

Diss. ETH No. 19656

**DIRECT AND LARGE-EDDY
SIMULATION OF PARTICLE
TRANSPORT PROCESSES IN
ESTUARINE ENVIRONMENTS**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Rolf Henniger

Dipl.-Ing., Universität Stuttgart

born on November 1, 1978

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. L. Kleiser, examiner

Prof. Dr. E. Meiburg, co-examiner

Dr. D. Obrist, co-examiner

Abstract

The present work is concerned with accurate numerical predictions of the particle transport, settling and deposition in estuaries and adjacent regions of the continental shelves as there are still huge uncertainties in answering fundamental questions arising in this context. Generally, we have to consider all relevant physical effects which involves especially the details of the freshwater/saltwater interaction, the particle transport and settling, the occasional formation of bottom-propagating turbidity currents and the particle deposition on the ground. To obtain accurate and reliable results, we perform Direct Numerical Simulations (DNS) where all turbulent scales are resolved. However, this approach is limited to at most laboratory-size model configurations. In case of more realistic flows, we cannot afford the resolution of the smallest scales such that we need to model them as done in so-called Large-Eddy Simulations (LES).

To this end, we develop a combined DNS/LES tool which is well suited for the application to such flow problems. Because such simulations require high spatial and temporal resolutions and thus large computing resources, we have to account for the (massively) parallel architecture of modern (super-)computers. This restriction influences the choices of the discretization and of the solver for the elliptic problems which arise from the incompressibility constraint. The simulation code is thoroughly validated and tested by means of DNS of different transitional and turbulent channel flows.

Next, we perform several DNS of (idealized) turbidity currents which are mainly intended to validate the implementation of the particle model. Also a DNS of a flow in a much larger configuration is conducted to analyze the impact of the Grashof number. Subsequently, we employ the solver for DNS of particle transport and settling in different laboratory-scale (model) estuaries. We introduce typical flow configurations and analyze the flows therein with the focus on settling-enhancing effects. The results permit a deeper insight into a particle settling mode which is related to the interaction of turbulence, convective mixing and buoyancy effects. The impact of different flow parameters is studied as well.

In a final step, we adapt and implement the so-called Relaxation-Term subgrid-scale model to obtain the LES capability. We apply the LES approach to the previous DNS configurations with the objective to reproduce the results at lower costs, comparable accuracy and still high reliability. This requires a detailed survey of the various model parameters with respect to their influence on the results.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit genauen numerische Vorhersagen des Transports, des Absinkens und des Ablagerns von Partikeln in Flussmündungen und in angrenzenden Gebieten der Kontinentalschelfs, da im Bezug auf diese Aspekte große Unsicherheiten in der Beantwortung fundamentaler Fragestellungen bestehen. Im Allgemeinen müssen wir hierbei alle relevanten physikalischen Effekte berücksichtigen, was insbesondere die Interaktion von Süß- und Salzwasser, den Transport und das Absinken der Partikel, die gelegentliche Entstehung von bodennahen Suspensionströmen sowie das finale Ablagern der Partikel auf dem Meeresboden einbezieht. Um genaue und zuverlässige Ergebnisse zu erzielen, verwenden wir hauptsächlich Direkte Numerische Simulationen (DNS), bei denen alle turbulenten Skalen vollständig dargestellt werden. Diese Methode ist allerdings auf eher kleine, maximal laborgroße Konfigurationen beschränkt. Bei Simulationen von realistischeren Strömungen wird die Darstellung der kleinsten Skalen allerdings zu aufwändig, so dass diese modelliert werden müssen, wie etwa in sogenannten Large-Eddy Simulationen (LES).

Mit dieser Zielsetzung entwickeln wir in dieser Arbeit ein kombiniertes DNS/LES-Werkzeug, das für die Anwendung auf solche Strömungsprobleme gut geeignet ist. Weil Simulationen dieser Art sehr hohe räumliche und zeitliche Auflösungen und damit auch große Rechenkapazitäten benötigen, muss dabei insbesondere die massiv-parallele Architektur moderner (Super-)Computer berücksichtigt werden. Diese Anforderung beeinflusst sowohl die Wahl der Diskretisierung also auch die des Lösers für die elliptischen Probleme, die aus der Inkompressibilitätsbedingung resultieren. Das Computerprogramm wird anhand von verschiedenen DNS transitioneller und turbulenter Kanalströmungen sorgfältig validiert und getestet.

Als nächstes führen wir mehrere DNS (idealisierter) Suspensionsströme durch, um in erster Linie die Implementierung des Partikelmodells zu validieren. Darauf aufbauend wird auch die Strömung in einer deutlich größeren Konfiguration simuliert, um den Einfluss der Grashof-Zahl zu analysieren. Anschließend verwenden wir den Löser für DNS verschiedener (Modell-)Flussmündungen, die ungefähr die Größe von Laborexperimenten haben. Wir führen typische Strömungskonfigurationen ein und analysieren die Strömungen darin vor allem in Bezug auf Effekte, die das Partikelabsinken begünstigen. Die Resultate lassen insbesondere einen tieferen Einblick in einen Absinkmechanismus zu, der auf der

Interaktion von Turbulenz, konvektiver Mischung und Auftriebseffekten beruht. Auch der Einfluss verschiedener Strömungsparameter wird untersucht.

Im letzten Schritt adaptieren und implementieren wir das sogenannte Relaxationsterm-Feinstrukturmodell für eine Erweiterung auf LES. Wir wenden den LES-Ansatz auf die vorherigen DNS-Konfigurationen mit dem Ziel an, jene Resultate bei geringerem Aufwand, vergleichbarer Genauigkeit und immer noch hoher Zuverlässigkeit zu reproduzieren. Das wiederum erfordert eine detaillierte Studie über den Einfluss der verschiedenen Modellparameter auf die Resultate.