

# Das ökologische Modell des Bodensees: Konzept, Simulation und Test an Langzeitdaten

Das Ökosystem Bodensee ist aus ethischer, ökologischer und wasserwirtschaftlicher Sicht eine wertvolle Ressource. Die nachhaltige Nutzung und ein sinnvoller Schutz des Bodensees setzen ein elementares Verständnis der Ökosystemdynamik des Bodensees voraus. Im Rahmen des Verbundprojektes BodenseeOnline wurde die Anwendung des 1-D-Modellsystems DYRESM-CAEDYM auf den Bodensee realisiert, welches wertvolle Einsichten in die Funktionsweise des Ökosystems liefert und somit das Fundament für Kurz- und Langzeitprognosen für den Bodensee bildet.

## 1 Einleitung

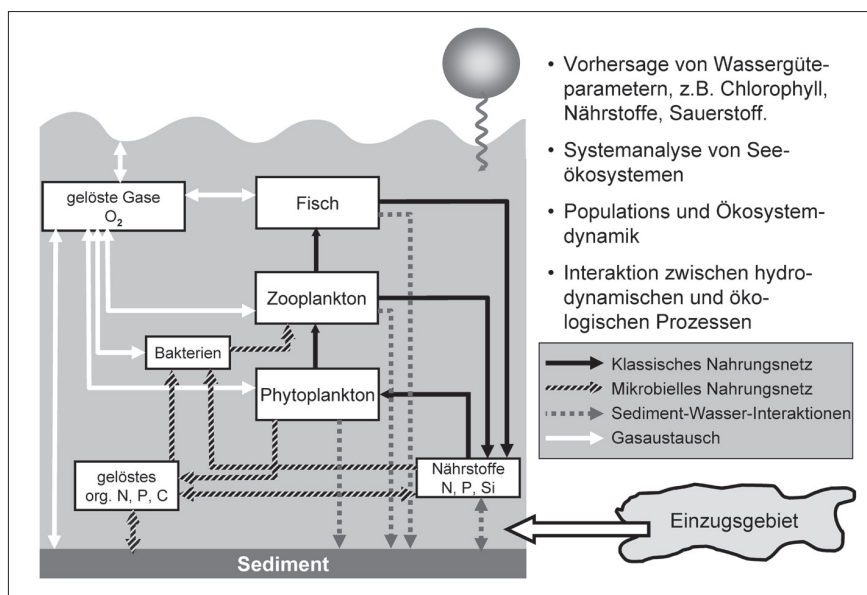
Die Simulation von Seeökosystemen hat innerhalb der Limnologie eine verhältnismäßig lange Tradition, die bis in die 1970er Jahre zurückreicht [1]. Das Interesse an der Entwicklung von ökologischen Modellen für Standgewässer kam dabei gleichermaßen aus der Grundlagenforschung als auch von der angewandten Limnologie bzw. dem Gewässermanagement. Aus wissenschaftlicher Sicht sind Seen verhältnismäßig abgeschlossene Ökosysteme,

die somit gut studierbar sind und hervorragend als Modellsysteme geeignet sind. Aus der Perspektive des Gewässermanagements spielen ökologische Prozesse eine zentrale Rolle, weil die Wasserqualität eines Wasserkörpers maßgeblich durch ökologische Zustandsgrößen beeinflusst wird (z. B. Phytoplanktonbiomasse, toxische Algen, Nährstoffkonzentrationen). Geeignete Modellsysteme zur Simulation der Ökosystemdynamik stellen daher wichtige Instrumente dar, um Auswirkungen von anthropogenen Stressoren oder anderen

