

Fernausbreitung des Alpenrhein-Einstroms in den Bodensee-Obersee bei tiefer winterlicher Einschichtung

**– Ergebnisse einer mathematischen Modellierung
mit Berücksichtigung der Mündungsvorstreckung –**

Einführung und Zielsetzung

Die Verlagerung der Alpenrheinmündung in der vorletzten Jahrhundertwende ist der größte direkte hydrologische Eingriff in den Bodensee. Durch die seit 1972 kontinuierliche wasserbauliche Vorstreckung der Mündung wird eine Verlandung des nordöstlichen Seeteils vermieden. Die genaueren Auswirkungen dieser Maßnahmen auf den limnologischen Zustand des Bodensee-Obersees sind größtenteils unbekannt. Im Auftrag der IGKB wurde aus diesem Grund seit Ende der Achtziger Jahre eine breit angelegte Untersuchung in Angriff genommen. Dabei wurden drei Themenbereiche eingehend behandelt:

- Eine Literaturstudie über die seenphysikalische und limnologische Dokumentation zur Vorstreckung des Alpenrheins (IGKB Bericht Nr. 42, 1993),
- Sidescanuntersuchungen zu den Sedimentoberflächen im östlichen Obersee (IGKB Bericht Nr. 43, 1992),
- die mathematische Modellierung des Alpenrhein-Einstroms in den Bodensee (IGKB Bericht Nr. 50, 1999).

Die Untersuchungen mit dem mathematischen Modell konzentrierten sich auf die tiefe winterliche Einschichtung des Alpenrheins, die starke Auswirkungen auf den limnologischen Zustand des Hypolimnions hat. Es war daher von besonderem Interesse, die Ausbreitung des Flußwassers bis in die tiefsten Seeschichten zu erklären und abzuschätzen, bis auf welche Entfernung die untersten Zonen des Tiefenwassers direkt erneuert werden und beispielsweise der Sauerstoffgehalt regeneriert wird. Hierzu war der Einfluß verschiedener Vorstreckungslagen der Mündung und typischer Strömungsverhältnisse im winterlichen Bodensee auf das Verhalten der Einstromfahne festzustellen. Hinsichtlich ruhiger Witterung über dem See, d.h. ohne Einwirkung winderzeugter Strömungen, sind die Untersuchungen und Modellrechnungen dem IGKB Bericht Nr. 50 zu entnehmen.

Die Beschränkung auf ruhige Witterungsverhältnisse war aus zwei Gründen sinnvoll: Einerseits waren die vom Einstromimpuls des Alpenrheins allein verursachten tiefen Ausbreitungsvorgänge grundsätzlich aufzuklären. Andererseits beschreiben sie häufig wiederkehrende reale Situationen. Windarme Bedingungen bestehen über dem See vorherrschend im Sommer, treten aber auch im Winterhalbjahr deutlich gegenüber denjenigen mit stärkerer Windeinwirkung auf.

Um aber auch Veränderungen der Flußwasserausbreitung bei vorherrschender winderzeugter Strömung im See aufzuklären, wurden zusätzliche Fallstudien gerechnet. Gegenstand dieser Untersuchung war die Fernausbreitung des Rheinwassers im winterlichen Bodensee für drei charakteristische Windepisoden von je drei Wochen Dauer. Hierbei handelte es sich um zwei westliche Starkwindlagen mit markanten Unterschieden im zeitlichen Verlauf der Windstärke, die jeweils die rechnerisch markierte Zuflussfahne in stark unterschiedlichen

Entfernungen von der Mündung beeinflussten. Das dritte Windfeld betraf mäßige nordöstliche Winde, wie sie über dem Bodensee im Winter ebenfalls häufiger auftreten.

Es wurden die hydrologischen Verhältnisse von Dezember 1991 bis Anfang Januar 1992 zugrunde gelegt, die durch einen schwach geschichteten See mit Wassertemperaturen über 4°C und geringe Abflüsse des Alpenrheins mit Wassertemperaturen unterhalb 4°C gekennzeichnet waren. Unter diesen Bedingungen war eine bodennahe Einschichtung des Rheins in den tiefen Seebereich zu erwarten.

Die Szenarien wurden paarweise für die Referenz-Lage 1989 und die geplante Endlage unter sonst gleichen Bedingungen berechnet. Die Referenzlage ist durch die Tiefenverhältnisse der Mündungskonfiguration von 1989 und die Lage der Dammköpfe vom Dezember 1991 definiert. Der Hauptgrund für die Auswahl dieser Konstellation war die relativ gute Datenlage hinsichtlich der hydrographischen Schichtungsverhältnisse im Obersee unter realen westlichen Starkwindlagen und der zeitnächsten Seegrundaufnahme des Mündungsumfeldes durch die IRR 1989. Rückschlüsse auf frühere Mündungslagen bzw. die Alte Rheinmündung sind aufgrund fehlender hydrographischer Daten aus dem See nicht möglich.

Den Rechnungen liegen die Newtonschen Bewegungsgesetze zugrunde. Daher lassen sich verallgemeinerte Aussagen aus den fallweisen speziellen Lösungen der Modellszenarien gewinnen. Die hier wiedergegebenen charakteristischen Einzelergebnisse aus den berechneten Einstromszenarien wurden in einer physikalisch generalisierenden Lesart herausgestellt, um die Wesenszüge der Einzelercheinungen zu veranschaulichen. Hierdurch wird ein geordnetes Wirkungsprinzip nachvollziehbar, das der Ausbreitung des Alpenrheins im winterlichen Bodensee zugrunde liegt und zugleich Rückschlüsse auf generelle Effekte erlaubt, die durch die Mündungskorrektur der Neuen Rheinmündung bedingt sind.

Die im vorliegenden Bericht beschriebenen Ergebnisse sind der ausführlichen Dokumentation von Hydromod (2001) entnommen.

Konzeption charakteristischer Einstromszenarien

Hydrologische Randbedingungen der Modellrechnungen

Um das Verhalten der Zuflussfahne im winterzeugten Strömungsfeld des Bodensees zu veranschaulichen, werden nachfolgend zeitgleiche Momentaufnahmen der im Hochwasserscheitel markierten Zuflußwasserelemente für die verschiedenen Szenarien gegenübergestellt. Hierzu wird zunächst ein Einblick in die hydrologische Situation des Sees und des Alpenrheins als Hauptzubringer für die zugrundegelegte Simulationsperiode gegeben. Aus den seenphysikalischen Terminmessungen des ISF an der Station Seemitte Fischbach-Uttwil vom 19.12.1991 wurde die in Tabelle 1 angegebene Temperaturschichtung als Anfangsbedingung übernommen. Die für den Abfluß und für die Flußwasserdichte des Alpenrheins in dieser Zeitspanne zugrunde gelegten Bedingungen stammen von der am nächsten zum See liegenden schweizerischen Meßstation Diepoldsau, Rietbrücke. Sie sind für die Simulationszeitspanne in Abb. 1 graphisch wiedergegeben und zwar als Tagesmittelwerte des Abflusses und der Wassertemperatur, sowie als momentane Beobachtungswerte der Schwebstoffkonzentration.

Die Simulation des Strömungsfeldes im See inklusive des Alpenrheineinstroms erfolgt im Zeitraum vom 17.12.1991 0.⁰⁰Uhr bis zum 6.1.1992 24.⁰⁰Uhr. Sieben Tage nach dem Anfangszeitpunkt erreicht ein schwaches Hochwasser seinen höchsten Wert von 424 m³/s im Tagesmittel. Zu diesem Zeitpunkt - 23.12.1991 um 6⁰⁰ Uhr - werden 1000 Wasserkompartimente auf 200 x 200m in der Mündungsöffnung momentan numerisch markiert. Dieses Partikelensemble wird nun während der Zeitspanne bis 6.1.1992 detailliert als Tracer verfolgt, um das Ausbreitungsverhalten der Flußwasserfahne festzustellen. Die Auswahl des Markierungszeitpunkts bei höherem Abfluss erfasst limnologisch wichtige Hochwassersituationen, in denen höhere Stofffrachten in die tieferen Regionen des Sees gelangen. Darüberhinaus sind die Ergebnisse im wesentlichen auf die wintertypischen niedrigen Abflüsse übertragbar, da Struktur und Richtung der Flußwasserfahne bei sonst gleichen hydrologischen Randbedingungen ähnlich sind.

Infolge der unter 4°C liegenden Flußwassertemperaturen und des leicht erhöhten Schwefelstoffgehaltes (s.Tab. 2) bildet sich beim Zusammentreffen mit dem Seewasser, dessen Temperatur über 4°C liegt, schweres Mischwasser unmittelbar seewärts der Mündung. Hierdurch ist eine tiefe bodennahe Einschichtung des Flußmischwassers zu erwarten. Sie repräsentiert im Hinblick auf die Versorgung tiefster Schichten des Sees mit sauerstoffreichem Wasser die limnologisch wichtigen Einstromlagen im Winter.

Meteorologische Randbedingungen der Modellrechnungen

Als Windfelder wurden drei Fälle zugrunde gelegt, die hinsichtlich ihrer Häufigkeit, Richtung und Stärke für den winterlichen Bodensee typisch sind. Zwei Windfelder sind durch Starkwindlagen aus westlichen Richtungen charakterisiert und sind Beispiele für die häufigsten Starkwinde im Jahresverlauf. Ihre Eintrittswahrscheinlichkeit ist im Winter doppelt so hoch wie im Sommer (DITTRICH und WESTRICH 1988).

Das dritte Windfeld betrifft mäßige Winde aus nordöstlichen Richtungen. Solche Windereignisse sind im Jahresverlauf weniger häufig und stellen sich wiederkehrend auch im Winter ein. Sie sind in der östlichen Seehälfte am Nordufer ausgeprägter als an den übrigen Uferabschnitten.

Das erste der drei angenommenen Windfelder betrifft Windverhältnisse, die real während des Simulationszeitraums auftraten. Sie bestanden in der Zeitspanne bis 29.12.1991 aus einer durchgehenden westlichen Starkwindlage und anschließend schwachem Windverlauf aus überwiegend nordnordöstlicher Richtung. Der Verlauf ist für die Windstation Friedrichshafen in Abb. 2 dargestellt. Dem zweiten Windfall wurde die Episode vom 25.1.1990 bis 14.2.1990 zugrunde gelegt, die ebenfalls durch westliche Starkwindlagen charakterisiert ist, jedoch nur in mehreren kürzer andauernden Phasen, die durch längere Intervalle schwacher Windbewegungen getrennt sind. Der zeitliche Verlauf ist zum Vergleich wiederum am Beispiel Friedrichshafen aus Abb. 3 zu entnehmen. Die beiden Windfälle repräsentieren lediglich verschiedene Abfolgen der über dem Bodensee häufigsten Starkwindlagen. Sie ergeben durch die zugehörigen, im Hauptverhalten nach Nordwesten gerichteten Strömungen im tiefen Hypolimnion die am weitesten in dieser Richtung des Sees reichenden Versetzungen des in diese Tiefenbereiche eingedrungenen Flußwassers. Beim dritten Windfall wurde ein Beispiel für die im Spätherbst und Winter häufigen Windereignisse aus nordöstlichen Richtungen mit mäßigen Windstärken herausgegriffen. Diese Episode trat vom 26.11. bis 16.12.1995 auf und ist in Abb. 4 ebenfalls für Friedrichshafen veranschaulicht.

Die Modellrechnung erfolgte nun derart, daß die beiden in anderen Jahren real aufgetretenen Windfelder auf den Simulationszeitraum Dezember 1991 bis Januar 1992 übertragen wurden, um hinsichtlich der hydrologischen Verhältnisse im See, der berücksichtigten Referenzlage 1989 und Endlage der Mündung genau vergleichbare Bedingungen sicherzustellen. Da sowohl die zugrundeliegende hydrographische Situation des Sees im Jahresgang wiederkehrt, als auch die beiden zuletzt genannten Windfelder real in einer Wintersaison so auftreten können, ist diese Verfahrensweise erlaubt.

Hydrodynamische Grundlagen der Modellrechnungen

Die dreidimensionalen zeitabhängigen Strömungsfelder im See werden in Eulerscher Darstellung berechnet. D.h. daß die Strömungsvektoren an den eng liegenden Gitterpunkten des numerischen Modells ortsfest in ihrem zeitlichen Verlauf ermittelt werden. Eine Momentaufnahme ist für den 23.12.2001, 6⁰⁰ Uhr, dem Markierungstermin der Flußwasserteilchen in der Mündung in Abb. 5 wiedergegeben. Die Hauptstruktur dieses Momentbildes zeigt eine auffällige Rechtsablenkung zu der westlichen Richtung, aus der der Wind weht. Dieses Verhalten ist auf die ablenkende Kraft der Erdrotation zurückzuführen, die noch eingehend behandelt wird

Aus der Eulerschen Form der Strömungsverteilung werden die Bahnversetzungen der markierten Flußwasserteilchen in Lagrangescher Repräsentation des Strömungsfeldes berechnet. Es wird also der Weg ermittelt, den jedes einzelne Wasserteilchen in dem gegebenen räumlich und zeitlich variierenden Bewegungsablauf durchläuft. Die markierten Teilchen werden nun zu bestimmten Zeitpunkten in ihrer Lageverteilung im See betrachtet. Aus der vergleichenden Analyse dieser Tracer-Positionen der Flußwasserfahne kann mit gewissen Einschränkungen auf die allgemeine Verhaltensweise ihrer Ausbreitung geschlossen werden. Hierbei werden die Bewegungsabläufe daraufhin betrachtet, wie sie sich im hydrodynamischen System des Bodensee-Obersees nach den Newtonschen Grundgesetzen in charakteristischen Strukturen der großräumigen Zirkulation manifestieren. Dabei ist den Strömungsverteilungen im offenen See durch die ablenkende Kraft der Erdrotation ein bestimmtes Verhalten aufgeprägt. Diese Strukturen bedingen wiederum im Zusammenwirken mit der Form der festen Berandung und der Massenkontinuität im See, daß Auftriebs- und Absenkungsgebiete vorgegeben sind. Nach diesen Wesenszügen der winderzeugten Strömungsvorgänge im Bodensee werden die allgemeinen Eigenschaften der Flusswasserausbreitung erschlossen.

