

## Inhalt

	Abb.	Tab.	Seite
<b>Einleitung</b>			4
<b>Zustandsbeschreibung für das Seejahr</b>			5
	1		13
		1	54
<b>Langfristige Entwicklung von</b>			
Phosphor (Obersee), Sauerstoff (Obersee), Chlorid (Obersee), Stickstoff (Obersee), Phytoplankton (Obersee), Zooplankton (Obersee), Phytoplankton (Untersee, Zellersee)	2-5	1	54 14-17
<b>Obersee</b>			
Witterung, Wasserstände, Temperatur, Sauerstoff, Orthophosphat, Andere Phosphorverbindungen, Nährstoffinhalte, Nitrat, Nitrit, Ammonium, Stickstoff partikulär, Silikat, Anorganische Kohlenstoffverbindungen, Eisen, Mangan, Phytoplankton, Zooplankton, Bakterienplankton	6-31	2	58 18-33
<b>Untersee</b>			
Zellersee Thermik, Sauerstoff, Orthophosphat, Nährstoffinhalte, Eisen, Andere Phosphorverbindungen, Nitrat, Nitrit, Ammonium, Silikat, Anorganische Kohlenstoffverbindungen, Phytoplankton	32-51	4	62 34-44
Rheinsee Thermik, Sauerstoff, Orthophosphat, Nährstoffinhalte, Eisen, Andere Phosphorverbindungen, Nitrat, Nitrit, Ammonium, Silikat, Anorganische Kohlenstoffverbindungen, Phytoplankton	52-69	5	64 45-53
<b>Vergleich des limnologischen Zustandes an verschiedenen Untersuchungsstationen</b>			
Obersee		3	59
Untersee		6	66
<b>Anhang</b>			
Bericht des Fachbereichs Einzugsgebiet über das Jahr 2001			68
Fernausbreitung des Alpenrhein-Einstroms in den Bodensee- Obersee bei tiefer winterlicher Einschichtung			73
<b>Auskünfte</b>			99

## VORWORT

Der vorliegende Bericht der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) enthält die Ergebnisse der regelmäßigen limnologischen Freiwasseruntersuchungen des Bodensees im Jahr 2001 / 2002. Die allgemeinen Grundlagen und limnologischen Zusammenhänge, die zum Verständnis dieses Berichtes notwendig sind, wurden im Bericht Nr. 9: Limnologischer Zustand des Bodensees - Grundlagen (2. Auflage, Stand 1993) dargestellt.

Am Bericht haben mitgearbeitet:

Dr. Heinrich Bühler, Dübendorf  
Dr. Hans-Rudolf Bürgi, Dübendorf  
Mag. Dietmar Buhmann, Bregenz  
Dr. Heinz Ehmman, Frauenfeld  
Dr. Hans Güde, Langenargen  
Dr. Harald Hetzenauer, Langenargen  
Dr. Eckard Hollan, Langenargen  
Dr. Reiner Kümmerlin, Langenargen  
Dipl.-Inform. Günther Kuhn, Langenargen (EDV)  
Dr. Helmut Müller, Langenargen  
Dipl.-Ing.(FH) Robert Obad, Langenargen (EDV)  
Dr. Henno Roßknecht, Langenargen  
Dr. Heinz Gerd Schröder, Langenargen (Vorsitz Fachbereich See)  
Dr. Hans Bernd Stich, Langenargen

sowie für den Bericht über die Fern-Ausbreitung des Alpenrhein-Einstroms (Anhang)

Dr. Kurt Duwe , Hydromod, Wedel zusammen mit  
Dr. Eckard Hollan, Langenargen

Die Grundlage für den Bericht bildet das Langzeit-Untersuchungsprogramm der Kommission, an dessen Durchführung die folgenden Institutionen mitgewirkt haben:

Umweltinstitut des Landes Vorarlberg in Bregenz:  
Untersuchungen des Chemismus in der Bregenzer Bucht.

Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), Dübendorf, Fachabteilung Hydrobiologie/ Limnologie:  
Datenverarbeitung.

Amt für Umwelt des Kantons Thurgau, Frauenfeld:  
Terminfahrten, Messungen und Untersuchungen des Chemismus und des Phytoplanktons im Untersee-Rheinsee.

Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Langenargen:  
Terminfahrten, Messungen und Untersuchungen des Chemismus, des Phyto-und Zooplanktons im Obersee und Untersee-Zellersee, bakteriologische Untersuchungen, physikalische und sedimentologische Untersuchungen; Datenverarbeitung und Berichterstattung

Physikalisch-chemische Untersuchungen des Überlinger Sees an der Probenahmestelle zwischen Überlingen und Wallhausen wurden von der Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein (AWBR) und vom Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe durchgeführt. Die Ergebnisse werden

jeweils in den AWBR-Jahresberichten veröffentlicht und sind daher hier nicht enthalten.

Der Deutsche Wetterdienst, Offenbach, stellte Daten der Wetterstation Konstanz für die Analyse der meteorologischen Situation des Obersees zur Verfügung.

## EINLEITUNG

Der Bericht zum Seejahr 2002 / 2003 enthält eine kurze Beschreibung und Bewertung des aktuellen Seezustandes, ergänzt durch die Darstellung der langfristigen Entwicklung der wichtigsten Größen. Sie werden von Jahr zu Jahr fortgeschrieben.

Die dann folgenden Abbildungen und Tabellen geben eine Übersicht über Örtlichkeiten, Wassertiefe und Zeitpunkt der Probenahme und Messungen sowie über Klimabedingungen, Temperatur, chemische und biologische Verhältnisse im Freiwasser. Für den Bodensee-Obersee beschränken sich diese Darstellungen hauptsächlich auf die zentrale Untersuchungsstation Fischbach-Uttwil. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungsstelle wurden auch die Stoffinhalte unter Verwendung der Seevolumina berechnet, die sich aus der Tiefenvermessung von 1990 ergeben haben. Quervergleiche zwischen verschiedenen Obersee-Untersuchungsstationen werden nur für einige ausgewählte Parameter durchgeführt. Seit Januar 2000 werden die Untersuchungen nach dem überarbeiteten Programm für die Langzeituntersuchungen durchgeführt, wie es im Anhang des Grünen Berichtes Nr. 26 beschrieben wurde.

Für den Bodensee-Untersee werden die Zustände im Zellersee und Rheinsee behandelt. Für die Tabellen wurden charakteristische Summenwerte, z. B. der Stoffinhalt des ganzen Sees, eines Seeteils oder bestimmter Wasserschichten sowie Konzentrationsmaxima und -minima in der Oberflächenschicht oder über dem Seeboden ausgewählt.

Die Datentabellen mit den gesamten Meßwerten für den Freiwasserbereich (Physik, Chemie, Phytoplankton) wurden nach Archivierung auf Datenträgern bei der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) und beim Institut für Seenforschung (ISF) der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, den damit direkt befaßten Stellen zugestellt. Nachdem die datentechnischen Umstrukturierungen im Jahr 2001 abgeschlossen werden konnten, werden die Daten der IGKB nun in einer zentralen

Datenbank BOWIS am Institut für Seenforschung archiviert.

Das jeweilige limnologische Zustandsbild des Freiwassers wird stark durch die Witterungserscheinungen geprägt. Zustandsänderungen von Jahr zu Jahr dürfen daher nicht von vornherein als Ausdruck einer Entwicklungstendenz interpretiert werden. Dazu sind längere Zeitreihen in Form von Trendkurven notwendig. Dies ist beim Vergleich der Verhältnisse aufeinanderfolgender Jahre zu beachten. Zur langjährigen chemischen und biologischen Entwicklung im Freiwasser des Bodensees wird auf die Blauen Berichte Nr.37 (1987: Crustaceenplankton), 39 (1989: Phytoplankton) und 48 (1998: chemische Parameter im Bodensee-Obersee) verwiesen.

## ZUSTANDSBESCHREIBUNG FÜR DAS SEEJAHR 2002/2003

### Bodensee - Obersee

Im Seejahr 2002/03 blieb die Phosphorkonzentration während der Vollzirkulation erstmals seit Anfang der achtziger Jahre mit  $12 \text{ mg/m}^3$  gegenüber dem Vorjahr konstant (2002:  $12 \text{ mg/m}^3$ ). Der Gehalt an anorganischem Stickstoff - im wesentlichen Nitrat - nahm von  $0,96$  auf  $0,94 \text{ g/m}^3$  geringfügig ab. Die Biomasse des Phytoplanktons lag 2002 mit  $13,0 \text{ g/m}^2$  deutlich über der Höhe des Vorjahreswertes ( $6,7 \text{ g/m}^2$ ).

Die mittleren Sauerstoffgehalte in 200-254 m Tiefe lagen von März 2002 bis Februar 2003 stets deutlich über den Werten desselben Zeitraumes ein Jahr zuvor. In diesem tiefen Seebereich war 2002 bis Anfang Mai eine Zunahme der Sauerstoffkonzentration zu beobachten. Dank dieser im Vergleich zu 2001 besseren Ausgangslage blieb auch das herbstliche Sauerstoffminimum in 2002 in einem Meter über Grund mit  $6,8 \text{ g/m}^3$  über dem des Vorjahres ( $6,1 \text{ g/m}^3$ ).

Die **hydrologische Situation** wurde durch den im Januar und Februar relativ kalten Winter 2002/2003 und den vorangegangenen mäßig kalten Winter geprägt.

Die anhaltend kalte Witterung im Januar und Februar 2003 bewirkte im Monatsmittelwert der Lufttemperatur für Februar die große Abweichung von  $-3,1^\circ\text{C}$  zum Monatsmittelwert der vorangehenden 30 Jahre. Das gesamte Tiefenwasser wurde nachfolgend bis Anfang März 2003 durch Vermischung mit Oberflächenwasser weitgehend erneuert. Die für die Auskühlung des Sees maßgebliche Anzahl der Seefrosttage, d.h. der Tage mit einer mittleren Lufttemperatur unter  $0^\circ\text{C}$ , betrug 36 und übertraf nur um einen Tag den Mittelwert für die 15 Seejahre bis 1999/2000. Die Auskühlung wurde jedoch dadurch verstärkt, daß sie in zwei nah aufeinander folgenden Hauptphasen verlief, in denen insgesamt 14 Seefrosttage mit Tagesmittelwerten unterhalb von  $-4^\circ\text{C}$  enthalten waren. Im vorangegangenen Winter

wurden nur 6 Seefrosttage mit dieser tiefen Kältstufe verzeichnet.

Die maximale gemessene Oberflächentemperatur in Seemitte trat mit  $22,5^\circ\text{C}$  bereits am 18.6.2002 ein. Dieser Wert war um  $1,7^\circ\text{C}$  höher als das Vorjahresmaximum Ende August 2001 und wurde durch den sehr warmen Juni 2002 verursacht, in dem 11 Sommertage mit Lufttemperaturen zwischen  $25^\circ\text{C}$  und  $30^\circ\text{C}$  und 7 Tropentage mit Lufttemperaturen über  $30^\circ\text{C}$  registriert wurden. Im gesamten Verlauf von April bis Dezember 2002 waren die Monatswerte der Lufttemperatur bis auf den September höher gegenüber dem Monatsmittelwert der vorangehenden 30 Jahre, wobei die Abweichung im Juli und August nur sehr gering ausfiel. Daher betrug in Seemitte die maximalen gemessenen Oberflächentemperaturen im Juli und August nur  $20,7^\circ\text{C}$  und  $20,6^\circ\text{C}$ . Im September 2002 wich der Monatsmittelwert der Lufttemperatur um  $-1^\circ\text{C}$  vom langjährigen Monatsmittel ab. Dies führte wie im vorangegangenen Seejahr zu einer stärkeren Abnahme der Oberflächentemperatur, die bis zum 11.10.2002 bereits auf  $13,3^\circ\text{C}$  sank. Im weiteren Verlauf des Winters von Januar bis März 2003 übertraf der Monatsmittelwert der Lufttemperatur nur noch im März das langjährige Monatsmittel um  $1,6^\circ\text{C}$ . Die Lufttemperaturen im Seejahr 2001/2002 lagen insgesamt mit  $10,1^\circ\text{C}$  um  $0,5^\circ\text{C}$  über dem 30-jährigen Mittelwert von  $9,6^\circ\text{C}$ .

Das Minimum der Oberflächentemperatur wurde am 20.2.2003 mit  $4,8^\circ\text{C}$  gemessen und stimmte mit dem Vorjahreswert überein.

Bis Ende März 2003 entwickelte sich die neue Deckschicht mit einer 4 m mächtigen, auf  $7,0^\circ\text{C}$  erwärmten Oberflächenschicht über einer von  $5,4$  auf  $5,1^\circ\text{C}$  vertikal abnehmenden Unterschicht, die durch konvektive Vermischung bis 45 m Tiefe reichte.

Das Hypolimnion war vom Beginn des Seejahres bis Anfang November 2002

durchgehend schwach geschichtet. Mitte November wurde eine auffällige thermische Homogenisierung bei der Temperatur von 4,78°C in der untersten Schicht von 205 bis 250 m gemessen. Ende November ereigneten sich in Seemitte zwischen 135 und 205 m Tiefe drei ausgeprägte Einschübe von wärmerem Zuflußwasser mit leicht angehobenem Salzgehalt.

Bei Einsetzen der kalten Winterphase in der ersten Hälfte Januar 2003 war die Deckschicht durch konvektive Vermischung bis auf 90 m vorgedrungen und vertiefte sich bis Ende Februar 2003 auf 205 m. Anfang März 2003 war das Hypolimnion bis zur größten Tiefe weitgehend erneuert, wobei die Deckschicht bis 230 m reichte. Die Regeneration erfolgte in den tieferen Schichten unterhalb 175 m durch seitliche Zufuhr infolge auskühlungsbedingter Dichteströmungen aus randlichen Gebieten. Dies betraf im Februar vor allem die untersten Bereiche unter 205 m und Anfang März unter 230 m. Am Ende des Seejahres 2002/03 war die alte Deckschicht relativ unruhig aufgebaut, was durch kältere und leicht erwärmte Einschichtungen verursacht wurde. Unterhalb von 215 m war die Situation durch fortgesetzte Vermischung restlichen alten Hypolimnionwassers mit den im Spätwinter eingeschobenen großen Mengen kälteren Randwassers gekennzeichnet.

Die Temperaturen über Grund stiegen von 4,70°C am Anfang des Seejahres nahezu monoton bis auf 4,84°C am 14.2.2003 an. Infolge des bodenaufliegenden Kaltwassereinstroms gingen die Temperaturen sprunghaft bis 20.2.2003 auf 4,52°C und bis 6.3.2003 auf das Minimum von 4,44°C zurück. Am Ende des Seejahres hatte die Temperatur über Grund bereits wieder auf 4,50°C zugenommen und lag damit um 0,2°C unter dem Wert am Anfang des Seejahrs.

Die Konzentration des **Gesamtposphors** im Rohwasser betrug im Frühjahr 2003 während der Monate Februar bis April im Mittel 12 mg/m<sup>3</sup> (Abb. A, Konzentration während der Vollzirkulation). Damit nahm die Phosphorkonzentration während der Zirkulationsphase erstmals seit Anfang der achtziger Jahre nicht weiter ab (Frühjahr 2002: 12 mg/m<sup>3</sup>; 2001: 13 mg/m<sup>3</sup>; 2000: 14 mg/m<sup>3</sup>). Im Gegensatz zum Zirkulationswert lag jedoch

der Jahresmittelwert 2002 mit 11 mg/m<sup>3</sup> geringfügig unter jenem des Vorjahres mit 12 mg/m<sup>3</sup>. Dabei ist zu beachten, dass derartige geringe Konzentrationsunterschiede im Bereich der analytischen Messgenauigkeit liegen und nicht überinterpretiert werden dürfen.

Der **Orthophosphat - Phosphor** lag von Ende März bis Anfang Dezember 2002 in den Messtiefen von 0 bis 30 m überwiegend unter 2 mg/m<sup>3</sup> und im volumengewichteten Mittel mit 1,3 mg/m<sup>3</sup> minimal unter dem entsprechenden Wert des Vorjahres (1,5 mg/m<sup>3</sup>).

Der **anorganische Stickstoff** (N aus NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + NO<sub>2</sub><sup>-</sup> + NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) mit Nitrat als Hauptkomponente fiel in 2002 im Jahresmittel mit 0,94 g/m<sup>3</sup> geringfügig unter den Wert des Vorjahres (2001: 0,96 g/m<sup>3</sup>; Abb. C).

**Chlorid** als Indikator vielfältiger Salzbelastungen ergab 2002 mit 5,0 g/m<sup>3</sup> im Jahresmittel denselben Wert wie 2001 (Abb. C).

Die **Sauerstoffgehalte** lagen von März 2002 bis Februar 2003 im tiefen Hypolimnion des Obersees von 200 - 254 m Tiefe um 0,5 bis 1,5 g/m<sup>3</sup> über jenen des Vorjahres. Nach zwei Jahren mit geringerer Sauerstoffversorgung war eine leichte Erholung gegeben. Allerdings erreichten auch 2002 die winterlichen Höchstwerte nur etwas über 9 g/m<sup>3</sup> mg/l. Im März 2003 stiegen die Konzentrationen erstmals seit 1999 wieder auf über 10 g/m<sup>3</sup> an.

Der gesamte Sauerstoffinhalt des Obersees lag in den Monaten März und April 2003 mit 518 000 Tonnen praktisch auf dem Niveau des Vorjahres (520 000 Tonnen).

Die niedrigste einen Meter über Grund gemessene Sauerstoffkonzentration betrug 2002 6,8 g/m<sup>3</sup>. Sie wurde Anfang Oktober erreicht (Abb. B). Vor dem Hintergrund der nicht besonders hohen Sauerstoffgehalte im Frühjahr 2002 zeigt dieser relativ hohe Minimalwert klar die fortschreitende Stabilisierung des Ökosystems Bodensee.

Das **Phytoplankton** im Bodensee-Obersee erreichte 2002 im Jahresmittel eine Biomasse von 13,0 g/m<sup>2</sup> (0-20 m). In den Vorjahren wurden folgende Werte festgestellt: 2001: 6,7 g/m<sup>2</sup>, 2000: 8,9 g/m<sup>2</sup>, 1999: 9 g/m<sup>2</sup>, 1998: 12,6

g/m<sup>2</sup>, 1997: 13,6g/m<sup>2</sup> und 1996: 13,4 g/m<sup>2</sup> (0-20 m). Der seit 1997 erfolgte kontinuierliche Abfall wurde damit beendet. Der in den letzten Jahren beobachtete Trend zu niedrigeren Frühjahrsblüten setzte sich 2002 nicht mehr fort; Ende März erfolgte eine erste Frühjahrsblüte mit 25,4 g/m<sup>2</sup>; Anfang Mai eine zweite Blüte mit 28,4 g/m<sup>2</sup>. Nach dem Klarwasserstadium Ende Mai bis Anfang Juni begann Mitte Juni eine Sommerblüte, die bis Ende Juli dauerte und ihren Höchstwert Anfang Juli mit 36,5 g/m<sup>2</sup> erreichte. Nach einem Minimum Anfang August mit 11,4 g/m<sup>2</sup> stieg die Biomasse wieder kontinuierlich an und erreichte Anfang November ein Maximum mit 20,7 g/m<sup>2</sup>. Alle Maxima lagen deutlich über den Werten des Vorjahres.

Die zentrischen Kieselalgen traten 2002 stark in den Hintergrund und erreichten nur Mitte März und im Sommer nennenswerte Anteile an der Biomasse. Die pennaten Kieselalgen traten im Sommer und im Spätherbst stark in den Vordergrund, wobei vor allem *Fragilaria*, *Asterionella* und *Tabellaria* dominierten. Cryptomonaden erreichten das ganze Jahr über beträchtliche Anteile an der Biomasse und dominierten das Planktonbild hauptsächlich in der Frühjahrsblüte. Die Dinoflagellaten bevorzugten das Frühjahr mit *Gymnodinium helveticum* sowie den Sommer und den Frühherbst mit *Ceratium hirundinella* und *Gymnodinium helveticum*. Die Chrysophyceen erschienen hauptsächlich während der Frühjahrsblüte mit *Erkenia* sowie *Pseudokephyrion* und im Sommer mit verschiedenen oligotraphenten *Ochromonas*-Arten als auch im September mit *Erkenia*, *Ochromonas* und *Uroglena*. Coccale Grünalgen, die höhere Nährstoffkonzentrationen bevorzugten, erreichten das ganze Jahr über nur noch einen unbedeutenden Anteil an der Biomasse, dagegen spielten fädige Blaualgen wie *Anabaena*, *Aphanizomenon* und *Oscillatoria* und coccale Blaualgen wie *Aphanocapsa* und *Aphanothece* von Ende August bis Ende Oktober wieder eine größere Rolle als in den Vorjahren.

Die mittlere Individuendichte des **Crustaceenplanktons** lag bei ca. 500 000 Ind/m<sup>2</sup> (0-100 m) und war im Vergleich zu den Mittelwerten des Jahres 2001 im Jahr 2002 wieder geringer.

Im Jahr 2002 prägten bis Mitte Juni kontinuierlich ansteigende Werte den jahreszeitlichen Verlauf der Individuendichten der Daphnien. Das Individuenmaximum lag mit 290 000 Ind/m<sup>2</sup> (0-100 m) deutlich höher als im Vorjahr. Erst Anfang Juli zeigte sich eine Abnahme der Daphnienzahlen auf 55 000 Ind/m<sup>2</sup> (0-100 m). Das Herbstmaximum bildete sich Ende September bis Anfang Oktober aus und ereignete sich somit früher als im Jahr 2002. Die Individuendichten lagen mit ca. 180 000 Ind/m<sup>2</sup> (0 -100m) niedriger als im Vorjahr. Von Frühsommer bis zum Herbst war aufgrund der Vertikalwanderung die Verteilung der Daphnien inhomogen. So befanden sich z.B. im Juli mehr als 50 % der Daphnien in Wassertiefen unterhalb von 30 m. In oberflächennahen Wasserschichten (oberhalb von 10 m) befanden sich ca. 25 % der Population.

Bei den Beständen der übrigen Cladoceren (*Bosmina*, *Bythotrephes longimanus* und *Leptodora kindtii*) lagen die Werte insbesondere im Frühjahr deutlich niedriger als im Vorjahr. *Diaphanosoma brachyurum*, die 2001 zum ersten Mal seit ca. 40 Jahren wieder beobachtet wurde, konnte auch 2002 wieder festgestellt werden. Die Rückkehr der Art kann somit als erfolgreich betrachtet werden. Mögliche Ursachen dieser Wiedereinwanderung sind noch nicht bekannt.

*Eudiaptomus gracilis* zeigte keine ausgeprägten saisonalen Änderungen seiner Abundanz. Die Werte lagen in der Regel unter denen des Vorjahres. Es trat nur ein hohes Abundanzmaximum im September auf. Die Individuenzahl lag bei 170000 Ind/m<sup>2</sup>, 0 -100 m). Auch bei den Copepodiden lagen die Abundanzen 2002 deutlich niedriger als im letzten Seejahr. Wie bei den adulten Tieren fehlte auch bei den Copepodiden ein deutliches Frühjahrsmaximum. Das Abundanzmaximum lag ebenfalls im September, die Individuendichte betrug 190 000 Ind/m<sup>2</sup> (0 -100m) und entsprach dem Wert des Vorjahres.

Bei den cyclopoiden Copepoden hielt die Abnahme der großen Arten *Cyclops vicinus* und *Cyclops abyssorum* weiterhin an. Sie wurden wie schon im Vorjahr von *Mesocyclops leuckarti* dominiert. Die Anzahl der erwachsenen Tieren lag insbesondere im Frühjahr niedriger als im vergangenen Jahr.

Das Herbstmaximum erreichte die höchsten Werte erst Mitte September ( $161\,000\text{ Ind/m}^2$ , 0-100m). Bei den Copepodiden der cyclopoiden Copepoden lagen die Individuendichten in der Regel niedriger als im Vorjahr. Während 2001 Werte von fast  $600\,000\text{ Ind/m}^2$  (0-100 m) erreicht wurden, lagen die Werte 2002 unterhalb von  $400\,000\text{ Ind/m}^2$  (0-100 m). Insbesondere die Individuendichten des Frühjahrsmaximums fielen deutlich niedriger aus.

