

Advances in Geophysical and Environmental  
Mechanics and Mathematics

**AGEM<sup>2</sup>**

Kolumban Hutter  
Yongqi Wang  
Irina P. Chubarenko

# Physics of Lakes

Volume 3: Methods of Understanding  
Lakes as Components of the Geophysical  
Environment

 Springer

# Advances in Geophysical and Environmental Mechanics and Mathematics

---

Series Editor: Professor Kolumban Hutter

For further volumes:  
<http://www.springer.com/series/7540>

# Board of Editors

## **Granular Flows, Gravity Mass Flows, Snow Avalanches, Debris flows, Landslides, Snow Cover Metamorphosis**

Dr. sc. techn Perry Bartelt  
WSL Institute for  
Snow and Avalanche Research  
Flüelastrasse 11  
CH-7260 Davos Dorf, Switzerland  
bartelt@slf.ch  
Phone: +41 81 4170 251

## **Hydraulics, Geophysical Fluid Mechanics, Morphohydraulics**

Prof. Dr. Hervé Capart  
Department of Civil Engineering  
National Taiwan University  
Taipei 106, Taiwan  
hcapart@yahoo.com  
Phone: +886 2 3366 4277

## **Continuum Thermomechanics, Theory of Materials, Numerical Mechanics**

Prof. Dr.-Ing. Stefan Diebels  
Lehrstuhl für Technische Mechanik  
Universität des Saarlandes  
Campus A4 2, 1. OG  
66123 Saarbrücken, Germany  
s.diebels@mx.uni-saarland.de  
Phone: +49681 302-2887

## **Snow Mechanics, Gravity Mass Flows, Geomechanics**

Prof. Dr. Wolfgang Fellin  
Institut für Infrastruktur  
Arbeitsbereich für Geotechnik und Tunnelbau  
Technikerstrasse 13  
A-6020 Innsbruck, Austria  
Wolfgang.Fellin@uibk.ac.at  
Phone: +43 512 507 62372

## **Seismology, Inverse Theory, Wave Propagation, Tomography, Elasticity Theory**

Prof. Dr. rer. nat. Andreas Fichtner  
Institut für Geophysik  
Professur für rechner-gestützte Seismologie  
ETHZ NO H 51.3  
Sonneggstrasse 5  
8092 Zürich, Switzerland  
Andreas.Fichtner@erdw.ethz.ch  
Phone: +41 44 632 2597

## **Glaciology, Ice Sheet and Ice Shelf Dynamics, Planetary Ices**

Prof. Dr. Ralf Greve  
Institute of Low Temperature Science  
Hokkaido University  
Kita-19, Nishi-8, Kita-Ku  
Sapporo 060-0819, Japan  
greve@lowtem.hokudai.ac.i  
<http://www.ice.lowtem.hokudai.ac.jp/~greve/contact.html>.

## **Aeolian Transport, Sediment Transport, Granular Flow**

Prof. Dr. rer.nat. Hans J. Herrmann  
Institut für Baustoffe  
Departement Bau, Umwelt und Geomatik  
HIF E12/ETH Hönggerberg  
8093, Zürich, Switzerland  
hjherrmann@ethz.ch  
Phone: +41 44 633 2701

## **Granular Matter, Multi-Scale Mechanics**

Prof. Dr. rer. nat. Stefan Luding  
Multi-Scale Mechanics (MSM)  
Universiteit Twente (UT), CTW, MESA+TS  
P.O. Box 217  
NL-7500AE, Enschede, The Netherlands  
S.luding@utwente.nl  
Phone: +3153 489-42112

## **Glaciology, Ice Modeling (sheets, shelves)**

Prof. Dr. rer. nat. Angelika Humbert  
Alfred Wegener Institute, Am Alten Hafen 26/gebäude D3400  
27568 Bremerhaven, Germany  
angelika.humbert@awi.de  
Phone: +49(471)4831-1834

## **Solid-Fluid Mixtures, Geomaterials, Numerics, Nonlinear Geophysics**

Prof. Dr.-Ing. Holger Steeb  
Mechanics, Continuum Mechanics  
Ruhr-University Bochum  
Universitätsstr. 150  
44780 Bochum, Germany  
holger.steeb@rub.de  
Phone: +49 234 32 23080

## **Geomorphological Fluid Mechanics**

Prof. John Swenson, Ph. D.  
Department of Geological Sciences  
University of Minnesota at Duluth  
229 Heller Hall 1114 Kirby Drive  
Duluth, MN, 55812, USA  
jswenso2@d.umn.edu  
(218) 726-8385

## **Debris Flows, Landslides, Geomorphological Fluid Mechanics**

Assoc. Prof. Dr.-Ing. Yih-Chin Tai  
Department of Hydraulic and Ocean Engineering  
National Cheng Kung University  
No. 1. University Road  
Tainan City 701, Taiwan  
yctai@mail.ncku.edu.tw  
Phone: +886-6-2757575 63260

## **Physical Oceanography and Limnology, Waves in the Ocean and in Lakes, Computational Fluid Dynamics**

Dr. Vasyl Vlasenko  
School of Marine Science and Engineering  
Plymouth University  
Room 109, Reynolds  
Drake Circus, Plymouth, Devon PL4 8AA, UK  
vasyl.vlasenko@plymouth.ac.u  
Phone: +44 (0)1752 584724

Kolumban Hutter · Yongqi Wang ·  
Irina P. Chubarenko

# Physics of Lakes

Volume 3: Methods of Understanding  
Lakes as Components  
of the Geophysical Environment



Prof. Dr. Kolumban Hutter  
ETH Zürich  
c/o Versuchsanstalt für Wasserbau  
Hydrologie und Glaziologie  
HIT F43.2  
8093 Zürich  
ETH Hönggerberg  
Switzerland  
hutter@vaw.baug.ethz.ch

Prof. Dr. Yongqi Wang  
Chair of Fluid Dynamics  
Department of Mechanical Engineering  
Darmstadt University of Technology  
Otto-Berndt-Strasse 2  
64287 Darmstadt  
Germany  
wang@fdy.tu-darmstadt.de

Dr. Irina P. Chubarenko  
Russian Academy of Sciences  
P.P. Shirshov Institute of  
Oceanology  
prospect Mira 1  
236000 Kaliningrad  
Russia  
irina\_chubarenko@mail.ru

ISSN 1866-8348                      ISSN 1866-8356 (electronic)  
ISBN 978-3-319-00472-3            ISBN 978-3-319-00473-0 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-319-00473-0  
Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London

Library of Congress Control Number: 2013938163

© Springer International Publishing Switzerland 2014

This work is subject to copyright. All rights are reserved by the Publisher, whether the whole or part of the material is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, reuse of illustrations, recitation, broadcasting, reproduction on microfilms or in any other physical way, and transmission or information storage and retrieval, electronic adaptation, computer software, or by similar or dissimilar methodology now known or hereafter developed. Exempted from this legal reservation are brief excerpts in connection with reviews or scholarly analysis or material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use by the purchaser of the work. Duplication of this publication or parts thereof is permitted only under the provisions of the Copyright Law of the Publisher's location, in its current version, and permission for use must always be obtained from Springer. Permissions for use may be obtained through RightsLink at the Copyright Clearance Center. Violations are liable to prosecution under the respective Copyright Law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, service marks, etc. in this publication does not imply, even in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protective laws and regulations and therefore free for general use.

While the advice and information in this book are believed to be true and accurate at the date of publication, neither the authors nor the editors nor the publisher can accept any legal responsibility for any errors or omissions that may be made. The publisher makes no warranty, express or implied, with respect to the material contained herein.

Printed on acid-free paper

Springer is part of Springer Science+Business Media (www.springer.com)

*This book series on Physics  
of Lakes is dedicated  
in memoriam to  
Professor Clifford H. Mortimer (1911–2010)  
and to  
Professor Lawrence A. Mysak  
mentors, teachers and friends*

## Preface to the Book Series

An integrated view of *Physics of Lakes* requires expert knowledge in different specialities which are hardly found in single scientists. Even in a team the overall subject must be restricted; this has also been done here, as we only treat in this book series the *geophysical aspects of fluid dynamics*. Being applied to very complicated natural objects and phenomena, this science traditionally uses three main complementary approaches: *theoretical description*, *field observation* and (numerical, laboratory and other kinds of) *modelling*. The present work extensively uses all three approaches, this way providing to the reader an opportunity to build a coherent view of the entire subject at once—from the introduction of governing equations to various field phenomena, observed in real lakes. Several features, we believe, will make the series of especial interest for a wide range of students and scientists of geophysical interest as well as specialists in physical limnology. Before plunging into the main focus of lake physics we start with a detailed introduction of the main mathematical rules and the basic laws of classical physics; this makes further work with equations and their solutions much easier for readers without solid knowledge in the common trade of the background of mathematics and physics of continuous systems—biologists, chemists, ecologists. These sciences are today the most active branches in limnology and are utterly needed for the development of modern society; thus, an easily available physical background for them cannot be overestimated. A feature of this treatise is a consolidated view expressed in its three books of a wide panoramic overlook of various lake phenomena, inherent in physical oceanography and a fairly thorough theoretical treatment of fluid mechanics. This way, the reader will find here both the mathematical background and general physical laws and considerations of natural phenomena with their driving mechanisms (waves, turbulence, wind action, convection, etc.), and also a zoo of field examples from many lakes on our Globe. Special attention is devoted to the dynamic response of lakes on their free surface and in their interior, perhaps best coined as the climatology in response to external driving mechanisms—wind action and seasonal input of solar energy. These subjects reflect the many years of professional interests of the authors.