Die Schichtung des Sees erfährt während der 14-tägigen Simulationszeitspanne nur Änderungen durch die Zuflüsse und die turbulente Vermischung im See-Innern. Der Auskühlungseffekt durch den winterlichen Wärmeverlust an der Seeoberfläche blieb vorerst noch unberücksichtigt. In der frühen Phase des Winters und für die kurze Zeitspanne ist nur mit einer relativ geringen Tiefenverlagerung der Temperatursprungschicht zu rechnen. Dies ist für die Einschichtung des Flußwassers sekundär, das unabhängig von diesen Unterschieden durch die hydrologische Konstellation seiner dichtebestimmenden Zustandsgrößen auf das Eindringen in große Tiefen ausgerichtet ist.

Die seeweiten Lösungen des Basismodells werden mit einer horizontalen Gitterweite von 200 m und vertikal mit einer Aufteilung in 63 Schichten berechnet, wobei die Deckschicht in einer anfänglichen Mächtigkeit von 80 m in 41 Schichten approximiert wird. Die besonderen Einschichtungsvorgänge unmittelbar an der Mündung werden in einem 4,15 x 3,5 km großen

Ausschnittmodell mit 25 m horizontaler Gitterweite und aufgelöst in 57 Schichten mit identischer Mächtigkeit nachgebildet. Zusätzlich zu diesem als „Alpenrheinmodell“ bezeichneten Teilmodell für den Nahbereich wurde auch die Teilmodellversion „Bregenzerbucht-Modell“ für den gesamten östlichen Seebereich ab der Höhe von Kressbronn zum Vergleich mit angewendet, um so den Einfluß des see-eigenen Strömungsfeldes auch auf mittelweite Entfernungen von der Mündung in der feineren horizontalen Auflösung von 50 m gegenüber dem Basismodell besser verfolgen zu können. Diese Berechnung wurde für Szenarien mit den realen Windverhältnissen des Simulationszeitraums gewählt, die in Abb. 2 dargestellt sind. Die Einschichtungsvorgänge unmittelbar an der Mündung werden durch die horizontale Auflösung von 50 m gegenüber 25 m im Alpenrheinmodell, das den übrigen Szenarien in diesem Bericht zugrundeliegt, im wesentlichen noch gleichartig nachgebildet. Der Einstrom von Bregenzerach und Dornbirnerach ist sowohl im Basismodell als auch im Bregenzerbucht-Modell aufgenommen. Die Einzelheiten der Modelltheorie und der Auslegung des gesamten Modellsystems mit überwiegender Anwendung in Eulerscher Betrachtungsweise sind dem IGKB-Bericht Nr. 50 von 1999 zu entnehmen.

Die einzelnen Fallstudien und ihre Ergebnisse

Ergebnisbeschreibung durch Momentaufnahmen der Einstromszenarien

Nachfolgend wird die tiefgerichtete Ausbreitung des Alpenrheins in ausgewählten Fallsituationen gezeigt, in denen die Hauptmerkmale des Verhaltens unter Windeinfluß markant hervortreten. Für die Szenarien wird eine Kurzbezeichnung verwendet, die aus Gründen der Übersichtlichkeit bereits im IGKB-Bericht Nr. 50 eingeführt wurde. Da die gleichen hydrologischen Bedingungen bei einigen Szenarien dieser Untersuchung, die ohne Windeinwirkung berechnet wurden, zugrundegelegt waren, erschien es sinnvoll, diese Fallbezeichnungen beizubehalten.

Übersicht der tiefen Einstromszenarien des Alpenrheins

<i>Abkürzung</i>	<i>Erläuterung</i>
W91	<i>Referenzlage 1989* ohne Wind</i>
W91-VE	<i>Endlage der Vorstreckung ohne Wind</i>
W91-Wr	<i>Referenzlage 1989* mit realer Westwindperiode Dez.1991/ Jan. 1992</i>
W91-VE-Wr	<i>Endlage der Vorstreckung mit realer Westwindperiode Dez.1991/ Jan. 1992</i>
W91-W1	<i>Referenzlage 1989* mit starker Westwindlage von Jan./Feb. 1990</i>
W91-VE-W1	<i>Endlage der Vorstreckung mit starker Westwindlage von Jan./Feb. 1990</i>
W91-W2	<i>Referenzlage 1989* mit mäßigen Nordostwinden Nov./Dez. 1995</i>
W91-VE-W2	<i>Endlage der Vorstreckung mit mäßigen Nordostwinden Nov./Dez. 1995</i>

** Die Referenzlage 1989 bezieht sich auf die topographische Mündungskonfiguration von 1989 und auf die Lage der Dammköpfe vom Dezember 1991.*

Einstrom ohne Wind

Aus den Einstromszenarien ohne Wind ist zu ersehen, wie sich die Fernausbreitung allein durch die Zuflüsse des Sees, also im wesentlichen durch das vom eingeschichteten Hauptzubringer verursachte Bewegungsfeld ergibt. Der Vergleich mit dem Verhalten im winderzeugten Strömungsfeld des Sees lehrt wichtige einheitliche Merkmale und sich charakteristisch unterscheidende Entwicklungen, wie beispielsweise verschiedene Reichweiten bei gleichen Laufzeiten, besser zu verstehen.

Szenarien: Referenzlage 1989 und Endlage der Vorstreckung ohne Wind (W91, W91-VE)

Um die Ausbreitungsverhältnisse zu erfahren, die sich ohne Wind einstellen, wird das Szenarien-Paar W91 und W91-VE betrachtet. Dabei wird die insgesamt langsamer als bei Wind einfluß verlaufende Ausbreitung in einer relativ zeitnahen Phase nach der Markierung, nämlich nach fünf Tagen am 28.12.1991, 6⁰⁰ Uhr, und vom Schluß, am 6.1.1992, 6⁰⁰ Uhr, aufgezeigt. Wie aus den Abbildungen 6 und 7 für den frühen Zeitpunkt jeweils für die Referenz-Lage und Endlage zu ersehen ist, differieren die Fahnenstrukturen bereits auffällig. Bei der realen Mündungsform ist zwar eine insgesamt noch zusammenhängende Fahne, aber in den Schwerpunkten hinsichtlich flacher und tiefreichender Einschichtung bereits eine Zweiteilung erkennbar. Ein Teil des Flußmischwassers, das durch randliche stärkere Vermischung mit dem Seewasser leichter geworden war, ordnet sich beim Eindringen in einem südöstlich ausgerichteten Streifen südlich von Lindau an, während ein mit dem Frontbereich tief liegender zweiter Fahnenanteil am Fuß des Unterwasserabhanges etwas breiter nach Nordwesten zu vordringt.

Das entsprechende Verteilungsbild für die Endlage der Mündung zeigt eine wesentlich kompaktere, wolkenartige Struktur, die noch relativ näher zur Mündungsöffnung liegt und nur einen geringen Anteil weniger flach nach Osten abgegeben hat. Die in den tieferen Seebereich hineinragende Endposition der Mündung bewirkt offenbar eine stärkere Bündelung der Fahne. Dennoch deutet sich an, daß die mittlere Einschichtungstiefe der Fahne geringer als für die Referenz-Lage der Mündung ausfällt, weil das Flußwasser bei den größeren Wassertiefen zunächst bereits nahe der Mündung frei im See-Innern verbleibt und einer anderen Vermischung unterliegt, als im Fall der Referenz-Lage, bei der es in seinem inneren Fahnenanteil bei den geringeren Wassertiefen bodenauflegend einströmt und einer geringeren Vermischung mit Seewasser ausgesetzt ist.

Die am Schluß der Simulationsphase entstandenen Tracerverteilungen sind den Abbildungen 8 und 9 zu entnehmen. Für den Fall W91 ist eine klare Zweiteilung in eine flache Wolke südlich von Lindau, die ca. 60% des Ensembles umfaßt, und eine breiter gestreute tief liegende Wolke festzustellen, die den größten Teil des restlichen Ensembles umfaßt und deren Front bis auf die Höhe der Argenmündung reicht. Es bewegen sich sogar flache Anteile aus der östlichen Wolke wieder auf die Rheinmündung zu. Dies wird durch Rezirkulationsvorgänge bewirkt, die durch das Abtauchen des Flußwassers unmittelbar vor der Mündung verursacht werden.

Im Falle W91-VE bildet sich ein in länglichen Streifen angeordneter flacher Fahnteil vom Bereich südwestlich von Lindau am Ufer entlang bis Wasserburg aus. Das übrige schwerer bleibende Flußmischwasser breitet sich ähnlich weit wie im Fall W91 nach Nordwesten aus, behält aber eine kompakte Struktur der Wolke bei, was der Fokussierung durch die Form und Endlage der Mündung zuzuschreiben ist.

In Tab. 3 sind neben anderen Kenngrößen die Zahlenwerte der mittleren Entfernung von der Mündungsöffnung und der mittleren Tiefenlage beider Wolkenteile zusammengestellt, die durch eine Gerade im Meridian der jeweiligen Mündungsmitte getrennt definiert sind. Außerdem sind die Tracer-Anteile angegeben, wie sie sich auf beide Seiten aufteilen. Wie die Zahlenwerte für das Simulationsende zeigen, hat sich der am 25.12.1991 abzeichnende Strukturunterschied zwischen beiden Szenarien voll herausgebildet. Bei der Referenz-Lage der Mündung befindet sich der Westteil der Fahne, der nur ca. 40% der Tracer enthält, mit 118 m mittlerer Tiefe erheblich unterhalb des entsprechenden Fahnteils bei der Endlage der Vorstreckung, der zwar rund 85% der Tracer umfaßt, aber in der mittleren Tiefe von nur 84 m liegt. Die komplementären Tracer in der flacher eingeschichteten östlichen Wolke verhalten sich hinsichtlich ihrer mittleren Tiefen von 27 m (W91) und 19 m (W91-VE) ähnlich. In der beachtlichen Differenz der Tracer-Anzahl in der tiefen westlichen Wolke beider Szenarien äußert sich der Bündelungseffekt infolge der in den See geradlinig vorverlegten Auslaufposition und der geringeren Mündungsweite. Die kompaktere Verteilung des westlichen tiefen Fahnteils und der stärkere Zusammenhang mit den östlichen flachen Einschichtungen bedingen eine um 700 m geringere mittlere Entfernung der westlichen Wolke von der Endlage der Mündung, als es bei ihrer Referenz-Lage der Fall ist. Für die östliche Wolke ist die Tendenz gleich, der Lageunterschied beträgt rund 300 m. Offensichtlich ist die Ausbreitung des Flußwassers bei einer mehr im Freiwasser liegenden Mündungsposition zunächst weniger von Gleit- und Vermischungseffekten am Rand des Seebeckens beeinflusst wie im Fall der weiter östlich gelegenen Referenz-Lage mit ihrer nicht so tief vorgelagerten Bodenkonfiguration.

Einstrom bei Starkwindlagen

Erheblich andere Verhältnisse stellen sich bei winderzeugter Zirkulation ein, wenngleich die Fokussierung der Fahne bei Endlage der Mündung bis auf mittlere Entfernungen markantes Merkmal vor allem der tief eingeschichteten Fahnteile bleibt. Die Ausbreitung verläuft in enger Kopplung mit der Intensität der winderzeugten Strömung und steht daher vor allem mit den zeitlichen Änderungen des Starkwindfeldes über dem See in engem Zusammenhang. Die interpretierende Beschreibung orientiert sich deshalb am zeitlichen Verlauf der Windanfischung und beachtet dabei einige prinzipielle und daher wiederkehrende Verhaltensmuster der Strömung. Ausgangspunkt der Betrachtung ist das jeweilige Winddiagramm in den Abbildungen 2 bis 4, auf das jeweils hinsichtlich der Zeitspannen von Starkwindlagen und Phasen schwacher Luftbewegungen zur Interpretation der Ergebnisse genau Bezug genommen wird.

