit Hilfe von hochgenauen numerischen Methoden, die auf spektralen Diskretisierungen und Spektralelemente-Verfahren basieren.

Die Simulationsergebnisse werden besonders im Hinblick auf die Sedimentation der Partikel und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Strömungsdynamik ausgewertet. Es wird gezeigt, dass die Strömungsverhältnisse zu frühen Zeiten praktisch nicht von der Sedimentation der Partikel beeinflusst werden und sich der partikelgetriebene nicht vom dichtegetriebenen Fall unterscheidet. Erst zu späteren Zeiten hat die Sedimentation der Partikel einen starken Einfluss auf die Strömung. Dies wird zum Beispiel an der Frontgeschwindigkeit deutlich, die nach einer Anfangsphase im partikelgetriebenen Fall sehr viel stärker abfällt als bei dichtegetriebenen Fronten. Wenn alle Partikel aussedimentiert sind, breitet sich die partikelgetriebene Front nicht weiter aus. An der unteren Wand des Kanals nimmt zu frühen Zeiten der Massenstrom aussedimentierender Partikel stetig zu, während spätere Zeiten durch eine starke Abnahme des Massenstroms gekennzeichnet sind. Von fundamentaler Bedeutung für Dichteströmungen sind die Umwandlung von potentieller in kinetische Energie sowie die Verluste durch viskose Dissipation. Die zeitabhängige Entwicklung der Energieumwandlung wird eingehend untersucht und Ergebnisse des partikelgetriebenen Falls werden mit dem dichtegetriebenen verglichen. Es zeigt sich, dass in der partikelgetriebenen Strömung Energie nicht nur in der makroskopischen konvektiven Fluidbewegung dissipiert wird, sondern auch in der mikroskopischen Umströmung der Partikel. In den betrachteten Fällen verursacht die mikroskopische Umströmung der Partikel einen "Verlust" von bis zu 50% der anfangs vorhandenen potentiellen Energie. Ein Vergleich zwischen zweidimensionalen und dreidimensionalen Simulationen zeigt, dass bei der vorliegenden Geometrie ein zweidimensionales Modell die Strömungsverhältnisse zu frühen Zeiten sehr gut beschreiben kann. Zu späteren Stadien der Strömung werden jedoch signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen zweidimensionaler und dreidimensionaler Simulationen deutlich. Schliesslich wird der Mischungsprozess des klaren Fluids mit dem Trägerfluid (Fluid, in dem anfangs die Partikel suspendiert waren) untersucht. Die Vermischung beider Fluide nimmt zu späten Zeiten stark zu, wenn alle Partikel aussedimentiert sind und im Kanal keine Dichteunterschiede mehr existieren.