The content of the books and the manner of the presentation are, of course, significantly influenced by the composition of the authors' team. Being professionals of slightly different branches of the same science (limnology, fluid dynamics, and oceanography), we tried to present lake physics in the most coherent way, extracting important kernels from all the mentioned fields. The differences in opinions, what procedures might be the optimal approach in presenting a certain topic have occasionally been quite extensive, requiring compromises, but we believe that the interference, rather than simple sum, of our knowledge contributed to an enhancement of the present product than would have been reached otherwise. An additional joy for us is the national composition of our international team; translation of this Preface from the English into our native languages can be directly understood by more than 70 % of the Earth population.

The subjects of this treatise on *Physics of Lakes*, divided into three volumes, cover the following topics:

## **Volume 1: Physics of Lakes—Formulation of the Mathematical and Physical Background**

It commences in the introduction with a general, word-only motivation by describing some striking phenomena, which characterize the motion of lake water on the surface, in the interior of lakes and then relate these motions to the density distribution. It lists a large number of lakes on Earth and describes their morphology and the causes of their response to the driving environment.

Because physics of lakes can not be described without the language used in mathematics and only limited college knowledge calculus and classical Newtonian physics is pre-assumed, these subjects are introduced first by using the most simple approach with utmost care, and continuing with increasing complexity and elegance. This process leads to the presentation of the fundamental equations of Lake Hydrodynamics in the form of 'primitive equations', to a detailed treatment of angular momentum and vorticity. A chapter on linear water waves then opens the forum to the dynamics in water bodies with free surface. Stratification is the cause of large internal motions; this is demonstrated in a chapter discussing the role of the distribution of mass in bounded water bodies. Stratification is chiefly governed by the seasonal variation of the solar irradiation and its transformation by turbulence. The latter and the circulation dynamics are built on input of wind shear at the surface. The early theory of circulation dynamics with and without the effect of the rotation of the Earth rounds-off this first book into the dynamics of lakes. A chapter on turbulence modelling and a further chapter collecting the phenomenological coefficients of water complete this book on the foundations of the mathematics and physics of lakes.

## Volume 2: Physics of Lakes—Lakes as Oscillators

The overwhelming focus in this volume of the treatise is on linear waves in homogeneous and stratified lakes on the rotating Earth. It comprises 11 chapters, starting with rotating linear shallow-water waves and demonstrating their classification into gravity and ROSSBY waves for homogeneous and stratified water bodies. This leads naturally to the analysis of gravity waves in unbounded, semi-bounded and bounded domains of constant depth: KELVIN, inertial and POINCARÉ waves, reflection of such waves at the end of a gulf and their description in sealed basins as so-called ‘inertial waves proper’. The particular application to gravity waves in circular and elliptical basins of constant depth then builds further confidence towards the treatment of barotropic and baroclinic basin wide wave dynamics affected by the rotation of the Earth. The classical analytical approach to the baroclinic motion in lakes is done using the two layer approximation. Recent observations have focused on higher order baroclinicity, a topic dealt with in two chapters. Whole lake responses are illustrated in barotropic and baroclinic wave analyses in Lake Onega<sup>1</sup> and Lake Lugano, respectively, with detailed comparisons of field data. The final three chapters are then devoted to a detailed presentation of topographic ROSSBY waves and the generalized CHRYSTAL equations and their identification by field observations.

## Volume 3: Physics of Lakes—Methods of Understanding Lakes as Components of the Geophysical Environment

Red line of this volume is the presentation of different methods of investigation of processes taking place in real lakes.<sup>2</sup> Part I is devoted to numerical modeling approaches and techniques, applied to demonstrate the response of a lake to wind

---

<sup>1</sup> In today’s Latin orthography from Russian, ‘Onega’ and ‘Onego’ are both in use. In this book we use ‘Onega’.

<sup>2</sup> This description of the contents of Volume 3 differs from the version stated in Volumes 1 and 2, which were written in June 2010. Since then, chapters on morphological dynamics of lakes have been added and topics on nonlinear internal oscillations, wave transformation, and meromixis have been published in a separate book [1]; also, investigations of convective exchange flows in basins with sloping bottom have been published [2]. Содержание Тома 3 несколько отличается от версии, представленной в Томах 1 и 2, опубликованных в июне 2010. С одной стороны, нами были добавлены главы о морфологической динамике озёр, с другой - часть материалов уже увидела свет в новых отдельных книгах: о нелинейных внутренних волнах, их трансформации и перемешивании в глубинных слоях (Hutter, K. (Ed.): *Nonlinear internal waves in lakes*. Springer Verlag, Berlin, etc., 2012) и об исследованиях обменных течений конвективной природы над подводными склонами (Чубаренко И.П.: *Горизонтальная конвекция над подводными склонами*. Калининград, Тэра Балтика. 256 стр. 2010). (in Russian).

forcing. It commences with the presentation of the barotropic and baroclinic current and temperature distributions due to different wind scenarios applied to Lake Zurich. This shows that depth integrated models predict an adequate current distribution only for extremely restricted situations. Moreover, multi-layered simulation models require careful selection of the distribution of layer depths and layer number as well as horizontal and vertical turbulent diffusivities to reach trustworthy stable results for current and temperature distributions. This experience makes a thorough application of numerical implementation of the governing equations compulsory. Numerical methods for convectively-dominated problems are compared. Moreover, different numerical treatments of advection terms and subgrid turbulence parameterization are studied, which indicate that shock capturing and total variation diminishing procedures are required, if metalimnion dynamics is to be realistically reproduced, including possible meromixis processes.

Traditional field measurement tools and methods of observation as well as laboratory experimental procedures are laid down in Part II. It includes the presentation of principles of operation of commonly used current, temperature, conductivity, pressure, and other sensors and devices applied in the field, as well as the discussion of advantages and limitations of common measuring methods like long-lasting registration using stationary or drifting buoys, sounding and profiling from the boat, sampling, etc. This part aims to help the reader to develop a clear understanding of *what* and *how* things are measured in lakes, to draw attention to questions of data accuracy, quality, reliability, to emphasize that field experiments should be carefully designed in accord with the researchers' ideas—i.e., to introduce to the science of field experimentation. The third chapter of this part introduces the ideas of dimensional analysis and similarity solutions, later applied to transport of sediment, which is suspended in the turbulent water and/or moves as detritus<sup>3</sup> at the lake bottom.

Part III is devoted to the dynamics of lakes as particle laden fluids and the transport of the bottom sediments leading to morphodynamic changes of the bathymetry in estuarine and possibly whole lake regions. The sediment may be eroded from the ground and become suspended; or suspended non-buoyant particles may be deposited at the ground. The mixture type equations in the lake domain are akin to those also describing the transport of species and nutrients in the lake water. The equations of motion describing the sediment and water transport on the curved basal bed are formulated relative to time-dependent curvilinear coordinates. Erosion and deposition of solid particles will contribute to morphological changes of the bathymetry, especially in estuaries close to river mouths. A simple one-dimensional theory explains the formation of hypo- and

---

<sup>3</sup> The term 'detritus' used in this book is to mean solid material—gravel—transported at the basal surface of a river or lake/ocean. This is the terminology used in geology and hydraulic engineering.

hyper-pycnal deltas, very well supported by laboratory experiments. The three-dimensional general formulation is new and open for validation and verification.

Combined presentation of numerical, field, and laboratory approaches builds a general view of present-day methods of physical investigations in limnology.

## Final Remarks

There is one change in the structure of Volume 3 as compared to Volumes 1 and 2, namely in Volume 3 each chapter has its own list of symbols. This was so made because some libraries now allow downloading of book chapters. Providing lists of symbols makes such documents more useful than otherwise.

With this third volume, this treatise on *Physics of Lakes* is declared to be abandoned by us. However, the subject as such cannot be viewed as closed. There are a wealth of topics that have not been treated at all or remain in an unfinished state. Mention was already made of *Non-linear internal waves in lakes* [1], of which their transformation or destruction through baroclinic instabilities with the metalimnion is responsible for the meromixis, i.e., strong mingling of phosphate, nitrate, oxygen, etc., from the epilimnion to the hypolimnion waters. Untouched has also been any serious attempt of a description of bio-chemical interactions with the physical processes. Quantification of the seasonal variation of the thermocline depends primarily on the interplay between the solar irradiation and the penetration of the turbulence into the water body. The attenuation of the coefficients of extinction of irradiation is coupled with the concentrations of the species (algies, nutrients etc.) through their bio-chemical reactions. An account on this in the German language is *Ein-dimensionales hydrodynamisches Modell in der Limnophysik. Turbulenz-Meromixis-Sauerstoff* [3]. These and a wealth of other topics could fill further volumes and will hopefully appear in the literature by experts of the younger generation.