Bei der **Gesamtbakterienzahl** - bestimmt durch fluoreszenzmikroskopische Direktzählung – bewegten sich die Werte im Berichtsjahr gegenüber den Vorjahren auf einem leicht höheren Niveau. Dennoch setzte sich der seit 1997 beobachtete Trend mit im Vergleich zu den Jahren 1980 – 1996 geringer ausgeprägten Frühjahrs- und Sommermaxima fort. In der Produktionszone (0 - 10 m) wurden nach einem ersten Anstieg im März schon im April Werte über  $4 \times 10^6$  Bakterien/ml erreicht. Nach zwei ersten Spitzen im Mai und Juni mit Werten über  $5 \times 10^6$  Bakterien/ml wurde im Juli und August ein leichter Abfall der Bakteriendichten beobachtet. Im September folgte nochmals ein Anstieg über  $5 \times 10^6$  Bakterien/ml. Von Oktober bis Dezember wurden dann deutlich geringere Dichten unter  $3 \times 10^6$  Bakterien/ml festgestellt. Dabei waren die Dichten in den gesamten oberen 30 m gleichmäßig verteilt und zeigten bis Ende des Jahres stets deutlich höhere Werte als in den Tiefenwasserschichten unterhalb 30 m Wassertiefe. Diese wiesen wie immer mit relativ geringen Schwankungen ganzjährig Werte im Bereich von  $1 \times 10^6$  Bakterien/ml auf. Die darauf folgende Phase winterlicher Minimalwerte mit annähernd vertikaler Gleichverteilung erstreckte sich von Januar bis März 2003.

Für die seit 1999 an der Station Fischbach-Uttwil durchgeführte monatliche Erhebung der Vertikalverteilung von *Escherichia coli* als Vertreter der **Fäkalbakterien** bestätigte sich auch im Kalenderjahr 2002, daß die Belastungswerte für diese Keimgruppe im Freiwasser des Bodensees allgemein bemerkenswert niedrig sind. In 82,6 % der Werte wurden Trinkwassergrenzwerte (1 Keim/100 ml) nicht überschritten und 98,6 % der Werte lagen unterhalb der für Oberflächengewässer immer noch als sehr

gering einzustufenden Belastung von 10 Keimen/100ml. Nur in zwei Proben wurden Werte oberhalb von 10 Keimen/100 ml beobachtet (im Februar in 150 m und im Dezember in 30 m). Diese Anstiege sind mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Einschichtung belasteten Flusswassers zurückzuführen.

## Bodensee - Untersee

Die Phosphorkonzentration bestimmt als Gesamtphosphor im Rohwasser - ging 2002 im Rheinsee mit einem Jahresmittel von  $12\text{ mg/m}^3$  leicht zurück (2001:  $13\text{ mg/m}^3$ ; 2000:  $13\text{ mg/m}^3$ ). Im Zellersee wurde ebenfalls eine leichte Abnahme auf  $19\text{ mg/m}^3$  beobachtet (2001:  $20\text{ mg/m}^3$  2000:  $22\text{ mg/m}^3$ ).

Der Inhalt an anorganischem Stickstoff (N aus  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$ ) mit Nitrat als Hauptkomponente nahm 2002 im Rheinsee geringfügig auf  $0,85\text{ g/m}^3$  zu (2001:  $0,83\text{ g/m}^3$ ; 2000:  $0,67\text{ g/m}^3$ ). Im Zellersee blieb der Wert mit  $0,96\text{ g/m}^3$  konstant (2000:  $1,00\text{ g/m}^3$ ).

Die Sauerstoffsituation hat sich 2002 im Rheinsee gegenüber dem Vorjahr etwas verschlechtert. Im Rheinsee wurden Ende August mit  $0,1\text{ g/m}^3$  und Ende Oktober mit  $0,6\text{ g/m}^3$  sehr geringe Sauerstoffkonzentrationen in Seebodennähe gemessen. Im Vorjahr war die Minimalkonzentration im Oktober mit  $1,3\text{ g/m}^3$  noch etwas höher. Im Zellersee, der bis 1992 über Jahrzehnte hinweg einen zeitweiligen totalen Sauerstoffschwund aufwies, wurde auch 2002 bei allen Messungen ein geringer Sauerstoff-Restgehalt gemessen. Die niedrigsten Werte lagen von August bis Oktober zwischen  $0,7$  und  $2,4\text{ g/m}^3$  und damit, bezogen auf das Minimum, geringfügig unter dem Niveau des Vorjahres (August bis Oktober:  $0,9 - 5,3\text{ g/m}^3$ ).

Das **Phytoplankton** im Zellersee erreichte 2002 mit  $12,5\text{ g/m}^2$  (0-20m Tiefe) den exakt gleichen Wert wie 2001. Mit Ausnahme eines Maximums im Jahr 1999 ( $25,8\text{ g/m}^2$ ) lagen damit die Biomassen seit 1992 auf relativ gleich bleibender Höhe. In den Vorjahren wurden folgende Werte festgestellt: 2000:  $15,1\text{ g/m}^2$ , 1999:  $25,8\text{ g/m}^2$ , 1998:  $18,7\text{ g/m}^2$ , 1997:  $15,7\text{ g/m}^2$ , 1996:  $15,9\text{ g/m}^2$ ; 1995:  $15,1\text{ g/m}^2$ .

Wie im Vorjahr war eine Spätwinterblüte Anfang März mit einem Maximalwert von  $16,5 \text{ g/m}^2$  zu beobachten; nach einem leichten Absinken der Biomasse entwickelte sich im April und Anfang Mai eine Frühjahrsblüte, deren Höhepunkt bereits Anfang April bei  $23,9 \text{ g/m}^2$  lag. Einem wenig ausgeprägten Klarwasserstadium folgte ein Wiederanstieg der Biomasse; dieser Sommeranstieg erreichte Anfang Juli mit  $25,4 \text{ g/m}^2$  ein Maximum. Einem starken Absinken der Biomasse folgte ein Hochsommeranstieg mit  $20,8 \text{ g/m}^2$ . Nach einem Minimum Anfang September stieg die Biomasse wieder kontinuierlich an und erreichte Anfang November ein Maximum mit  $19,1 \text{ g/m}^2$ .

Im Vergleich zum Obersee zeigte die Zusammensetzung des Planktons im Untersee ein andere Tendenz: *Cyclotella cyclopuncta* dominierte die Spätwinter- und die Frühjahrsblüte. Die große oligotrophente Art *Cyclotella bodanica* trat ebenfalls auf. Daneben erreichte *Stephanodiscus neoastraea* beträchtliche Anteile. Die pennaten Kieselalgen traten bereits während der Frühjahrsblüte in den Vordergrund, daneben auch im Sommer, wobei vor allem *Fragilaria* und *Asterionella* dominierten. Cryptomonaden erreichten wie im Obersee das ganze Jahr über beträchtliche Anteile an der Biomasse; sie dominierten das Planktonbild im Winter, Früh- und Spätherbst. Die Dinoflagellaten traten das ganze Jahr über in messbaren Anteilen auf; ihr Maximum erreichten sie von Ende April bis Anfang Mai, wobei hier *Gymnodinium helveticum* dominierte. Die Chrysophyceen erschienen vor allem während der Spätwinterblüte mit *Erkenia*, im Sommer mit *Dinobryon* sowie *Ochromonas* und *Erkenia*. Wie im Obersee fielen Grünalgen nicht mehr stark ins Gewicht, jedoch trat *Phacotus* Anfang Juli und *Dictyosphaerium* Mitte August vermehrt auf. Wie im Vorjahr wurden während des Sommers und Spätsommers bis in den November hinein die fädigen Blaualgen *Oscillatoria*, *Aphanizomenon* und *Pseudanabaena* sowie coccale Blaualgen wie *Aphanocapsa* mit größeren Anteilen beobachtet.

## Gesamtbewertung des Seezustandes

Die gute **Sauerstoffversorgung** der

grundnahen Wasserschichten dokumentiert auch 2002 die langfristig günstige Entwicklung im Zustand des Freiwassers des Bodensee-Obersees.

Der **Phosphorgehalt** - bestimmt als Gesamtphosphor während der Zirkulationsperiode von Februar bis Anfang April hat erstmals seit Beginn der achtziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts nicht weiter abgenommen. Inwieweit dies bereits das Erreichen eines Gleichgewichtszustandes bedeutet, läßt sich erst in den kommenden Jahren feststellen. Angesichts eines durch die bisherigen Sanierungsmaßnahmen weitgehend ausgeschöpften Reduktionspotenzials sind allerdings größere Änderungen kaum mehr zu erwarten.

Vor allem witterungsbedingt ist mit kleineren Schwankungen immer zu rechnen. Dies zeigt die leichte Abnahme des Jahresmittelwertes in 2002 gegenüber dem Vorjahr um  $1 \text{ mg/m}^3$ , die sich im Frühjahr 2003 nicht fortgesetzt hat.

Der **anorganische Stickstoffgehalt** (Nitrat-, Nitrit- und Ammoniumstickstoff) hat sich auch im vergangenen Untersuchungszeitraum kaum geändert und verbleibt seit nunmehr 13 Jahren im beobachteten Konzentrationsniveau von ca.  $1 \text{ g/m}^3$ .

Stickstoff ist für Algen im Bodensee kaum wachstumsbegrenzend, kann jedoch das Artenspektrum beeinflussen. Daher muss die Entwicklung des anorganischen Stickstoffgehaltes weiterhin verfolgt werden.

Klimatische Faktoren und die Intensität der pflanzlichen Produktion bestimmen die Höhe des für die Ökologie des Sees wichtigen Sauerstoffgehalts im tiefen Seebereich. Obwohl in 2002 eine fast doppelt so hohe Gesamtbioasse wie 2001 gefunden wurde, blieb der minimale Sauerstoffgehalt am Seegrund aufgrund der durch relativ kalte Winter geförderten Tiefenwassererneuerung dennoch leicht über dem Wert des Vorjahres. Dieses Ergebnis zeigt, dass einfache Ursache-Wirkungs-Beziehungen nur innerhalb gewisser Grenzen für Prognosen tauglich sind.

In der **Phytoplankton-Zusammensetzung** traten Arten ohne eine Indikationsfunktion, sogenannte Ubiquisten, im Vergleich zu den

Vorjahren wieder stärker in den Vordergrund. Arten, die als Anzeiger einer Nährstoffverarmung gelten und die in den Vorjahren beträchtliche Anteile an der Biomasse eingenommen haben, sind 2002 mehr in den Hintergrund getreten. Nach wie vor **bleiben ausgesprochene Eutrophierungsanzeiger vollständig aus dem Planktonbild verschwunden oder spielen nur noch eine untergeordnete Rolle.**

Die Biomasse lag mit einem Jahresmittel von 13,0 g/m<sup>2</sup> deutlich über der Höhe des Vorjahres mit 6,7 g/m<sup>2</sup> und erreichte Werte wie sie zuletzt 1997/98 beobachtet wurden. Damit bewegt sich der beobachtete Wiederanstieg auf einem moderaten Niveau unterhalb der bis Ende der 80er Jahre gehäuft über 20 g/m<sup>2</sup> liegenden Algenbiomassen. Jährliche Schwankungen in der Biomasse, die dem langfristigen Trend entgegengesetzt verlaufen, wurden am Bodensee schon öfters beschrieben und z. T. mit meteorologischen Einflüssen in Zusammenhang gebracht. Ob der in 2002 wieder angestiegene Jahresdurchschnittswert solche Ursachen hat oder auf andere Gründe zurückzuführen ist, kann erst im Vergleich mit der Entwicklung der nächsten Jahre beurteilt werden.

Vor dem Hintergrund einer wieder abnehmenden Gesamtpopulation schreitet der in den letzten Jahren eingesetzte Wandel im Artenspektrum des **Crustaceenplanktons** weiter voran. Die 2001 erstmals seit 40 Jahren wieder beobachtete Art *Diaphanosoma brachyurum* konnte sich offensichtlich im Pelagial des Bodensees erfolgreich etablieren und wurde auch 2002 im See gefunden. Bei den Copepoden überwiegen kleine Arten, während die großen weiterhin abnehmen. Obwohl die dominierenden Crustaceenarten nicht unbedingt typische Vertreter oligotropher Seen umfassen, weist doch die Verschiebung im Artenspektrum auf einen Wandel in der pelagischen Nahrungskette des Bodensees hin. Die Auswirkungen dieser Entwicklung auf das Gesamtökosystem werden derzeit näher untersucht.

Nachdem sich die **Gesamtbakterienzahl** seit 6 Jahren auf deutlich niedrigerem Niveau als in den Jahren 1980-96 bewegten, kann nun auch für diese Gruppe eine Reaktion auf die Oligotrophierung des Sees als gesichert gelten.

In der Regel sind durch Siedlungsabwässer eingetragene **Fäkalkeime** (*Escherichia coli*) in der großen Freiwasserzone des Bodensees kaum bemerkbar. Vereinzelt leicht erhöhte Keimzahlen können als Zeiger für lokale Einschichtung von Flusswasser gesehen werden. Damit im Einklang stehen auch die durchschnittlich etwas höheren Werte an der Station Bregenzer Bucht.

## Fazit und Handlungsbedarf

Die Ergebnisse der Freiwasseruntersuchungen bestätigen erneut den großen Erfolg der Sanierungsmaßnahmen aller Länder und Kantone im Einzugsgebiet des Bodensees.

Die Wasserqualität des Sees befindet sich nach wie vor in einem guten Zustand und die aktuell verzeichneten Änderungen im See zeigen eine Stabilisierung auf einem qualitativ hohen Niveau. Insoweit stützen die bisherigen Erfahrungen eine konsequente Sanierungsstrategie, die weniger an kurzfristigen Teilerfolgen denn an nachhaltiger Systemstabilität orientiert ist.

Der langjährige Trend abnehmender Phosphorgehalte im See hat sich erstmals nicht weiter fortgesetzt und ein Gleichgewichtszustand scheint bald erreicht zu sein. Dies entspricht auch im Wesentlichen den durch die P-Modellrechnungen gestützten Erwartungen.

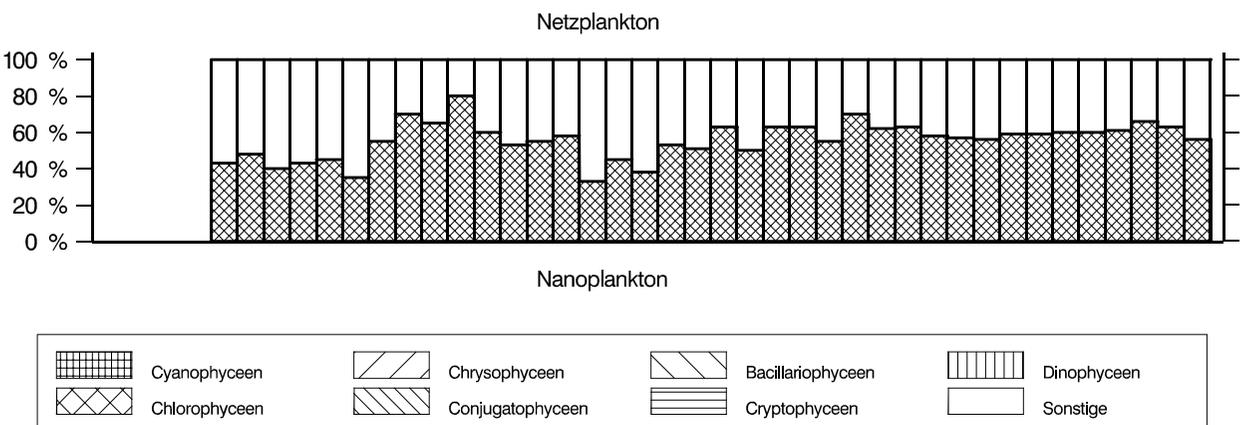
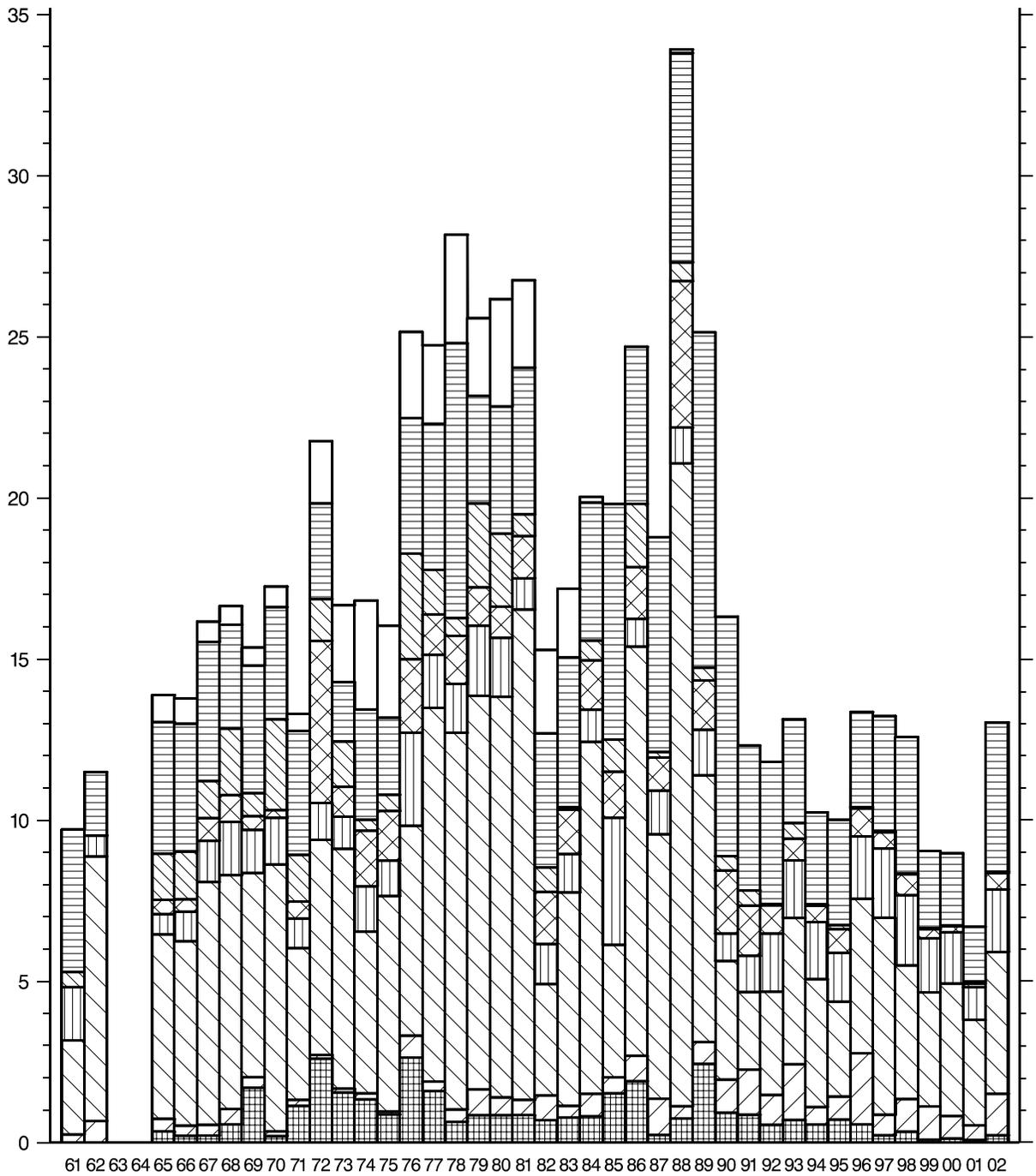
Die Entwicklung der biologischen Parameter zeigt aber auch, dass der ökosystemare Wandel noch in vollem Gange ist. Komplexe Reaktionsmuster werden nach und nach sichtbar. Sie folgen nicht nur der See-internen Dynamik, sondern werden auch durch externe Faktoren wie insbesondere den meteorologischen Gegebenheiten im Seejahr mit beeinflusst. Der aufgrund von Sanierungsmaßnahmen erfolgte Erholungsprozess ist ein limnologisch einmaliger Vorgang in der Geschichte des Bodensees, dessen Entwicklung noch nicht vollständig erforscht ist. Prognosen sind daher immer vor dem Hintergrund der jeweils vorliegenden Erfahrungen mit der gebotenen Vorsicht zu bewerten.

Angesichts der Tatsache, dass sich die äußeren Rahmenbedingungen der See-Entwicklung (Besiedlung, Landwirtschaft und Tourismus im Einzugsgebiet, Klimawandel) nicht nennenswert geändert haben und auch weiterhin mit steigenden Ansprüchen und Belastungen zu rechnen ist, muß die konsequente Schutzstrategie der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee aufrechterhalten bleiben. Neben den bewährten, hohen Anforderungen an die Abwasserbehandlung müssen diffuse Nähr- und Schadstoffeinträge sowie anthropogene Beeinträchtigungen weiter minimiert werden. Nur so läßt sich das Ökosystem Bodensee nachhaltig schützen und bewahren.

