

## **FORSCHUNGSBERICHTSBLATT BWK 27009**

### **Messung großskaliger Transportpfade im Bodensee als Basis für ein Modellsystem zur Schadstoffausbreitung: Drifterexperimente und Modellvergleich**

Projektleiter: Prof. Dr. Frank Peeters  
Limnologisches Institut  
Universität Konstanz

#### **1. Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse.**

Im Forschungsprojekt "Messung großskaliger Transportpfade im Bodensee als Basis für ein Modellsystem zur Schadstoffausbreitung: Drifterexperimente und Modellvergleich." (Projektleiter Prof. Frank Peeters, Förderkennzeichen: BWK 27009) wurde einer der umfassendsten Datensätze zur Zirkulation und zu Transportprozessen in Seen erhoben. Zur Bestimmung der advektiven großskaligen Strömungen im Bodensee wurden insgesamt 15 mehrtägige Feldexperimente mit jeweils einer Vielzahl von Driftern bei unterschiedlichen Schichtungsbedingungen durchgeführt. In weiteren 7 Experimenten wurden Gruppen von Driftern eingesetzt, und aus der horizontalen Ausbreitung der Driftergruppe horizontale Dispersion und Diffusion abgeschätzt. Zusätzlich zu den Drifterexperimenten wurden Strömungs- und Temperaturprofile an fixen Punkten mit verankerten Messinstrumenten kontinuierlich mit hoher Zeitauflösung aufgezeichnet.

Verschiedenste Messungen aus diesem umfangreichen Datensatz wurden mit Simulationsergebnissen von zwei unterschiedlichen hydrodynamischen Modellen verglichen. Rechnungen wurden mit ELCOM: Estuary, Lake and Coastal Ocean Model des Centre for Water Research der University of Western Australia (CWR) und mit FLOW3D (WL Delft Hydraulics) durchgeführt. ELCOM ist Bestandteil des in BodenseeOnline verwendeten Modellpakets, FLOW3D wird am Institut für Seenforschung eingesetzt. Als Randbedingungen für die Modelle wurden die von BodenseeOnline bereitgestellten Windfelder (linear interpoliertes Windfeld, LIN, und Mass Consistent Flow, MCF), Meteorologie und Hydrologie verwendet. Da die für die Windfelder vorhandenen Daten unzureichend waren, haben wir im Rahmen des Projektes Daten zusätzlicher meteorologischer Stationen verwendet, die von unserem Kooperationspartner KuP (Kobus und Partner) in BodenseeOnline zur Erstellung der Windfelder integriert wurden. Zusätzlich zu den in BodenseeOnline integrierten Windfeldern LIN und MCF haben wir das COSMO-2-Windfeld von MeteoSwiss eingesetzt, welches uns im Rahmen einer Kooperation mit Michael Sprenger (ETH-Zürich), zur Verfügung stand.

Die zentralen Schlussfolgerungen aus unseren Projekt sind:

1. Die Datenplattform BodenseeOnline ist eine hervorragende Basis für Modellanwendungen im Bodensee, ohne die eine Datenzusammenstellung zum Antrieb von Modellen zur Simulation beckenweiter Strömungen praktisch unmöglich ist.
2. Mit dem in BodenseeOnline integrierten Modellsystem (ELCOM mit LIN- oder MCF-Windfeld) lässt sich die grundsätzliche Struktur, Periode und Amplitude beckenweiter interner Wellen gut beschreiben. Bei detaillierter Betrachtung weichen Phasenbeziehung, Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsrichtung von den tatsächlichen Strömungen allerdings ab.
3. Die Trajektorien der einzelnen Drifter können mit dem Modellsystem nicht zuverlässig beschrieben werden. Selbst kurzfristige Prognosen des advektiven Transports von Driftern innerhalb von 6 Stunden stimmen sowohl in Ausbreitungsrichtung und Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht sehr gut mit den Daten überein. Daher ist eine zuverlässige Prognosen des advektiven Transports von Schadstoffen mit dem in BodenseeOnline integrierten Modellsystem noch nicht möglich.
4. Allerdings kann mit Hilfe der Simulationen das Gebiet, in dem sich eine Schadstoffverteilung nach einigen Stunden aufhalten kann, eingeschränkt werden. Besonders bei grossen Strömungsgeschwindigkeiten ist diese Gebiet deutlich kleiner, als eine Abschätzung allein aus dem Betrag der Geschwindigkeit liefern würde.
5. Im zentralen Obersee erhält man mit dem COSMO-2-Windfeld die beste Übereinstimmung von Simulationsergebnissen mit den Daten, d.h. die kleinsten Vorhersagegebiete bei advektivem Transport. Für die interne Wellenbewegung im Überlingersees liefern Simulationen mit dem LIN- und dem MCF-Windfeld bessere Ergebnisse als Simulationen mit COSMO-2.
6. Die Dispersion von Drifterclustern kann gut mit Scherdiffusion beschrieben werden, wobei unter ungeschichteten Bedingungen der horizontale turbulente Diffusionskoeffizient in der Grössenordnung zwischen  $0.01 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  und  $0.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  liegt und damit deutlich kleiner ist, als der in der Standardsimulation von BodenseeOnline angenommene Wert von  $2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Ausserdem scheint die numerische Diffusion in Elcom deutlich über einer Diffusivität von  $0.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  zu liegen, sodass die horizontale Dispersion und damit auch die Verdünnung von Schadstoffkonzentrationen in ELCOM-Simulationen überschätzt wird.
7. Modellergebnisse von FLOW3D für die Strömungsfelder unterscheiden sich zum Teil deutlich von den Modellergebnissen mit ELCOM, selbst wenn beide Modelle mit dem gleichen Windfeld angetrieben werden. Dies deutet darauf hin, dass nicht nur die Ungenauigkeit der Windfelder für die unzureichende Übereinstimmung der simulierten mit den gemessenen Drifterpfaden verantwortlich sind, sondern dass auch bei den

hydrodynamischen Modellen erhebliche Unterschiede in der Auswirkung des Antriebs auf die simulierte Advektion besteht.

8. Das Strömungsfeld in den obersten 5 m ist sehr variabel und Wind- und Schichtungsabhängig. Das von Wasmund (1928) publizierte typische Zirkulationsmuster im Obersee tritt vor allem im Herbst bei dicker durchmischter Oberflächenschicht und NNW-Winden auf. Unter ungeschichteten Verhältnissen im Winter, bei dünner Oberflächenschicht im Sommer und je nach Windrichtung können die Strömungsmuster aber auch deutlich anders aussehen, sodass bei der Prognose von Schadstoffausbreitungen nicht zuverlässig auf typische Zirkulationsmuster zurückgegriffen werden kann.

Fazit: Eine detaillierte Prognose des advektiven Schadstofftransports nach Unfällen ist zur Zeit nicht zuverlässig möglich, da a) das Strömungsfeld zu variabel ist um von typischen Zirkulationsmustern ausgehen zu können und b) die zur Verfügung stehenden Modellsysteme noch nicht in der Lage sind, die Strömungen ausreichend gut im Detail zu simulieren.

Allerdings lässt sich das Vorhersagegebiet für Schadstoffe mit den Modellen deutlich besser einschränken als durch eine reine Schätzung aus den typischen

Strömungsgeschwindigkeiten. Die Modelle können ausserdem großskalige Phänomene wie die internen Wellen recht gut abbilden, sodass Aussagen zur Amplitude und Phase der beckenweiten Seiche (Kelvinwelle) gemacht werden können. Letzteres kann vor allem im Überlingersee eine Abschätzung der durch die Kelvinwelle verursachten advektiven Transporte über 2 Tage unterstützen.

Die besten Ergebnisse für die Vorhersagegebiete haben wir mit dem COSMO-2 Windfeld erhalten, obwohl dessen zugrunde liegende Auflösung nur 2 km betrug. Da die COSMO-Windfelder weiter entwickelt werden und auch zur Prognose von Windfeldern zur Verfügung stehen, wäre daher eine Einbindung von COSMO-Windfeldern in das BodenseeOnline Modellsystems wünschenswert. Außerdem könnte durch Einbindung weiterer vorhandener Windstationen in das BodenseeOnline Datensystem, eine modifizierte Interpolation und eine bessere Implementierung der Stationskoordinaten das LIN-Windfeld verbessert werden.