Szenario: *Referenzlage 1989 mit realer Westwindperiode
Dez.1991/Jan.1992 (W91-Wr)*

In der mit Wr bezeichneten realen Westwindepisode in Abb. 2 herrscht bis über den Markierungszeitpunkt am 23.12.1991 6⁰⁰ Uhr hinaus, ein starkes westliches Windfeld, auf das nach schwachen Winden um den 25.12.1991 eine erneute anderthalbtägige starke Westwindlage

folgt. Die Tracerverteilung in der ruhigen Zwischenphase am 25.12.1991 6⁰⁰ Uhr ist in Abb. 10 wiedergegeben und zeigt eine auffällige nordwestlich gerichtete streifenförmige Zweiteilung der Fahne. Ein flacher Teil mit Ausläufern bis in die innere Bregenzer Bucht streicht am Lindauer Unterwasserabhang entlang. Der andere weit nach Westen bis auf die Höhe von Kressbronn reichende Streifen ist tief eingeschichtet und wird am Unterwasserabhang entlang geführt. Diese klare Aufteilung der Fahne ist verursacht durch die noch in der letzten Phase des vorauslaufenden Starkwindfeldes gegebenen starken Strömungen vor der Mündung. Innerhalb weniger Stunden wurde das Tracer-Ensemble in zwei noch flache Wolken aufgespalten, die eine vor der Alpenrheinmündung bleibend und die andere nach Osten vor den Uferabschnitt an der Bregenzerach-Mündung verschoben. Hierdurch ist das spätere Ausbreitungsverhalten charakteristisch vorgeprägt worden. Dieser Fall ist ein Beispiel dafür, welchen Einfluß starke see-eigene Strömungsvorgänge im Gebiet um die Mündung nehmen können.

Die relativ kurze nachfolgende westliche Starkwindphase verschmiert den flachen östlichen Streifen über die ganze Seebreite und in die gesamte innere Bregenzer Bucht hinein. Nach dem Ende dieser letzten Anfachung bestehen kontinuierlich ruhige Verhältnisse über dem See, die keine so markanten Verschiebungen mehr bewirken. Das Endergebnis der Ensemble-Verteilung am 6.1.1992, 6⁰⁰ Uhr, ist in Abb. 11 und in einigen Kenngrößen in Tab. 4 angegeben. Die Ausbreitungstendenz der oberflächennahen Wolke nach Südosten unterliegt dem Corioliseffekt, der eine Abweichung der Driftströmung an der Oberfläche von ca. 45° nach rechts von der Richtung zur Folge hat, in die der Wind weht. Mit zunehmender Tiefe reduziert sich der Driftstrom stark, wobei seine Richtung weiter nach rechts dreht. Hierdurch ist diese Strömung im wesentlichen auf die Oberflächenschicht begrenzt und weicht hinsichtlich ihres vertikal integrierten Transports um bis zu 90° nach rechts ab. Ist wie im Falle des Bodensees die Wasserfläche nur mehrere Kilometer breit, so hat die Rechtsablenkung etwas kleinere Ausmaße.

Auf eine scheinbar unwichtige Struktur, die vor dem Uferabschnitt von Langenargen bis Nonnenhorn aus flachen Tracerpositionen besteht, wird bereits hier verwiesen. Wie das nicht wiedergegebene Bild der Tracerverteilung vom 27.12.91 6⁰⁰ Uhr zeigt, entwickelte sich in der letzten Starkwindphase eine oberflächennahe Anordnung durch dort am Unterwasserabhang erzwungene Auftriebsbewegungen, die den in diesem Bereich gerade eingetroffenen vorderen Teil der tiefliegenden Tracer-Wolke erfaßten und ihn teilweise nach oben beförderten. Dieses örtliche Verhalten bei einer einsetzenden Westwindsituation zeigt sich auch im nachfolgenden Fall und tritt im Szenario für W1 (s. u.) eklatant zu Tage

**Szenario: *Endlage der Vorstreckung mit realer Westwindperiode
Dez. 1991/ Jan. 1992 (W91-VE-Wr)***

In Abb. 12 ist am 25.12.1991, 6⁰⁰ Uhr, das gesamte Tracer-Ensemble am Fuß des Abhangs vor der Kressbronner Bucht tief eingeschichtet und reicht bis östlich von Wasserburg zurück. Die Struktur ist durch den Kompensationsstrom und die fokussierende Wirkung der angenommen künftigen Mündung geformt worden. Es fand in diesem Fall keine anfängliche Zerteilung der Flußfahne kurz nach dem Markierungsbeginn statt, sondern das Flußwasser schichtete sich in Richtung des Mündungskanals geschlossen tief ein. In Abb. 12 ist die nordwestliche Front der Fahne auch bereits knapp 3 km weiter nach Nordwesten vorgedrungen als für die Referenz-Lage der Mündung (s. Abb. 10). In der zeitlich abgesetzten Starkwindphase vom 27. bis 28.12.1991 ist der markierte Fahnteil bereits auf der Höhe von

Langenargen und weiter nordwestlich davon angelangt. In dieser letzten Westwind-phase wird ein kleinerer Teil der Tracer vor Langenargen durch hier sich entwickelnde Auftriebsvorgänge nach oben geholt, während der Großteil des Ensembles tief eingeschichtet weiter nach Nordwesten und in den zentralen Bereich des Sees fortwandert. Dieses Verhalten hängt mit der zum See-Innern etwas aufgeweiteten Fahnenstruktur in dieser Phase zusammen. Die Auftriebsvorgänge sind hier nur nahe am Rand stärker entwickelt.

Das Endergebnis ist in Abb. 13 zu sehen, die den fast bis zur tiefsten Stelle des Sees zwischen Fischbach und Uttwil vorgedrungenen Hauptteil des markierten Flußwassers zeigt, wie er sich zwischen Romanshorn, Friedrichshafen und Langenargen über die gesamte Breite der Beckensohle erstreckt. Diese Situation kommt bei äußerlich schwachen Windverhältnissen in der zweiten Hälfte der Simulationszeitspanne dadurch zustande, daß das schon relativ weit zur zentralen tiefen Region des Sees gelangte Flußmischwasser in der fortbestehenden Zirkulation im tiefen Hypolimnion weiter zum Zentrum mitgenommen wird. Die Struktur in Abb.13 deutet an, daß eine großräumige horizontale Drehbewegung in der Tiefe besteht, die die Tracer am Fuß des gegenüberliegenden Unterwasserabhanges entlang wieder nach Südosten führt. Allgemein ist festzuhalten, daß die tiefsten Schichten des Sees in Seemitte mit Flußwasser regeneriert wurden, denn die mittlere Entfernung der markierten tiefen Einstromfahne mit 15,5 km hat etwa den doppelten Wert erreicht, wie für den westlichen Fahnteil im entsprechenden Fall W91-VE ohne Wind (s. Tab. 3 und 4).

**Szenario: Referenzlage 1989 mit starker Westwindlage
Jan./Feb. 1990 (W91-W1)**

In diesem Beispiel mit den im Gegensatz zu W91-Wr zeitlich anders liegenden westlichen Starkwindlagen ergibt sich in der besonderen Konstellation der Position der tiefen Fahnteile auch bei der Referenz-Lage der Mündung am Simulationsende eine noch weiter nach Nordwesten reichende Ausbreitung in der Tiefe. Um das nachvollziehen zu können, muß das Winddiagramm für W1 in Abb. 3 genauer betrachtet werden. In der Übertragung auf die Simulationsperiode bedeutet dies, daß vom 26. auf den 27.12.1991 eine kurze Starkwindlage aus Westen herrschte und danach bis zum 31.12.1991 schwacher Wind zu verzeichnen war. Anschließend herrschte für einen halben Tag westnordwestlicher Starkwind, wieder gefolgt von geringer Windstärke, bis am 3.1.1992 erneut ständig anhaltende starke Westwinde einsetzten.

Das Einstromverhalten erfolgt vor dem ersten Starkwindereignis tiefgerichtet und länglich zusammenhängend entlang dem Fuß des Abhanges zwischen Lindau und Wasserburg. In der Phase des Westwindangriffs vom 26./27.12.1991 ist die Masse des tiefliegenden Tracer-Ensembles noch nicht soweit gekommen, daß es vor der Kressbronner Bucht in den windbedingten Auftriebsvorgang gerät. Hiervon wird nur ein kleiner Teil an der Vorderseite und am nördlichen Wolkenrand erfaßt, der nach oben gelangt und in der Folge oberflächennah verbleibt. Die Situation am Ende dieser Westwindlage ist in Abb. 14 wiedergegeben. Man erkennt, daß einige von den an die Oberfläche gelangten Tracern mit der starken Driftströmung bereits in die gegenüberliegende Seehälfte vertrieben wurden. Der relativ geringe Zugriff der Auftriebsbewegung auf die tiefe Fahne hängt auch damit zusammen, daß der vordere nordwestliche Teil der tiefen Wolke bereits breiter verteilt ist und sich somit größtenteils außerhalb des eng am Nordufer konzentrierten Auftriebsfeldes befindet. Dieser Umstand war auch schon im Szenario W91-VE-Wr gegeben und hatte wesentlich dazu bei-

getragen, daß der Hauptteil der tiefen Flußwasserfahne ungestört zur Zentralregion des Sees weiterwanderte.

Die Endverteilung der Tracer ist in Abb. 15 im seeweiten Überblick dargestellt. Durch die Starkwindlage am 31.12.1991 und ab 3.1.1992 werden die oberflächennahen Elemente über die gesamte Seebreite bis auf die Höhe von Hagnau zerstreut. Die tiefen Fahmenteile unterliegen auch einer starken Streuung, werden aber durch die geringere Beckenweite in der Tiefe stärker zusammengehalten. Der zentrale Teil des Hauptbeckens ist in der Tiefe bis auf die Höhe von Immenstaad von Tracern erfüllt, die für sich gesehen sogar noch etwas weiter als im Fall W91-VE-Wr nach Nordwesten vorgestoßen sind.

**Szenario: *Endlage der Vorstreckung mit starker Westwindlage
Jan./Feb. 1990 (W91-VE-W1)***

Die Entwicklung verläuft in diesem Fall mit der Endlage der Mündung unerwartet anders und vermittelt dadurch einen sehr wichtigen Einblick. Bis zum 25.12.91 6⁰⁰ Uhr ist die schon bekannte, länglich zusammenhängende und dabei relativ schmale Struktur des markierten Fahnenabschnitts in Fortsetzung der Mündungskanalrichtung am Fuß des Abhanges bis westlich der Höhe Wasserburg gelangt. Sie ist mit ihrem vorderen Hauptteil bereits deutlich weiter nordwestlich plaziert als im vorigen Szenario.

Während der westlichen Starkwindattacke vom 26./27.12.1991 befindet sich das markierte Ensemble zwischen Wasserburg und Kressbronn und wird nun auch wegen seiner Schmalheit voll von den dort in Gang gesetzten starken Auftriebsbewegungen mit nach oben genommen. Die Folge ist, daß die Tracer in oberflächennahe Lage kommen und sich nur noch ein kleiner Teil in mittleren Tiefen hält. Diese Situation ist in Abb. 16 zum Zeitpunkt 27.12.1991, 6⁰⁰ Uhr, veranschaulicht. Beim Transport durch die starke Driftströmung haben die ersten der obersten Tracer bereits die Mitte des Seebeckens zur gegenüberliegenden Seite des Sees überquert. Das gesamte Windgeschehen führt dann, vor allem durch die starken westlichen Winde in den Schlußtagen der Simulation dazu, daß die Masse der Tracer im östlich von Langenargen-Arbon liegenden Seeteil bleibt, was auch für die tief eingeschichteten Anteile gilt. Die am Simulationsende erreichte Verteilung ist Abb. 17 zu entnehmen. Die zugehörigen Kenngrößen sind in Tab. 4 angegeben.

Durch die randliche konzentrierte Lage der tiefen Wolke am 26./27. 12.1991, kann das kurze Starkwindereignis bewirken, daß der markierte tiefe Fahnenabschnitt von seiner Tendenz, sich seitlich zur zentralen Region hin zu bewegen, durch das lokale kurzzeitige Auftriebsfeld fast vollständig nach oben umgelenkt wird. In diesem Verlauf zeigt sich eine ungünstige Eigenschaft der Endlage der Vorstreckung: Durch die Bündelung der Fahne ist diese fast komplett in das randliche Auftriebsfeld gesteuert worden, was bei der Referenz-Lage durch die größere Breite der Fahne und ihre noch weiter östlich gebliebene Gesamtlage vermieden worden ist. Der Vergleich beider Ergebnisse gibt Hinweise darauf, daß mindestens die geplante Richtung der Mündungs-Endlage modifiziert werden müßte, um dieses Ausmaß der Unterbrechung tiefer Flußwasserzufuhr zur Seemitte hin zu reduzieren.

**Szenario: *Referenzlage 1989 mit mäßigen Nordostwinden
Nov./Dez. 1995 (W91-W2)***

In diesem insgesamt durch nord- bis nordnordöstliche mäßige Winde gekennzeichneten Fall ist zur Interpretation wiederum genauer auf die Zeitspanne zu achten, in der die stärkeren Windphasen auftreten. Aus Abb. 4 geht hervor, daß vom 23.12.1991, 6⁰⁰ Uhr, dem Markie-

rungszeitpunkt, bis mittags des folgenden Tages sehr geringe Luftbewegung herrscht. Erst dann setzt stärkerer nordöstlicher Wind ein, der sein Maximum vormittags am 26.12.1991 erreicht. Danach nimmt die mäßige Windstärke fast gleichförmig bis zum Morgen des 2.1.1992 ab. Danach kommt wieder stärker werdender NO-Wind auf. Sein Maximum liegt höher und tritt in der Nachtmittage von 3. auf den 4.1.1992 ein. Anschließend erfolgt eine schwankende Abnahme bis zum Simulationsende.