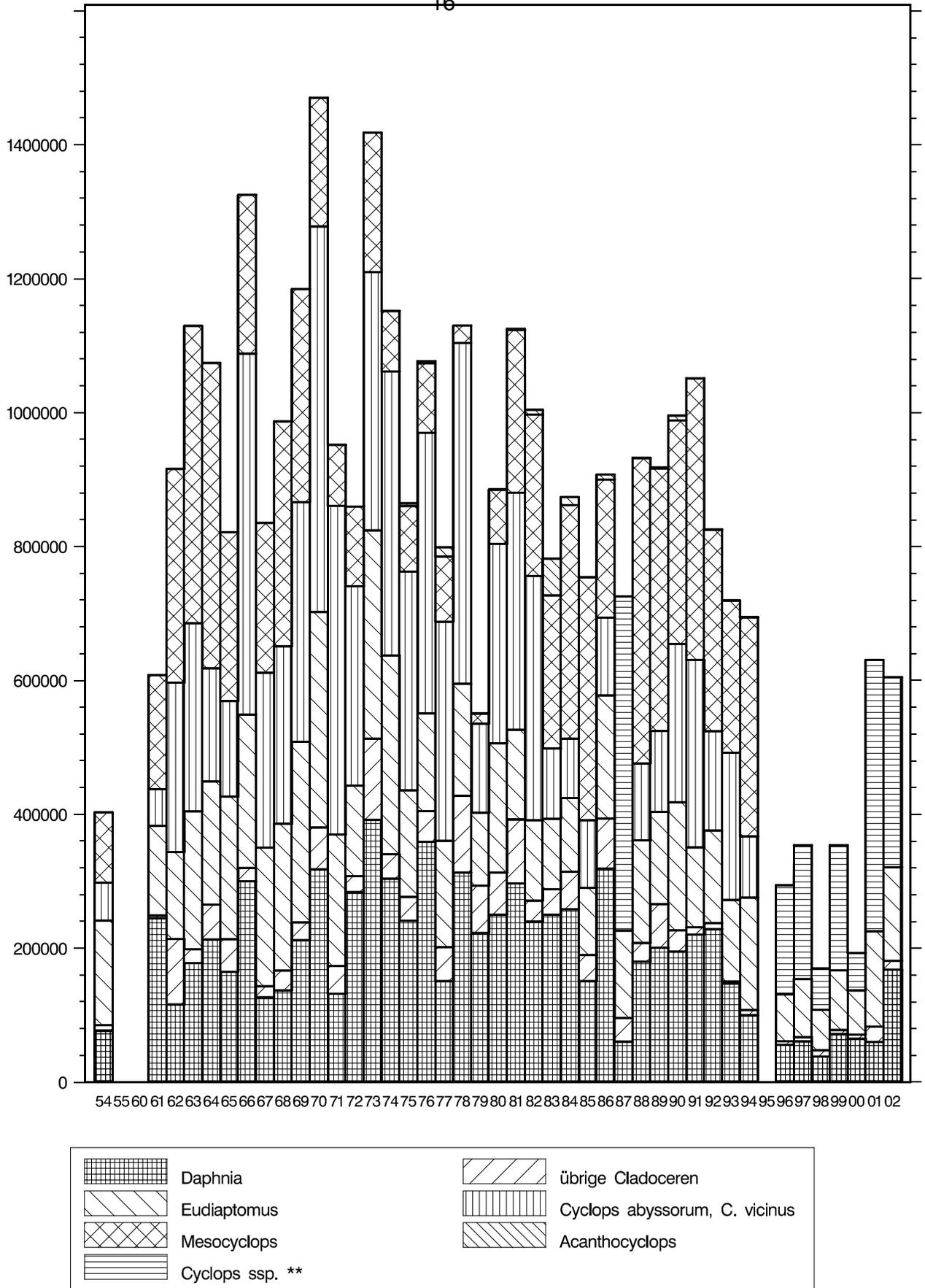
## **ABBILDUNGEN**







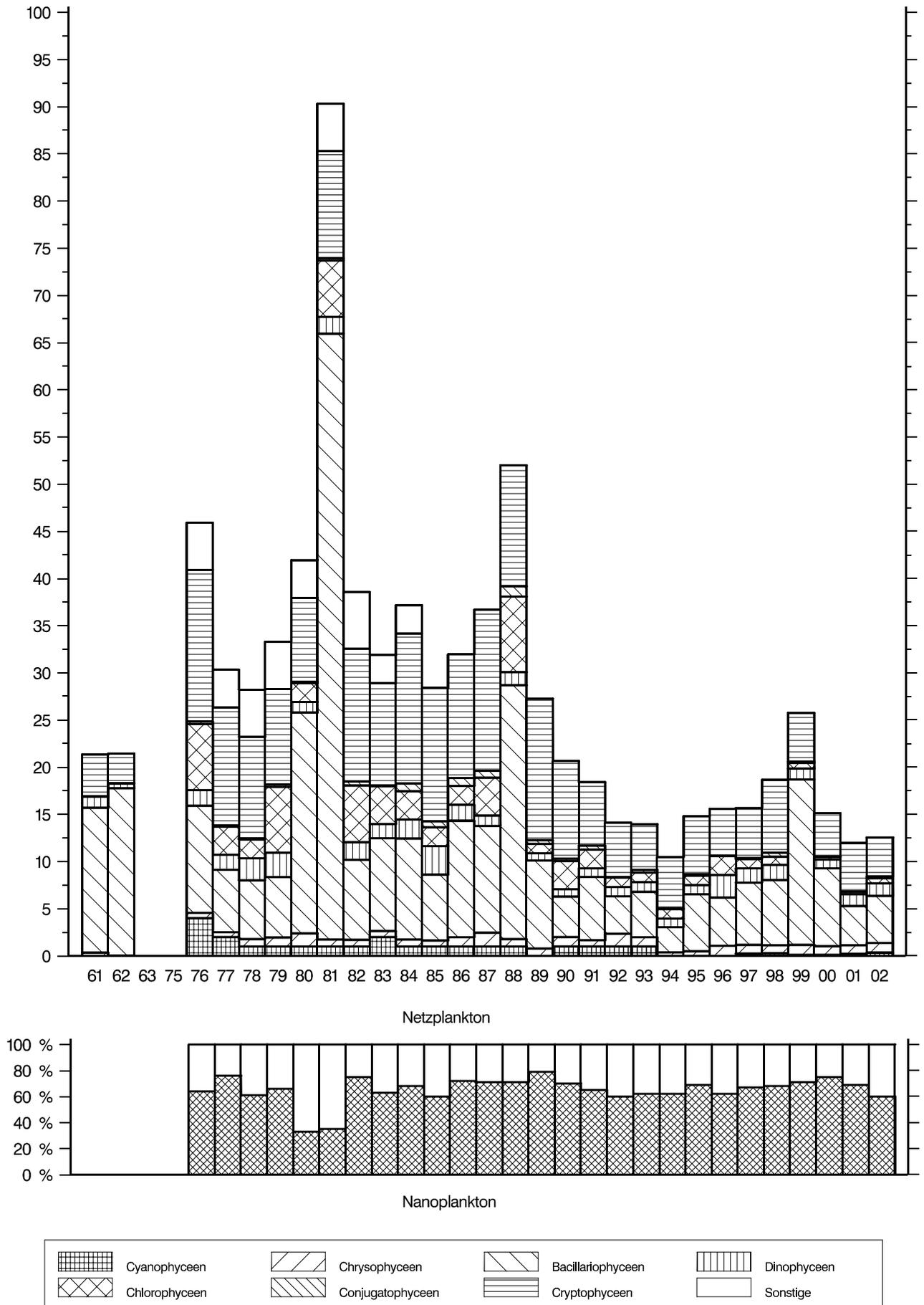
**Abb. 3:** Bodensee – Obersee, Fischbach – Uttwil:  
Langfristige Entwicklung des Phytoplanktons  
Biomassen in  $\text{g/m}^2$  (0–20 m Tiefe), Jahresmittelwerte



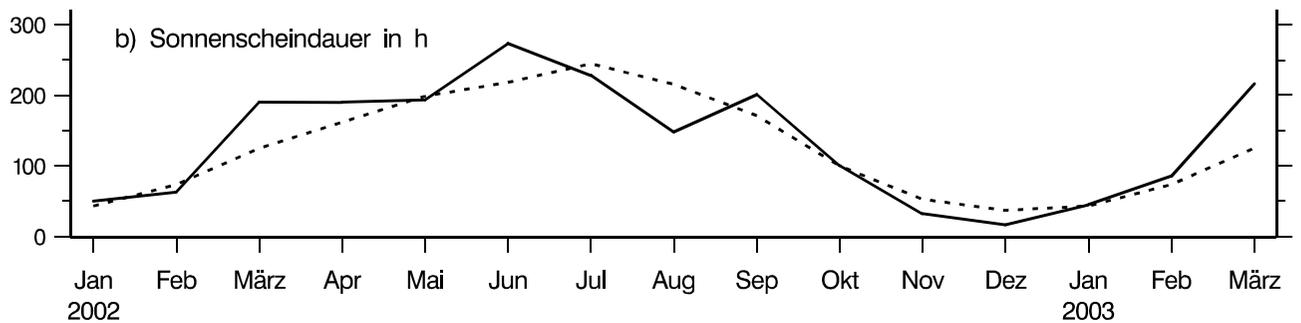
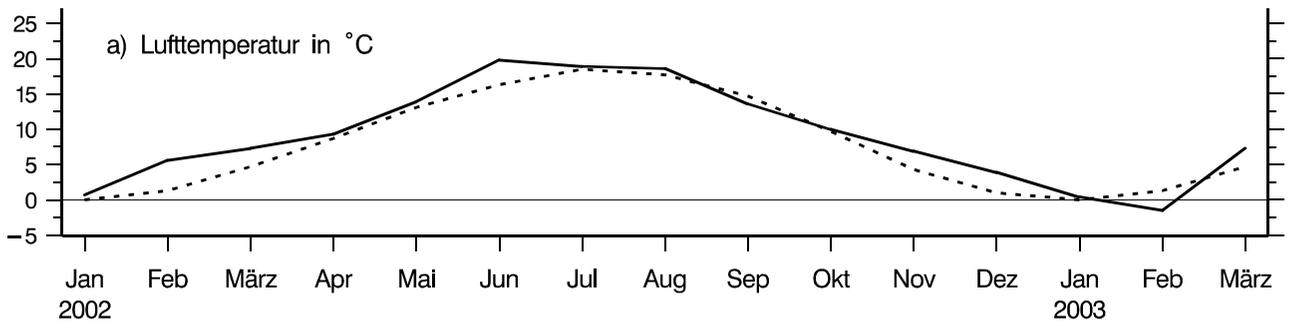
**Abb. 4:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Langfristige Entwicklung des Crustaceenplanktons  
Tiere/m<sup>3</sup> gesamte Wassersäule, Jahresmittelwerte \*

\* Berechnung des Jahresmittelwertes für 1995 nicht möglich wegen fehlender Frühjahrswerte

\*\* 1987 und ab 1996 einschließlich Mesocyclops



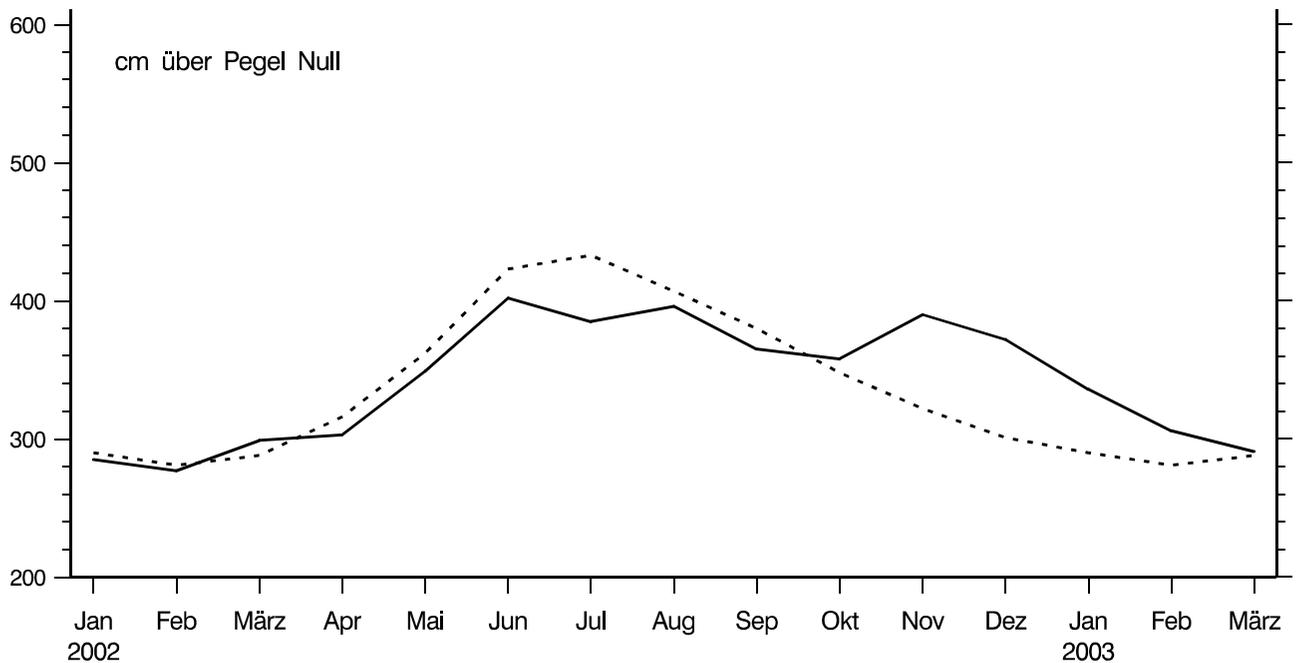
**Abb. 5:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
 Langfristige Entwicklung des Phytoplanktons  
 Biomassen in g/m<sup>2</sup> (0–20 m Tiefe), Jahresmittelwerte



a) — Monatsmitteltemperatur  
 ..... langjährige Monatsmitteltemperatur (61-90)

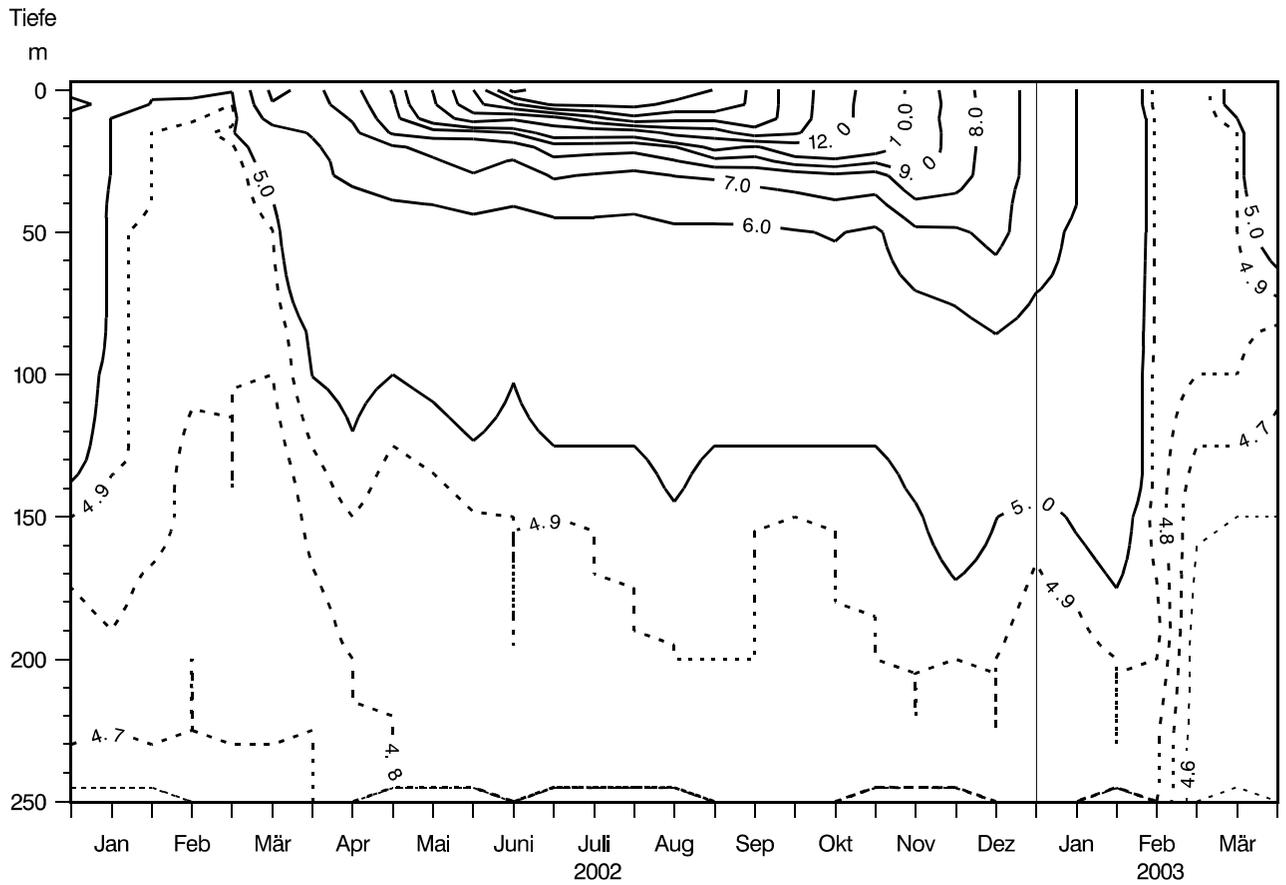
b) — monatliche Sonnenscheindauer in h  
 ..... langjährige monatliche Sonnenscheindauer in h (61-90)

**Abb. 6:** Bodensee – Obersee:  
 Klimadaten der Wetterwarte Konstanz

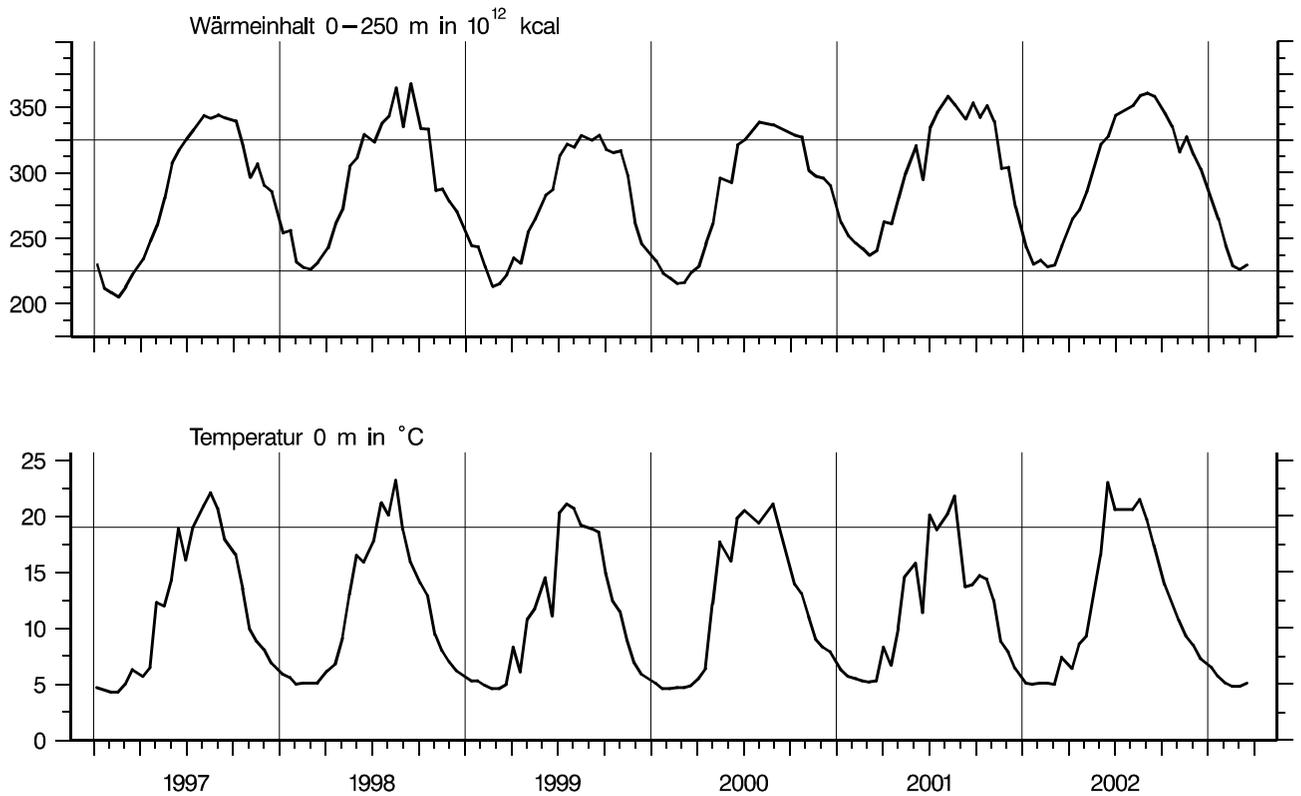


— mittlerer monatlicher Wasserstand  
 ..... langjähriger monatlicher Wasserstand (61-90)

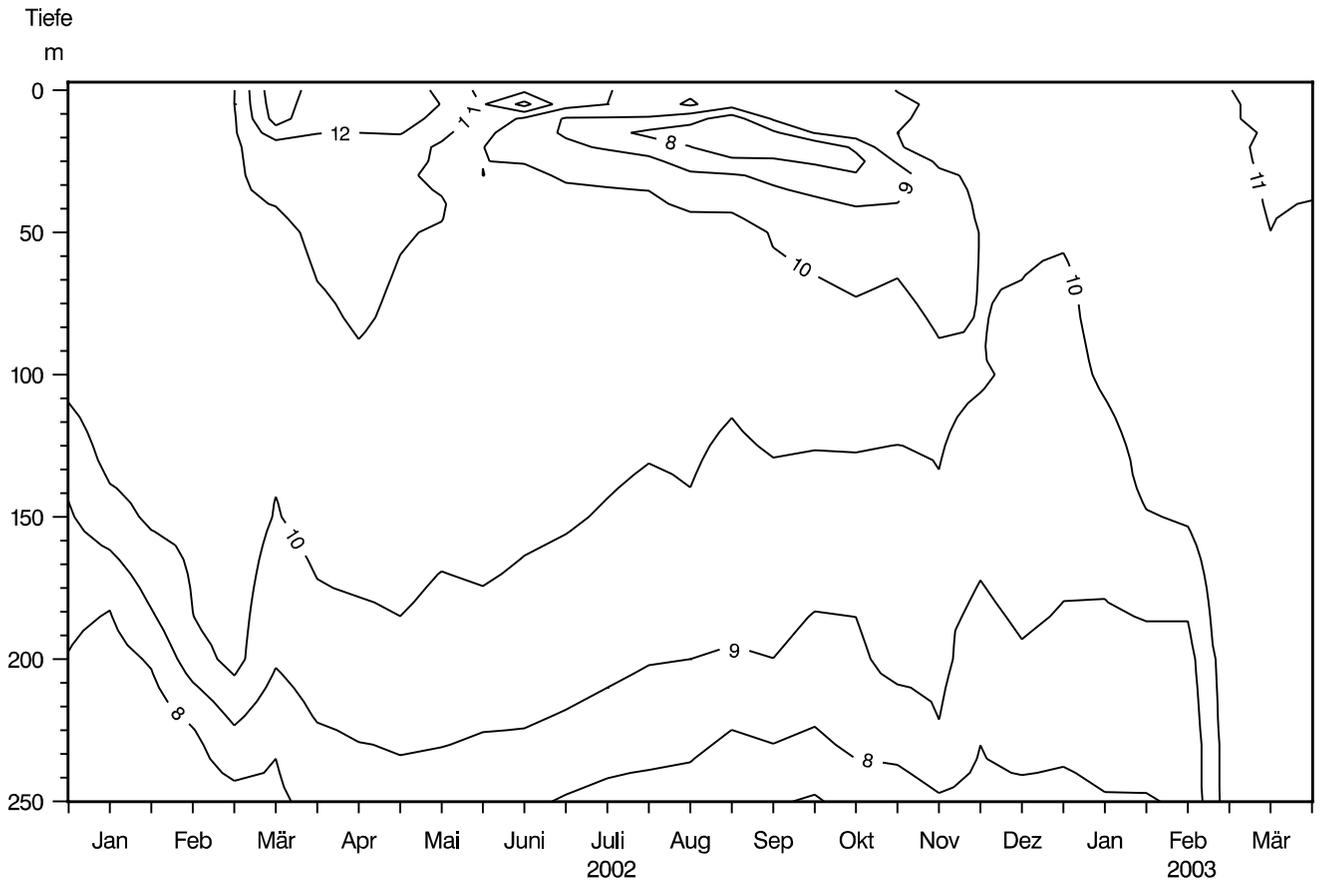
**Abb. 7:** Bodensee – Obersee:  
 Wasserstand am Pegel Konstanz



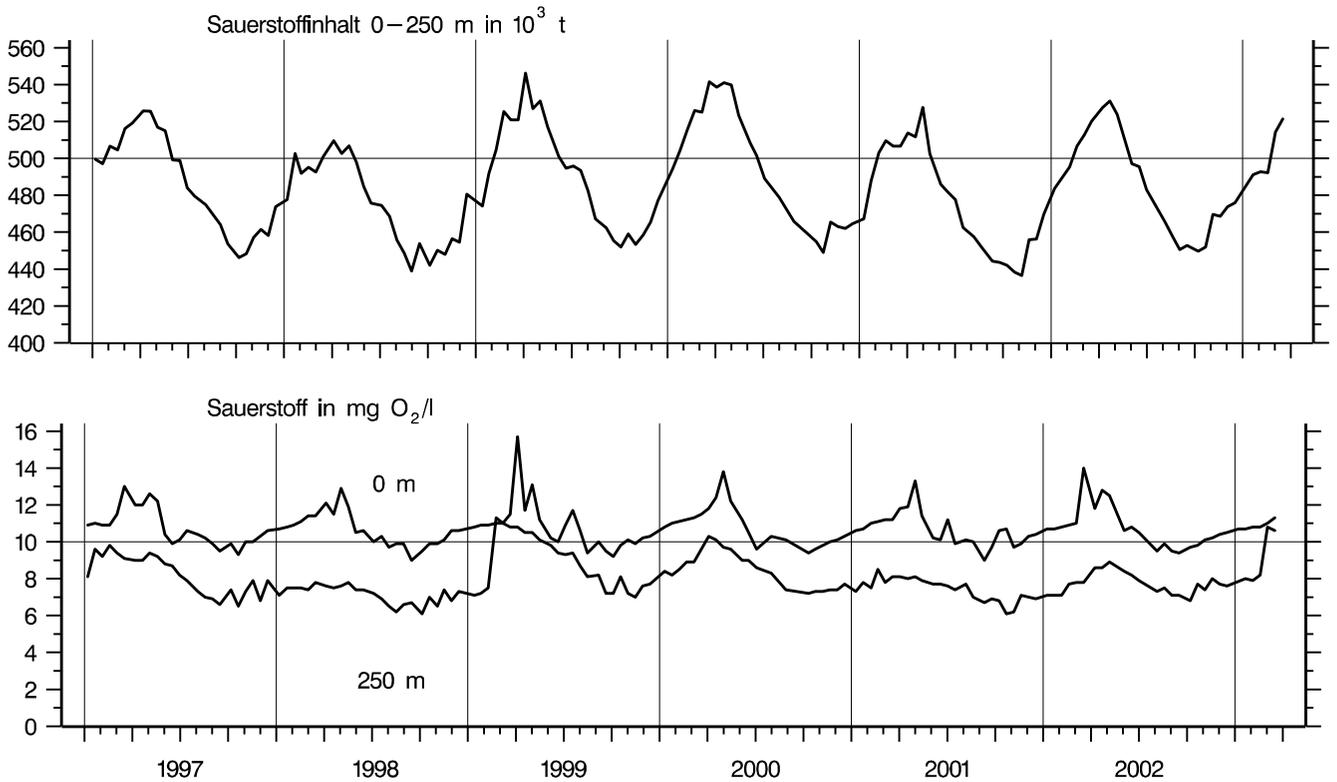
**Abb. 8:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Temperatur °C