Die Ergebnisse unserer Studien legen nahe, das Krisenmanagement nach Unfällen mit Schadstoffen im Bodensee durch Simulationen mit dem in BodenseeOnline integrierten Modellsystem zu unterstützen und gleichzeitig die aktuelle Ausbreitungssituation des Schadstoffes durch Einsatz von Driftern im Bereich der Schadstofffahne zu überwachen. Die Information aus den Driftermessungen kann genutzt werden, um das Modell regelmäßig mit der aktuellen Position des Schadstoffs zu reinitialisieren (Assimilation der Schadstoffposition für die Drifterpfadberechnung). Auf diese Weise könnten die für die Prognose erforderlichen Simulationen auf kurze Zeitintervalle beschränkt werden und das Vorhersagegebiet für die Schadstoffposition am Ende des Prognosezeitintervalls klein gehalten werden.

## 2. Welche Fortschritte ergeben sich für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse?

- Anhand der im Projekt vorgenommenen Untersuchungen konnten Anwendbarkeit und die Qualität der mit dem derzeitigen Modellsystem realisierbaren Nachhersage-/Vorhersagegüte der hydrodynamischen Modelle näher spezifiziert werden: Weder mit ELCOM noch mit FLOW3D können mit den zur Zeit verfügbaren Windfeldern zuverlässige Aussagen über den advektiven Transport von gelösten Substanzen oder suspendierten Partikeln im Bodensee gemacht werden. Beckenweite interne Schwingungen lassen sich insbesondere mit ELCOM recht gut simulieren. ELCOM liefert insgesamt bessere Ergebnisse als FLOW3D. Diese Erkenntnisse liefern eine realistischere Einschätzung für mögliche zukünftige Forschungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Simulation dreidimensionaler Verteilungen und von dynamischen Prozessen im Bodensee.
- Aus der Ausbreitung von Driftergruppen konnte die horizontale Diffusivität  $K_h$  im Oberflächenwasser des Bodensees abgeschätzt werden. Die horizontale Diffusivität ist eine zentrale Größe für die Modellierung der horizontalen Ausbreitung und Verdünnung von gelösten Substanzen. Der bisher für den Stofftransport verwendete aber eher willkürlichen Wert von  $K_h = 2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  sollte durch den hier abgeschätzten Wert  $K_h = 0.1 - 0.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ersetzt werden.
- Die Ergebnisse aus den Drifterexperimenten liefern eine ausgezeichnete Datenbasis für die Validierung von hydrodynamischen Modellen. Im Gegensatz zu den normalerweise verwendeten eulerschen Messungen von Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturfluktuationen, liefert der aus den Drifterexperimenten gewonnene Datensatz unmittelbare Information über den advektiven Transport im Oberflächenwasser. Damit ist eine Datenbasis geschaffen worden, mit der die Qualität von neuen Modellentwicklungen (hydrodynamische Modelle, Windmodelle) in Bezug auf die Vorhersage advektiver Schadstoffausbreitung quantitativ beurteilt werden kann.
- Eine Methodik wurde entwickelt, die auf der Grundlage von Simulationsergebnissen der hydrodynamischen Modelle und einer stochastischen Beschreibung der Vorhersagewahrscheinlichkeit Prognosen über das wahrscheinliche Aufenthaltsgebiet von Driftern oder Schadstoffen ermöglicht. Diese Methodik gestattet eine Minimierung des Gebietes, welches nach einer Schadstofffreisetzung überwacht werden muss.
- Es wurden wesentliche Quellen der Unsicherheiten der derzeitigen Transportmodellierung ermittelt und Optimierungsmöglichkeiten für das

Vorhersagesystem aufgezeigt. Dies liefert eine wichtige Information für Forschungsanstrengungen zur Verbesserung des bestehenden Modellsystems.