Der windintensive Schlußabschnitt erzeugt eine weitreichende Verteilung der überwiegend oberflächennah verbliebenen Tracer. Als wesentliche Eigenschaft ist den durch die nordöstlichen Winde erzeugten Zirkulationen eigen, daß nun am südlichen Ufer in der gesamten östlichen Seehälfte, und vermehrt auf die Seebreite zum östlichen See-Ende hin Auftrieb erzeugt wird. Dieser Vorgang erfolgt als Kompensation zum nach rechts vom Wind durch die ablenkende Kraft der Erdrotation gerichteten Oberflächenwassertransport, der nun generell nach Nordwesten orientiert ist. Dabei muß jedoch beachtet werden, daß die horizontalen Bewegungen unterhalb der wenige Meter mächtigen Driftströmung auch bereits von der Kompensationsströmung nach Südosten zu bestimmt sein können, was vor allem zum östlichen See-Ende hin von Bedeutung ist.

Die nun im Auftriebsbereich liegende Mündung leitet das Flußwasser mit Tendenz zu flacheren Tiefen ein, was am 25.12.1991, schon im stärkeren NO-Windereignis zu einem zusammenhängenden Fahnenstreifen über dem Abhang von südlich Lindau bis Höhe Bad Schachen führt. Der nordwestliche Kopf des markierten Fahnenabschnitts liegt tiefer, und zwar im Tiefenbereich zwischen 60 und 80 m. Einen Tag nach dem relativen Windmaximum, also am 27.12.1991, befindet sich fast die gesamte Tracerwolke östlich der Mündung überwiegend flach eingeschichtet mit dem Hauptteil in der inneren Bregenzer Bucht. Dieses Verhalten ist von der nach Südosten zu gerichteten Kompensationsströmung verursacht, die hier bereits in geringerer Tiefe unter der Driftströmung vorherrscht. Im weiteren Verlauf gelangt ein großer Teil der Tracer mit der entlang dem südlichen Ufer nach Westen gerichteten Strömung wieder zum Vorsprung der Alpenrheinmündung. Ein weiterer Teil wird um die Referenz-Lage der Mündung herumgeleitet und ist schließlich am 30.12.1991, 6⁰⁰ Uhr, im Wetterwinkel gelandet. Erste Elemente sind bereits um die Mündung des Alten Rheins herumgeführt worden und am Uferabschnitt zwischen Rorschach bis westlich von Arbon eingetroffen. Dieser Moment der Ausbreitung ist in Abb. 18 dargestellt.

Bis zum Schluß, als ein NO-Wind wieder verstärkt insgesamt vier Tage über dem See geweht hatte, ist die Westverteilung der Tracer stark vorangeschritten, sodaß die Hauptmenge nun in der Bucht zwischen Rorschach und Romanshorn am Ufer entlang versammelt ist. Fast alle Tracer sind entsprechend des Auftriebsverhaltens im Ausbreitungsgebiet in oberflächennahen Schichten geblieben (s. Abb. 19).

**Szenario: *Endlage der Vorstreckung mit mäßigen Nordostwinden
Nov./Dez. 1995 (W91-VE-W2)***

Die Endlage der Mündung bündelt den markierten Einstrom, der am 25.12.1991 in Richtung des Mündungskanals, nordwestlich-südöstlich orientiert, nahe am Fuß des Unterwasserabhanges zwischen Wasserburg und westlich Bad Schachen länglich zusammenhängend angelangt ist. Diese tief liegende Fahne wird unter dem Einfluß des anhaltenden stärkeren NO-Windes infolge der Kompensationsströmung in der Tiefe zurückgedrängt und nimmt eine mehr nordsüdlich gerichtete Anordnung ein. Dabei werden das nördliche und südliche Ende, das hart westlich der Mündungsöffnung zu liegen kommt, infolge von Auftriebsvorgängen

nach oben verlagert. Die fortdauernden aber abnehmenden nordöstlichen Winde halten die auftriebsbedingte Anhebung der Tracer in den genannten Bereichen aufrecht. Die in die Oberflächenschicht eingelagerten Teilchen werden bis 30.12.1991, 6⁰⁰ Uhr, wieder ans südliche Ufer zum Wetterwinkel und in die Rorschacher Bucht transportiert, was in Abb. 20 zum Vergleich mit Abb. 18 gezeigt ist.

Im Gegensatz zum Fall der Referenz-Lage werden jetzt aber auch Tracer über die ganze Seebreite nach Nordwesten bis zur Linie Langenargen-Arbon vertrieben, was der insgesamt nordwestlichen Driftströmung und den Ausgangsgebieten der flachen Tracer-Ansammlungen südwestlich Bad Schachen sowie hart westlich der Alpenrheinmündung und im Wetterwinkel zuzuschreiben ist. Im Gefolge der stärkeren NO-Winde während der letzten Tage der Simulationsperiode wird die Tendenz der oberflächennahen Tracer, über die gesamte Seebreite verschmiert zu werden, stärker. Das Endergebnis der Verteilung ist in Abb. 21 zu sehen. Die seeweite oberflächennahe Zerstreung ist bis zur Höhe von Meersburg erfolgt, wobei jedoch die Tracer deutlich in den ufernahen Abschnitten am südlichen Rand konzentriert sind, wie es sich auch im vorigen Szenario für die Referenz-Lage der Mündung am Schluß verhielt. Tiefere Einschichtungen sind im Buchtbereich zwischen Arbon und Rorschach, am Abhang vor Langenargen und auch noch bei Wasserburg festzustellen, sie sind aber mengenmäßig gering und haben deshalb nur untergeordnete Bedeutung.

Allgemein ist hinsichtlich der NO-Windlagen festzuhalten, daß sie die Tiefenversorgung des Hauptwasserkörpers im Hypolimnion mit Alpenrheinwasser behindern. Die seeweite oberflächennahe Ausbreitung der Tracer wird durch die geplante Alpenrheinmündung bei diesen Windfällen begünstigt.

Zusammenfassung und Wertung

Aus den Berechnungen ergeben sich folgende Haupterkenntnisse über die winterliche Ausbreitung des Alpenrheinwassers im See:

- Die Strömungsfelder im Bodensee sind durch die Corioliskraft deutlich beeinflusst. Winderzeugte Strömungen werden nach rechts von der Richtung abgelenkt, in die der Wind weht. Der nach rechts abgelenkte Oberflächentransport von Seewasser bewirkt an Uferabschnitten, auf die er trifft, einen Anstau und damit verbunden auch eine Absenkung von Oberflächenwasser in größere randliche Tiefen (Absenkungsgebiet). Im randlichen Herkunftsgebiet dieses Oberflächenwassers entstehen Auftriebsbewegungen, die an steileren Unterwasserabhängen besonders stark ausgeprägt sind (Auftriebsgebiet). Auftriebsbewegungen können zu einer Verringerung der Tiefenwassererneuerung durch Flußwasser beitragen, wenn es von der Anhebung erfaßt und bis in Oberflächennähe mitgenommen wird.
- Die geplante Endlage und vorgesehene einfache Form der Alpenrheinmündung bewirken eine starke Bündelung der Flusswasserfahne im Vergleich zur Referenz-Lage. Hierdurch hat die Flusswasserfahne im Nah- und Mittelbereich der Mündung eine Tendenz zu konzentriertem Eindringen in größere Tiefen entlang am Fuß der nordwestlich gelegenen Unterwasserabhänge. Die geplante Form und Endlage der Mündung ist hinsichtlich der Fokussierung der Fahne für eine Tiefenwassererneuerung durch Flußwasser grundsätzlich förderlich.

- Bei Westwind erfolgen die tiefliegenden Ausbreitungen am weitesten nach Nordwesten und können bis auf die Höhe von Immenstaad reichen. Dies ist fast die doppelte Entfernung, die sich in entsprechenden Szenarien ohne Windwirkung ergab. Westwind fördert grundsätzlich die winterliche Tiefenwassererneuerung durch Flußwasser.
- Die Richtung der geplanten Mündung kann bei starkem Westwind, der häufigsten Starkwindlage über dem Bodensee, bevorzugt dazu führen, dass die an den Unterwasserabhängen zwischen Nonnenhorn und Langenargen tief entlang streichende Fahne in ein Auftriebsgebiet gelangt. Hierdurch kann dieser Fahnenteil fast vollständig an die Oberfläche gehoben werden. In seinem weiteren Verlauf befindet er sich dann hauptsächlich in oberflächennahen Schichten. In dieser Situation wird eine Tiefenwassererneuerung durch Flußwasser weitgehend verhindert.
Wenn bei starkem Westwind die tief liegende Fahne bis in den zentralen mittleren Bereich des Hauptbeckens vorgedrungen ist, bleibt sie von randlichen Auftriebsvorgängen unberührt und kann sich mit den langsameren Strömungen in den tiefen Zonen weit nach Nordwesten ausbreiten. Dieser Prozess fördert die Tiefenwassererneuerung durch Flußwasser.
- Bei Nordostwindlagen wird das Flusswasser generell oberflächennah eingeschichtet, weil durch das zugehörige Strömungssystem weiträumige Auftriebsvorgänge im südöstlichen Seegebiet erzeugt werden. Durch die nach Nordwesten setzenden Oberflächenströmungen werden große Anteile des Flusswassers randlich in den Wetterwinkel an der Altenrheinmündung und an das schweizerische Ufer zwischen Rorschach und Romanshorn verfrachtet. Winterliche Nordostwindlagen vermindern die Tiefenwassererneuerung durch Flußwasser erheblich.
- In längeren Zeitspannen schwacher Winde ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Zuflusswasser im See i.a. deutlich reduziert. Dies charakterisiert die Ausbreitung bei den häufigen Schwachwindlagen über dem See. Bei schwachen Windverhältnissen ist daher generell die winterliche Tiefenwassererneuerung durch Flußwasser herabgesetzt und auf kleinere Gebiete im östlichen Seebereich beschränkt.

Die limnologisch bedeutsame winterliche Tiefenwassererneuerung und Sauerstoffregeneration wird wesentlich von folgenden Prozessen bestimmt:

- I. Vertikalzirkulation / Konvektion
- II. Seitliche Einströmungen von schwerem kalten Oberflächenwasser aus flacheren Randbereichen des Sees (Hollan, 2000)
- III. Tiefe Einschichtung von Flusswasser

Auch wenn diese Mechanismen durch die Witterung von Jahr zu Jahr mit unterschiedlichem Gewicht auftreten, bleiben sie doch in ihrem Zusammenwirken für den Seezustand dominant.

Hinsichtlich der limnologischen Fragestellung nach der Auswirkung der Alpenrheinvorstreckung auf die Ausbreitung des Flusswassers bis in die tiefsten Seeschichten und der damit verbundenen Tiefenwassererneuerung und Sauerstoffregeneration ergeben sich aus den Modellergebnissen folgende Feststellungen:

- Unabhängig von der Mündungslage beeinflusst die Windsituation maßgeblich die Verteilung des Flusswassers im See
- Die geplante Endlage der Alpenrheinmündung bewirkt generell eine Fokussierung der Flusswasserfahne und schafft damit eine der wesentlichen Voraussetzungen für Tiefenwassererneuerung
- Bei der geplanten Richtung der Mündungsöffnung erfolgt unter bestimmten, nicht seltenen Windlagen eine Hebung von bereits tiefer eingeschichtetem Flusswasser an die Oberfläche. Damit wird der Beitrag des Alpenrheinwassers zu einer Tiefenwassererneuerung vermindert.

Hieraus lässt sich aus Sicht des Gewässerschutzes (IGKB) folgende Empfehlung ableiten:

Zur Förderung einer fortlaufenden Erneuerung der tiefsten Wasserschichten durch Alpenrheinwasser muß sichergestellt werden, dass die Flusswasserfahne bei der angestrebten Endlage der Mündung den zentralen tiefen Bereich des Sees stets erreicht. Hierzu sollte - unter Berücksichtigung der verschiedenen relevanten Randbedingungen - eine Optimierung der Mündungslage und -form angestrebt werden.

Mit dem Modell wurde ein bisher einzigartiges Instrument zur Nachbildung von Ausbreitungs- und Strömungsvorgängen im Bodensee unter Einbeziehung der beiden Hauptzuflüsse geschaffen. Prognosen über die Auswirkung von Eingriffen wie z.B. der Rheinvorstreckung und die limnologische Bewertung von Mündungsvarianten sind nur mit derartigen Modellansätzen möglich. Die bisher eingesetzten Mittel sind daher durchaus angemessen.