Zürich, Switzerland, December 2012  
Darmstadt, Germany  
Kaliningrad, Russia

Kolumban Hutter  
Yongqi Wang  
Irina Chubarenko

## References

1. Hutter K (ed) (2012) *Nonlinear internal waves in lakes*. Springer, Berlin
2. Chubarenko I (2010) *Horizontal convection above underwater slopes*. Kaliningrad, Terra Baltica, p 256
3. Jöhnk K (2000) *Habilitationsschrift*, Technische Hochschule Darmstadt, p 235

# Vorwort zur Buchreihe

Eine übergeordnete Betrachtungsweise von *Physik der Seen* verlangt überdurchschnittliche Kenntnisse in unterschiedlichsten Spezialgebieten, die man kaum in einer einzelnen Person vereinigt findet. Selbst innerhalb eines Teams muss das übergeordnete Thema eingeschränkt werden; das ist auch hier getan worden, da wir in diesen Bänden der Seenphysik nur *geophysikalische Belange* der *Fluidodynamik* behandeln. Dieses Gebiet der Strömungsmechanik, hier angewendet auf ziemlich komplizierte natürliche Objekte und Phänomene, verwendet traditionell drei unterschiedliche, aber komplementäre Vorgehensweisen: *Theoretische Beschreibungen*, *Feldbeobachtungen* und (numerische, Labor oder anderweitige) *Modellierung*. Das vorliegende Werk macht ausgedehnt Gebrauch von all diesen Methoden und gibt dem Leser so die Gelegenheit, eine kohärente Sichtweise über das gesamte Gebiet zu erarbeiten von einer Einführung in die Grundgleichungen bis zu den unterschiedlichsten Phänomenen, die man in realen Seen beobachten kann. Wir glauben, dass verschiedene Merkmale dieses Werk von speziellem Interesse macht für eine breite Leserschaft von Studierenden und Wissenschaftlern mit geophysikalischem Interesse, wie auch für Spezialisten der physikalischen Limnologie. Bevor wir jedoch eintauchen in das Zentrum der Seenphysik, starten wir mit einer detaillierten Einführung in die mathematischen Voraussetzungen und die grundlegenden Gesetze der klassischen Physik; dieses Vorgehen macht das Arbeiten mit Gleichungen und ihren Lösungen wesentlich leichter für all jene Leser, welche keine gründlichen Kenntnisse in der üblichen Anwendung der Mathematik und Physik von kontinuierlichen Systemen mitbringen, in der Regel angewandte Biologen, Chemiker und Ökologen. Diese Wissensgebiete gehören heute zu den aktivsten Gruppen der Limnologie und bilden daher die Spezialwissensgebiete, die für die Entwicklung der modernen Gesellschaft von großer Bedeutung sind. Eine leicht zugängliche Darbietung des physikalischen Hintergrundes kann nicht überschätzt werden. Ein Hauptzug dieses Werkes ist eine über drei Bände verteilte Betrachtungsweise, welche eine Übersicht über verschiedene Phänomene in Seen schafft, welche der physikalischen Ozeanographie zugeordnet sind und auf einer streng theoretischen Handhabung der Methoden der Fluidmechanik beruhen. So findet der Leser hier sowohl den mathematischen Hintergrund, die allgemeinen physikalischen Gesetze und deren Anwendung auf die natürlichen Phänomene der Seenphysik mit ihren Anregungsmechanismen



(Wellen, Turbulenz, Windantrieb, Konvektion, etc.), wie auch eine ganze Palette von Feldbeispielen vieler Seen dieser Erde. Spezielle Beachtung findet die dynamische Reaktion von Seen auf ihrer freien Oberfläche und in ihrem Innern, das Klima des Sees als Antwort der äusseren Antriebsmechanismen Wind-Antrieb, jahreszeitlicher Eintrag der Sonnenenergie. Diese Thematik umfasst die jahrelange Erfahrung der beruflichen Interessen der Autoren.

Der Inhalt der Bücher und die Art und Weise der Darstellung des Stoffes sind offensichtlich stark von der Zusammensetzung des Autorenteam beeinflusst. Als Repräsentanten von (leicht) unterschiedlichen Spezialgebieten derselben Wissenschaft (Limnologie, Fluidodynamik und Ozeanographie), haben wir uns bemüht, die Seenphysik in kohärenter Weise darzustellen und wichtige Elemente aller oben erwähnten Gebiete zu extrahieren. Meinungsunterschiede, wie ein Thema am optimalsten darzustellen sei, waren gelegentlich recht heftig und verlangten Kompromisse; wir glauben hingegen, dass die Interferenz unseres Wissens im Gegensatz zu einer einfachen Summe mehr zur Qualität des gegenwärtigen Produktes beigetragen hat als dies andernfalls der Fall gewesen wäre. Ein zusätzlicher Gewinn für uns ist die internationale Zusammensetzung des Teams. Die Übersetzung dieses Vorwortes aus dem Englischen in unsere Muttersprachen kann direkt verstanden werden von mehr als 70 % der professionellen angesprochenen Bevölkerung dieser Erde.

Der Inhalt dieser Abhandlung über Seenphysik, aufgeteilt in drei Bände, umfasst die folgenden Themen:

## **Band 1: Physik der Seen – Formulierung des mathematischen und physikalischen Hintergrundes**

Der Band beginnt in der Einführung mit einer allgemeinen, formelfreien Motivation durch Beschreibung von gewissen, treffenden Phänomenen, welche die Bewegung des Seewassers an der Oberfläche und im Seeinnern betreffen und ordnen letztere der Verteilung der Dichte des Seewassers zu. Es wird zudem eine große Zahl von Seen auf dieser Erde gelistet und ihre Morphometrie charakterisiert, einschliesslich der Beschreibung ihrer Verhaltensweise auf Grund der Reaktion auf die antreibenden Mechanismen.

Da die Physik von Seen nicht ohne die mathematische Sprache beschrieben werden kann, und da nur gerade die einfachsten Kenntnisse der Hochschulanalyse und der klassischen Physik vorausgesetzt werden, erfolgt eine Einführung in diese Themen anfänglich in der einfachsten möglichen Art und mit größter Sorgfalt; mit wachsender Gewöhnung und fortschreitender Komplexität wird dann aber schrittweise auf eine elegantere Schreibweise übergegangen. Dieser Prozess führt so (i) zur Darstellung der Grundgleichungen der Seen-Hydrodynamik in Form der primitiven Gleichungen, die direkt den physikalischen Bilanzen entsprechen, und (ii) zu einer detaillierten Behandlung des Drehimpulssatzes und der

Wirbelbilanzgleichungen. Ein Kapitel über lineare Wasserwellen öffnet danach das Forum für die Dynamik von wassergefüllten Becken mit freier Oberfläche. Die Dichteschichtung ist Ursache für große interne Bewegungen, was in einem Kapitel demonstriert wird, in welchem die Rolle der Verteilung der Masse in endlichen Becken untersucht wird. Schichtung wird hauptsächlich durch die jahreszeitliche Variation der Sonneneinstrahlung und deren Umformung durch Turbulenz gesteuert. Letztere sowie die Zirkulationsdynamik werden durch den Eintrag von Windschub an der Seeoberfläche gesteuert. Die frühe Theorie der Zirkulationsdynamik mit dem, bzw. ohne den, Einfluß der Erdrotation schließen dann den Themenkreis dieses ersten Bandes der Seendynamik. Ein Kapitel über turbulente Modellierung und ein weiteres Kapitel, das die phänomenologischen Koeffizienten von Wasser behandelt, vervollkommen diesen ersten Band über die Grundlagen der mathematischen und physikalischen Behandlung der Physik von Seen.