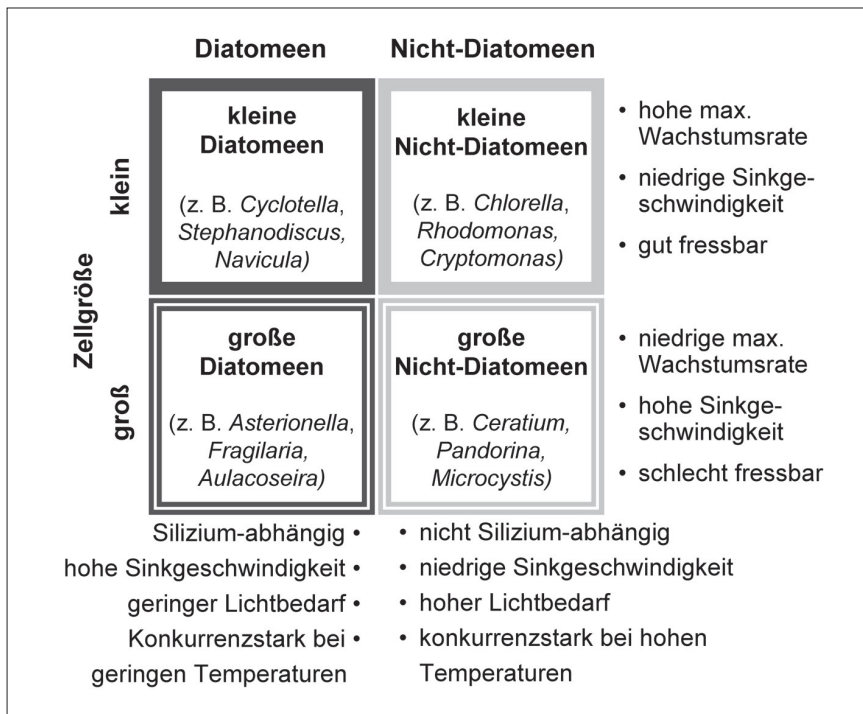
Umweltfaktoren zu untersuchen bzw. vorherzusagen. Klassische Einsatzbereiche solcher Modelle sind Gewässereutrophierung oder Gewässersanierung. Neue Anwendungsfelder richten sich auf die Auswirkungen des globalen Klimawandels, der Invasion exotischer Arten oder die Effekte fortschreitender Reoligotrophierung.

Im Rahmen des Verbundprojektes BodenseeOnline wurde eine ganz andere, neuartige Anwendung eines ökologischen Modells angestrebt: Die Kurzfrist-Prognose der ökologischen Prozesse im Rahmen des BodenseeOnline-Systems (s. a. Lang et al. [2] in diesem Heft der Wasserwirtschaft). Hierbei liefern Modelle Prognosen über Zeiträume von wenigen Tagen, die als Entscheidungsunterstützung im Gewässermanagement des Bodensees herangezogen werden können.

Die Anwendung eines ökologischen Modells auf derartig kurzen Zeitskalen ist bisher selten realisiert worden, was sehr wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, dass viele elementare ökologische Prozesse eher auf Zeitskalen von Wochen (z. B. Planktonsuccession) bis mehreren Monaten (z. B. Nährstoffkreisläufe, Zirkulation) ablaufen. Eine sinnvolle Beurteilung der Simulationsergebnisse von ökologischen Modellen muss deshalb über längere Zeiträume stattfinden, im besten Fall über mehrere aufeinanderfolgende Jahre, um auch Prozesse des saisonalen Wechsels von Stratifikation, d. h. Schichtung, und Durchmischung sowie lang-



**Bild 1:** Schematischer Aufbau und typische Einsatzfelder des biogeochemischen Modells CAEDYM



**Bild 2:** Funktionelle Phytoplankton-Typgruppen des ökologischen Modells: Die physiologischen Eigenschaften, die mit den verwendeten zwei Eigenschaftspaaren (Diatomeen/Nicht-Diatomeen, große/kleine Zellgröße) assoziiert werden, sind rechts bzw. unterhalb angegeben; für jede Gruppe sind typische Stellvertreterarten dargestellt

fristige Trends in der externen Nährstoffbelastung eines Gewässers berücksichtigen zu können. Als Quintessenz kann somit festgehalten werden: Dem Einsatz von ökologischen Seenmodellen in der Kurzfristprognose steht prinzipiell nichts im Wege, nur muss die Qualität der Modellausgaben vorab über längere Zeitskalen untersucht worden sein. Letzteres ist der Schwerpunkt dieses Beitrags, in dem über die Struktur und Funktion des ökologischen Modells sowie dessen Anwendung über mehrere Jahre auf den Bodensee berichtet wird. Der Einsatz des ökologischen Modells im Rahmen der Kurzfristprognose wird im Artikel von Eder et al. [3] in diesem Heft demonstriert.