Das vorliegende Modellsystem enthält als Grundbaustein ein allgemeines mathematisch-physikalisches Seenmodell, das wesentliche seenphysikalische Prozesse im See wie z.B. Strömungen (Zirkulation) und Transportvorgänge, vertikale und horizontale Vermischungen nachbildet. Daraus ergibt sich über die bisherige Verwendung hinaus für die Zukunft eine Reihe weiterer Anwendungen bei Ereignissen, die für den Seezustand von grundlegender Bedeutung sind. Dazu gehören z.B. Fragen nach den Auswirkungen von Eingriffen in den Abfluß des Sees, eines veränderten Temperatur- und Wasserregimes, wie sie als Folgen einer Klimaveränderung auftreten können oder nach der Ausbreitung von Schadstoffen nach Unfällen. Eine vermehrte Anwendung von Modellen wird daher auch für den Gewässerschutz am Bodensee eine unverzichtbare Zukunftsaufgabe sein.

Literaturangaben

- Bäuerle, E. und E. Hollan (1993): Seenphysikalische und limnologische Dokumentation zur Vorstreckung des Alpenrheins in den Bodensee - eine Literaturstudie - Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Bericht Nr. 42, 122 Seiten.
- Dittrich, A. und B. Westrich (1988): Bodenseeufererosion: Bestandsaufnahme und Bewertung. Mitteilungen Institut für Wasserbau, Eigenverlag des Inst. f. Wasserbau der Univ. Stuttgart, 168 Seiten, Anhang A mit 14 Seiten.
- Duwe, K., Fey, A. und E. Hollan (1999): Mathematisches Modell des Alpenrhein-Einstroms in den Bodensee. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Bericht Nr. 50, 145 Seiten.

Hollan, E. (2000): Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf größere Binnenseen. In: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 29. und 30.11.2000 in Karlsruhe, KLIWA-Berichte, Heft 1, S. 213-235, Karlsruhe (ohne Jahresangabe).

Hydromod Wissenschaftliche Beratung (2001): Bericht über vertiefte Auswertung und ergänzende Berechnungsfälle über die Fernausbreitung tiefreichender winterlicher Einschichtung des Alpenrheins in den Bodensee-Obersee im Rahmen des IGKB-Projektes Mathematisches Modell-Vorstreckung Alpen-rhein. Wedel/Holstein 2001, 38 Seiten mit 24 Abbildungen, 6 Tabellen im Text und 66 Abbildungen im Anhang (unveröffentlicht).

Schröder, H.G. (1992): Sedimentoberflächen im östlichen Bodensee-Obersee, Sidescan Untersuchungen im Zusammenhang mit den Auswirkungen der Vorstreckung des Alpenrheins. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Bericht Nr. 43, 35 Seiten.

Meßtiefe	Temperatur
1 - 76 m	5,59 °C
80 m	5,34 °C
85 m	5,11 °C
90 m	4,93 °C
95 m	4,83 °C
100 m	4,72 °C
105 m	4,74 °C
110 m	4,71 °C
115 m	4,65 °C
120 m	4,62 °C
125 m	4,63 °C
130 m	4,60 °C
135 m	4,58 °C
140 - 150 m	4,54 °C
155 - 170 m	4,51 °C
175 m	4,49 °C
180 - 190 m	4,47 °C
195 - 210 m	4,46 °C
215 - 248 m	4,45 °C

Tab. 1: Temperaturprofil an Seemitte Fischbach-Uttwil nach Terminmessungen des ISF vom 19.12.1991

Hydrologie Alpenrhein		
Parameter	17.12.1991	23. 12. 1991
Abfluß in m ³ /s	150,0	424,0
Temperatur in °C	2,40	2,90
Schwebstoffgehalt in g/l	0,021	0,088

Tab. 2: Hydrologische Werte des Alpenrheins am Simulationsbeginn 17.12.1991 und zum Zeitpunkt der Markierung in der Flussmündung am 23.12.1991

Szenario	W91-VE	W91	W91-VE	W91
	westlicher Fahnenenteil		östlicher Fahnenenteil	
mittlere Tiefe [m]	84	118	19	27
maximale Tiefe [m]	181	184	53	89
mittlere Entfernung [km]	7,830	8,571	2.285	2,574
Traceranzahl	848	400	152	600

Tab. 3: Charakteristische Kenngrößen der Tracerverteilungen am 6.1.1992, 6° Uhr, 14 Tage nach Markierung, für die Szenarien W91 und W91-VE. Die Gesamtzahl der Tracer beträgt 1000.

Szenario	W91-VE-Wr	W91-W1	W91-Wr	W91-VE-W1
tiefe Nordwestausbreitung	begünstigt		gehemmt	
mittlere Tiefe [m]	126	97	44	53
maximale Tiefe [m]	249	245	173	153
mittlere Entfernung [km]	15,457	17,339	4,107	4,532

Tab. 4: Charakteristische Kenngrößen der Tracerverteilungen am 6.1.1992, 6° Uhr, 14 Tage nach Markierung, für die Szenarien mit Windeinwirkung. Auswahl für starke Hauptausbreitung in großen Tiefen nach Nordwesten und für die gehemmte Ausbreitung, jeweils für westlichen Wind. Die Angaben gelten für das gesamte Ensemble von 1000 Tracern und sind nicht nach westlich und östlich der jeweiligen Mündungslage befindlichen, sowie nach flach- und tiefeingeschichteten Tracern aufgeteilt.

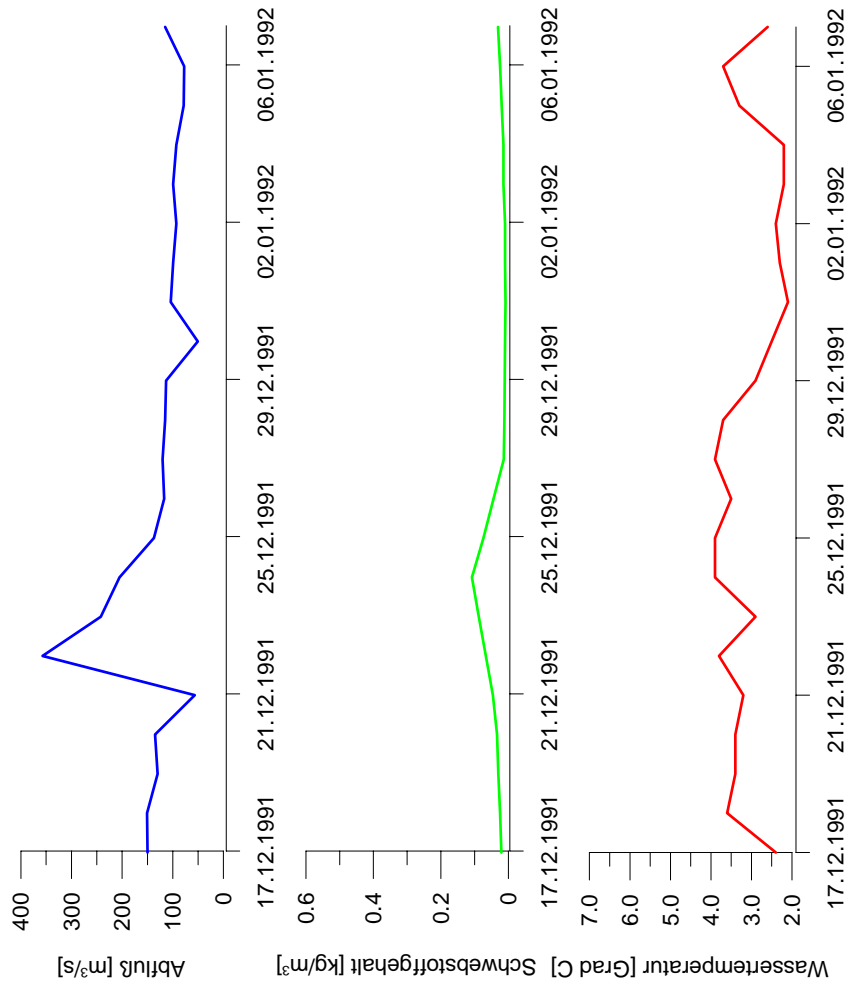


Abb. 1: Verlauf von Schwefelstoffgehalt, Temperatur und Abfluß des Alpenrheins vom 17.12.1991 bis 07.01.1992 an der Station Rhein-Diepoldsau, Rietbrücke

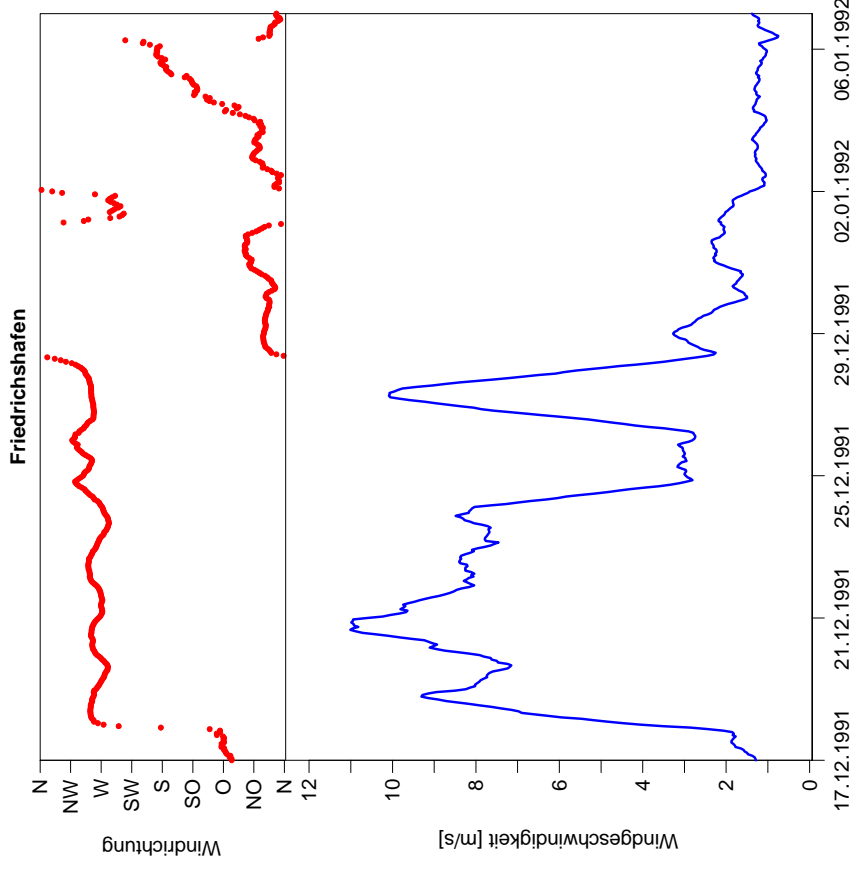


Abb. 2: Windrichtung und Windgeschwindigkeit in Friedrichshafen vom 17.12.1991 bis 07.01.1992 (gleitendes Tagesmittel) als Grundlage für den Fall W91-Wr

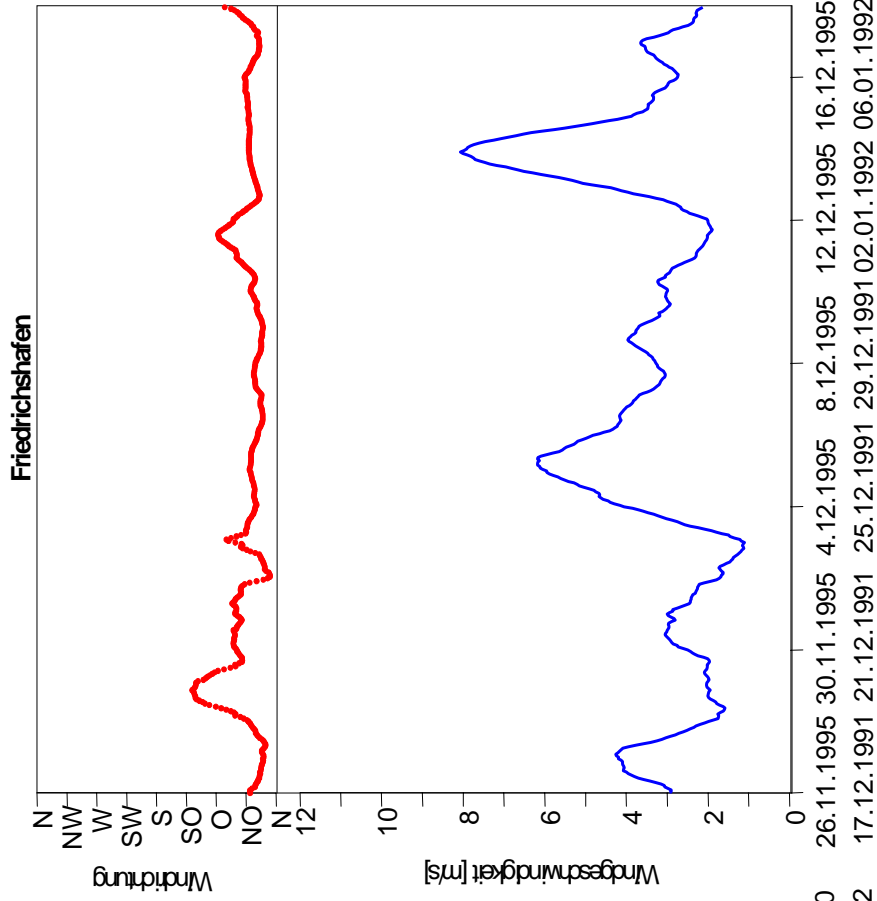


Abb. 4: Windrichtung und Windgeschwindigkeit in Friedrichshafen vom 26.11.1995 bis 18.12.1995 (gleitendes Tagesmittel) als Grundlage für den Fall W91-W2