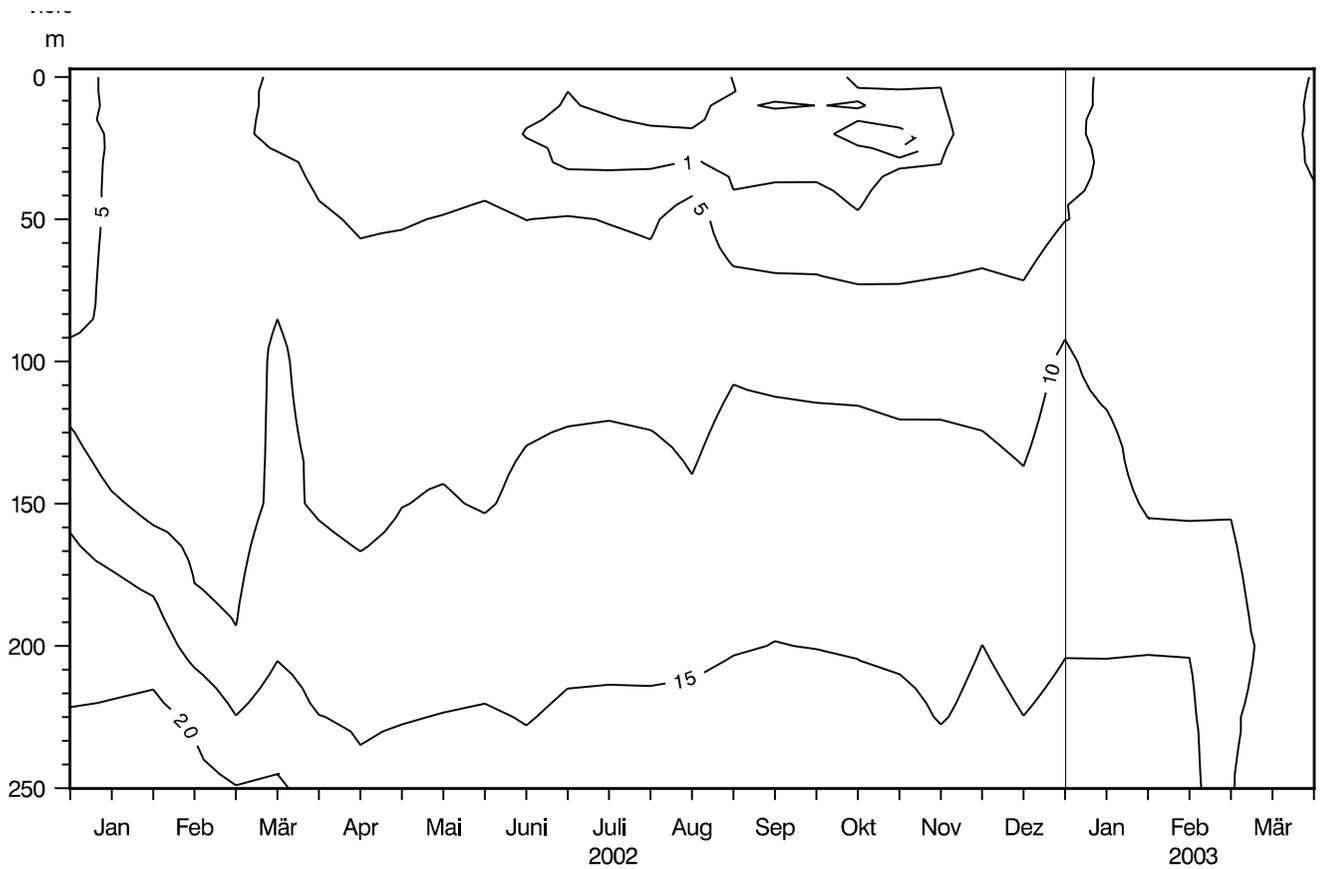
**Abb. 9:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Thermik



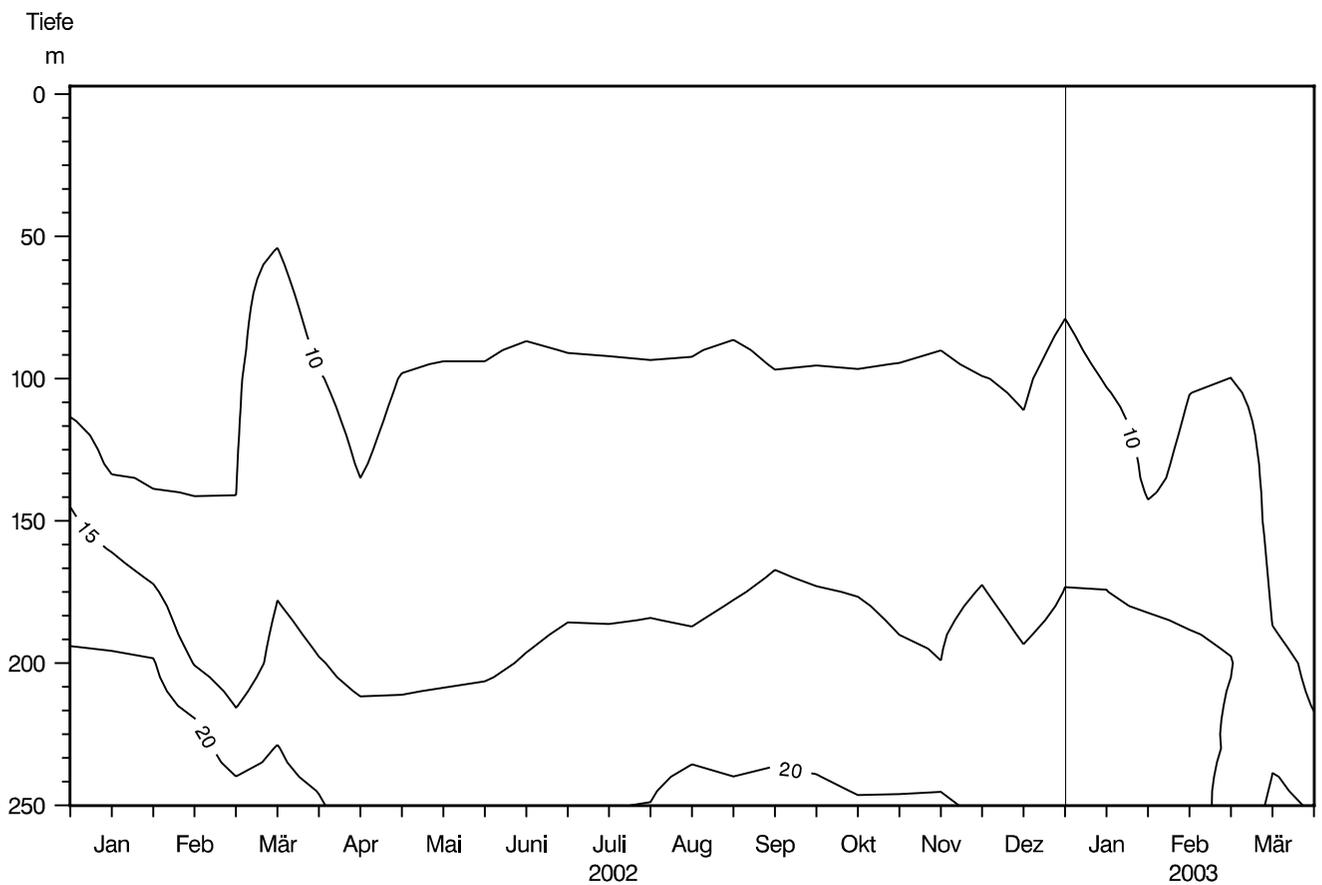
**Abb. 10:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Sauerstoff (mg/l)



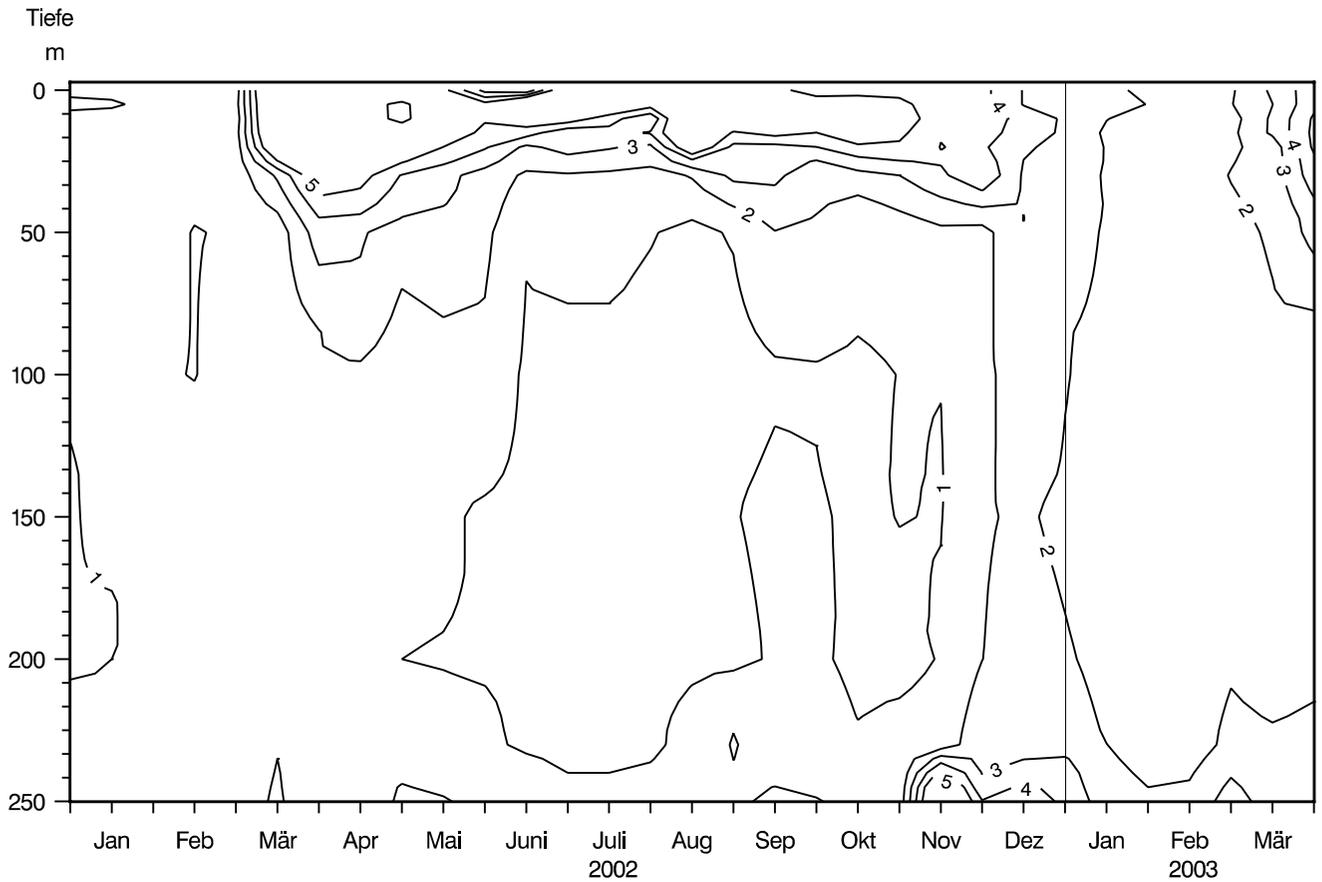
**Abb. 11:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Sauerstoffinhalt 0–252 m und Sauerstoffkonzentration in 0 und 250 m Tiefe



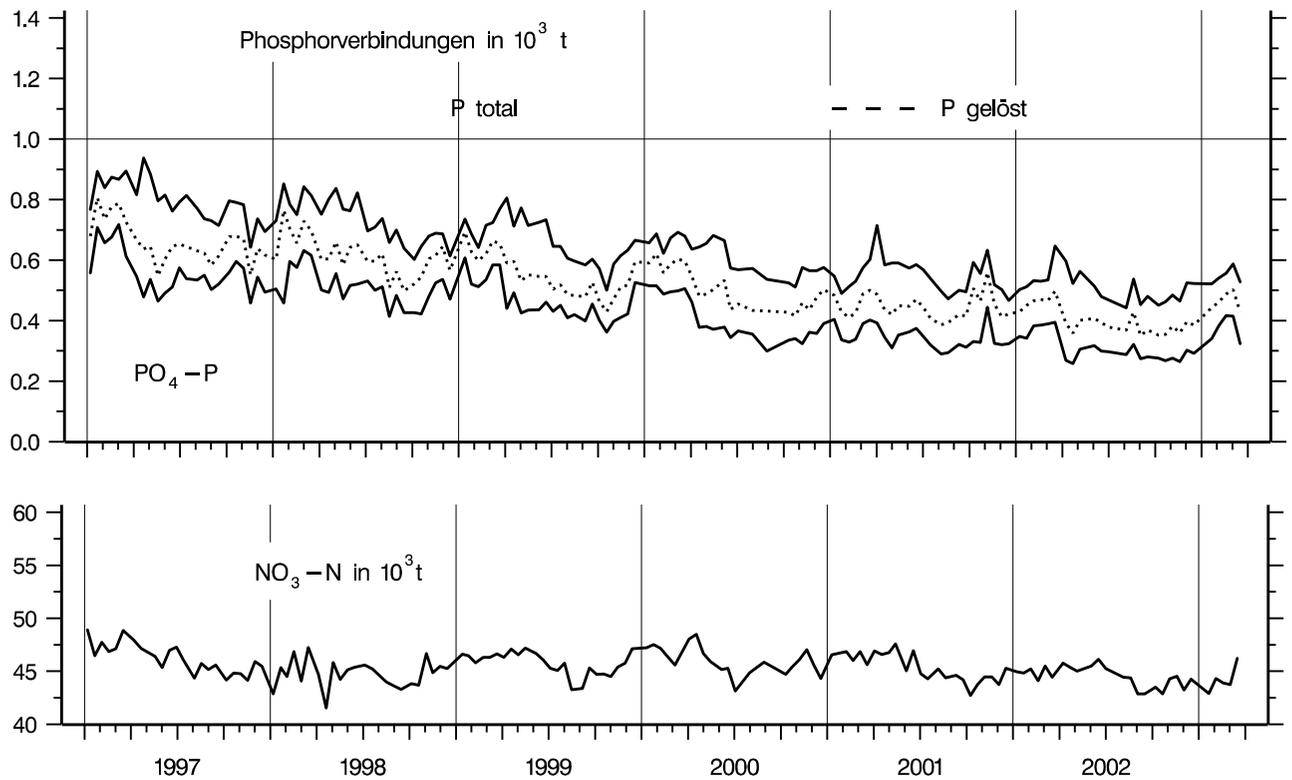
**Abb. 12:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Orthophosphat – Phosphor (mg/m<sup>3</sup>)



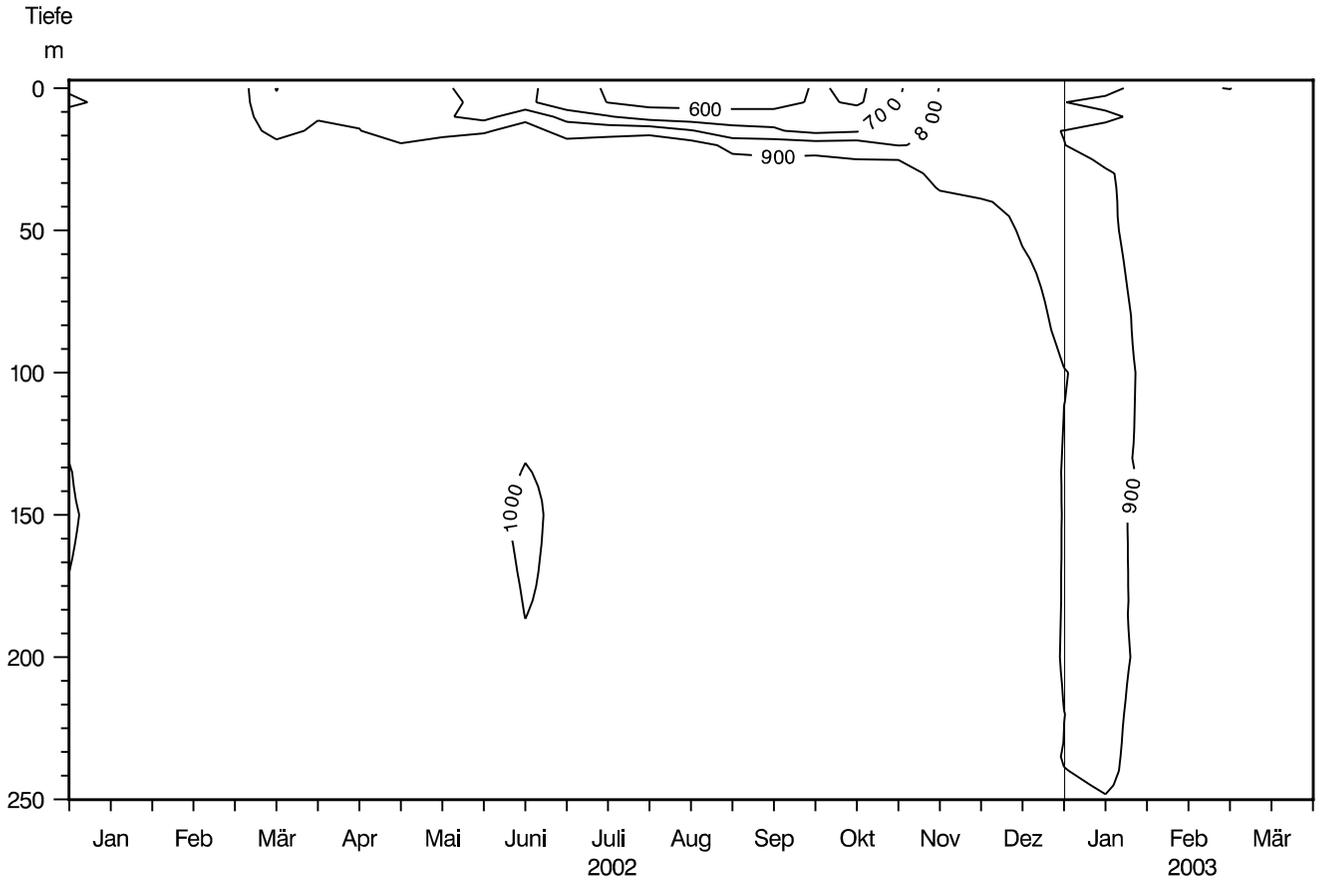
**Abb. 13:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Gesamt gelöster Phosphor (mg/m<sup>3</sup>)



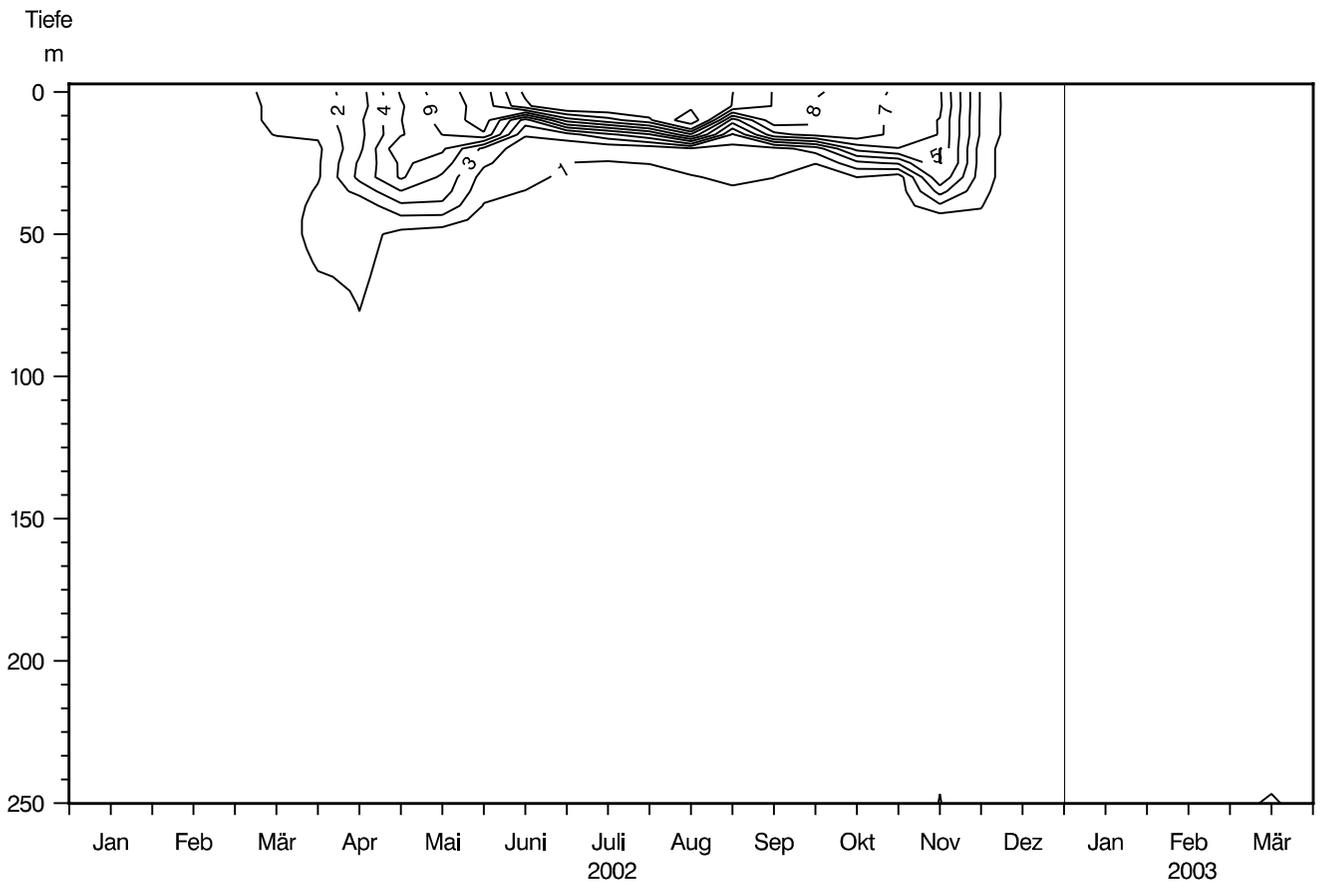
**Abb. 14:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
partikulärer Phosphor (mg/m<sup>3</sup>)