## 2 Das Modellsystem

Für die ökologische Simulation des Bodensees wurde das Model CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model) [8]. Eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse im Rahmen einer Modellanwendung auf den See Geneareth wurde von Bruce et al. [4] durchgeführt. Das Model CAEDYM wird in Kombination mit einem hydrodynamischen Modell angewendet, welches die Dynamik von Stratifi-

kation und Durchmischungsprozessen simuliert, die ihrerseits wichtige Antriebsfaktoren für ökologische Prozesse darstellen. Als hydrodynamische Modelle stehen das 1-D-Modell DYRESM und das 3-D-Modell ELCOM zur Verfügung. Durch die komplexere räumliche Auflösung von ELCOM sind die Rechenzeiten für 3-D-Simulationen (ELCOM-CAEDYM) verhältnismäßig lang. Für langfristige Simulationen über mehrere Jahre, wie sie hier angestrebt werden, ist deshalb die Anwendung des 1-D-Modells DYRESM sinnvoll. Alle Simulationen in diesem Artikel wurden deshalb mit dem hydrodynamisch-ökologischen 1-D-Modellsystem DYRESM-CAEDYM durchgeführt.

Die Struktur des ökologischen Modells ist vergleichbar mit bereits existierenden Wassergütemodellen (s. Petzoldt et al. [5]). Es beinhaltet die Komponenten der klassischen Nahrungskette (Nährstoffe, Algen, Zooplankton, Fische), verschiedene Sediment-Freiwasser-Interaktionen, Gasaustauschprozesse sowie Elemente des mikrobiellen Nahrungsnetz (Bild 1). Das System ist modular aufgebaut und die Komplexität des Nahrungsnetzes und der Stoffumwandlungsprozesse kann in verschiedenen Stufen simuliert werden. Die verwendete Modellspezifikation muss dem-

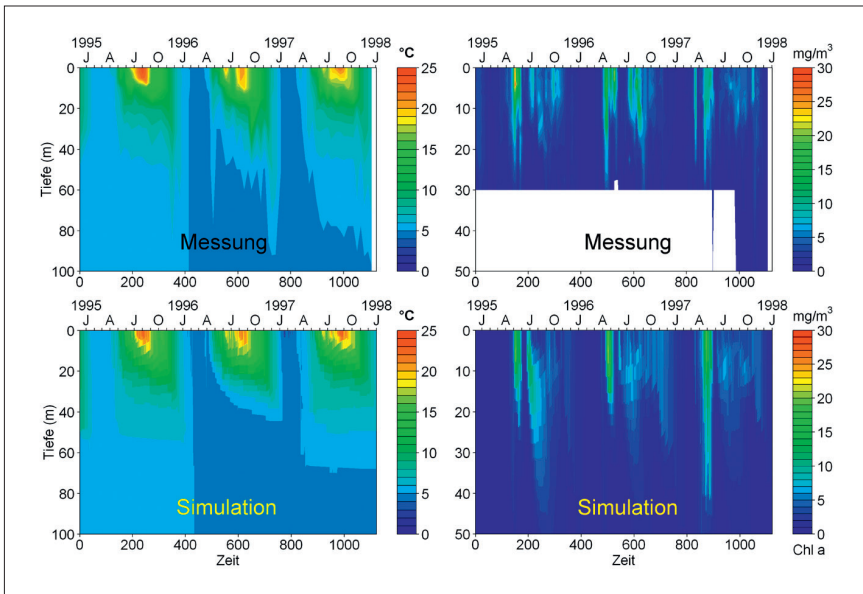
nach vom Anwender gewählt werden und ist eine elementare Stufe des gesamten Modellierungsprozesses. Für den Bodensee wurde entschieden, das planktische Nahrungsnetz mit höherer Komplexität zu simulieren (4 Phytoplanktongruppen, 1 Zooplanktongruppe), während die Fische, das mikrobielle Nahrungsnetz und das Sediment nicht als eigene Zustandsgrößen repräsentiert werden, sondern die damit assoziierten Prozesse auf aggregierter Ebene durch empirische Formeln abgebildet werden. Diese Vorgehensweise hat sich auch bei anderen Wassergütemodellen bewährt (z. B. [5]). Die Parametrisierung des ökologischen Modells erfolgte – soweit möglich – auf Basis direkter Messungen im Bodensee, beziehungsweise durch Verwendung von Ergebnissen aus prozessorientierten Labor- und Felduntersuchungen aus der Literatur. Stoffimporte aus dem Einzugsgebiet werden durch die entsprechenden Stoffkonzentrationen in den Zuflüssen berücksichtigt.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Funktionelle Klassifikation des Phytoplanktons