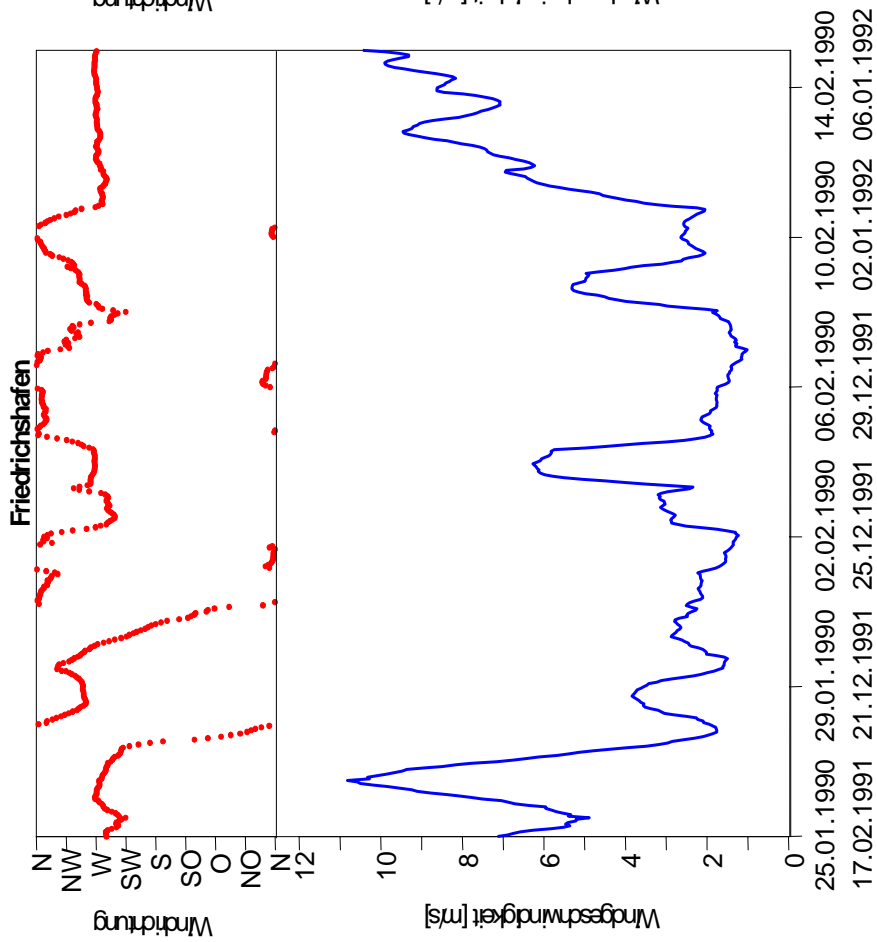


Abb. 3: Windrichtung und Windgeschwindigkeit in Friedrichshafen vom 25.01.1990 bis 15.02.1990 (gleitendes Tagesmittel) als Grundlage für den Fall W91-W1

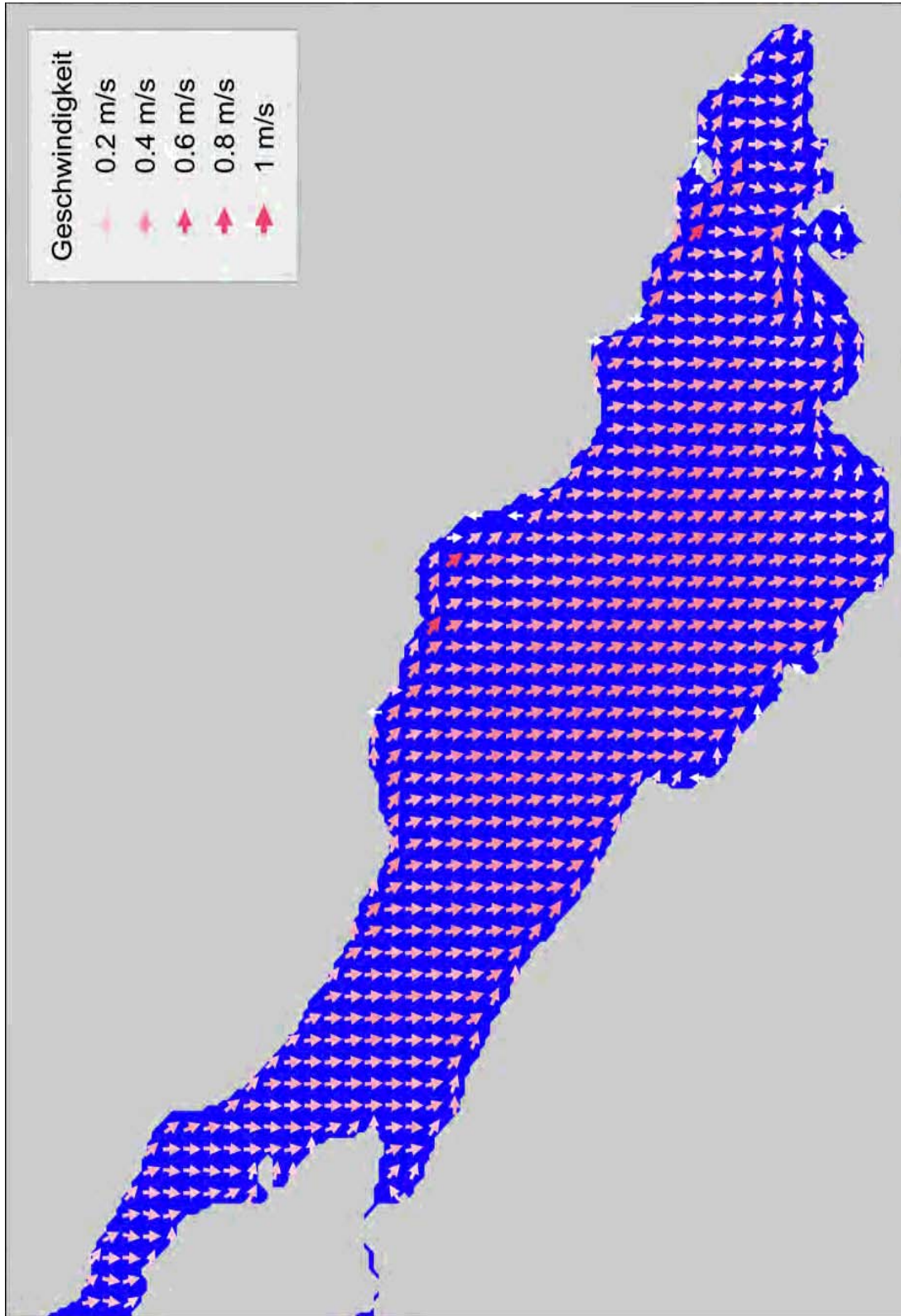
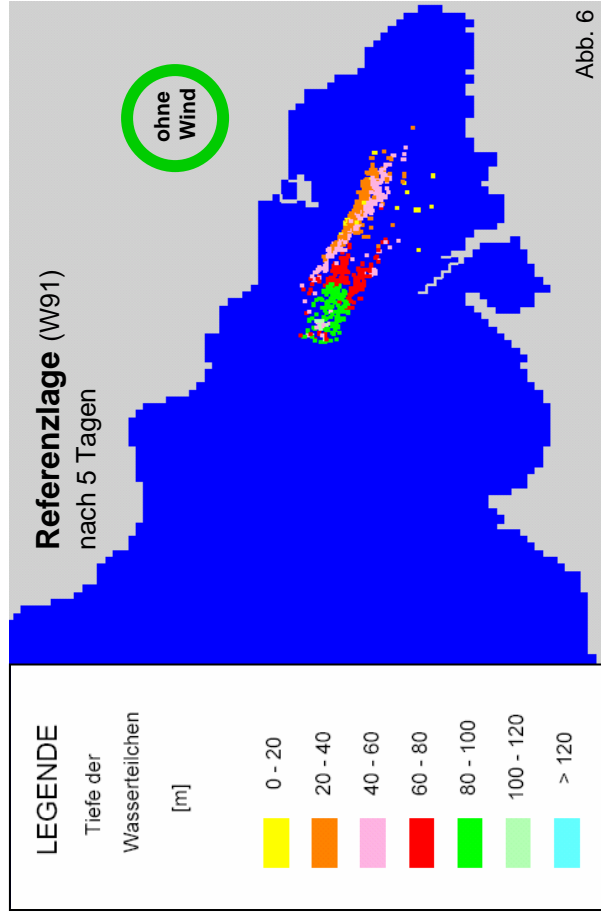
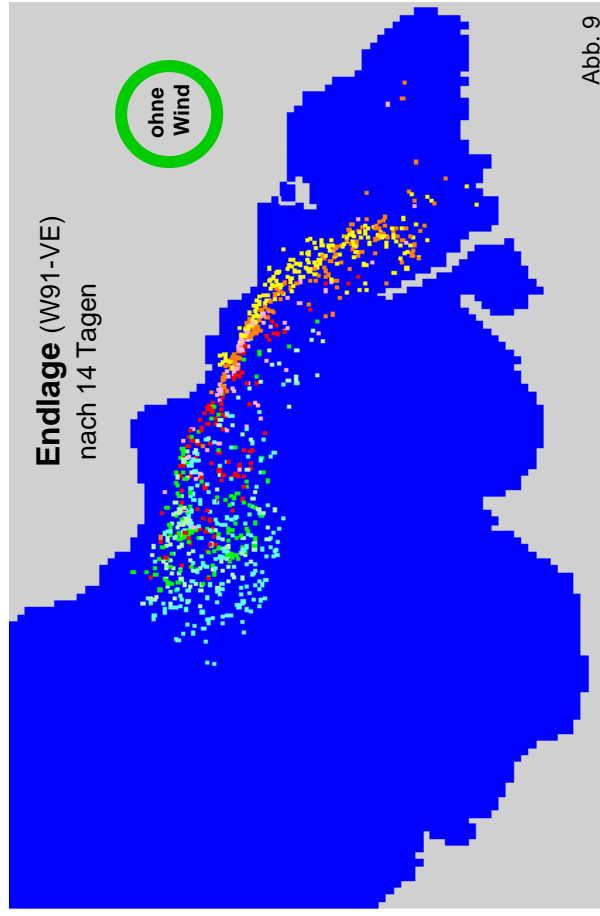
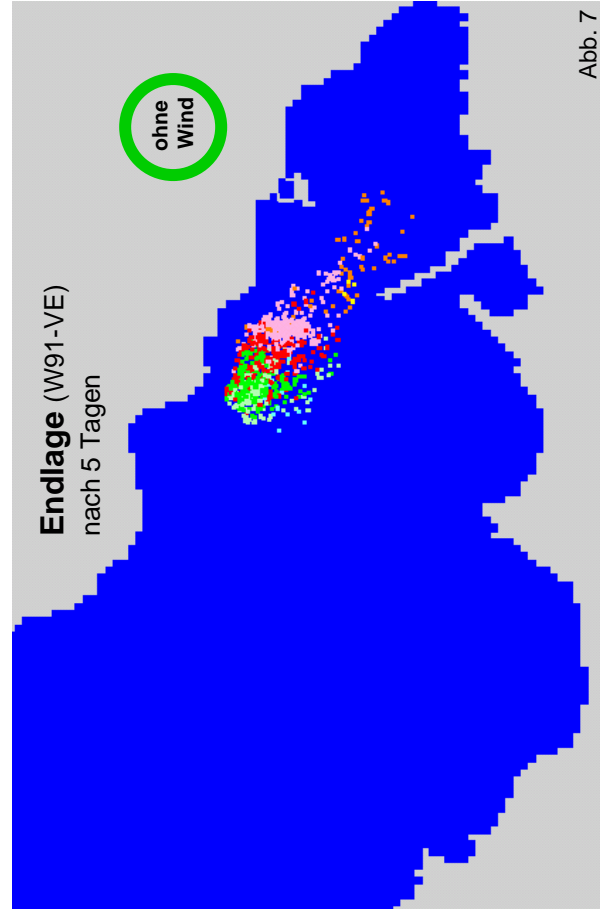
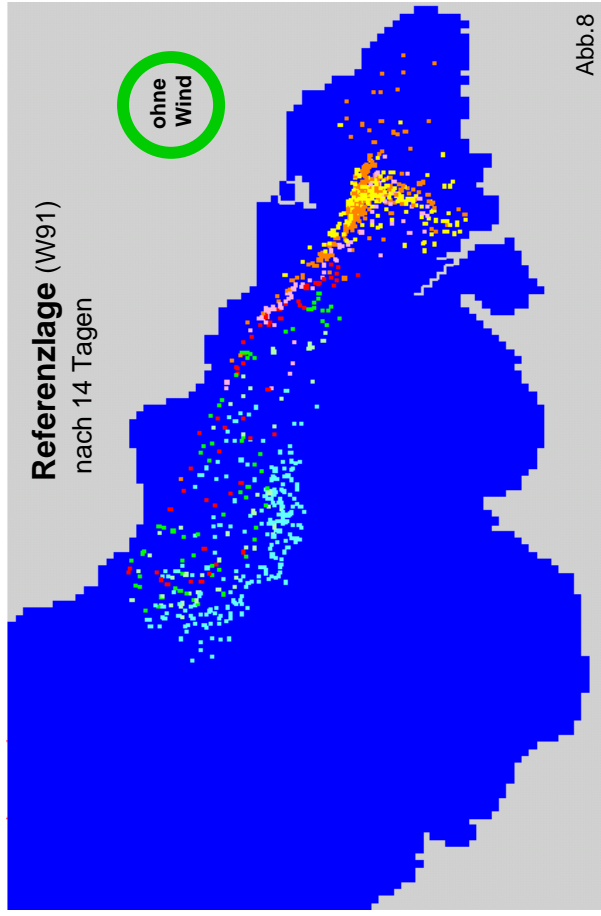