## **Band 2: Physik der Seen – Seen als Oszillatoren**

Das hauptsächliche Thema in diesem zweiten Band der Monographie *Physik der Seen* betrifft lineare Wellen in homogenen und geschichteten Seen auf der rotierenden Erde. Er umfasst elf Kapitel und beginnt mit linearen Wasserwellen auf der rotierenden Erde. Es werden Klassifikationen eingeführt, welche die Schwerewellen und ROSSBY-Wellen im begrenzten homogenen und im Schichtmedium charakterisieren. Dies führt in natürlicher Weise zur mathematischen Analyse von Schwerewellen im unbegrenzten und endlichen Medium mit konstanter Tiefe: KELVIN, Inertial- und POINCARÉ Wellen, Reflektion solcher Wellen am Ende eines Golfes und deren Beschreibung in vollkommen geschlossenen Becken als sogenannte eigentliche Inertialwellen (inertial waves proper). Die Anwendung von Gravitationswellen in kreisförmigen und elliptischen Becken konstanter Tiefe führt in natürlicher Weise zur interpretationsgerechten Behandlung von barotroper und barokliner beckenweiter Wellendynamik auf der rotierenden Erde. Das klassische analytische Vorgehen zur Beschreibung der baroklinen Bewegung in Seen wird mit der Zweischichten-Approximation gemacht. Neuere Beobachtungen an Seen haben sich jedoch auf das Erfassen der höheren Baroklinizität konzentriert. Diesem Thema werden zwei Kapitel gewidmet. Beckenweite Dynamik wird anhand von barotropen und baroklinen Studien des Omega Sees und Luganersees vorgenommen und mit ausgedehnten in-situ Messungen verglichen. Die letzten drei Kapitel werden der detaillierten Darstellung topographischer ROSSBY Wellen und den verallgemeinerten CHRYSTAL Gleichungen und deren Identifikation anhand von Feldmessungen gewidmet.

### **Band 3: Physik der Seen – Methoden, die Seen als Komponenten des Geophysikalischen Umfeldes Verstehen**

Roter Faden dieses Bandes ist die Darstellung verschiedener Methoden zur Beschreibung dynamischer Prozesse, die in realen Seen auftreten.<sup>4</sup> Teil I ist der numerischen Modellierung und Software-Varianten gewidmet, um aufzuzeigen, wie Seen auf den Eintrag von Windkräften reagieren. Er beginnt mit der Darstellung von barotropen und baroklinen Strömungs- und Temperaturverteilungen im Zürichsee, wie sie bei verschiedenen Windszenarien entstehen. Es wird klar, dass tiefengemittelte Modelle nur unter extrem einschränkenden Bedingungen zutreffende Strömungsverteilungen erzeugen. Es zeigt sich auch, dass Mehrschichten-Modelle nicht nur eine sorgfältige Auswahl der Verteilung der einzelnen Schichten und deren Dicke und somit auch ihrer Gesamtzahl verlangen, sondern ebenso sorgfältige Wahl der horizontalen und vertikalen turbulenten Diffusivitäten, wenn vertrauenswürdige, stabile Resultate für die Strömungs- und Temperaturverteilungen erhalten werden sollen. Diese Erfahrung macht eine sorgfältige numerische Implementierung zu einer absoluten Notwendigkeit. Daher werden verschiedenen numerische Approximationsmethoden untereinander verglichen. Zu diesem Zwecke werden verschiedene Parametrisierungen der advektiven Terme und der Turbulenz untereinander verglichen, was aufzeigt, dass stoßerfassende und total variation diminishing (TVD) finite Differenzenverfahren nötig sind, wenn die Strömungsdynamik im Metalimnion realistisch nachvollzogen werden soll, einschließlich möglicher Meromixis Szenarien.

In Teil II werden klassische Messgeräte und Methoden der Feldbeobachtung dargelegt. Darin sind die Darstellung von Funktionsweisen gewöhnlich verwendeter Strömungs-, Temperatur-, elektrischer Leitfähigkeits-, Druck- und anderer Sensoren, die im Feld zum Einsatz kommen, eingeschlossen. Desgleichen werden die Vorteile und Einschränkungen verwendeter Messmethoden diskutiert; hierzu gehören z. B. die lanzeitige Registrierung mit Hilfe von stationären, bzw. driftenden Boyen sowie das Loten und Profilieren vom Boote aus. Dieser Teil soll dem Leser helfen, ein klares Verständnis zu entwickeln, was und wie, welche physikalischen Größen in einem See gemessen werden; es soll seine Aufmerksamkeit auf Fragen der Genauigkeit von Daten, ihre Qualität und Verlässlichkeit gelenkt werden, um zu betonen, dass Feldexperimente sorgfältig geplant werden sollen im Einklang mit den Ideen der involvierten Forscher. Ein weiteres Kapitel dieses zweiten Teiles führt in die Methoden der Dimensionsanalyse, Ähnlichkeit und Modelltheorie ein, mit der Absicht, Seeströmungsprozesse der Natur auf Laborgrösse abzubilden.

---

<sup>4</sup> Die folgende Beschreibung des Inhaltes von Band 3 unterscheidet sich von der Version, wie sie in den Bänden 1 und 2 erschien und im Jahre 2010 verfasst wurde. In der Zwischenzeit sind Kapitel über Morphodynamik von Seen hinzugekommen; zugleich ist zum Thema nichtlineare interne Schwingungen, Transformation von Wellen und Meromixis ein Buch herausgekommen [1]. Desgleichen ist ein Buch über Laboruntersuchungen zum konvektiven Strömungsaustausch in Becken mit geneigtem Boden herausgekommen [2].

Teil III ist dem Thema des Sedimenttransportes in Seen gewidmet, wie er als suspendierte Partikel unterschiedlicher Größe im turbulenten Seewasser oder als Schicht bewegten Granulates am Boden eines Sees auftreten kann. Das Sediment kann vom Boden erodiert und im Seewasser suspendiert werden; oder suspendiertes, vom Auftrieb reduziertes schweres Material kann am Seegrund abgelagert werden. Die Mischungsgleichungen, die für dieses mit Partikeln befrachtete Wasser zur Anwendung kommen, sind den Transportgleichungen von Lösungsstoffen im Seewasser ähnlich. Die Bewegungsgleichungen, die den Sediment- und Wasser-Transport entlang dem gekrümmten, aber bewegten basalen Bett beschreiben, werden in, der Topographie folgenden, Koordinaten geschrieben. Erosion und Absetzung von festen Partikeln tragen zur Veränderung der Bodentopographie bei, insbesondere in Nähe von Flußmündungen. Die einfachste ein-dimensionale Theorie erklärt die Bildung von hypo- und hyperpyknischen Deltas, die sehr genau in Laborexperimenten verifiziert werden. Demgegenüber ist die volle drei-dimensionale Formulierung der Seeströmung unter Einschluß der Bewegung von Detritus und suspendiertem Granulat neu und offen gegenüber Validierung und Bestätigung.

Kombinierte Behandlung von numerischen Methoden und Feld- sowie Laborexperimenten bilden heutzutage das gewohnte Vorgehen bei Untersuchungen physikalisch-limnologischer Fragestellungen.

## Letzte Bemerkungen

Band 3 von *Physics of Lakes* unterscheidet sich in seiner Struktur von den Bänden 1 und 2 dadurch, dass in ihm jedes Kapitel seine eigene Symbolliste aufweist. Diese Änderung ist durchgeführt worden, weil gewisse Bibliotheken einzelne Kapitel der elektronischen Buchversion herunterzuladen gestatten. Mit der Symbolliste sind solche Dokumente wertvoller.

Mit diesem dritten Band wollen wir die Reihe *Physics of Lakes* aufgeben und schließen. Das Thema als solches kann jedoch nicht als abgeschlossen betrachtet werden. Es gibt immer noch eine stattliche Zahl von Themen, die nicht berücksichtigt werden konnten oder in unvollendetem Zustand verlassen wurden. Das Buch 'Nonlinear internal waves in lakes' [1], in welchem Umwandlung von Wellen oder ihre Vernichtung durch barokline Instabilität, besonders im Metalimnion, behandelt werden, ist für die Meromixis, d.h. für die Beständigkeit der hypolimnetische Mischung aufgrund starker Vermischung von Inhaltsstoffen, z. B. Phosphat, Nitrat, Sauerstoff, etc. vom Epilimnion ins Hypolimnion von Bedeutung. Unbehandelt blieb auch eine eingehendere Beschreibung der Wechselwirkung von biochemischen und physikalischen Prozessen. Die Quantifizierung der jahreszeitlichen Veränderung der Thermokline hängt primär von den Wechselwirkungen zwischen Sonneneinstrahlung und Einwirkung der Turbulenz in den Wasserkörper ab. Die Abnahme der Strahlung, ausgedrückt im Extinktionskoeffizienten, ist mit der Konzentration der biochemischen Komponenten (Algen, Nährstoffe, etc.) und deren biochemischen

Reaktionen verknüpft. Ein Werk in deutscher Sprache zu diesem Thema ist *Ein-dimensionales hydrodynamisches Modell in der Limnophysik. Turbulenz Meromixis-Sauerstoff* [3]. Diese und eine Vielzahl von Themen, könnten weitere Bände füllen. Es ist zu hoffen, dass diese durch Experten der jüngeren Generation angepackt werden.