Dank langfristiger Monitoringprogramme im Bodensee, wie z. B. durch die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Uni Konstanz, ist die Algengemeinschaft im Bodensee gut charakterisiert. Im Zeitraum von 1979 bis 1999 wurden insgesamt 154 Phytoplanktontaxa identifiziert (Datensatz: Limnologisches Institut, Uni Konstanz), was die enorme Vielfalt des Phytoplanktons eindrücklich demonstriert. Neben der taxonomischen Diversität spiegelt diese hohe Zahl auch eine erhebliche funktionelle Diversität wider. Diese funktionellen Eigenschaften – und nicht ihre taxonomische Zugehörigkeit einer Algenart – entscheiden darüber, unter welchen Umweltbedingungen sich diese Art in der Konkurrenz mit anderen Arten durchsetzen kann. Moderne Modellierungsansätze in der Ökologie zielen deshalb auf die funktionellen Eigenschaften der Organismen und die Struktur des ökologischen Modells sollte diese funktionelle Diversität in geeigneter Form widerspiegeln können. Als erster Schritt wurden deshalb funktionelle Typgruppen für den Bodensee definiert.

Bei der Definition der Typgruppen müssen neben einer adäquaten Abbildung der

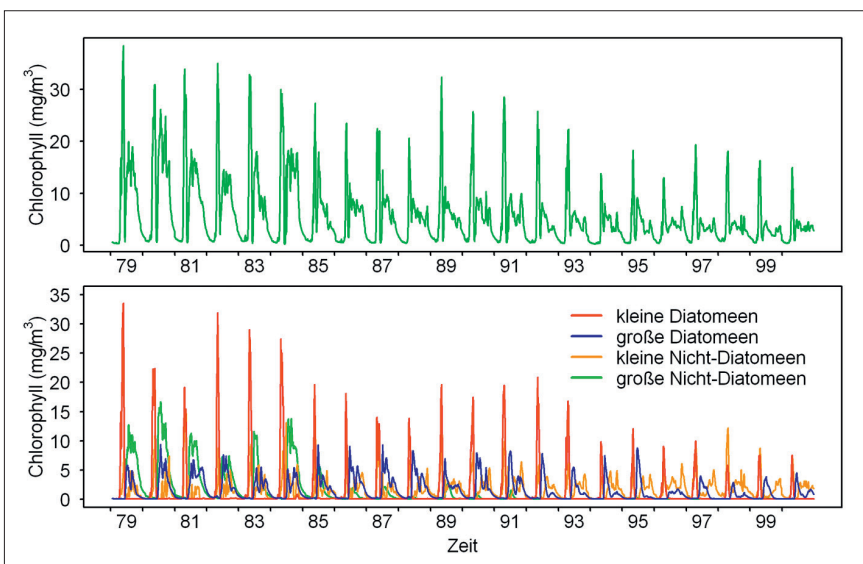


**Bild 3:** Validation von Messung (oben) und Simulation (unten) des gekoppelten hydrodynamisch-ökologischen Modells DYRESM-CAEDYM für Wassertemperatur (links) und Gesamtchlorophyll-Konzentration (rechts, Summe über vier Typgruppen) (Tiefenachse bei Temperatur und Chlorophyll unterschiedlich; Daten: Temperatur: IGKB, Chlorophyll: Universität Konstanz)

funktionellen Diversität aber auch gleichzeitig zwei Dinge beachtet werden:

- 1) Die Komplexität des Modells muss in gewissen Grenzen gehalten werden, damit das Modellsystem im praktischen Einsatz beherrschbar bleibt und
- 2) die Phytoplanktontaxa, die im See vorkommen, müssen den abstrakten funktionellen Gruppen relativ einfach zugeordnet werden können.