### **3. Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen;**

- Die im Projekt aufgezeigten Grenzen der Vorhersage von advektiven Transport mit dem im BodenseeOnline integrierten Modellsystem legen nahe, beim Krisenmanagement nach Unfällen mit Schadstoffen im Bodensee sich nicht nur auf Simulationen mit dem Modellsystem zu verlassen, sondern gleichzeitig die aktuelle Ausbreitungssituation des Schadstoffes durch Einsatz von Driftern im Bereich der Schadstofffahne zu überwachen.
- Im Rahmen des Projektes entwickelte Driftkörper mit GPS-Logger und GSM-Datenübertragung stehen zur Verfügung, um im Fall der Freisetzung von potentiellen Schadstoffen online Informationen zum advektiven Transport einer Schadstofffahne im See zu liefern. Bei entsprechender Vorbereitung könnten die Drifter eingesetzt werden, um präventive Maßnahmen, wie etwa den Einsatz von Ölsperren, zu unterstützen und zu optimieren. Außerdem könnte die Information von den Driftern genutzt werden, um Modellsimulationen mit der aktuellen Position der Schadstofffahne zur weiteren Prognose der Schadstoffausbreitung zu re-initialisieren.
- Mit der im Projekt erarbeiteten Methodik, Simulationsergebnisse der hydrodynamischen Modelle mit einem Ansatz zur stochastischen Beschreibung der Vorhersagewahrscheinlichkeit der Simulationen zu verbinden, könnte im Fall eines Unfalls das Gebiet minimiert werden, das nach Schadstoffen abgesucht werden muss.
- Im Projekt wurde aufgezeigt, in welchen Bereichen des Modellsystems von BodenseeOnline eine weitere Entwicklung ohne großen Aufwand zu Fortschritten in der Vorhersagegüte führen könnte: so insbesondere durch die Integration zusätzlicher Windmessungen von vorhandenen Stationen, verbesserten Interpolationsalgorithmen für das lineare Windfeld, sowie durch Einbeziehung mesoskaliger Atmosphärenmodelle. Diese Informationen können eine sinnvolle Weiterentwicklung des BodenseeOnline-Informationssystems unterstützen.

### **4. Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen,.**

Im Rahmen der Arbeiten der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) werden Studien mit numerischen hydrodynamischen Modellen an verschiedenen Seen Baden-Württembergs durchgeführt.

Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse zur Vorhersagegüte dieser Modelle für advective Transporte sind eine wertvolle Informationsquelle für entsprechend gelagerte Untersuchungen in anderen Seen und bieten eine wichtige Interpretationshilfe für die Bewertung der Ergebnisse von Transportsimulationen.

Es ist geplant, die Forschungsergebnisse des Projektes international zu publizieren, um die offensichtlich immer noch bestehenden Grenzen bei der Modellierung der dreidimensionalen hydrodynamischen Bedingungen in Seen aufzuzeigen und zu demonstrieren, dass ausgezeichnete Kenntnisse der Windfelder vorhanden sein müssen, um advectiven Stofftransport adequat simulieren zu können. Modellierung mit mehrdimensionalen Modellen wird in der Literatur zunehmend als leicht einzusetzendes Werkzeug unter anderem auch für biologische Anwendungen propagiert, was nach unseren Projektergebnissen eher kritisch zu bewerten ist, da zumindest eine detaillierte Validierung des physikalischen Transports Voraussetzung für eine sinnvolle weitergehende Interpretation von biologischen Interaktionen im dreidimensionalen Strömungsfeld ist.

Wir planen außerdem, die Ergebnisse aus den Experimenten mit den Drifterclustern zur horizontalen Mischung international zu publizieren, da die horizontale Diffusivität eine wichtige Grösse in allen mehrdimensionalen Stofftransportmodellen in Seen darstellt und somit auch in anderen Anwendungen, die sich mit dem Transport von gelösten Stoffen oder suspendierten Partikeln in Seen auseinandersetzen, eine wichtige Rolle spielt.