Zürich, Switzerland, Dezember 2012  
Darmstadt, Germany  
Kaliningrad, Russia

Kolumban Hutter  
Yongqi Wang  
Irina Chubarenko

## References

1. Hutter K (ed) (2012) Nonlinear internal waves in lakes. Springer, Berlin
2. Chubarenko I (2010) Horizontal convection above underwater slopes. Kaliningrad, Terra Baltica, p 256
3. Jöhnk K (2000) Habilitationsschrift, Technische Hochschule Darmstadt, p 235

# Предисловие к серии

Интегральное представление физики озер требует глубокого знания целого ряда различных специальностей, что вряд ли может быть достигнуто одним ученым. Даже коллективу авторов столь общую тему пришлось ограничить: в этой монографии рассматриваются только *геофизические* аспекты *динамики жидкости*. Имея дело со сложными природными объектами и явлениями, физическая лимнология традиционно использует три взаимодополняющих подхода: *теоретическое описание*, *натурные наблюдения* и (численное, лабораторное и другие виды) *моделирования*. Представленная работа в значительной степени использует все три подхода, давая читателю таким образом возможность построить максимально полное и согласованное представление о предмете – от вывода основных уравнений до исследования разнообразных явлений, наблюдаемых в реальных озерах.

Некоторые особенности этой серии, мы надеемся, сделают ее особенно привлекательной для широкого круга студентов, исследователей геофизической гидродинамики, специалистов в физической лимнологии. Прежде чем погрузиться в описание собственно физики озер, мы начинаем с детального введения основных математических правил и основополагающих законов классической физики; это облегчит дальнейшую работу с уравнениями тем читателям, у кого нет специального образования в математике и физике сплошных сред – биологов, химиков, экологов. Именно эти области лимнологии сегодня развиваются наиболее активно и особенно нужны для развития современного общества; следовательно, доступность изложения для них физических основ трудно переоценить.

Характерной чертой этой серии является обобщенный подход к изложению материала, сочетающий широкий панорамный обзор явлений, присущий физической океанографии, с глубоким и тщательным теоретическим рассмотрением, свойственным механике жидкости. Таким образом, читатель найдет здесь и математические основы, и основополагающие физические законы, и рассмотрение конкретных природных явлений вместе с их движущими механизмами (волны, турбулентность, действие ветра, конвекция и т.д.), и широкий спектр примеров натурных наблюдений во многих озерах нашей планеты. Особое внимание уделяется динамическому отклику озер и их свободной поверхности на внешние факторы – действие ветра и сезонное поступление солнечной энергии, что обусловлено многолетним профессиональным интересом авторов.

Содержание книг и манера представления материала, конечно, существенно зависит от состава авторского коллектива. Будучи представителями разных школ и профессионалами в несколько различных аспектах одной и той же науки – в лимнологии, механике жидкости и океанологии -- мы пытались представить физику озер наиболее гармоничным образом, извлекая ценные зерна из каждой области знаний. Разница мнений о том, какой путь мог бы быть оптимальнее в представлении того или иного материала, была иногда довольно значительна, требуя компромиссов; мы искренне надеемся, что результатом явилась не простая сумма, а реальная

интерференция наших знаний, и финальный продукт от этого заметно выиграл. Еще один штрих к возникающей объемной картине добавляет национальный состав нашего интернационального коллектива: перевод этого Предисловия с английского на наши родные языки может быть непосредственно понят более чем 70% населения Земли.

Материал, изложенный в монографии **Физика Озер**, разделен на три тома:

### **ТОМ 1: Физика Озер – Математические и Физические Основы**

Введение начинается с описания поразительных явлений, связанных с движением воды в озере и на его поверхности; затем эти движения соотносятся с распределением плотности. Далее перечисляются наиболее крупные озера Земли, описывается их морфология и характеризуются основные причины их отклика на воздействие окружающей среды.

Поскольку физика озер не может быть описана без языка математики, а у читателя предполагаются только ограниченные школьные знания об исчислении и классической НЬЮТОНовой физике, эти области вводятся сначала максимально просто, а затем исследование продолжается с нарастающей сложностью и элегантностью. Этот процесс приводит к представлению фундаментальных уравнений Гидродинамики Озер в форме так называемых 'примитивных уравнений', вплоть до детального описания вращательного момента и завихренности. Затем обсуждение динамики вод в бассейнах со свободной поверхностью открывается главой о свойствах линейных волн. Присутствие стратификации является основным условием возникновения движений вод внутри озера; это демонстрируется в главе, обсуждающей роль распределения масс в ограниченных бассейнах. Стратификация вод в значительной степени управляется сезонными вариациями солнечной радиации и ее трансформацией турбулентностью. Последняя, так же как циркуляция вод, обусловлена главным образом действием ветра на поверхность. Изложение основ теории циркуляции вод с учетом и без учета влияния вращения Земли включает рассмотрение динамики вод в озерах. Главы о методах моделирования турбулентности и феноменологических свойствах воды заканчивают эту книгу об основах математики и физики озер.

### **ТОМ 2: Физика Озер – Озера как Осцилляторы**

Основная тема этого тома серии – линейные волны в однородных и стратифицированных озерах на вращающейся Земле. Он содержит 12 глав. Сначала рассматриваются линейные волны на мелкой воде во вращающейся жидкости и дается их классификация на гравитационные волны и волны РОССБИ в однородных и стратифицированных бассейнах. Это естественным образом приводит к анализу гравитационных волн в неограниченных, полугораниченных и ограниченных бассейнах с постоянной глубиной: волн КЕЛЬВИНа, инерционных волн и волн ПУАНКАРЕ, отражения этих волн от закрытого конца залива и их описания в закрытых бассейнах как так называемых 'собственно инерционных волн'. Приложение к гравитационным волнам в круглых и эллиптических бассейнах постоянной глубины продолжает обсуждение баротропной и бароклиной динамики волн во вращающемся бассейне. Классический аналитический подход к бароклиным движениям в озерах продемонстрирован с использованием двухслойной аппроксимации. Современные работы фокусируются на исследовании бароклиности более высоких порядков, что рассматривается в последующих двух главах. Отклик озера как целого

проиллюстрирован анализом баротропных и бароклинических волн в озерах Онежском и Лугано и сопровождается детальным сравнением с натурными данными. Последние четыре главы посвящены подробному анализу топографических волн РОССБИ и обобщенных уравнений КРИСТАЛа и их идентификации в натурных данных.

### **ТОМ 3: Физика озёр –**

#### **Методы исследования озёр в их геофизическом окружении<sup>5</sup>**

Красной нитью этого тома является идея представления различных методов исследования процессов, происходящих в реальных озёрах. Часть I посвящена подходам и техникам численного моделирования, приложенным к демонстрации отклика озера на ветровое воздействие. Она начинается с представления баротропных и бароклинических течений и распределений температуры воды, формирующихся в озере Цюрих в результате действия различных ветровых сценариев. Результаты показывают, что модели, интегрированные по глубине, дают адекватное распределение скоростей течений только в очень ограниченном числе ситуаций; при этом достижение достоверных и устойчивых результатов для полей течений и распределения температуры воды в многослойных моделях требует тщательного подбора распределения толщин слоёв и их числа, а также горизонтальных и вертикальных коэффициентов турбулентного обмена. Далее всесторонне обсуждаются варианты применения численной реализации основных уравнений движения и сравниваются численные методы моделирования процессов, в которых доминирует конвекция. Исследование различных численных интерпретаций членов адвекции и параметризации подсеточной турбулентности указывает, что для реалистичного воспроизведения динамики металимниона, включая возможные процессы перемешивания в нём, необходимо использование схемы сквозного счёта (shock-capturing) и схемы с ограничением потока (TVD).

Традиционные средства измерений и методы натурных наблюдений, а также процедуры лабораторного экспериментирования изложены в Части II. В ней представлены основные принципы действия наиболее используемых в натурных измерениях сенсоров и измерителей скорости течения, температуры, электропроводности, давления, оптических свойств воды, а также обсуждены преимущества и ограничения традиционных методов исследования, таких как долговременная регистрация с использованием стационарных или дрейфующих буёв, зондирование и профилирование с судна, отбор проб и т.п. Цель этой части - помочь читателю выработать ясное понимание того, *что и как* измеряется в озёрах, привлечь внимание к вопросам точности, качества, надёжности данных, подчеркнуть, что натурный эксперимент должен быть тщательно спланирован в соответствии с конкретными идеями исследователя – т.е., ввести его в науку натурального экспериментирования. Третья глава этой части посвящена идеям анализа подобия и размерностей, применяемых затем к транспорту осадка, который взвешен в турбулентной среде и/или движется, подобно детриту на дне озера.

---

<sup>5</sup> Содержание Тома 3 несколько отличается от версии, представленной в Томах 1 и 2, опубликованных в июне 2010. С одной стороны, нами были добавлены главы о морфологической динамике озёр, с другой - часть материалов уже увидела свет в новых отдельных книгах: о нелинейных внутренних волнах, их трансформации и перемешивании в глубинных слоях (Hutter, K. (Ed.): *Nonlinear internal waves in lakes*. Springer Verlag, Berlin, etc., 2012) и об исследованиях обменных течений конвективной природы над подводными склонами (Чубаренко И.П.: *Горизонтальная конвекция над подводными склонами*. Калининград, Тэрра Балтика. 256 стр. 2010).