Für die Anwendung von CAEDYM auf den Bodensee wurden vier funktionelle Typgruppen gemäß **Bild 2** definiert. Mit dieser einfach zu handhabenden Einteilung in kleine und große Algen bzw. in Diatomeen (Kieselalgen) und Nicht-Diatomeen können elementare funktionelle Eigenschaften assoziiert werden. So sind z. B. kleine Arten gut fressbar für das Zooplankton und schnellwüchsiger als große



**Bild 4:** Langzeitsimulation mit DYRESM-CAEDYM für den Zeitraum 1979 bis 2000 für den Bodensee: Dargestellt sind die Chlorophyllkonzentrationen als Mittelwert über die oberen 20 m der Wassersäule mit Gesamtchlorophyll (oben) und Chlorophyllkonzentration der 4 funktionellen Typgruppen (unten)

Arten. Diatomeen benötigen Silizium zum Wachstum. Außerdem sinken sie schneller durch ihre schweren Kieselpanzer.

Eine Zuordnung der vorkommenden Algenarten in diese vier Gruppen ist weiterhin leicht möglich. Die Dynamik der vier Gruppen im Freiland zeigt typische Muster in der saisonalen Sukzession der funktionellen Phytoplankton-Typgruppen. So kommen kleine Diatomeen vor allem im Frühjahr vor, während große Diatomeen im Sommer nach der Klarwasserphase dominieren. Kleine Nicht-Diatomeen kommen im Frühsommer zur Dominanz, sind aber später im Jahr auch subdominant vorhanden und bilden zum Ende der Vegetationsperiode im Herbst ein zweites Maximum aus. Große Nicht-Diatomeen sind typische Sommerformen.

### 3.2 Gekoppelte hydrodynamisch-ökologische Simulation

Die Anwendung des Modells wurde aufgrund der Datenlage zunächst für den Zeitraum 1995 bis 1997 durchgeführt. Die Ergebnisse des hydrodynamischen Modells (DYRESM) zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit Messdaten (**Bild 3**). Sowohl Beginn und Ende der Stratifikation, als auch die vertikale Ausdehnung des Epilimnions werden von dem Modell realitätsnah simuliert. Ein quantitativer Vergleich zwischen Modell und Messungen zeigt eine starke Korrelation mit hohem Bestimmtheitsmaß ( $r^2 = 0,96$ ).