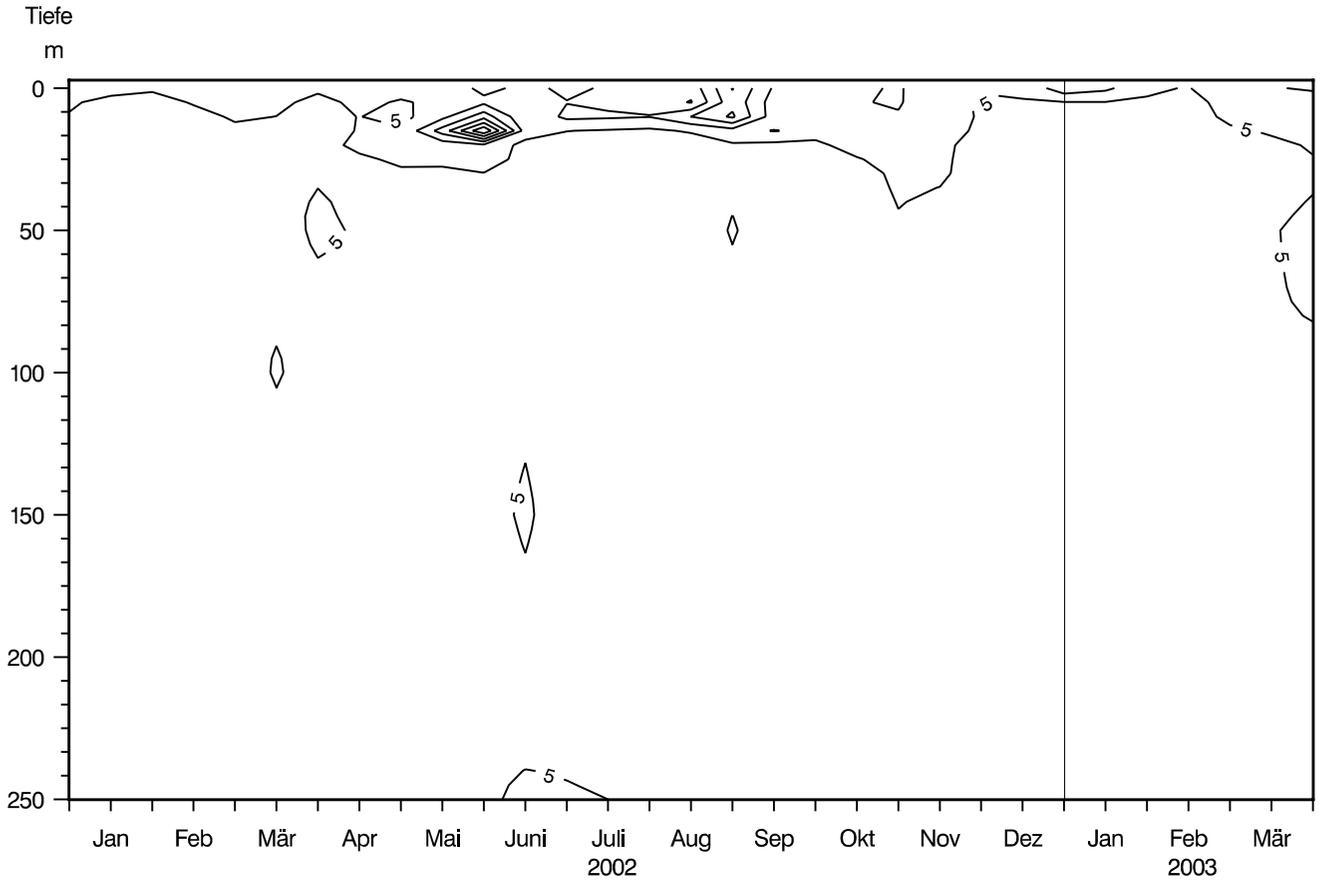
**Abb. 15:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Nährstoffinhalt (P, NO<sub>3</sub>-N) 0–250 m Tiefe



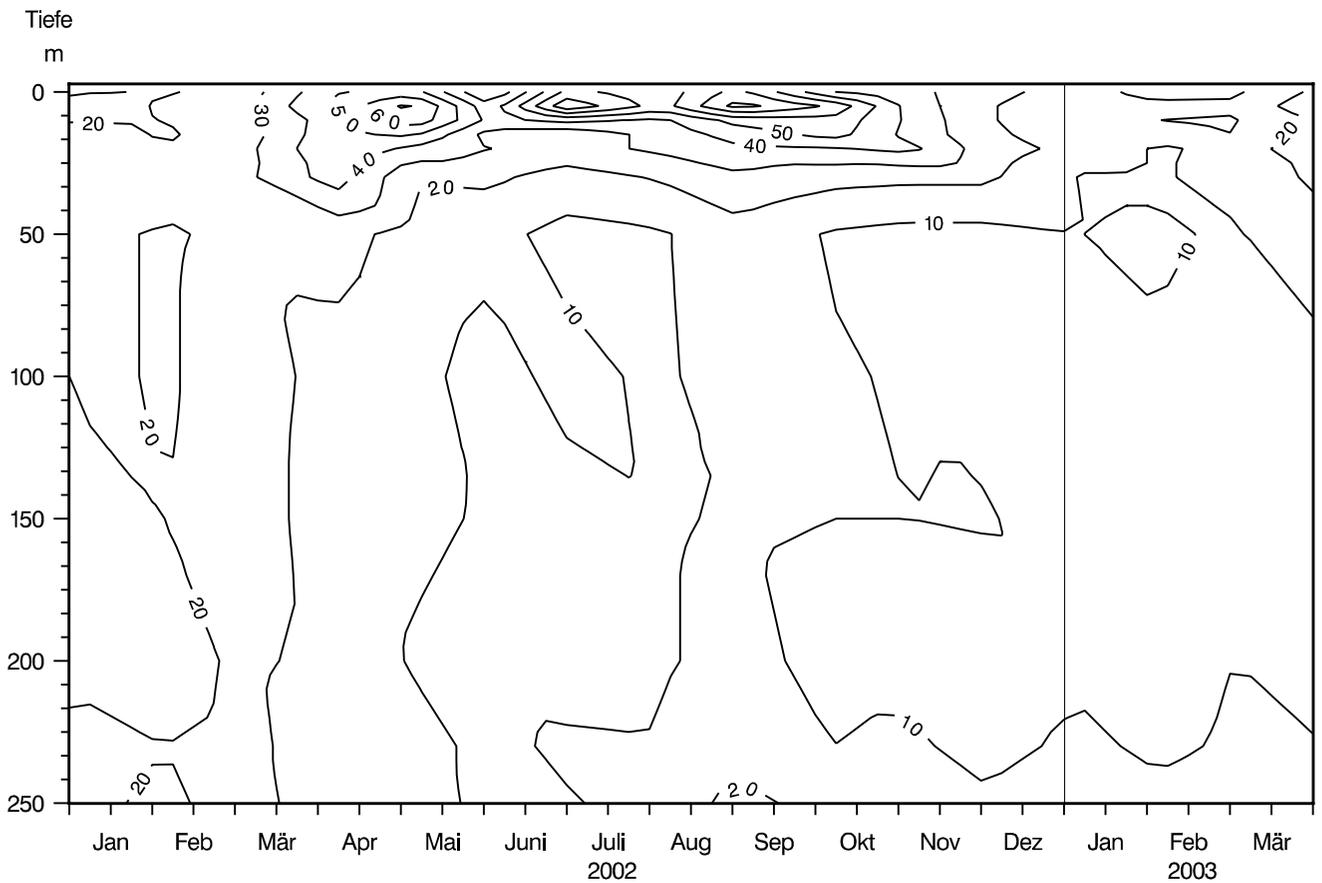
**Abb. 16:** Bodensee – Obersee, Fischbach – Uttwil:  
Nitrat – Stickstoff ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )



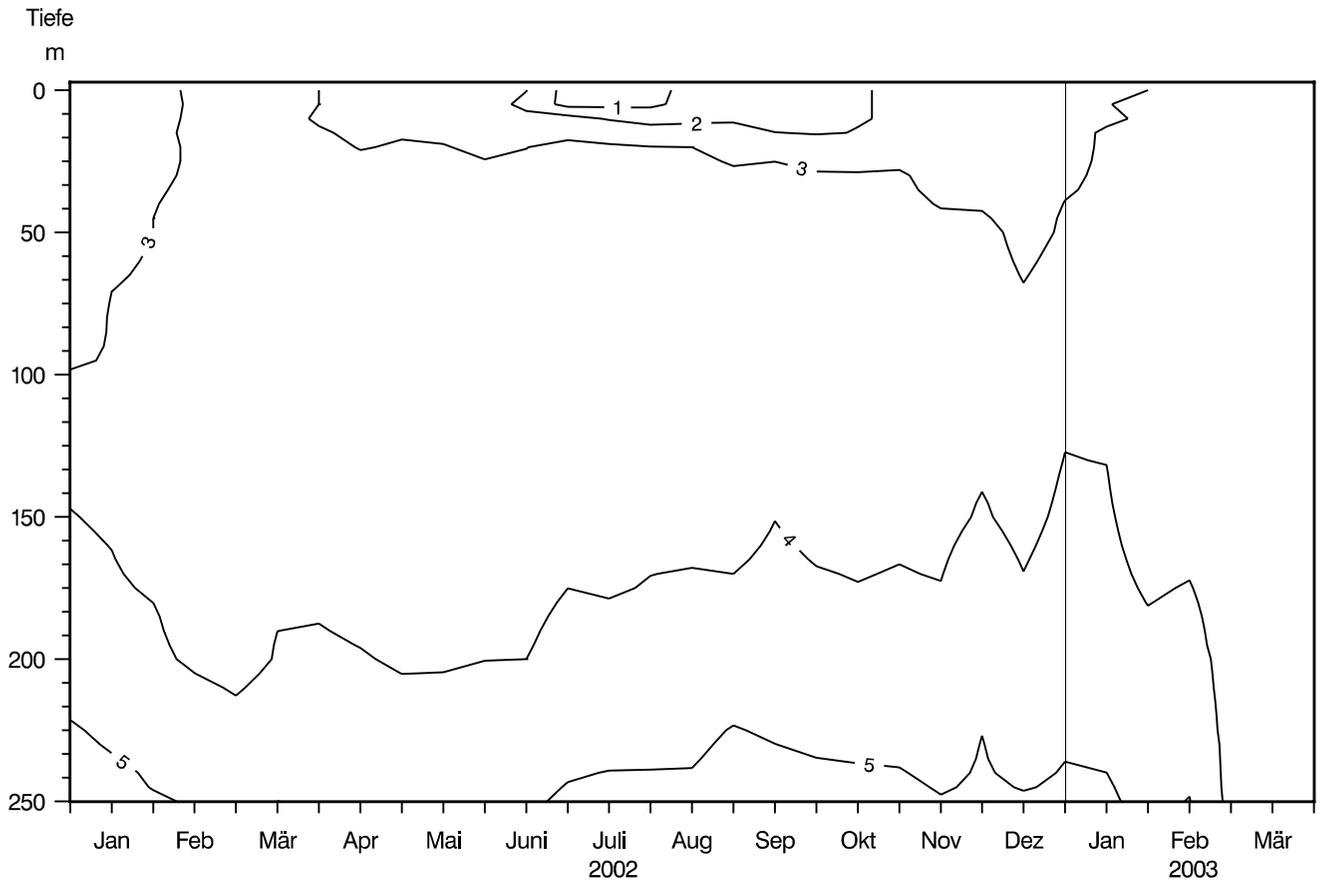
**Abb. 17:** Bodensee – Obersee, Fischbach – Uttwil:  
Nitrit – Stickstoff ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )



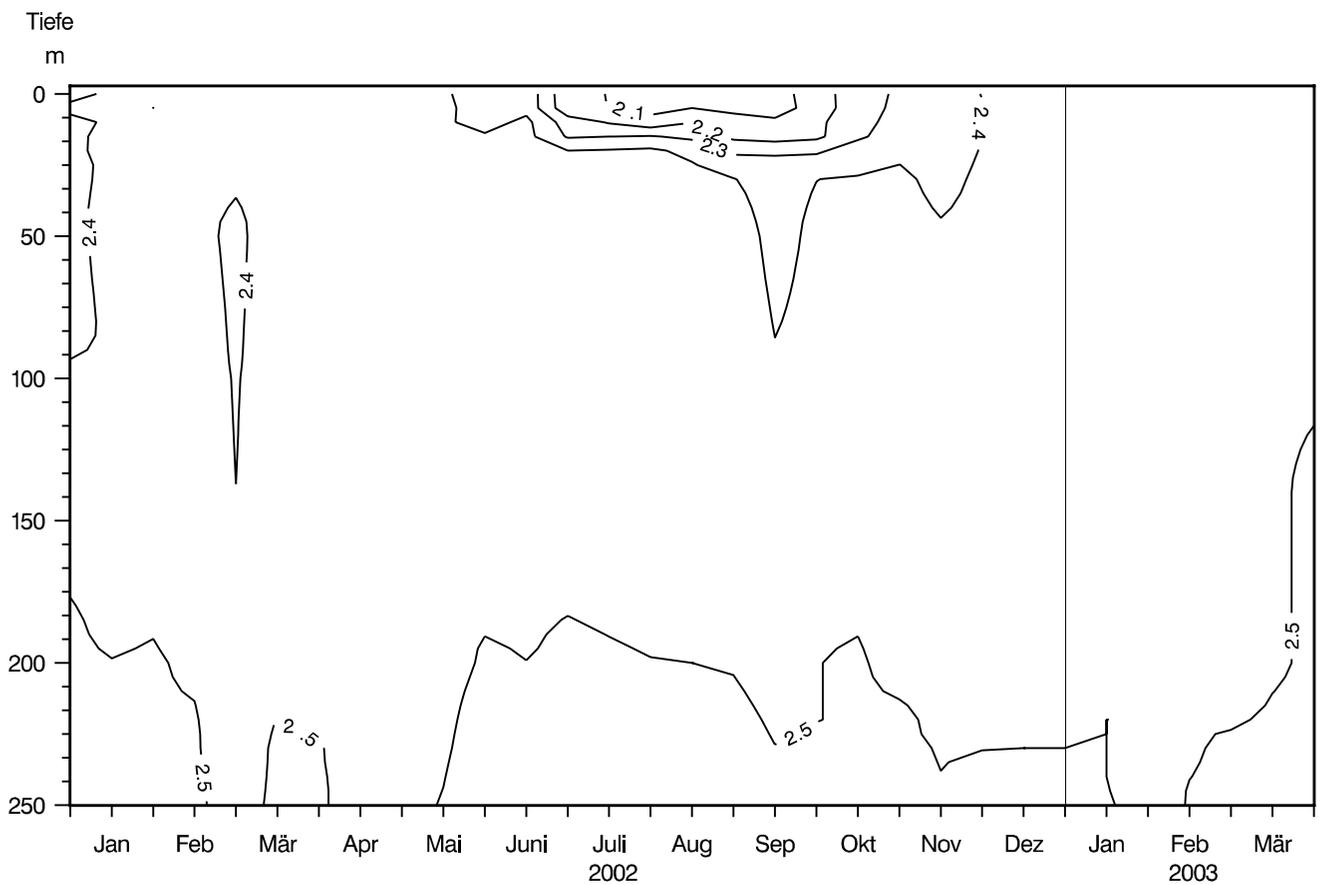
**Abb. 18:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Ammonium – Stickstoff (mg/m<sup>3</sup>)



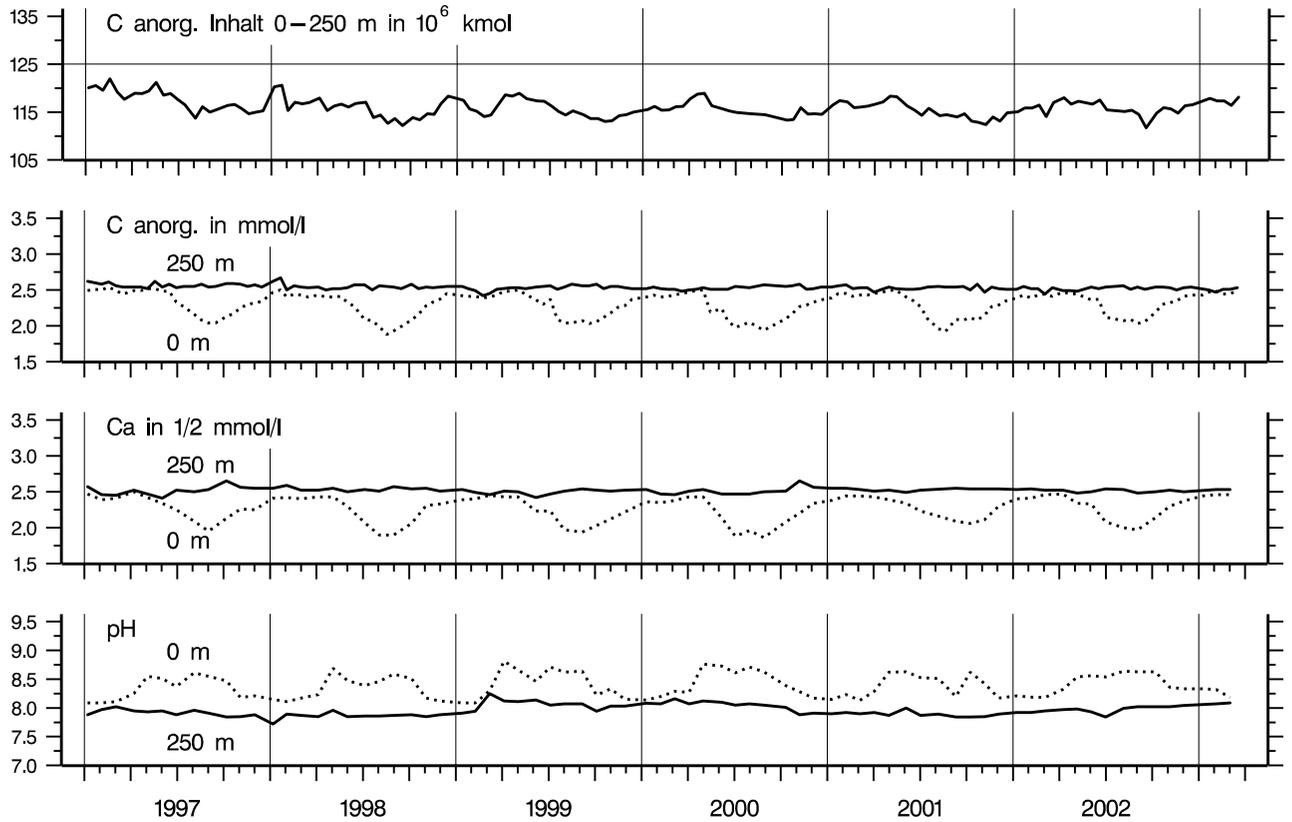
**Abb. 19:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Partikulärer Stickstoff (mg/m<sup>3</sup>)



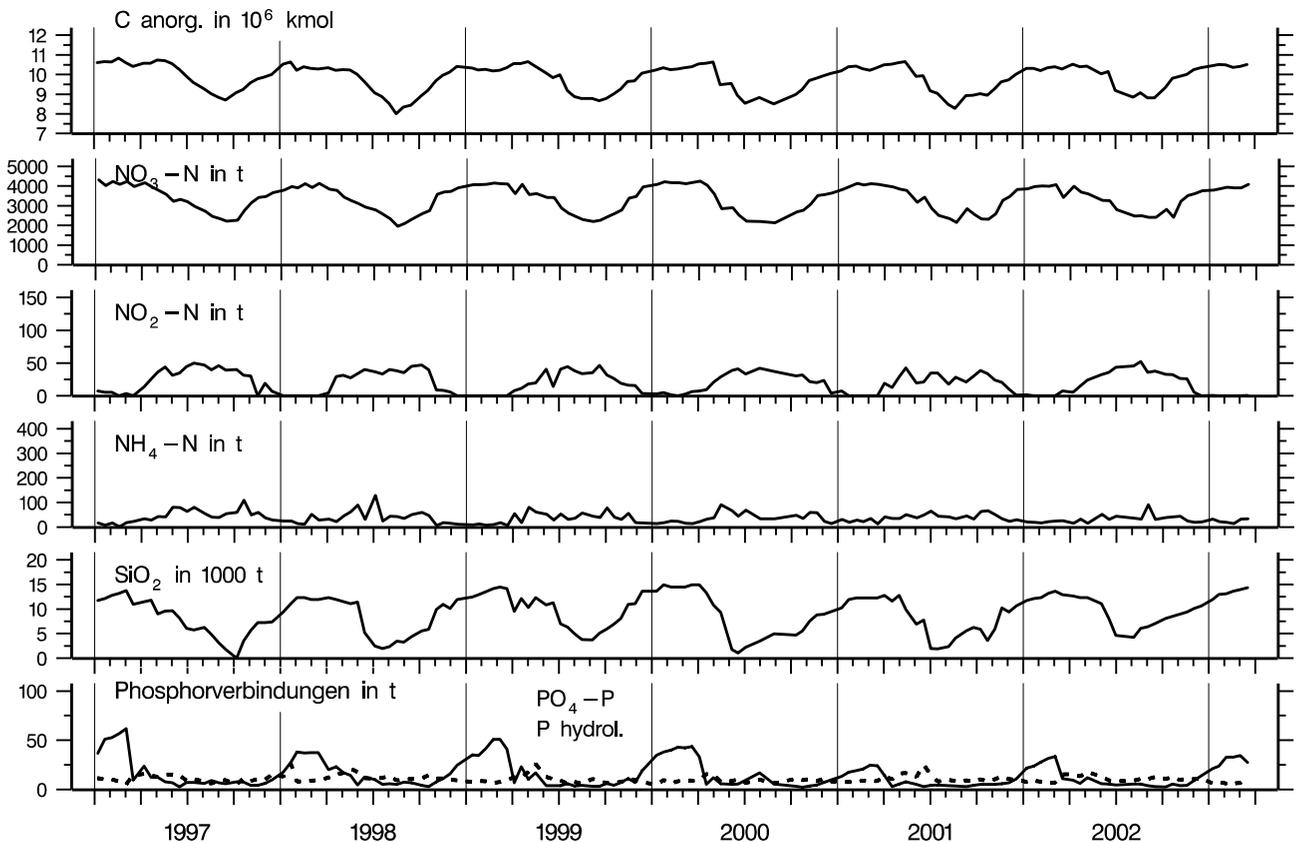
**Abb. 20:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Silikat (mg/l)



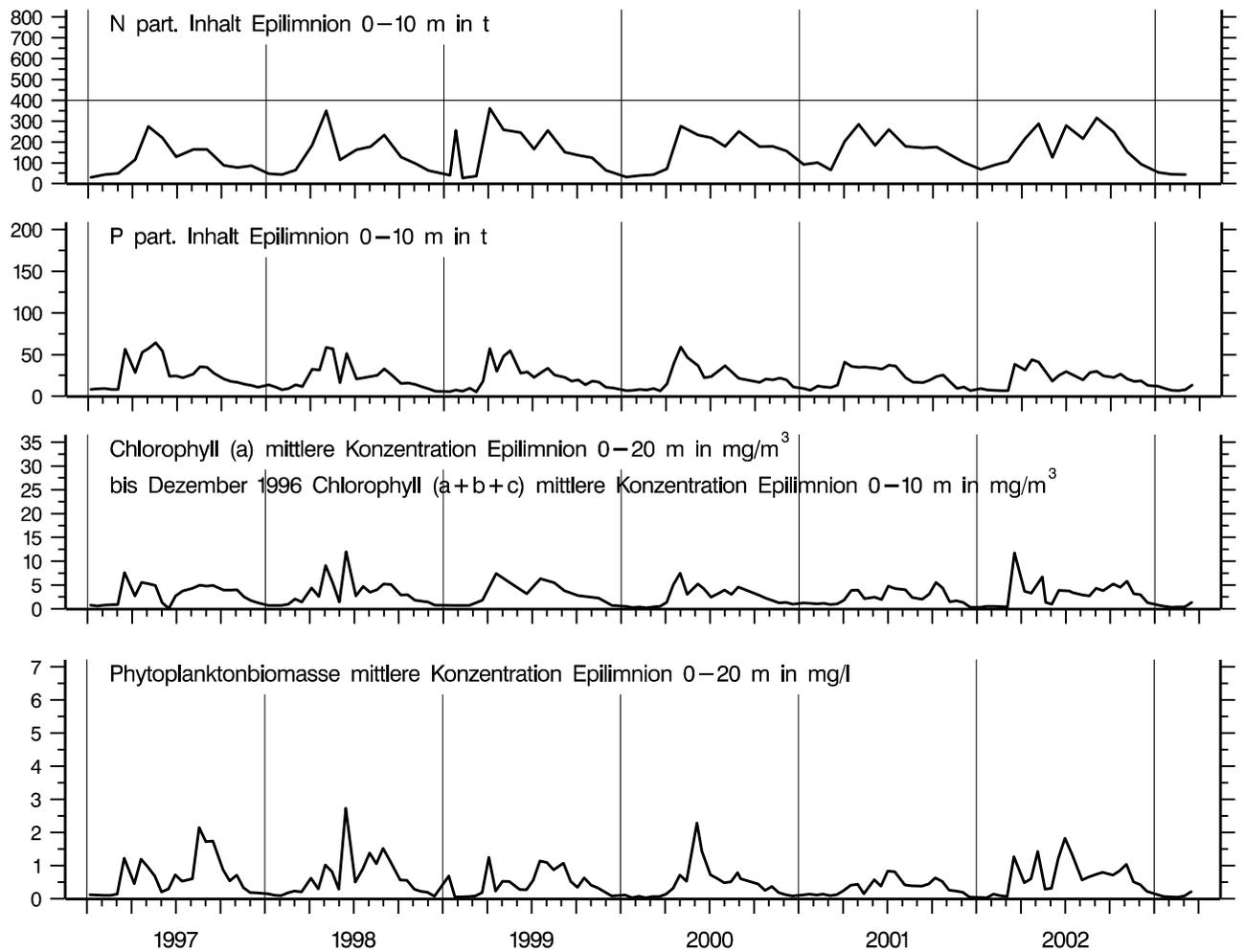
**Abb. 21:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Anorganischer Kohlenstoff (mmol/l)