Abb. 5: Strömungsverteilung an der Oberfläche des Bodensee-Obersees im 200m-Modell am 23.12.1991 um 6.00 Uhr (aus Darstellungsgründen sind Pfeile im 800 m Abstand gezeigt, Windfeld siehe Abb. 2)

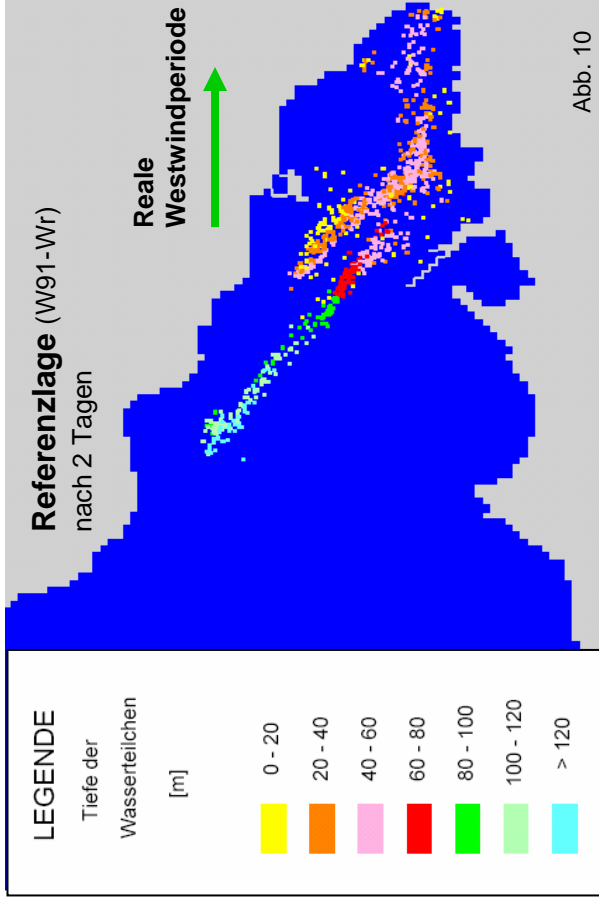
Einschichtung des Alpenrheins 28.12.1991 06.00 Uhr



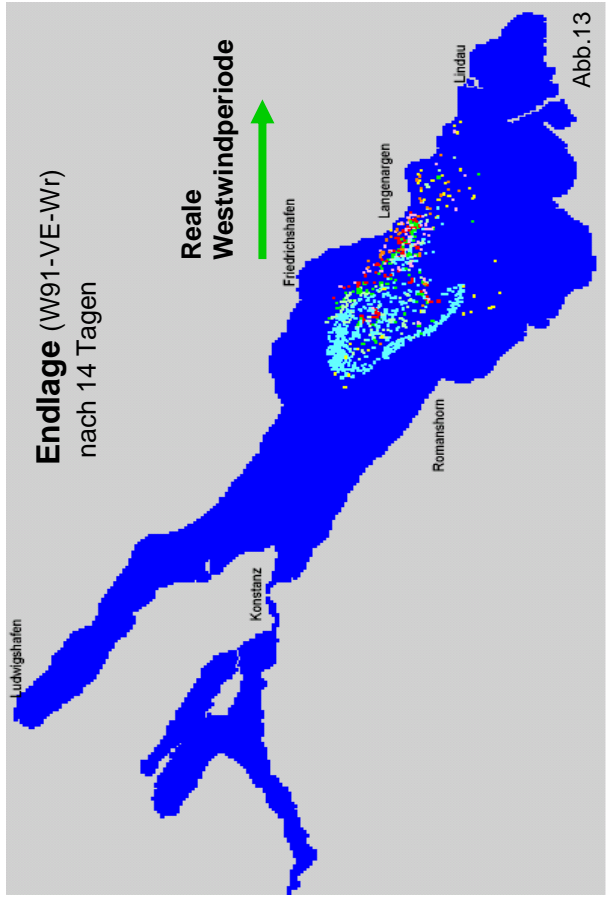
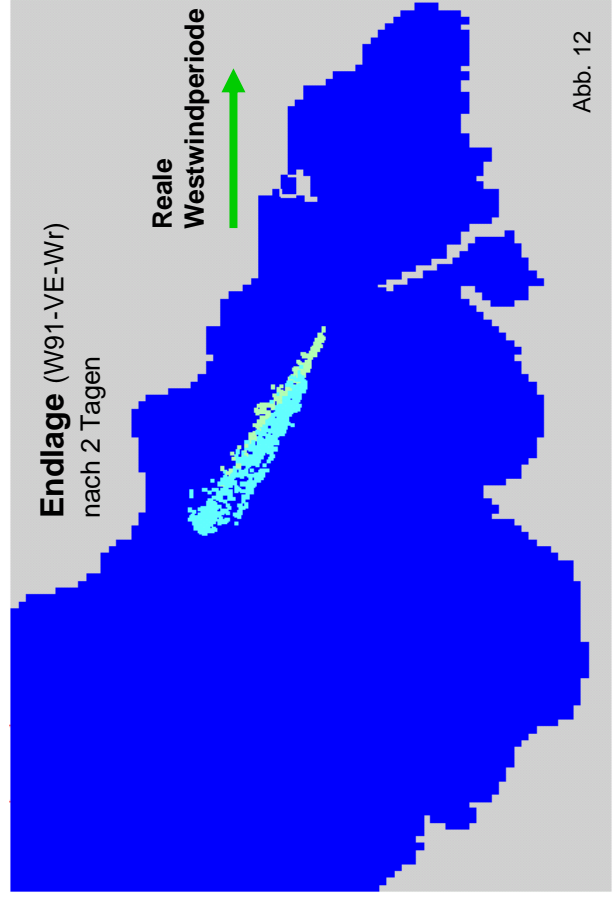
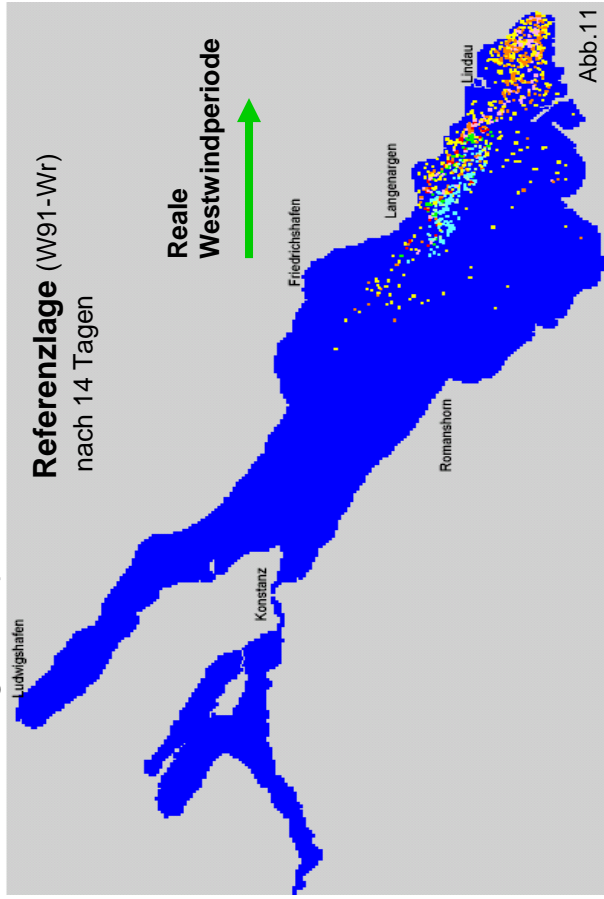
Einschichtung des Alpenrheins 06.01.1992 06.00 Uhr



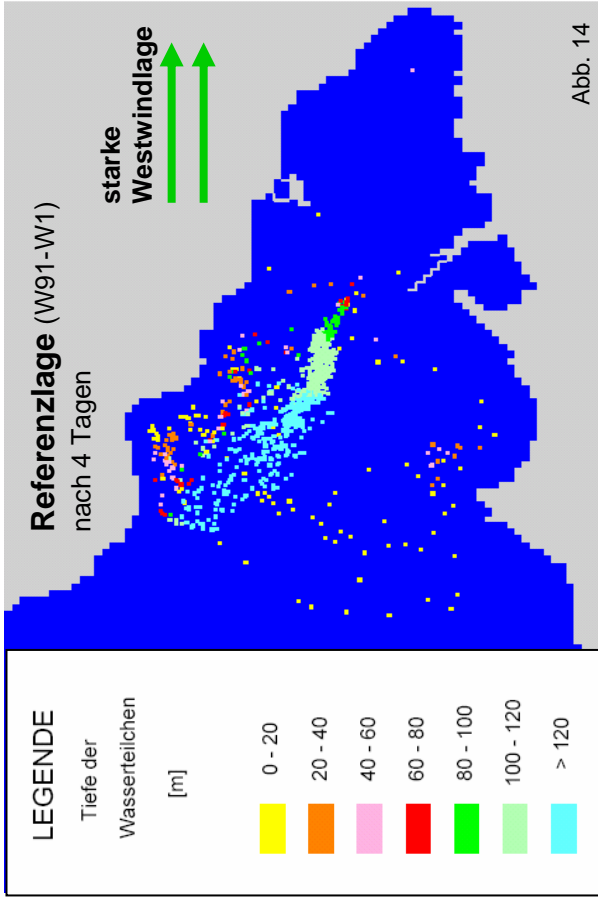
Einschichtung des Alpenrheins 25.12.1991 06.00 Uhr