Часть III посвящена динамике озёрных вод как жидкостей, нагруженных осадком, и транспорту донных осадков, приводящему к морфодинамическим изменениям батиметрии в эстуарийных областях, а, возможно, и во всём озере. Осадок может взмучиваться со дна, переходя во взвесь, или взвешенные неплавучие частицы могут снова осаждаться на дно. Уравнения движения такой смеси в области-озере схожи с теми, которые описывают транспорт питательных веществ и частиц в озёрной воде. Уравнения движения, описывающие транспорт воды и осадка на искривлённом дне, формулируются в криволинейных координатах, зависящих от времени. Взмучивание и перераспределение твёрдых частиц приводит к морфологическим изменениям поля глубин, особенно в эстуариях близи устьев рек. Простая одномерная теория, очень хорошо подтверждающаяся результатами лабораторных экспериментов, объясняет формирование гипо- и гипер-пикнических дельт. Общая трёхмерная формулировка задачи нова и открыта для верификации и использования.

Совместное изложение численного, натурального и лабораторного подходов формирует единый общий взгляд на современные методы физических исследований в лимнологии.

### Заключительные Замечания

С выходом в свет этого третьего тома наш труд по *Физике Озёр* объявляется нами «законченным». Очевидно, однако, что подобная тема как таковая не может считаться закрытой. Дополнением могут служить уже упомянутые *Нелинейные внутренние волны в озёрах* (Hutter, K. (Ed.): *Nonlinear internal waves in lakes*. Springer Verlag, Berlin, etc., 2012), трансформация или разрушение которых путём бароклинной неустойчивости в металимнионе ответственны за перемешивание и обмен фосфатами, нитратами, кислородом и т.д. между водами эпи- и гипolimниона. Ещё одна важная область, рассмотренная в книге на немецком языке Jöhnk, K. D.: *Ein-dimensionales hydrodynamisches Modell in der Limnophysik. Turbulenz-Meromixis-Sauerstoff* (Habilitationsschrift. Technische Hochschule Darmstadt, 235 p., 2000), это количественное описание сезонных изменений глубины залегания термоклина. Эта глубина зависит, прежде всего, от интенсивности приходящей солнечной радиации и глубины проникновения турбулентности в воду. Ослабление коэффициента проникновения радиации связано с концентрацией примесей (взвешенных частиц, а также водорослей, растворённых питательных веществ и т.п.) и зависит от их биохимических реакций. В целом, имеется множество вопросов, которые вообще не были затронуты или остались в незавершённом виде. Незатронутой осталась и тема описания биохимических взаимодействий с физическими процессами. Эти и многие другие вопросы могли бы составить содержание дальнейших томов, которые, будем надеяться, выйдут из-под пера экспертов более молодого поколения.

Цюрих, Швейцария  
Дармштадт, Германия  
Калининград, Россия  
октябрь 2012

Колумбан Хуттер  
Йонгки Ванг  
Ирина Чубаренко

# 本书系列序言

湖泊物理学的综述，需要本领域不同专业的知识，这对于一个单独著述的学者是很难兼备的。甚至对于三人作者团队，我们也必须限制所著述研究的范围。本书系列专注于地球物理学的流体动力学研究。目前科学界对复杂自然现象的研究，通常采用三种互补的研究方法，即：理论描述，场观测和(数值的，试验的和其它方式的)模拟。本专著亦充分运用这三种方法，以期提供给读者一个机会，从理论方程的引入到真实湖泊中所观看到的各种自然现象，建立一套对该领域清晰连贯的看法。我们相信本书系列的一些特色主题将吸引湖泊物理学专家们，以及众多对地球物理学有特别兴趣的学生和学者。

在进入湖泊物理的核心之前，我们先从详细的数学前提和基本物理定律的引入开始，这将使进一步的方程建立及求解变得容易理解，特别是对生物学家，化学家，生态学家而言，而他们从事的正是目前湖泊物理学研究中最具活力并对现代社会的发展深具影响的领域。在这些科研学者看来是高深的物理知识应成为容易利用的工具。本书系列分为三部，目的是要获得对湖泊中各种物理现象的一个全面了解。所采用的方法是建立在对流体力学精确的理论基础上。读者可以从中找到相关的数学基础，普遍的物理定律，也包括他们在湖泊物理中对自然现象上的应用和理解，以及这些现象产生的力学原理(比如：水波，湍流，风驱动，对流等)，从而得到对湖泊物理场的一个宏观印象。湖泊对其自由表面和内部特性的动力学响应，以及对外部驱动，如风力和太阳能的季节性摄入气象现象的反应也会被专门讨论。这些方面均涉及作者多年的相关工作经验和兴趣。

本系列所涉及的内容及描述的方式受到作者组合的深刻影响。由于各自不尽相同的专业背景(湖泊动力学，流体力学和海洋力学)，我们尝试以一个协调一致的方式介绍湖泊物理学和萃取所有上面提及领域的重要基础。作者因意见不同，比如怎样更好地描述一个相关的主题，有时甚至会有激烈的争辩，亦需要相互妥协。然而我们相信与所有作者知识的简单叠加相比，这样的交叉互补对本专著的质量是一个重要的贡献。对我们来说，这其中更大的乐趣是一个国际合作团队的形成。本序言从英语到我们各自母语的翻译将使得地球上超过 70% 的人们可以直接理解。

这个三部曲的系列将涵盖湖泊物理学的以下方面：

## 第一部：湖泊物理学 ----- 数学和物理学基础的构成

本书将从一些相关现象的描述开始。这些现象与湖水在表面和内部的运动及水密度分布紧密相关。地球上许多湖泊被一一罗列，它们的地貌特征及对驱动力的响应特点也会被描述。

由于不通过数学语言，人们无法描述湖泊物理特性，并且我们假设读者仅具备最基本的大学数学解析和牛顿物理学基础，湖泊物理描述首先以一种尽可能简单的方式小心地被引入，其理论描述的复杂性将逐步增加。湖泊水力学的基本方程，物理学平衡和角动量守恒及涡流守恒方程随之被导出。关于线性波的章节将引出含有自由表面水体的动力学讨论。水的密度分层是产生强烈内部运动的原因，一个讨论在水体中质

量分布影响的章节将论证这个特性。这样的水密度分层主要是由于太阳辐射的季节性变化以及由湍流产生的输运所控制，后者以及水环流动力学是由风力在水表面的作用而产生。早期环流动力学理论的引入，包括和不包括地球自转影响，将带领读者进入这本书的湖泊动力学部分。本系列书的第一部将以阐述湍流模拟和水的表征参数为结束。

## 第二部：湖泊物理学 ----- 作为振荡器的湖泊

本书系列第二部将主要涉及受地球自转影响的匀质和密度分层湖泊中的线性波。包括 12 个章节，从在转动地球上的线性浅水波的讨论开始，引入波的分类，以便描述在均质和分层水体中的重力波和 Rossby 波。这将自然引出在无限大，半有限和有限的等深水域中重力波的分析：Kelvin，惯性 Poincare 波。也包括波在港湾端部的反射和在全封闭水域里惯性波的描述。重力波在圆形或椭圆形等深水域中的应用自然引入了在旋转地球上正压和斜压波的动力学处理。在湖泊中斜压运动将首先用二层近似这种经典方法来分析。观测主要集中在高阶斜压性的捕捉上。两个章节将涉及此内容。湖泊作为一个整体的特性，将通过在 Onega 湖和 Luganer 湖的正压和斜压运动的研究来讨论，相关测量数据将被仔细地对比。本部书最后四章将讨论地貌产生的 Rossby 以及它们在场观测中的识别。

## 第三部：湖泊物理学 ----- 了解湖泊的方法

本部书聚焦于介绍研究天然湖泊物理过程的不同方法。第一部分涉及数值方法和技术，被用来研究湖泊对外部风力的影响。它以苏黎世湖中由于风引起的正压和斜压流场和温度分布的数值模拟开始，进而认识到深度平均模型仅适用于模拟在很有限的特殊情况下的流场的分布。为了得到可信赖的稳定的流场和温度分布结果，多层模型不仅需要小心地选取层的分布、厚度及总层数，水平和垂直湍流粘滞系数的选取也同样重要。这个经验指出了细致数值处理的必要性。为此，针对对流项和扩散项不同的数值近似方法被加以对比。结果表明，为了模拟在大温度梯度剪切层的流体动力学特性，能够模拟物理量剧烈变化的总变化减少(Total Variation Diminishing)有限差分方法应被采用。