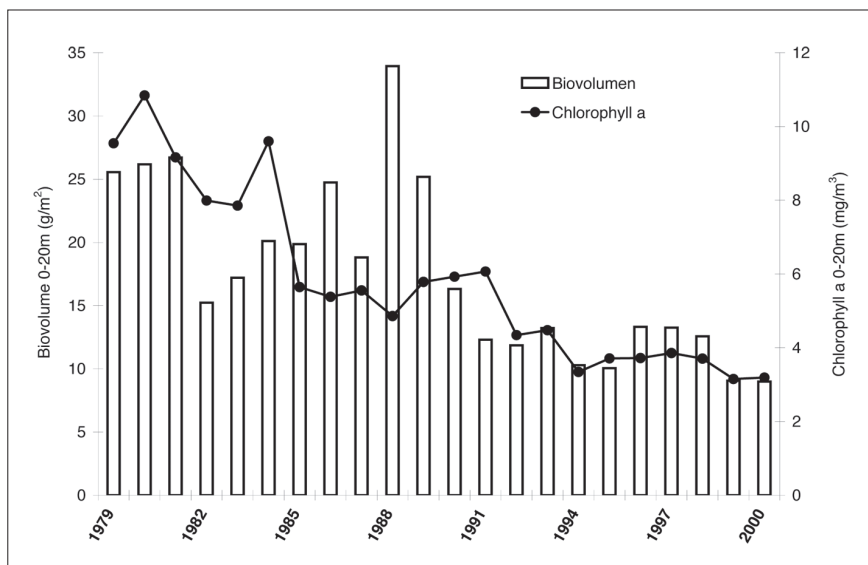
Die ökologische Simulation zeigt ebenfalls, dass das Modell sowohl die Muster in der Gesamtbiomasse als auch im zeitlichen und räumlichen Auftreten des Phytoplanktons gut reproduzieren kann (**Bild 3**). Der Beginn des Algenwachstums ist zeitlich eng mit dem Einsetzen der Stratifikation assoziiert. Die Sukzession der Algen im Modell verläuft vergleichbar zur Realität mit einer starken Frühjahrsblüte bei Einsetzen der Stratifikation, einer darauf folgenden Klarwasserphase, die durch Zooplanktonfraß verursacht ist, und einer daran anschließenden schwächeren Entwicklung des Phytoplanktons im Sommer (oft in größeren Tiefen). Mit Einsetzen des Phytoplanktonwachstums kommt es sofort zu einer starken epilimnischen Zehrung des Phosphors, dem limitierenden Nährstoff für das Algenwachstum im Bodensee. In der Simulation wird im Laufe der Vegetationsperiode Phosphor im Epilimnion vollständig aufgebraucht, was sich ebenfalls mit Messungen deckt. Die verwendete Spezifikation und Parametrisie-

rung des ökologischen Modells ist somit für den Bodensee anwendbar.

In einer zweiten Betrachtung wurde das gekoppelte Modellsystem in einer Langzeitsimulation von 1979 bis 2000 angewendet. In diesem Zeitraum sank die externe Phosphorbelastung des Bodensees von 900 t/Jahr auf 200 t/Jahr, was mit einer deutlichen Reoligotrophierung des Bodensees einherging. Das Modell zeigt über diesen Zeitraum eine Abnahme des Phytoplanktons (**Bild 4**). Die Reaktion des Phytoplanktons ist allerdings etwas verzögert und äußert sich zunächst in einer schwächeren Entwicklung der Sommerblüte, während eine Abnahme der Frühjahrsblüte erst zu Beginn der 1990er Jahre sichtbar wird.

Bei Betrachtung von Jahresmittelwerten zeigt sich, dass das Modell die Effekte der Reoligotrophierung auf die Algenbiomasse des Bodensees gut abbilden kann (**Bild 5**), wobei sich die Phosphorkonzentration (TP-Mixis) im Bodensee über den betrachteten Zeitraum von ca. 80 mg/m<sup>3</sup> auf etwa 20 mg/m<sup>3</sup> verringerte. Die Abnahme der Gesamtchlorophyll-Konzentration in der Simulation verläuft im selben Maßstab, wie die Abnahme der Algenbiomasse, die durch mikroskopische Zählungen erfasst wurde. Abweichungen von diesem Trend in Jahren mit ungewöhnlicher Algenentwicklung (z. B. 1988) können vom Modell jedoch nicht wiedergegeben werden. Gleichzeitig zeigt das Modell auch eine Veränderung der Struktur der Algengemeinschaft: während in den ersten Jahren, also während der hoch-eutrophen Periode, große Nicht-Diatomeen im Sommer vorherrschten (grüne Linie in Bild 4), werden diese Algen mit fortschreitender Reoligotrophierung durch große Diatomeen ersetzt. Die Typgruppe „große Nicht-Diatomeen“ repräsentiert somit eher Arten, die eutrophe Gewässer bevorzugen. Typische Vertreter dieser Gruppe sind z. B. koloniale oder fädige Blaualgen, die tatsächlich in der eutrophen Phase des Bodensees hohe Biomassen erreichten, mit voranschreitender Reoligotrophierung aber deutlich abnahmen.