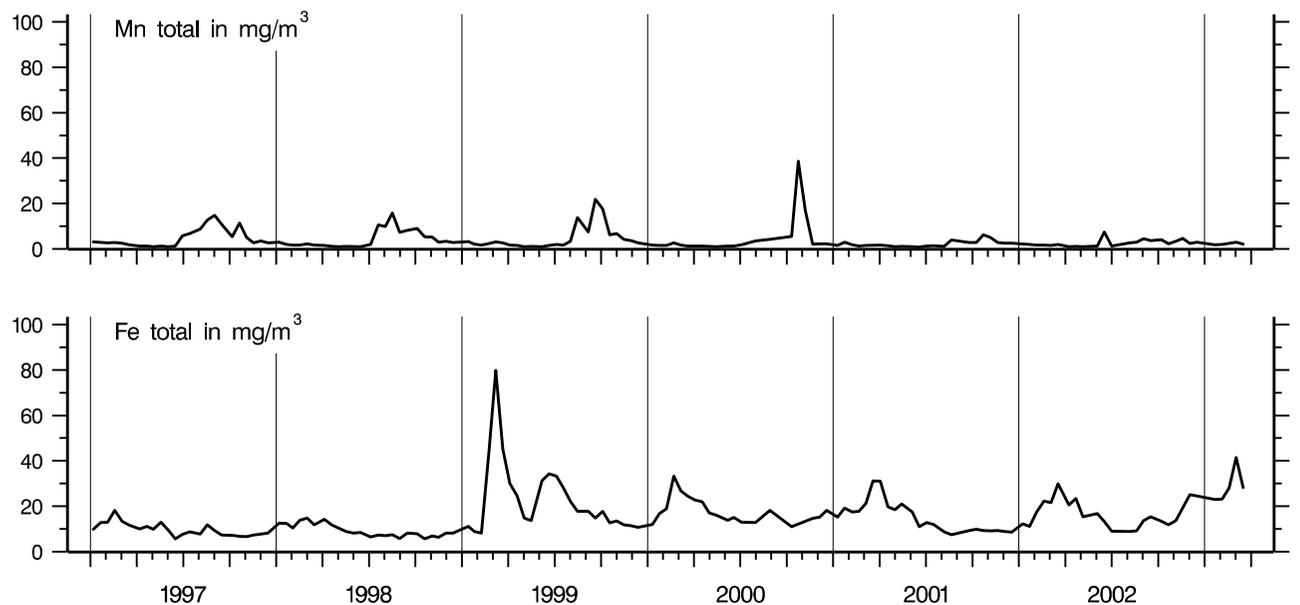
**Abb. 22:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Anorganischer Kohlenstoff, Inhalt 0–252 m Tiefe  
Konzentration von anorg. Kohlenstoff, Calcium; pH–Wert



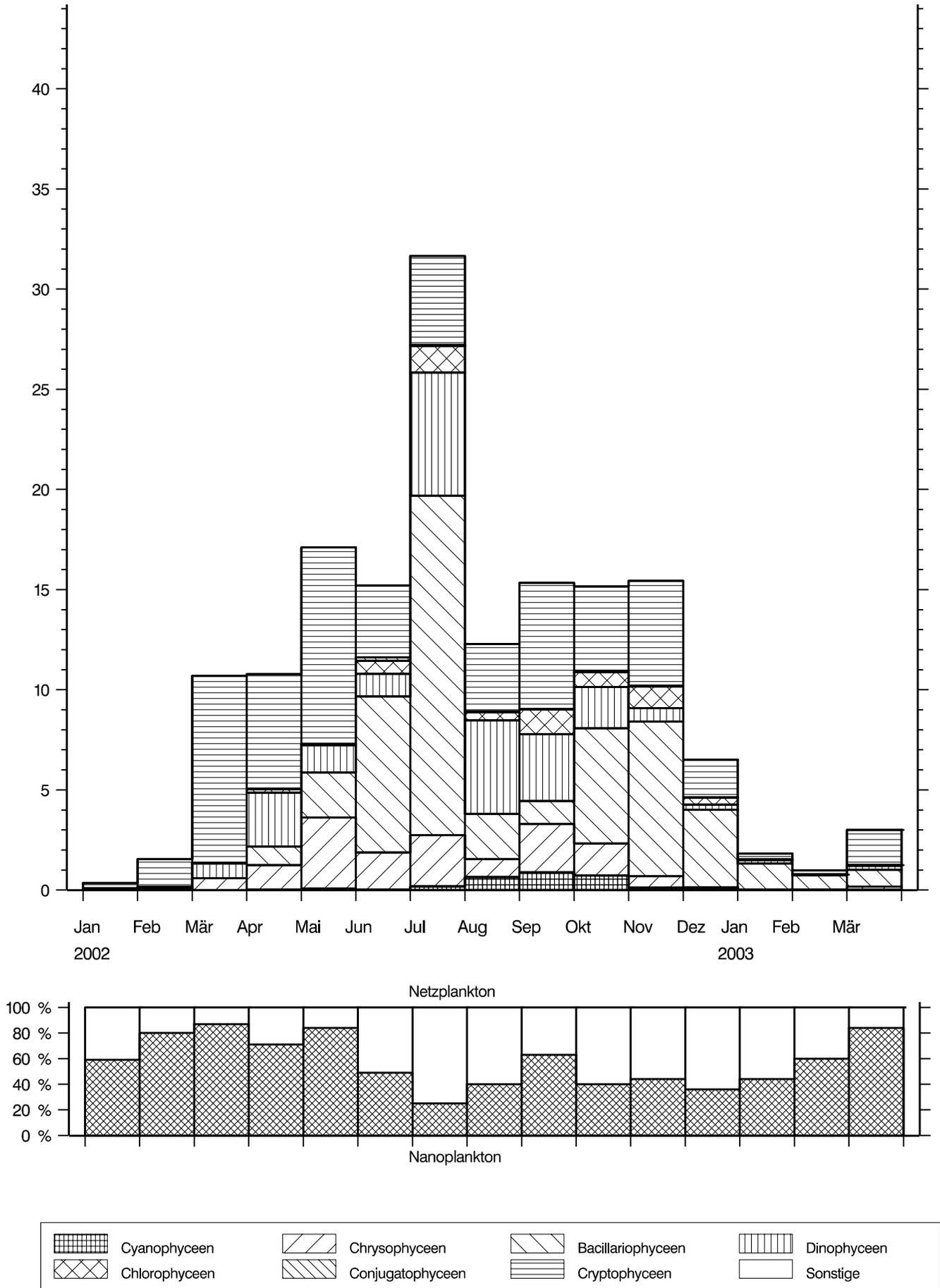
**Abb. 23:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Nährstoffinhalt (Phosphor, Stickstoff, Silikat,  
anorg. Kohlenstoff) im Epilimnion 0–10 m Tiefe



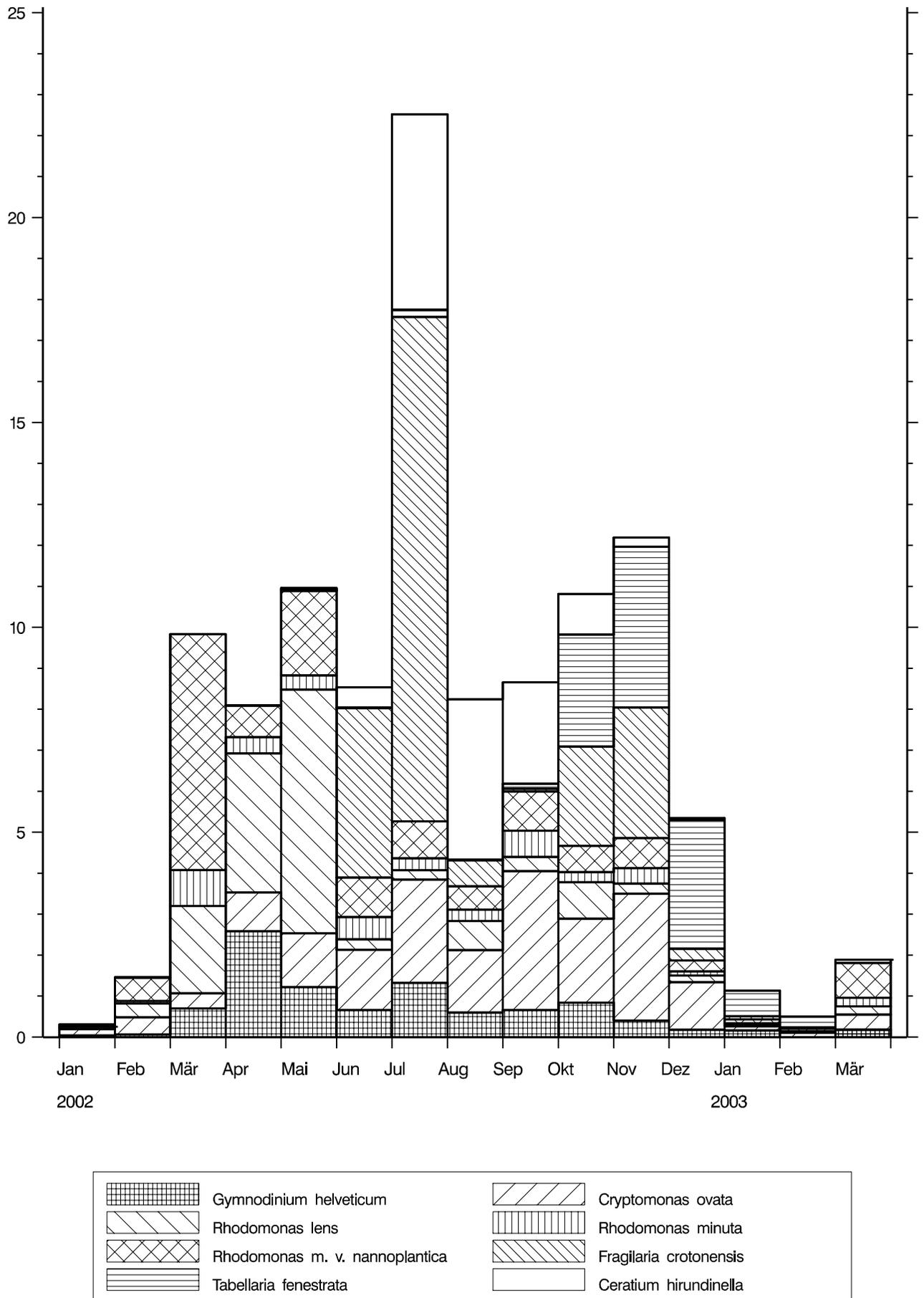
**Abb. 24:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Chemische Biomasseindikatoren und Phytoplanktonbiomasse



**Abb. 25:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Konzentration von Eisen total und Mangan total in 250 m Tiefe



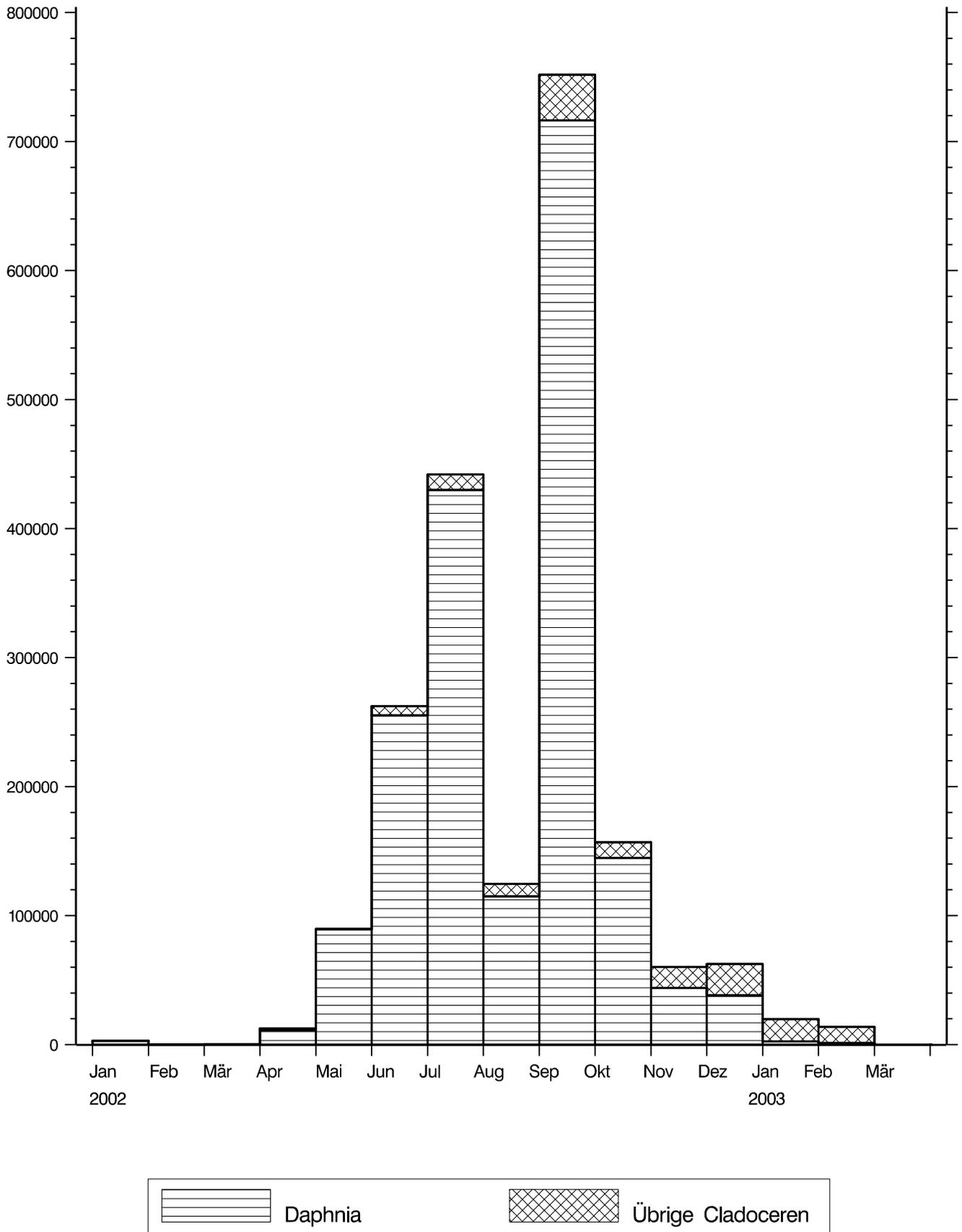
**Abb. 26:** Bodensee – Obersee, Fischbach – Uttwil:  
 Entwicklung des Phytoplanktons  
 Biomasse in g/m<sup>2</sup> (0–20 m Tiefe), Monatsmittelwerte



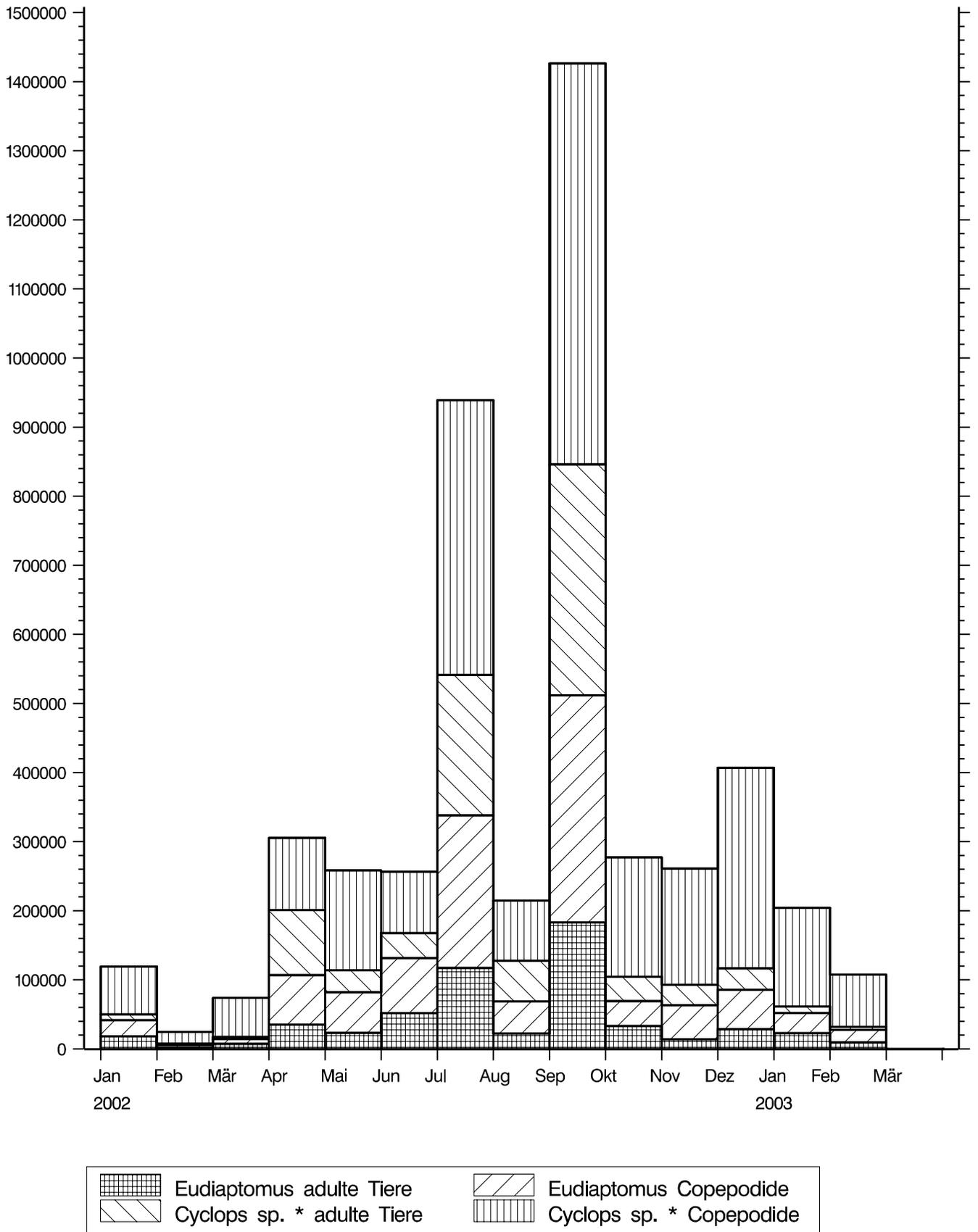
**Abb. 27:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:

Entwicklung des Phytoplanktons

Biomasse der Hauptarten in  $\text{g/m}^2$  (0–20 m Tiefe), Monatsmittelwerte



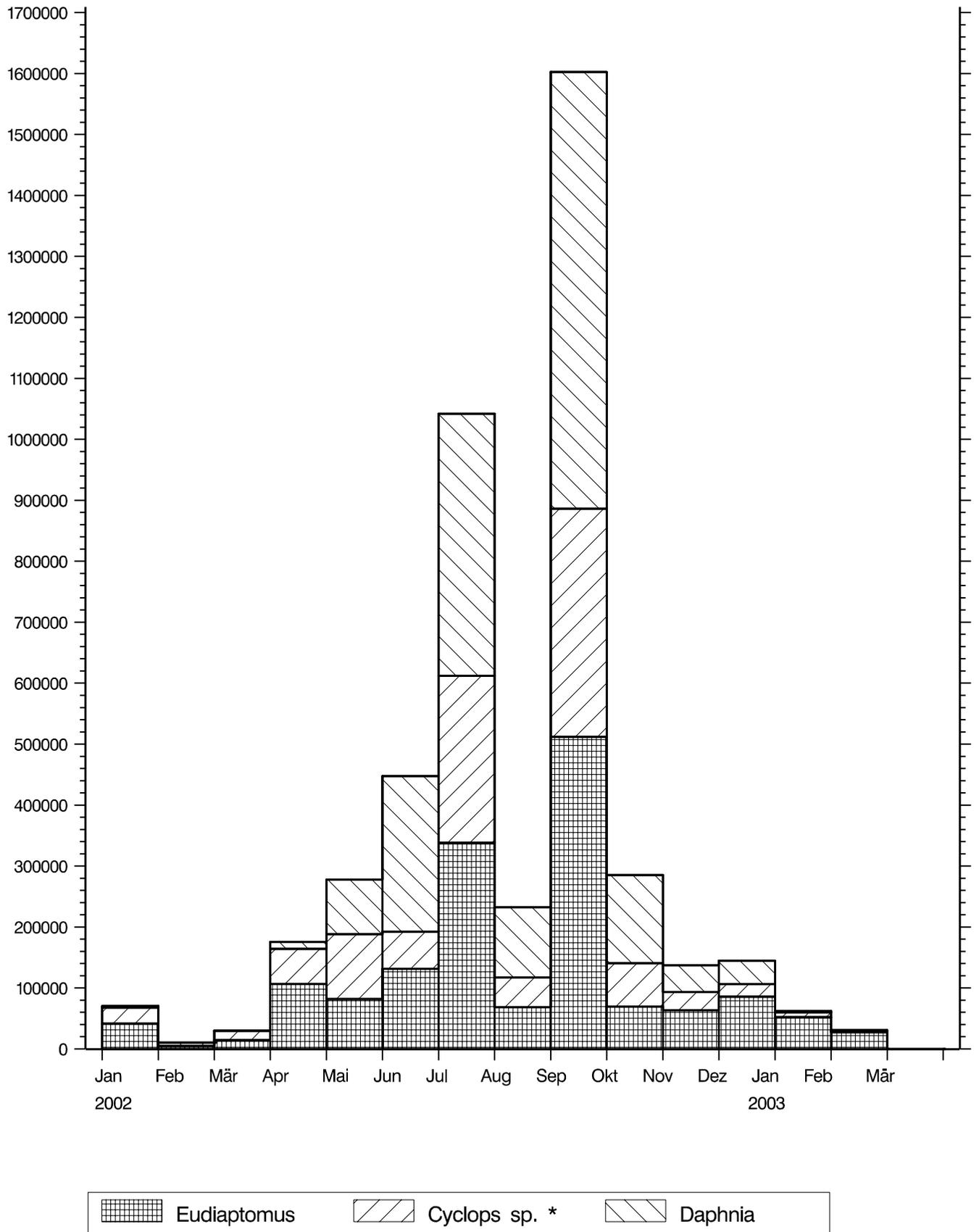
**Abb. 28:** Bodensee – Obersee, Fischbach – Uttwil:  
Entwicklung der Cladoceren  
Tiere/m<sup>2</sup>, Monatsmittelwerte



\* Cyclops sp. (Summe der Copepoden *C. abyssorum*, *C. vicinus*, *Mesocyclops*, *Acanthocyclops*)