第二部分包括有关测量的方法和仪器。传统的在大规模场观测中使用的流速、温度、传导、压力和其它测量仪器的操作原理将会被介绍，其中也包括一些现代的测量仪器。同时常用测量方法的优缺点也被讨论，例如，针对借助于固定的和漂移的漂浮体的长周期记录，从船上的声测或链条测量等。这部分将帮助读者认识到，在湖泊中哪些物理量可以被测量。这将引导读者关注数据精度、质量及可靠性，从而强调测量应根据研究者的设想，周到细致地计划。在这部分的最后一章将引入量纲分析，相似性原理和模型理论，进而认识到，在自然界的湖泊流动现象的测量也可以在实验室规模实现。

第三部分是关于在湖泊中沉积物的输运。例如，它们怎样作为不同大小的漂浮颗粒，在湍流的湖水中或作为沿湖底移动的颗粒层出现。沉积物可以从湖底被卷起，进入水中成为漂浮物，或者在水中悬浮的重密度物质也可以在湖底沉积。用来描述这样携带颗粒的水的混合物方程，类似于在水中溶解物的输运方程。描述在弯曲的底面上沉积物和水输运的守恒方程，将使用时间相关的沿着地形的曲线坐标系。固体颗粒的卷入和沉积，将在湖底地貌的变化上加以考虑，这一点在河流的入口处尤为重要。简单的一维理论可以解释河流入口处三角洲的形成，这一点也已由实验室试验很好地被证实。新的三维模拟仍需要被论证。

场观测，数值和实验数据分析，构成了当今理解湖泊物理现象的一个通用方法。

## 后记:

与这部系列中第一卷和第二卷相比，在第三卷中一个结构上的变化是每一章有一个单独的符号表。原因是出版社和一些图书馆允许单章下载，这样的符号表将使得这种的文献更完整。

与该第三卷我们将结束本湖泊物理学系列，然而并不意味着所有相关内容已经都被包含在这个系列中。许多课题仍完全没有被涉及或者仍不完善。值得一提的是，由 K. Hutter 编辑的书“在湖泊中的非线性波”(Non-linear internal waves in lakes)。在这本书里，波的转换或由斜压不稳定产生的波的毁坏被讨论。温度梯度层季节性的变化主要取决于太阳辐射和在水体中湍流的相互作用。太阳辐射的衰减，又与水生物体的浓度及生物化学反应密切相关。一个相关的德语著作是：“湖泊学中的一维水动力模型：湍流-分层-氧物质”(“Ein-dimensionales hydrodynamisches Modell in der Limnophysik. Turbulenz-Meromixis-Sauerstoff” K. Jöhnk, TU Darmstadt, 2000)。

许多相关课题也许在进一步的书卷中加以总结，希望年轻一代的专家们可以完成这些工作。

瑞士 Zurich,  
德国 Darmstadt  
俄罗斯 Kaliningrad

K. Hutter  
王永奇  
I. Chubarenko

2012 年 12 月

# Acknowledgments

This book series is an outgrowth of more than three decades of research and teaching activities, and so, the institutions which supported these activities deserve an early word of appreciation. The precursors to the books started as lecture notes on hydrodynamics of lakes, in particular ‘Waves in the Ocean and Lakes’ which KH held since the early 1980s of the last century in the Department of Mechanics of Darmstadt University of Technology and for some years also at the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich to upper level students of Earth Sciences, Physics, Engineering, and Mathematics. Advanced courses, addressed to graduate students and postdoctoral fellows were also held on subtopics of lake physics at the International Centre for Mechanical Sciences (CISM) in Udine, Italy (1983) and published as ‘Lake Hydrodynamics’ [1] and as an Article in the Encyclopedia of Fluid Mechanics [2]. During the teaching and research years 1987–2006 considerable activity was devoted to physics of lakes, which is documented in the reference list for diploma theses [9–18], doctoral dissertations [19–21, 25–28], and habilitation theses [29, 30]. Out of this grew a particularly fruitful collaboration with Dr.-Ing.habil. YONGQI WANG (YW), who serves as second author of this book series. The incentive to write a broader text on the subject grew during a research project in the years 2001–2004 in the Physical Limnology Group of the Limnology Institute of Constance University, Germany in its Collaborative Research Projects ‘Transport Processes in Lake Constance’ and ‘Littoral of Lake Constance.’ In the field campaigns conducted by the Limnological Institute external research Institutes were also involved. Collaboration was initiated with Drs. IRINA (IC) and BORIS CHUBARENKO from the Atlantic Branch of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, who were leading in the conduction of systematic experiments, data analysis, and interpretation, mostly executed by IC, who joined the book series as third author.

In the mid 1970s of the last century KHs activities within the Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), at the Swiss Federal Institute of Technology, Zurich were shifted from glaciology to physical limnology. A new small research unit, dealing with Hydrodynamics of Lakes, was created. Generous financial support was provided. The group received expert advise from Prof. J. SÜNDERMANN at the University of Hannover (later Centre for Ocean and Climate Research, University of Hamburg), the late Prof. W. KRAUSS, formerly at the

Leibnitz Institute for Ocean Sciences, University of Kiel, and in particular, Prof. C. H. MORTIMER, Centre for Great Lakes Studies, the University of Wisconsin, Milwaukee. The synoptic field campaigns, conducted in Lake Zurich, 1978; Lake of Lugano, 1979 and 1984; Lake Constance, 1993 were greatly influenced by them. In the late 1970s and early 1980s Prof. MORTIMER spent several visiting assignments with the group, looking at the Lake Zurich data of 1978 and teaching us his outstanding graphical and statistical methods by which time series data, taken synoptically at several moorings with thermistor chains and current meters, could be combined to extract the physics and thus find an understanding of the underlying physical processes. Later, during the academic year 1982–1983, Prof. L. A. MYSAK, now Department of Atmospheric and Ocean Sciences at McGill University, Montreal, spent his sabbatical with the group; his influence was of equal significance as that of Prof. C. H. MORTIMER, but complementary. The papers on barotropic, baroclinic gravity, and Rossby wave dynamics in Alpine lakes, summarized in Volume 2 of this book series, owe much to Profs. C. H. MORTIMERS and MYSAKS advice. The work of the lake group at VAW has also greatly benefited from Dr. D. J. SCHWAB of NOAA's Great Lakes Environmental Research Laboratory (GLERL), Ann Arbor, Michigan, and from associations with doctoral students (now Dr.) GABRIEL RAGGIO [22], (now Dr. Prof.) Thomas Stocker [6, 24], (now Dr.) JOHANNES SANDER [23] and research assistant GORDON OMAN [3, 4] as well as Dr. Mike Laska [5] with whom gravity waves, topographic ROSSBY-waves, nonlinear internal waves in channels, and wind-induced currents in stratified and homogeneous Lake Zurich were studied. Moreover, a long and very fruitful early collaboration ought to be mentioned with a group of community college teachers in Lugano and Melide in the South (Italian) Canton of Switzerland: Dr. F. ZAMBONI, Dr. C. SPINEDI and Mr. G. SALVADÈ, with whom a very active collaboration existed between 1978 and 1987 on research of physical limnology in Lake of Lugano. It is seldom that such a collaboration between research professionals and 'hobby scientists' leads to a considerable surge of substantial results. Volume 2 of this treatise demonstrates in several chapters that this collaboration has been very fruitful.

In the Department of Mechanics at Darmstadt University of Technology in (1987–2006), the focus of lake research was on laboratory experimental techniques and theoretical-numerical methods of nonlinear internal waves and barotropic and baroclinic circulation dynamics. A fortunate association with the Limnological Institute of the University of Constance initiated by Prof. M. TILZER, first casually and later more formally, within the collaborative research programs 'Transport Processes in Lake Constance' and 'Littoral of Lake Constance', led by Profs. P. BÖGER and K. O. ROTHHAUPT, made it possible that fieldwork could be pursued, though at a somewhat moderate pace. Much of the fundamental work, which was done in Darmstadt in diploma (M.Sc), Ph.D. and Habilitation dissertations (cf. the mentioned references), has been motivated by this collaboration, as well as collaboration within this program with Drs. B. & I. CHUBARENKO from the Atlantic Branch of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, who had visiting assignments within this program. Throughout this 'Constance Period' Dr. E. BÄUERLE and (until 1997) Dr. K. JÖHNK [29] were

very supportive through their own work, but also in many helping discussions, fieldwork planning, and measuring assignments.