Schließlich sind im Bild 4 auch generelle Muster in der qualitativen Zusammensetzung der Algengemeinschaft über die Vegetationsperiode zu sehen. So sind kleine Diatomeen in der Frühjahrsblüte zusammen mit kleinen Nicht-Diatomeen dominant, wobei letztere auch später im Jahr subdominant vertreten sind. Große Diatomeen kommen im Frühsommer nach



**Bild 5:** Vergleich von Jahresmittelwerten der simulierten Gesamtchlorophyll-Konzentration in den oberen 20m (Linie) und den mittleren Biovolumen aus Phytoplanktonzählungen (Säulen, Daten: Uni Konstanz)

der Klarwasserphase vor. Auch die großen Nicht-Diatomeen sind typische Sommerformen, allerdings unter eutrophen Bedingungen. Diese generellen Muster in den Modellsimulationen decken sich sowohl mit den empirischen Daten für den Bodensee als auch mit allgemeinen Beschreibungen in der Literatur [6].

## 4 Diskussion

Aus technischer Sicht betrachtet bietet das ökologische Modell CAEDYM ein sehr flexibles und vielseitig anwendbares ökologisches Gewässermodell für den Einsatz im Gewässermanagement. Als besonderer Vorteil ist hervorzuheben, dass es sowohl mit dem hydrodynamischen 1-D-Modell DYRESM verwendet werden kann (z. B. für Langzeitsimulationen) als auch mit dem 3-D-Modell ELCOM (z. B. für räumlich explizite Kurzfrist-Simulationen). Die gekoppelte Verwendung von ökologischen Seenmodellen zusammen mit hydrodynamischen Modellen hat sich in den vergangenen Jahren mehr und mehr als Standard durchgesetzt [4], [5] [7]. Diese Entwicklung wird insbesondere für tiefere Gewässer als sehr positiv angesehen, da physikalische Prozesse (Temperatur, vertikale Durchmischung) einen starken Einfluss auf die Planktonentwicklung ausüben. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass das gekoppelte Modellsystem auch bei Langzeitsimulationen von über 20 Jahren stabil läuft und einsatzfähig ist.

Aus praktischer Sicht ist die Handhabung des ökologischen Modells CAEDYM nicht trivial. Der Anwender muss ein gutes Systemverständnis des zu simulierenden Gewässers haben, um eine praktikable Modellspezifikation zu definieren (z. B. Anzahl von Typgruppen). Des Weiteren zeichnen sich ökologische Modelle durch eine sehr hohe Anzahl von Parametern aus (>100), die teilweise nur ungenügend durch empirische Daten bestimmt werden können. Modellkalibrationen bieten bei derartig komplexen Modellen kaum eine eindeutige Lösung, außerdem müssen im Laufe der Kalibration einzelne Parameter oft in unrealistische Bereiche verschoben werden. Für die Anwendung ökologischer Modelle wie CAEDYM bleibt es somit letztendlich eine unerlässliche Voraussetzung, sowohl Systemverständnis, Prozess- und Expertenwissen als auch naturwissenschaftliches Abstraktionsvermögen in diese Arbeit mit einzubringen. Schließlich ist die Durchführung eines umfassenden hochwertigen Monitoringprogramms des betreffenden Gewässers – wenigstens für einige Jahre – unentbehrlich. Im Bodensee wird dies aufgrund der vielseitigen und intensiven Nutzungen in vorbildlicher Art und Weise geleistet.

Die Verwendung von funktionellen Phytoplankton-Typgruppen ist ein elementarer Schritt in der Wassergütemodellierung. Letztendlich interessiert den Benutzer eben nicht nur, wie viel Algen insgesamt im Wasser sind, sondern auch um welche Algentypen es sich handelt. Von