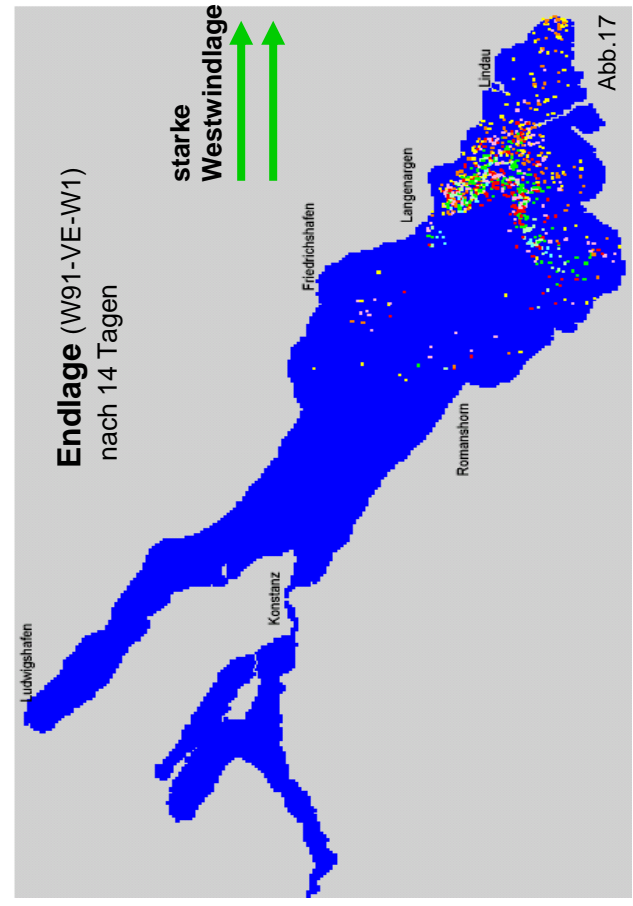
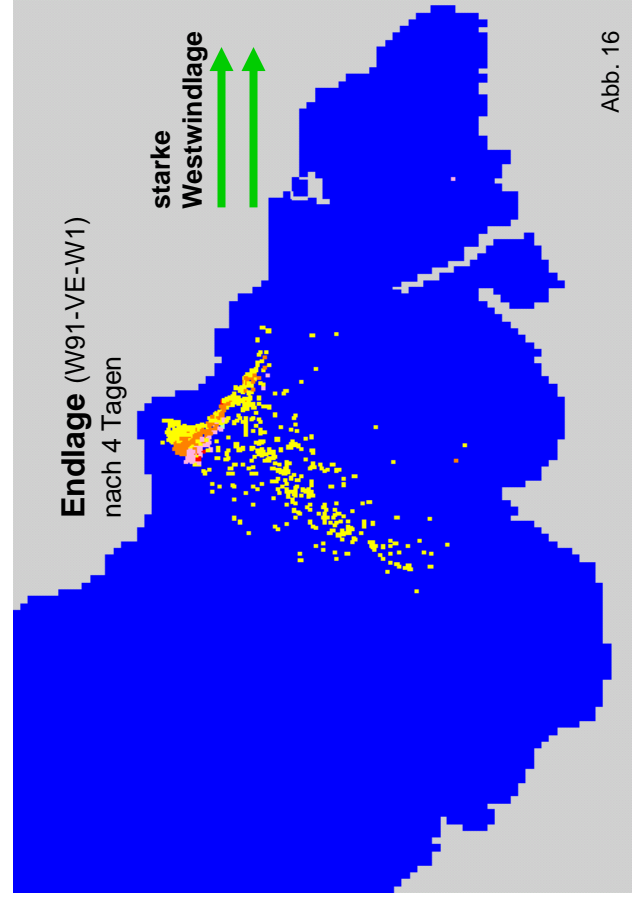
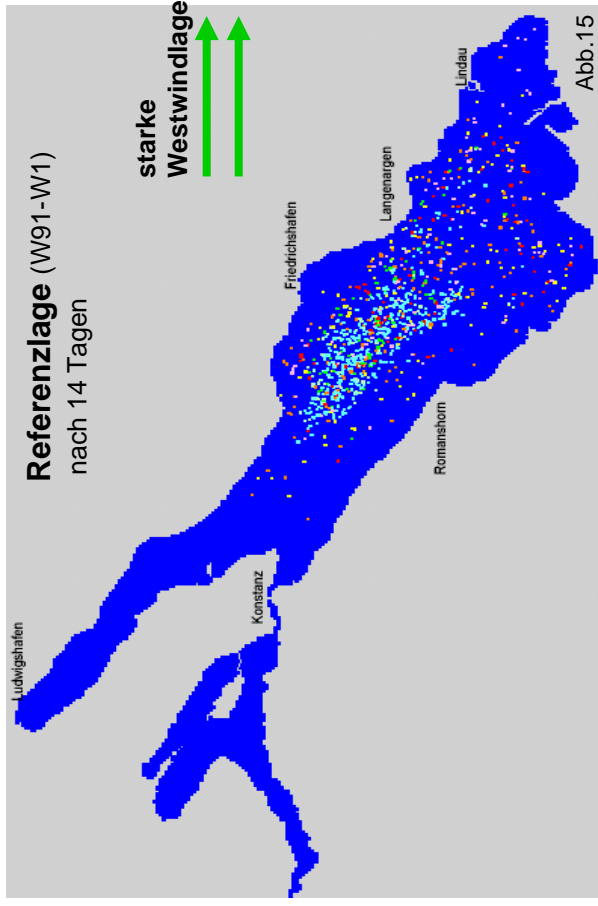
Einschichtung des Alpenrheins 06.01.1992 06.00 Uhr



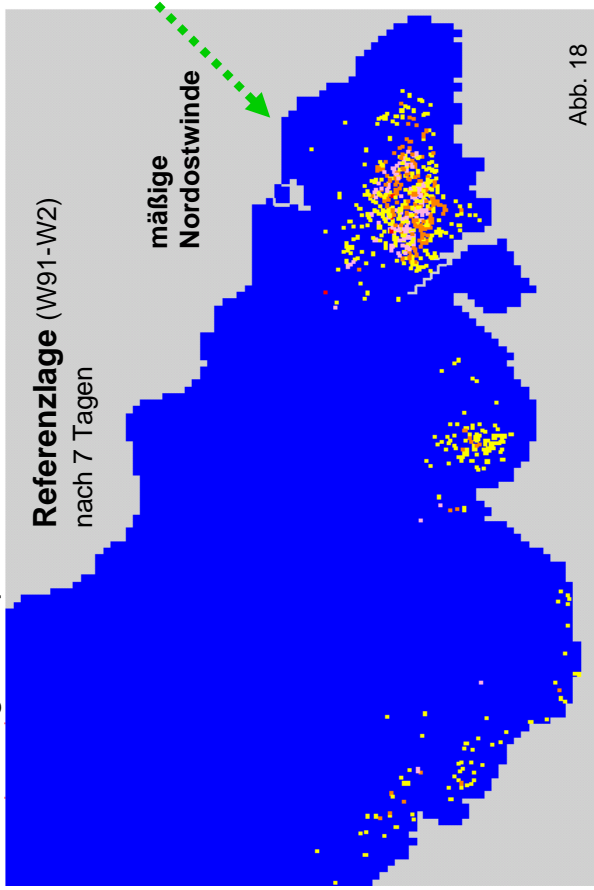
Einschichtung des Alpenrheins 27.12.1991 06.00 Uhr



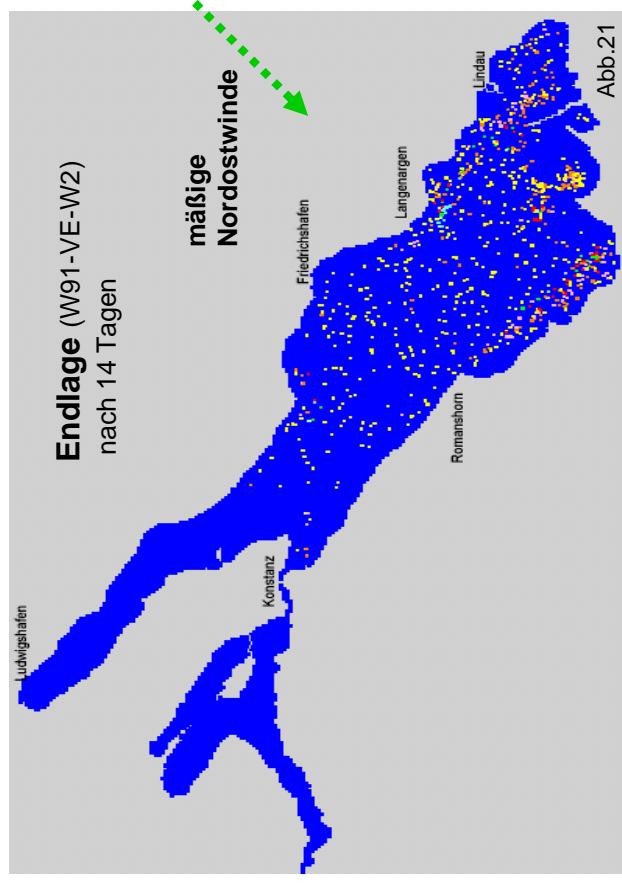
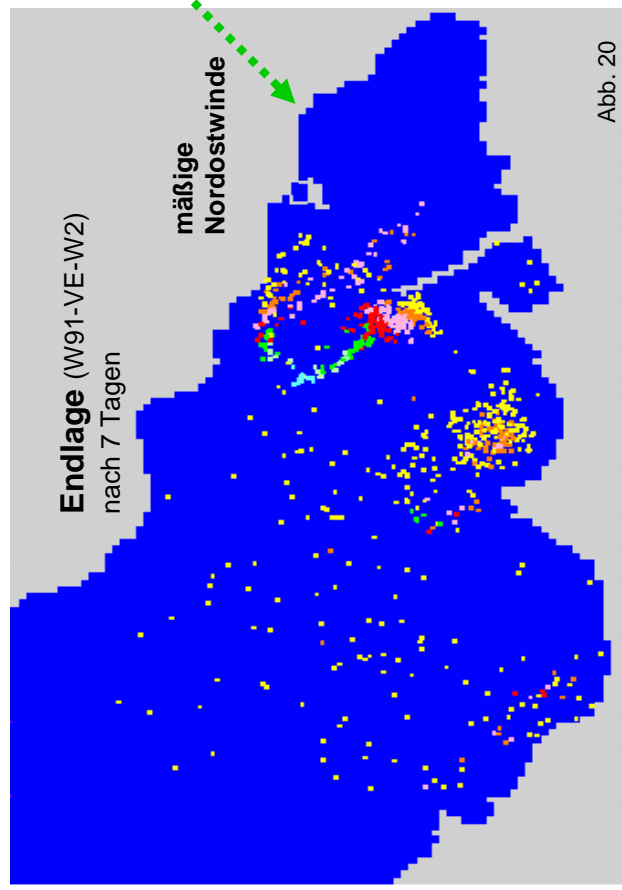
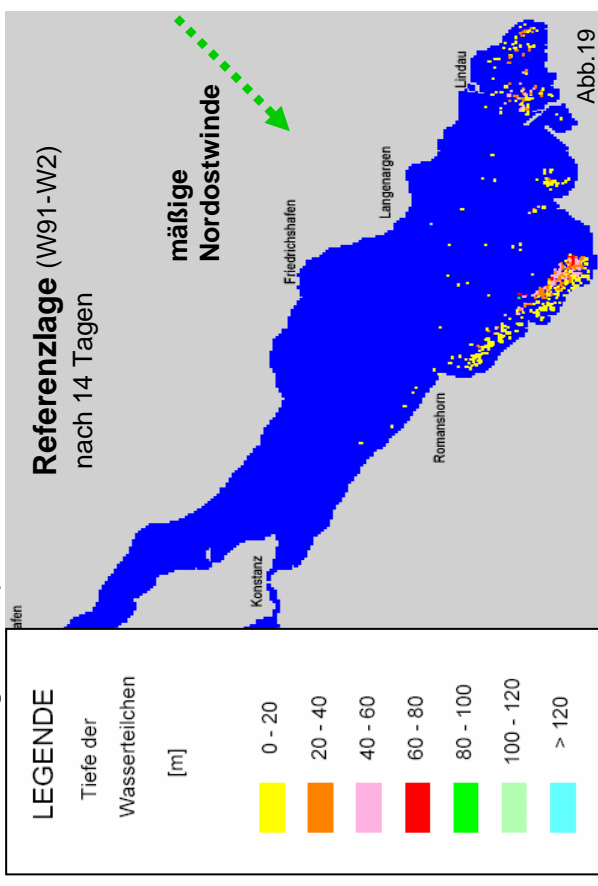
Einschichtung des Alpenrheins 06.01.1992 06.00 Uhr



Einschichtung des Alpenrheins 30.12.1991 06.00 Uhr



Einschichtung des Alpenrheins 06.01.1992 06.00 Uhr



Meßtiefe	Temperatur
1 - 76 m	5,59 °C
80 m	5,34 °C
85 m	5,11 °C
90 m	4,93 °C
95 m	4,83 °C
100 m	4,72 °C
105 m	4,74 °C
110 m	4,71 °C
115 m	4,65 °C
120 m	4,62 °C
125 m	4,63 °C
130 m	4,60 °C
135 m	4,58 °C
140 - 150 m	4,54 °C
155 - 170 m	4,51 °C
175 m	4,49 °C
180 - 190 m	4,47 °C
195 - 210 m	4,46 °C
215 - 248 m	4,45 °C

Tab. 1: Temperaturprofil an Seemitte Fischbach-Uttwil nach Terminmessungen des ISF vom 19.12.1991

Hydrologie Alpenrhein	
Parameter	17.12.1991
Abfluß in m ³ /s	150.0
Temperatur in °C	2.40
Schwebstoffgehalt in g/l	0.021

Tab. 2: Hydrologische Werte des Alpenrheins am Simulationsbeginn 17.12.1991 und zum Zeitpunkt der Markierung in der Flussmündung am 23.12.1991

Scenario	W91-VE	W91	W91-VE	W91
westlicher Fahnenenteil			östlicher Fahnenenteil	
mittlere Tiefe [m]	84	118	19	27
maximale Tiefe [m]	181	184	53	89
mittlere Entfernung [km]	7.83	8.571	2.285	2.574
Traceranzahl	848	400	152	600

Tab. 3: Charakteristische Kenngrößen der Tracerverteilungen am 6.1.1992 6⁰⁰ Uhr, 14 Tage nach Markierung, für die Szenarien W91 und W91-VE. Die Gesamtzahl der Tracer beträgt 1000.

Scenario	W91-VE-Wr	W91-W1	W91-Wr	W91-VE-W1
westlicher Fahnenenteil			östlicher Fahnenenteil	
mittlere Tiefe [m]	84	118	19	27
maximale Tiefe [m]	181	184	53	89
mittlere Entfernung [km]	7.83	8.571	2.285	2.574
Traceranzahl	848	400	152	600

Tab. 3: Charakteristische Kenngrößen der Tracerverteilungen am 6.1.1992 6⁰⁰ Uhr, 14 Tage nach Markierung, für die Szenarien mit Windeinwirkung, Auswahl für starke hauptausbreitung in großen Tiefen nach Nordwesten und für die gehemmte Ausbreitung jeweils für westlichen Wind. Die Gesamtzahl der Tracer beträgt 1000.

AUSKÜNFTE

Baden-Württemberg:	Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Argenweg 50/1 D-88085 Langenargen
Bayern:	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft Lazarettstraße 67 D-80636 München
Österreich:	Amt der Vorarlberger Landesregierung Römerstraße 14 A-6901 Bregenz
Schweiz:	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) CH-3003 Bern