In addition to all the above-mentioned scientists Drs. N. STASHCHUK and V. VLASENKO, now at the School of Earth, Ocean and Environmental Sciences, Plymouth University, UK, ought to be mentioned as well. They spent more than 4 years, from 1999 to 2003, in the fluid mechanics research group within the Department of Mechanics at Darmstadt University of Technology, working on a project funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft, mainly concentrating on nonlinear wave dynamics and convection in the baroclinic ocean. Their work, which was begun already in their Ph.D. dissertations and V. VLASENKO's doctoral thesis (corresponding to the Habilitation or D. Sc. in the West) in the Institute of Oceanology, Ukrainian Academy of Sciences, Sevastopol, provided a substantial boost to the lake research of the small group at that time. Apart from a number of important peer reviewed papers in oceanographic periodicals the collaboration with them led to the book 'Baroclinic Tides—Theoretical Modeling and Observational Evidence' [8]. V. VLASENKO also took the initiative to formulate with KH an INTAS project (funded from 03.2004 to 02.2007, grant Nr. 03-51-37 28) on 'Strongly nonlinear internal waves in lakes: generation, transformation, mero-mixis' with collaboration of KH from Darmstadt, V. VLASENKO and N. STASHCHUK from Plymouth, Prof. V. MADERICH and associates (from the Institute of Mathematical Machine and System Problems) and Prof. V. NIKISHOV and associates (from the Institute of Hydrodynamics), both of the Ukrainian Academy of Sciences in Kiev, Prof. N. FILATOV (and associates) from the Northern Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Prof. E. PELINOVSKY (and associates), Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod. The work of this INTAS project is reviewed in a separate book, co-authored by the above-mentioned scientists, one reason why topics covered in that book are treated less systematically in this book series.

Our work has generously been supported through the years by the Institutions by which we were applied. KH and YW were additionally funded by the Swiss National Science Foundation (KH, 1975–1987); by the German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft) (KH and YW, 1987–2006); German Academic Research Exchange Service (Deutscher Akademischer Austauschdienst), Alexander von Humboldt Foundation (1987–2006); INTAS, Brussels (2004–2007). B. & I. Ch.'s visits to the Limnological Institute, Constance University were funded by the German Research Foundation; further collaboration was supported by the German Academic Exchange Service, by a Collaborative Linkage Grant by NATO and the Russian Foundation for Basic Research. To all these funding agencies we express our sincere thanks. Only such sources make it possible that research ideas can effectively and efficiently be put into practice.

In writing this treatise, KH as a retired member of Darmstadt University of Technology wishes to acknowledge the generosity offered by Profs. H.-E. MINOR and R. BOES for the free access to the institute's facilities at VAWETH, of which KH is not a member. He also thanks all the other members of VAW for their endurance to cope with his presence. He particularly acknowledges the help

received from BRUNO NEDELA, who drew a great many of the illustrations in the second volume from hand-drafted and scanned ‘originals.’ His input is explicitly visible in the quality of these illustrations. Moreover, Drs. E. VASILIEVA and S. KHTITAREVA helped in Texing some manuscript elements and the production of Indices, and S. USSELMANN produced the figures in Chaps. 23 and 24 from scans of two internal VAW reports.

As was done already for Volumes 1 and 2, Volume 3 of *Physics of Lakes* was reviewed by two referees prior to submission of the final text to the publisher. These reviews were conducted by Prof. J. SÜNDERMANN from Hamburg University and Prof. V. MADERICH from the Ukrainian Academy of Sciences in Kiev. We are grateful to these experts for having taken the burden of this responsible workload. It gave us support, and we now present this book to the reader with confidence.

Finally, we all thank Springer Verlag for the support, in particular Dr. C. BENDALL, Dr. A. BÜTTNER and A. OELSCHLÄGER, for their efforts in the publication process of the books.

Zürich, Switzerland  
Darmstadt, Germany  
Kaliningrad, Russia  
June 2010, Updated January 2013

Kolumban Hutter  
Yongqi Wang  
Irina Chubarenko

## References

### Books, Reports

1. Hutter K (1984) Lake hydrodynamics. CISM courses and lectures no 286, Springer, New York, pp 341
2. Hutter K (1987) Hydrodynamic modeling of lakes. In: Cheremesinoff (ed.) Encyclopedia of fluid mechanics. Gulf Publishing Company, Houston, 6, p 897–998
3. Oman G (1982) Das Verhalten des geschichteten Zürichsees unter äusseren Windlasten. Resultate eines numerischen Modells. Sein Vergleich mit Beobachtungen. Mitteilung Nr 61, der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie and der ETHZ p 185
4. Hutter K, Oman G, Ramming H-G (1982) Wind-bedingte Strömungen des homogenen Zürichsees. Mitteilung Nr 60 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie and der ETHZ, p 123
5. Laska M (1982) Characteristics and modelling of the physical limnology processes. Mitteilung Nr 54, der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie and der ETHZ, p 290
6. Stocker T, Hutter K (1985) A model for topographic Rossby waves in channels and lakes. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, No 76, 1–154
7. Stocker T, Hutter K (1987) Topographic waves in channels and lakes on the f-plane. Lecture notes on coastal and estuarine studies, Vol. 9. Springer, Berlin
8. Vlasenko V, Stashchuk N, Hutter K (2004) Baroclinic tides—theoretical modelling and observational evidence. Cambridge University Press, Cambridge



### Diploma (M.Sc.) Theses

9. Bauer G (1993) Windangeregte Strömungen im geschichteten Bodensee—Modellrechnungen und Feldbeobachtungen. Diplomarbeit am Fachbereich Mechanik, Darmstadt University of Technology, p 169
10. Franke V (1996) Physikalisch-biologische Kopplung zur Modellierung des Algenwachstums in Seen. Diplomarbeit am Fachbereich Mechanik, Darmstadt University of Technology, p 112
11. Güting P (1994) Windgetriebene Strömungen und Diffusion eines Tracers Diplomarbeit am Fachbereich Mechanik, Darmstadt University of Technology, p 61
12. Hüttemann H (1997) Modulation interner Wasserwellen durch Variation der Bodentopographie Diplomarbeit am Fachbereich Mechanik, Darmstadt University of Technology, p 110
13. Maurer J (1993) Skaleneffekte bei internen Wellen im Zweischichtenfluid mit topographischen Erhebungen. Diplomarbeit am Fachbereich Mechanik, Darmstadt University of Technology, p 112
14. Salzner E (1996) Energieeinträge in Seen. Diplomarbeit am Fachbereich Mechanik, Darmstadt University of Technology, p 98
15. Umlauf L (1993) Strömungsdynamik im Ammersee. Diplomarbeit am Fachbereich Mechanik, Darmstadt University of Technology, p 151
16. Wessels F (1993) Wechselwirkung interner Wellen im Zweischichtenfluid mit topographischen Erhebungen. Diplomarbeit am Fachbereich Mechanik, Darmstadt University of Technology, p 69
17. Weimar V (1995) Nichtlineare, durch Randoszillation angeregte Wellen im Zweischichtenfluid. Diplomarbeit am Fachbereich Mechanik, Darmstadt University of Technology, p 65
18. Zeitler M (1996) Vergleich zweier eindimensionaler Turbulenzmodelle der Seenphysik Diplomarbeit am Fachbereich Mechanik, Darmstadt University of Technology, p 112

### Doctoral Dissertations

19. Diebels S (1991) Interne Wellen—Ein Modell, das Nichtlinearität, Dispersion, Corioliseffekte und variable Topographie berücksichtigt. Doctoral Dissertation, Technische Universität Darmstadt, p 1–173
20. Güting P (1998) Dreidimensionale Berechnung windgetriebener Strömungen mit einem  $k$ — $\varepsilon$ -Modell in idealisierten Becken und dem Bodensee. Doctoral Dissertation, Technische Universität Darmstadt, p 1–343
21. Lorke A (1998) Turbulenz und Mischung in einem polymiktischen See—Untersuchungen auf der Basis von Mikrostrukturmessungen. Doctoral Dissertation, Technische Universität Darmstadt, p 1–85
22. Raggio G (1981) A channel model for curved elongated homogeneous lakes. Mitteilung Nr 49 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie and der ETHZ, p 1–222
23. Sander J (1990) Weakly nonlinear unidirectional shallow water waves generated by a moving boundary. Mitteilung Nr 105 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie and der ETHZ, p 1–199
24. Stocker T (1987) Topographic Waves. Eigenmodes and reflection in lakes and semiinfinite channels. Mitteilung Nr 93 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETHZ, p 1–170
25. Schuster B (1991) Experimente zu nichtlinearen internen Wellen großer Amplitude in einem Rechteckkanal mit variabler Bodentopographie. Doctoral Dissertation, TH Darmstadt vii + 1–165
26. Umlauf L (2001) Turbulence parameterisation in hydrobiological models for natural waters. Doctoral Dissertation, TU Darmstadt, XVI + p 1–228
27. Wang Y (1995) Windgetriebene Strömungen in einem Rechteckbecken und im Bodensee. Band I: Text 1–186, Band II: Abbildungen 187–432, Doctoral Dissertation, TH Darmstadt

28. Weis J (2001) Ein algebraisches Reynoldsspannungsmodell. Doctoral Dissertation, TU Darmstadt, p 1–111

**Habilitation Theses**

29. Jöhnk KD (2000) Ein-dimensionale hydrodynamische Modelle in der Limnophysik. Turbulenz-Meromixis-Sauerstoff. Fachbereich Mechanik, TU Darmstadt, XII + 1–235
30. Wang Y (2001) From lake dynamics to granular materials—two aspects of environmental mechanics. Department of Mechanics, Darmstadt University of Technology, p 277