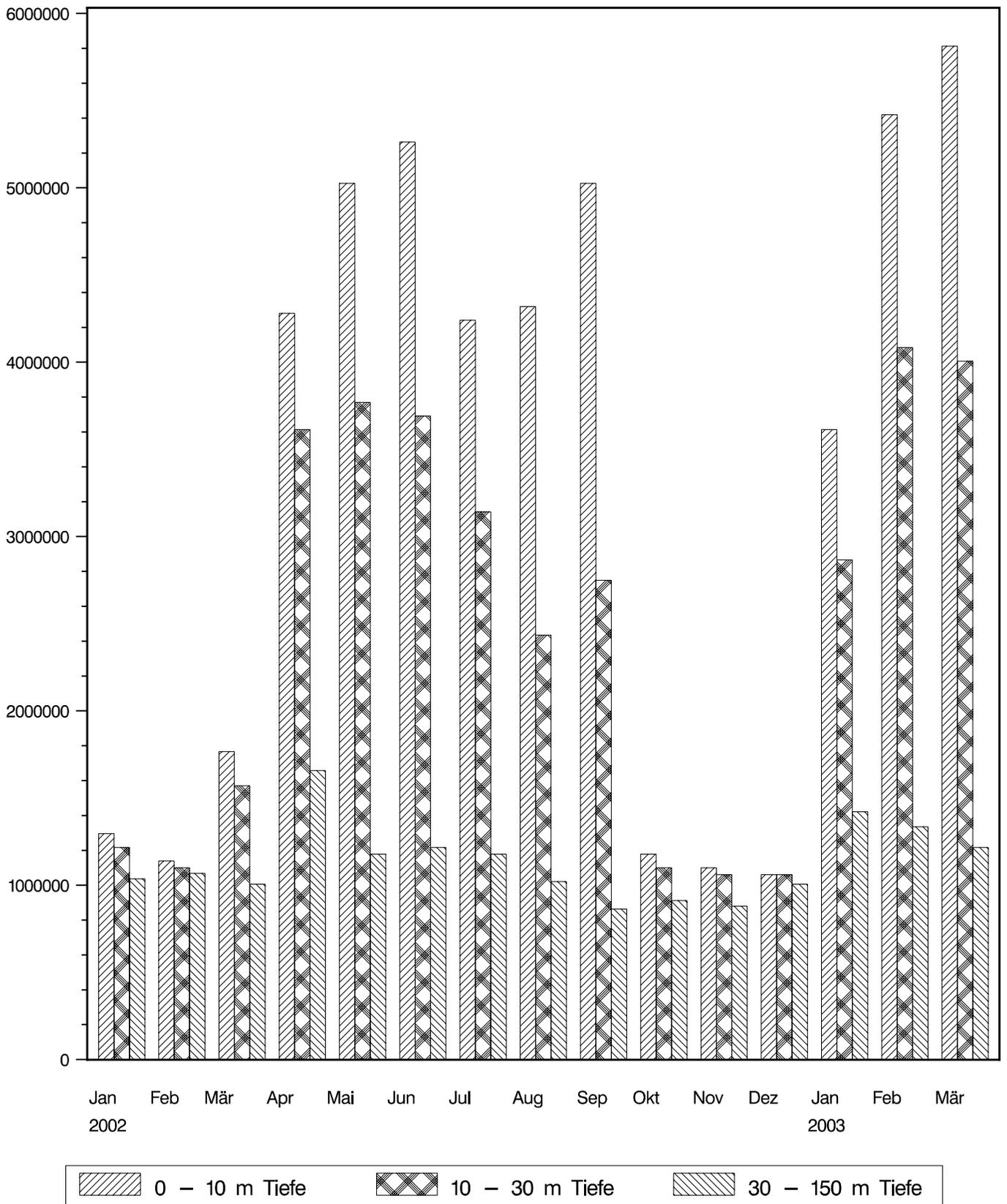
**Abb. 29:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:

Entwicklung der Copepoden, adulte Tiere und Copepodide,  
Tiere/m<sup>2</sup>, Monatsmittelwerte

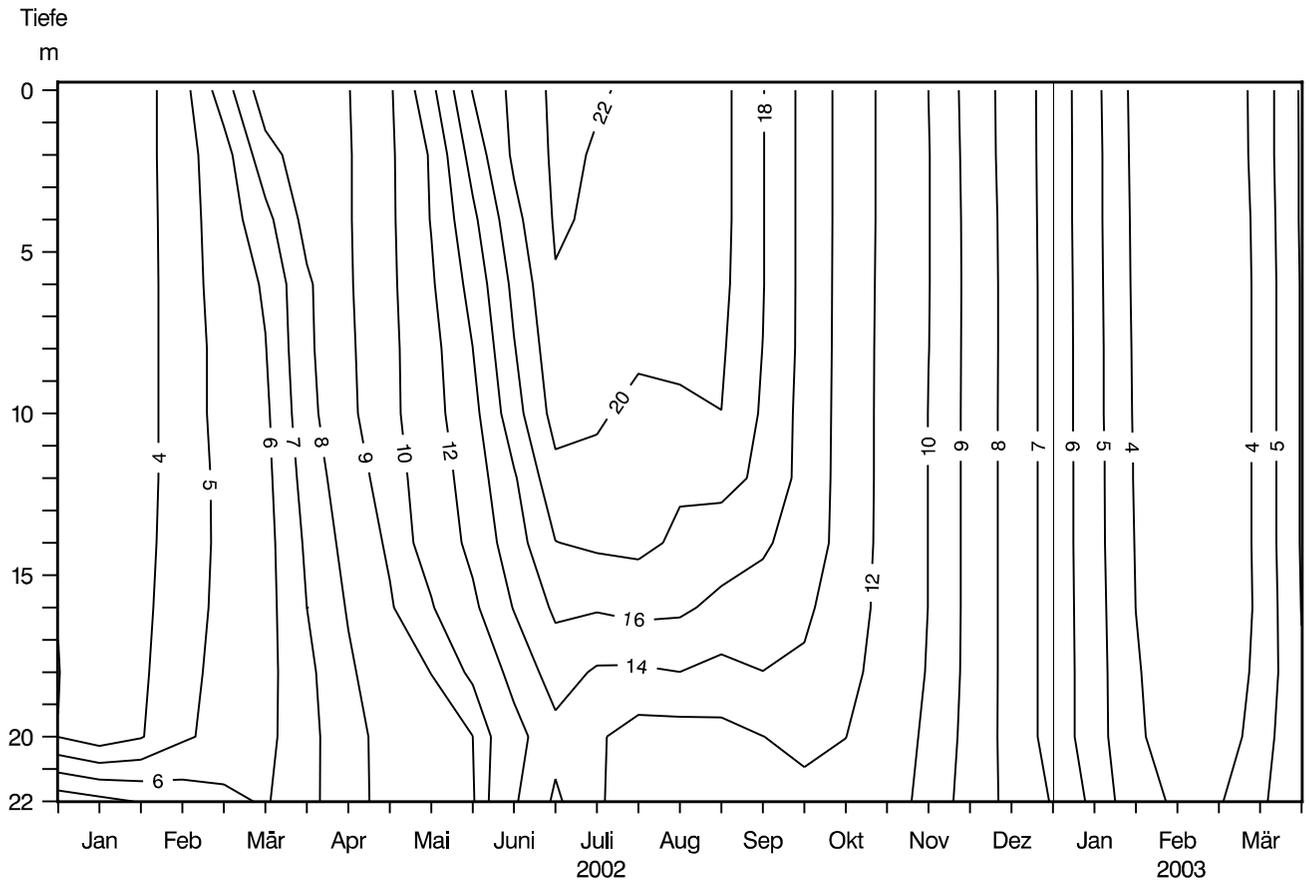


\* Cyclops sp. (Summe der Copepoden *C. abyssorum*, *C. vicinus*, *Mesocyclops*, *Acanthocyclops*)

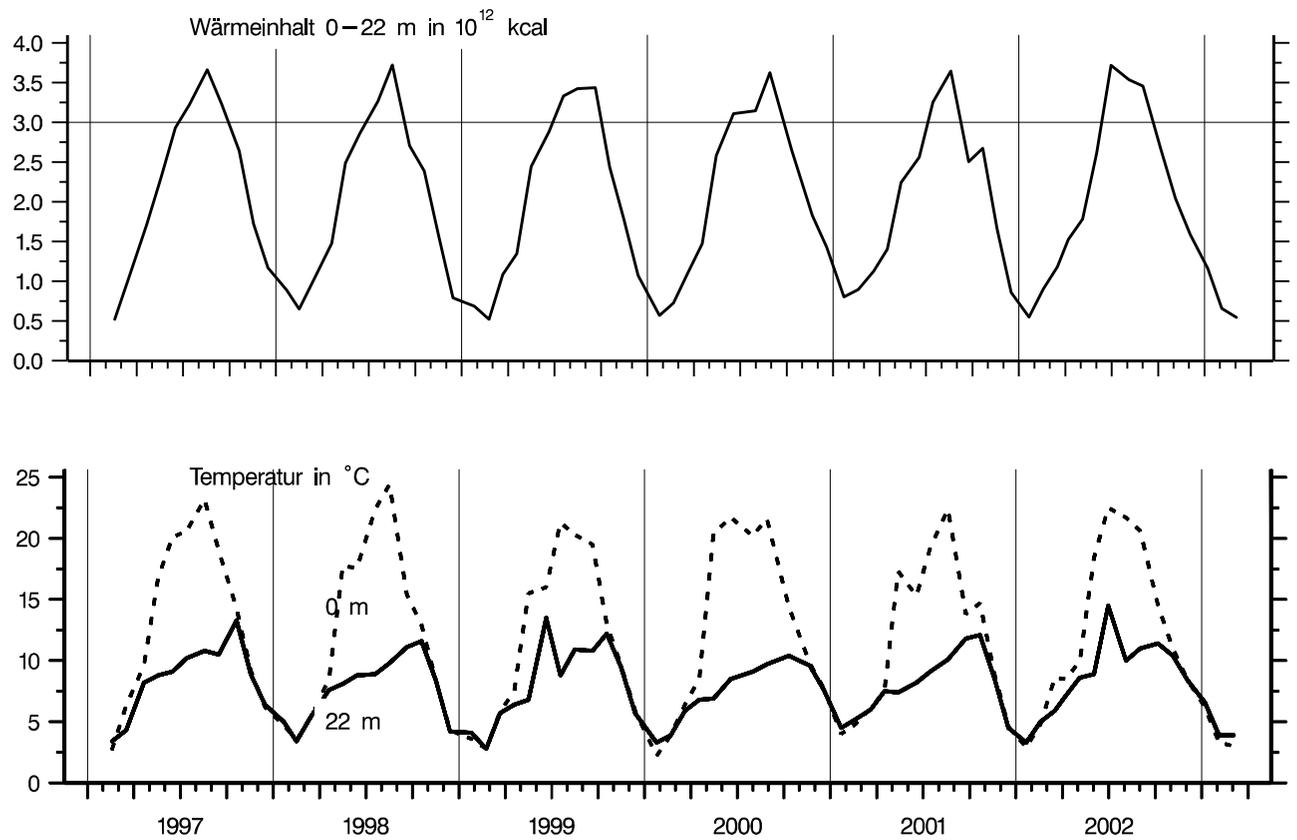
**Abb. 30:** Bodensee – Obersee, Fischbach–Uttwil:  
Entwicklung der herbivor lebenden Crustaceen,  
Tiere/m<sup>2</sup>, Monatsmittelwerte



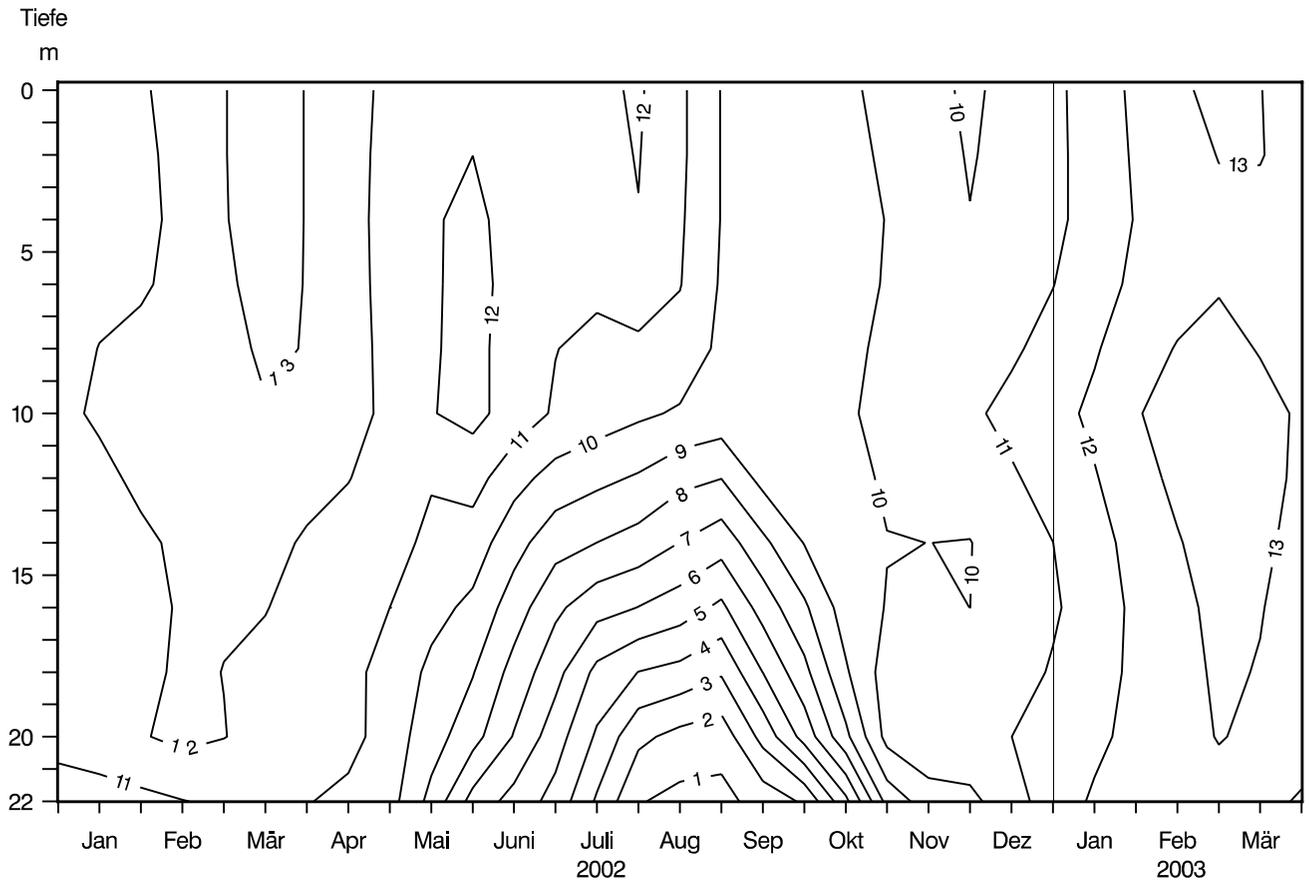
**Abb. 31:** Bodensee – Obersee, Fischbach – Uttwil:  
Entwicklung des Bakterienplanktons,  
Gesamtkeimzahlen (Bakterien/ml), Monatsmittelwerte



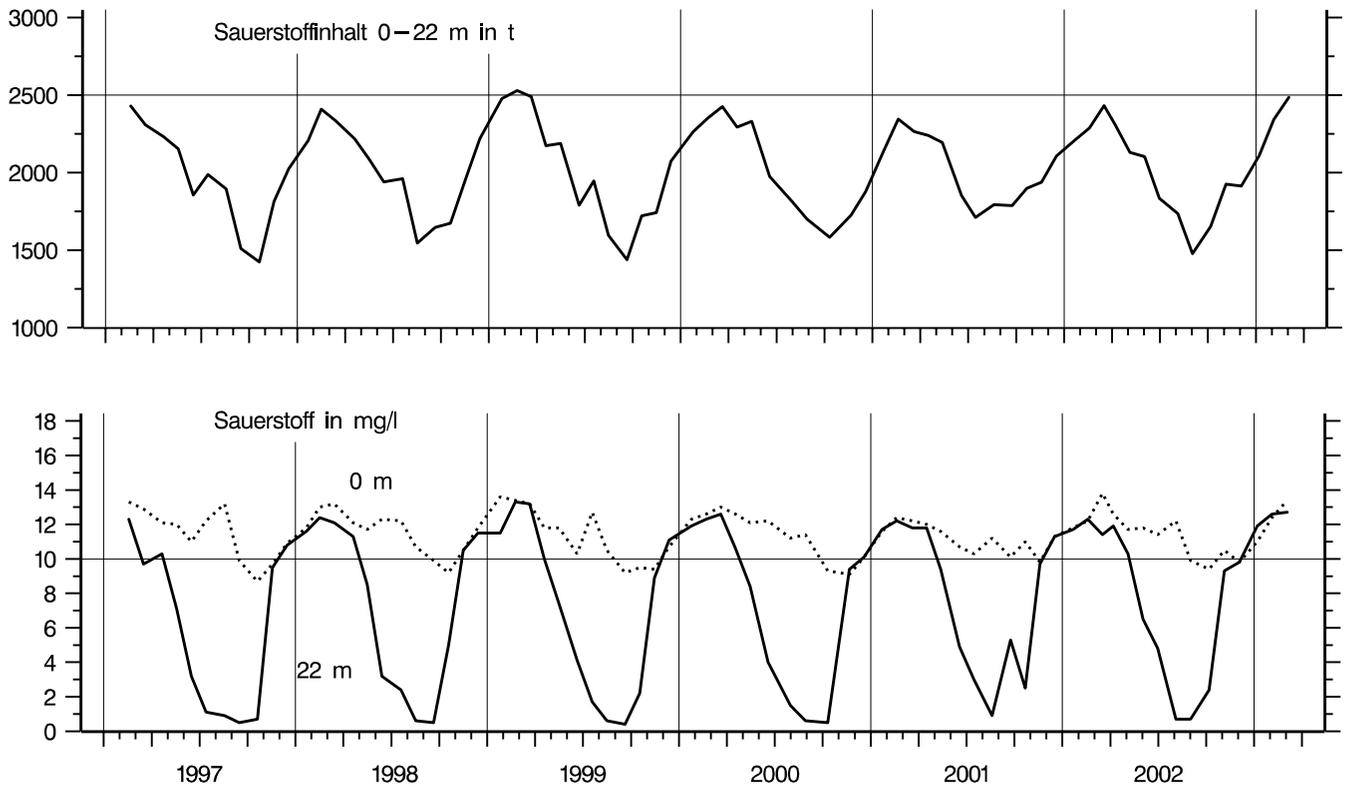
**Abb. 32:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Temperatur °C



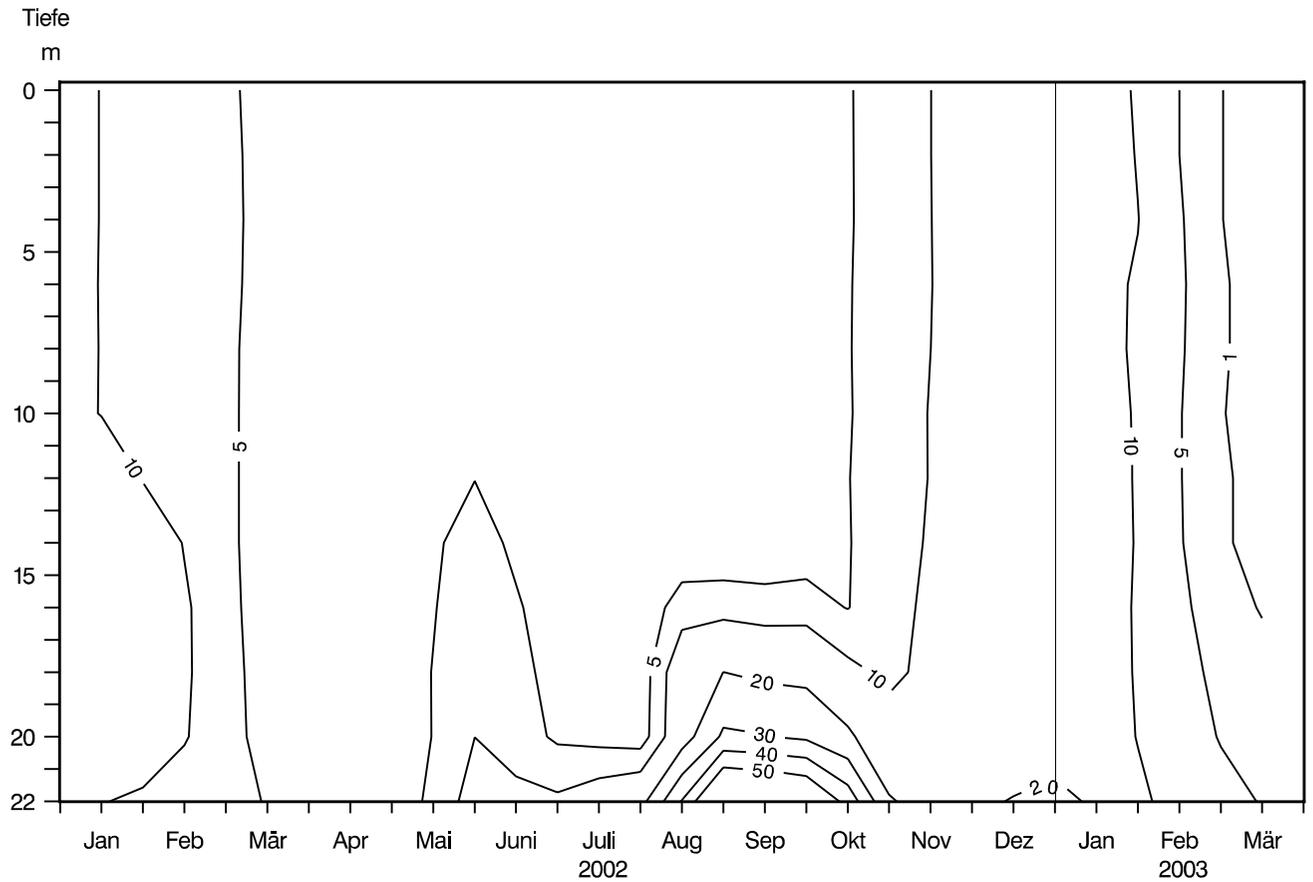
**Abb. 33:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Thermik