Karsten Rinke and Karl-Otto Rothhaupt

### **An Ecological Model of Lake Constance: Model Concept, Validation and Long-term Simulations**

The one-dimensional water quality model DYRESM-CAEDYM, a coupled hydrodynamic-ecological lake model, was applied to Lake Constance. Four functional phytoplankton groups were defined in order to represent the functional diversity of algae in the lake and simulated simultaneously. In a 3-year application we show that model outputs are in good agreement with observations, particularly in terms of the onset of algal growth in spring, which was strongly associated with the onset of stratification, and the spatiotemporal distribution of the algae. In a long-term simulation over 21 years (1979 to 2000) the model also predicts shifts in the algal community composition attributable to the ongoing reoligotrophication of Lake Constance. This model is going to be applied for short- and long-term-prognoses for water management in Lake Constance (BodenseeOnline project).

besonderem Interesse sind hier natürlich solche Arten, die Probleme, wie Geruchs- oder Geschmacksbeeinträchtigungen, hervorrufen oder Toxine produzieren. Auf diesem aktuellen Forschungsfeld in der Wassergütemodellierung sind weitere Forschungen notwendig, sowohl auf der Seite der Modellierung als auch auf der empirischen Seite (Algenphysiologie, Analyse von Phytoplankton-Langzeitdaten verschiedener Seen). Bestehende Konzepte von führenden Phycologen zeigen hier bereits vielversprechende Wege auf [7], die aber für Anwendungen in Modellen noch weiterer Abstraktion bedürfen (Rolinski et al. [7] beschreiben z. B. 31 funktionelle Gruppen!). Die Ergebnisse, die im Verbundprojekt BodenseeOnline erreicht wurden,

zeigen, dass die Verwendung von funktionellen Typgruppen praktikabel sowie viel versprechend ist und sowohl für das angewandte Gewässermanagement als auch für die Grundlagenforschung vielfältige Einsatzmöglichkeiten eröffnet.

#### **Danksagung**

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG, Projekt Ro 1008/11-1) für die finanzielle Unterstützung dieses Teilprojektes im Rahmen des Verbundprojektes BodenseeOnline.

#### **Autoren**

**Dr. Karsten Rinke**  
**Prof. Dr. Karl-Otto Rothhaupt**  
Universität Konstanz

Limnologisches Institut  
Mainaustr. 252  
78464 Konstanz  
karsten.rinke@uni-konstanz.de  
karl.rothhaupt@uni-konstanz.de

#### **Literatur**

- [1] Scavia, D.: Examination of phosphorus cycling and control of phytoplankton dynamics in Lake Ontario with an ecological model. In: J. Fish. Res. Board Can. 36 (1979), S. 1336-1346.
- [2] Lang, U.; Paul, T.: Zustandsbeschreibung und Prognose mit der Daten- und Methodenbank BodenseeOnline. In: Wasserwirtschaft 98 (2008), Heft 10, S. ....
- [3] Eder, M.; Rinke, K.; Kempke, S.; Huber, A.; Wolf, T.: Seeweite Bodensee-Messkampagne 2007 als Test für BodenseeOnline. In: Wasserwirtschaft 98 (2008), Heft 10, S. ....
- [4] Bruce, L. C.; Hamilton, D.; Imberger, J.; Gal, G.; Gophen, M.; Zohary, T.; Hambright, K. D.: A numerical simulation of the role of zooplankton in C, N and P cycling in Lake Kinneret, Israel. In: Ecol. Model. 193 (2006), S. 412-436.
- [5] Petzoldt, T.; Rolinski, S.; Rinke, K.; König, M.; Baumert, Z.M.; Benndorf, J.: SALMO: Die ökologische Komponente des gekoppelten Modells. In: Wasserwirtschaft 95 (2005), Heft 5, S.28-33.
- [6] Sommer, U.; Gliwicz, Z.; Lampert, W.; Duncan, A.: The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. In: Archiv für Hydrobiologie 106 (1986) S. 433-471.
- [7] Rolinski, S.; Petzoldt, T.; Baumert, Z.M.; Bigalke, K.; Horn, H.; Benndorf, J.: Das physikalisch-ökologisch gekoppelte Talsperrenmodell. In: Wasserwirtschaft 95 (2005), Heft 5, S.34-38.
- [8] Centre for Water Research der University of Western Australia: Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model (CAEDYM). [www.cwr.uwa.edu.au/services/models.php](http://www.cwr.uwa.edu.au/services/models.php).