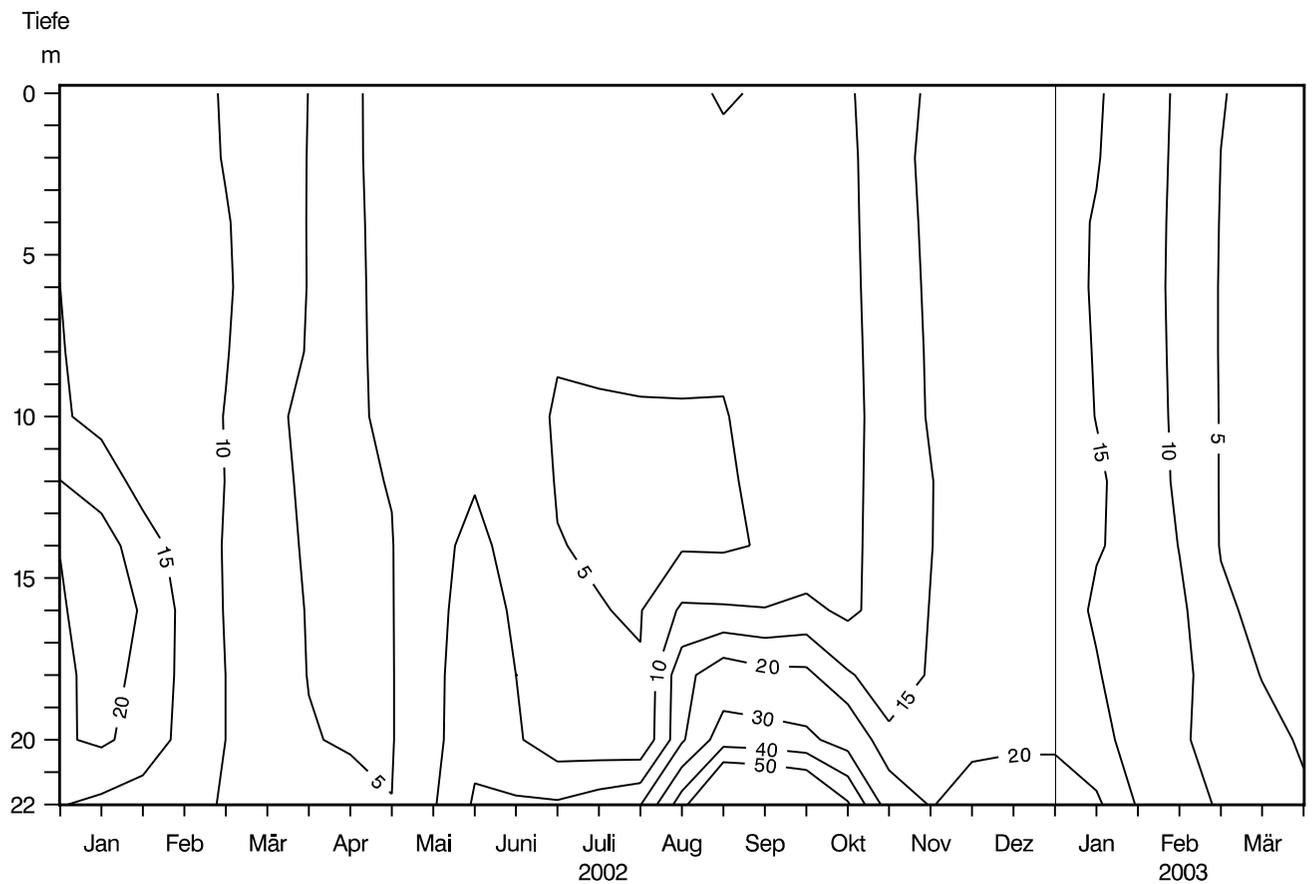
**Abb. 34:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Sauerstoff (mg/l)



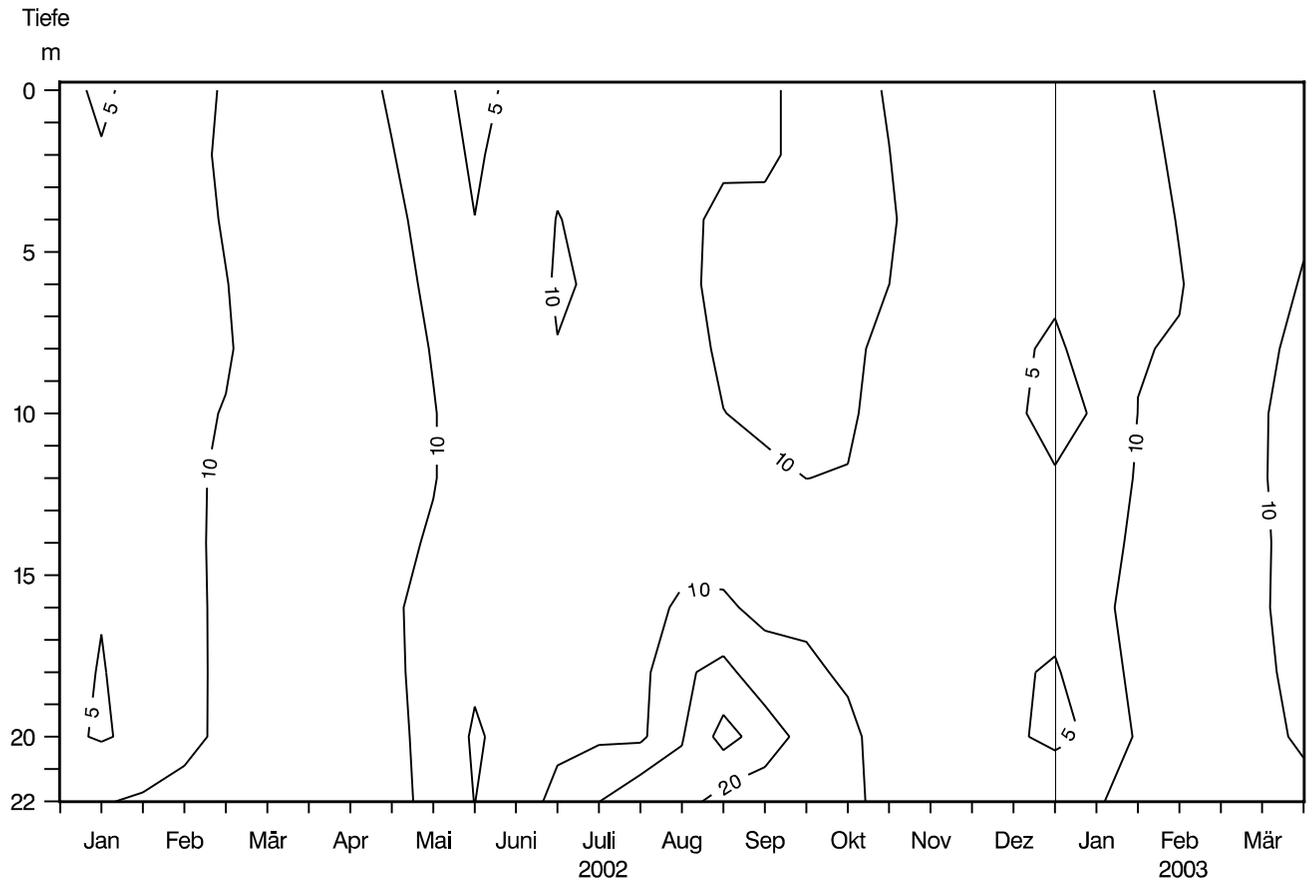
**Abb. 35:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Sauerstoffinhalt 0–22 m und Sauerstoffkonzentration in 0 und 22 m Tiefe



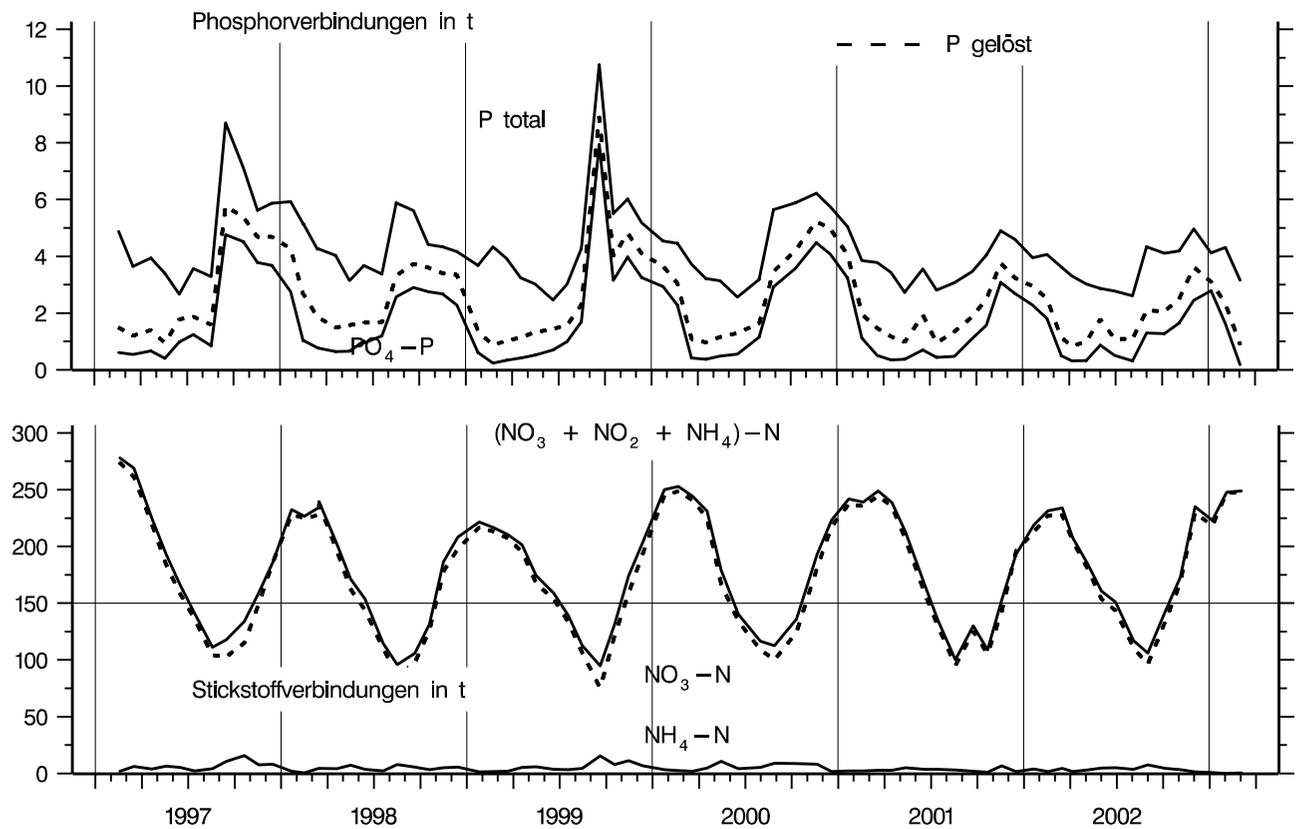
**Abb. 36:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Orthophosphat – Phosphor (mg/m<sup>3</sup>)



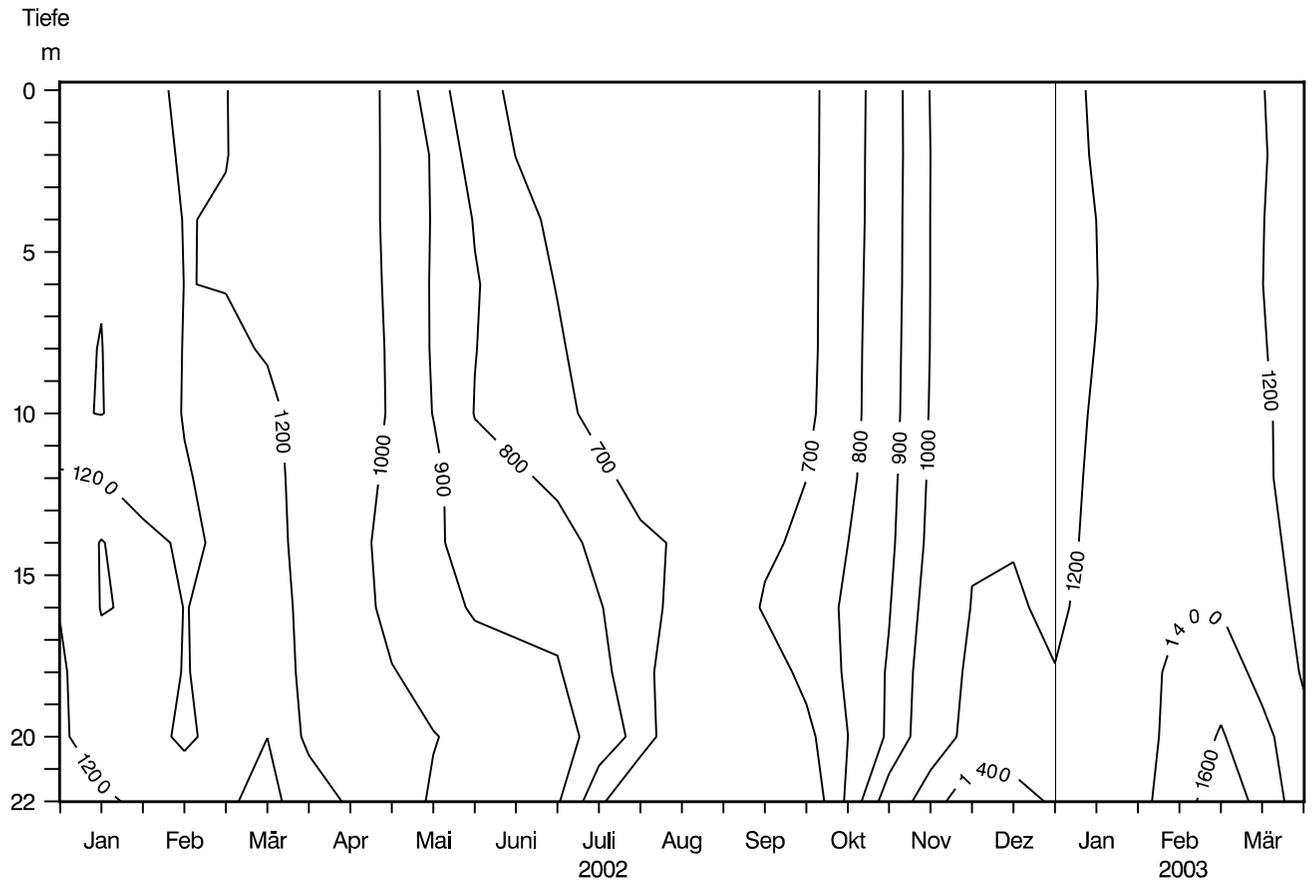
**Abb. 37:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Gesamt gelöster Phosphor (mg/m<sup>3</sup>)



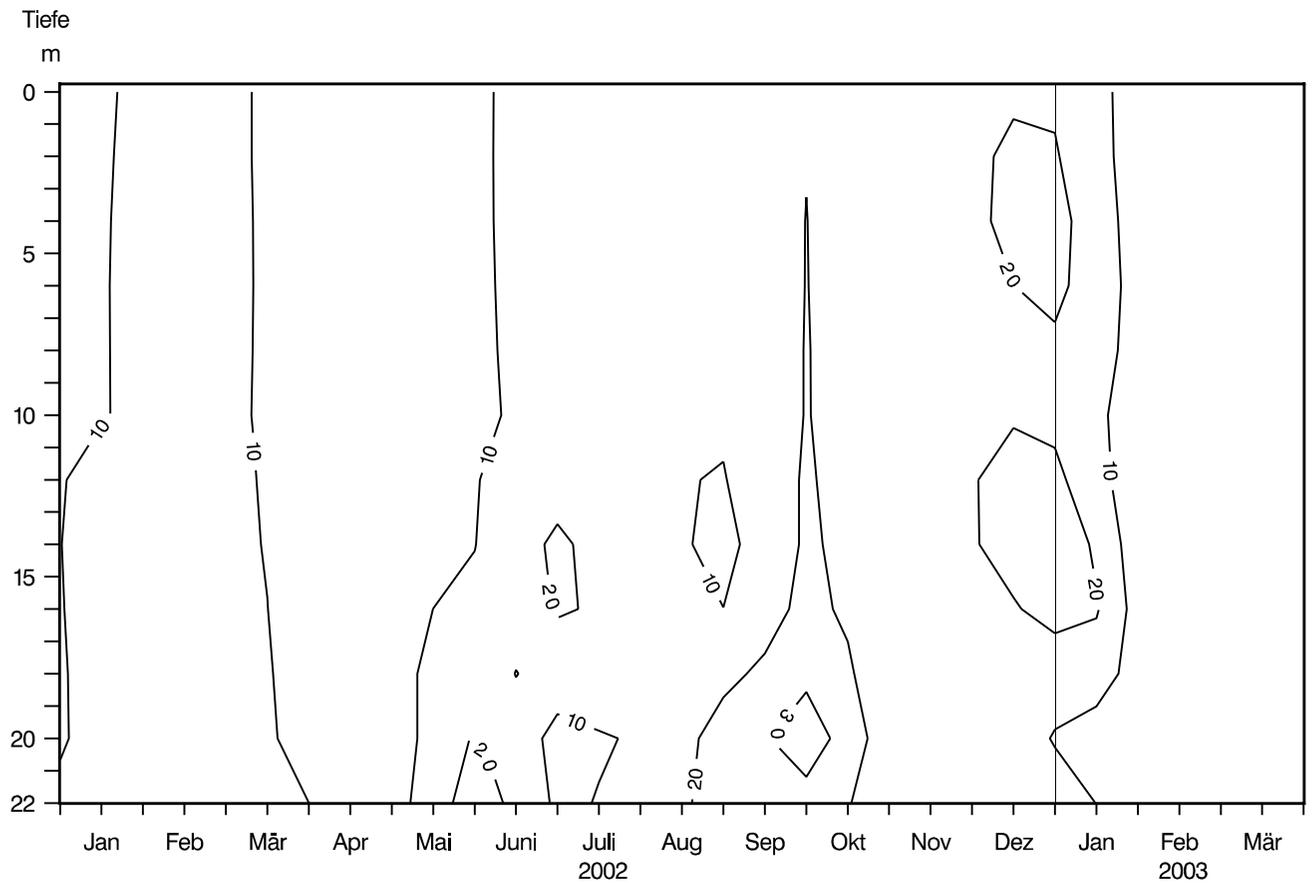
**Abb. 38:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
partikulärer Phosphor ( $\text{mg/m}^3$ )



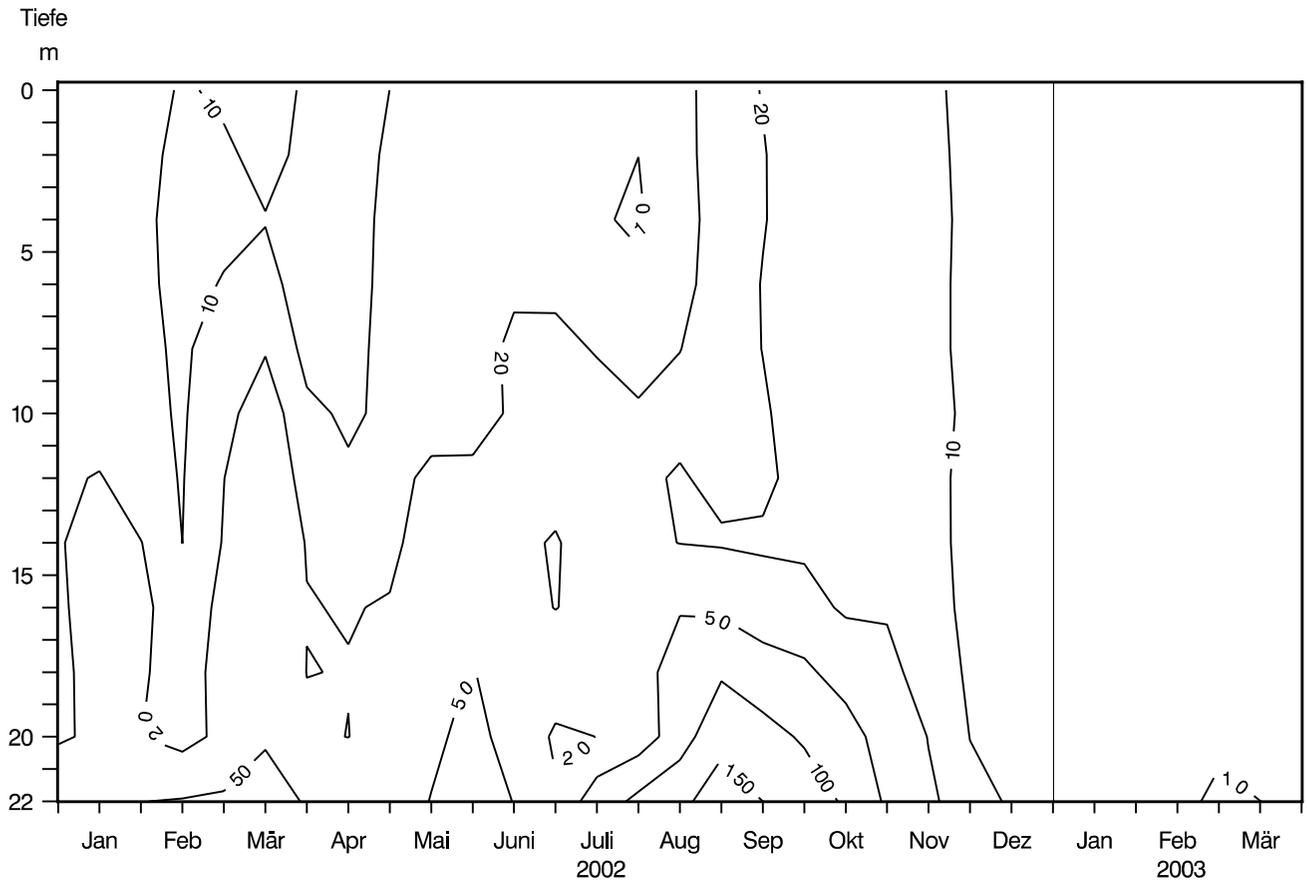
**Abb. 39:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Nährstoffinhalt 0–22 m Tiefe



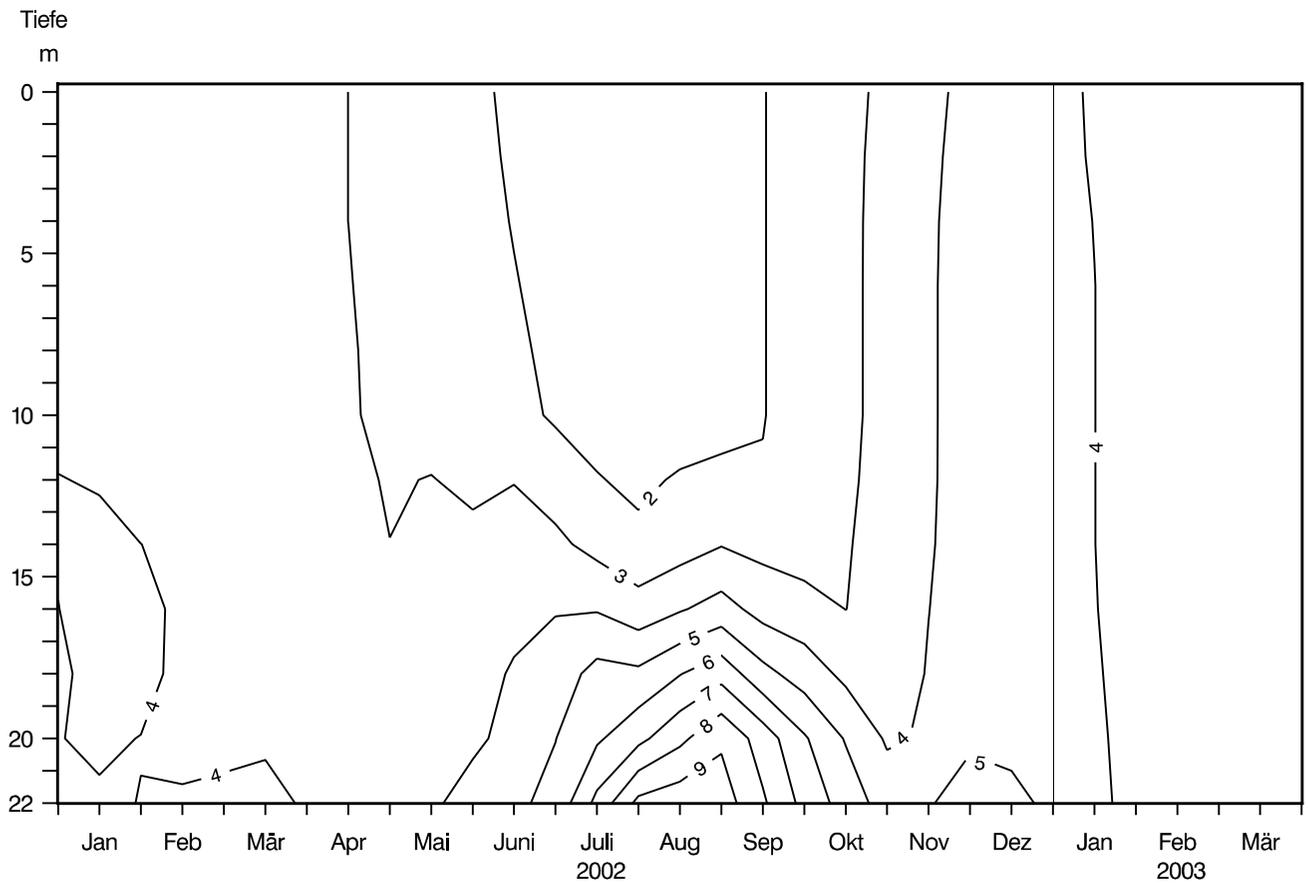
**Abb. 40:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Nitrat – Stickstoff ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )



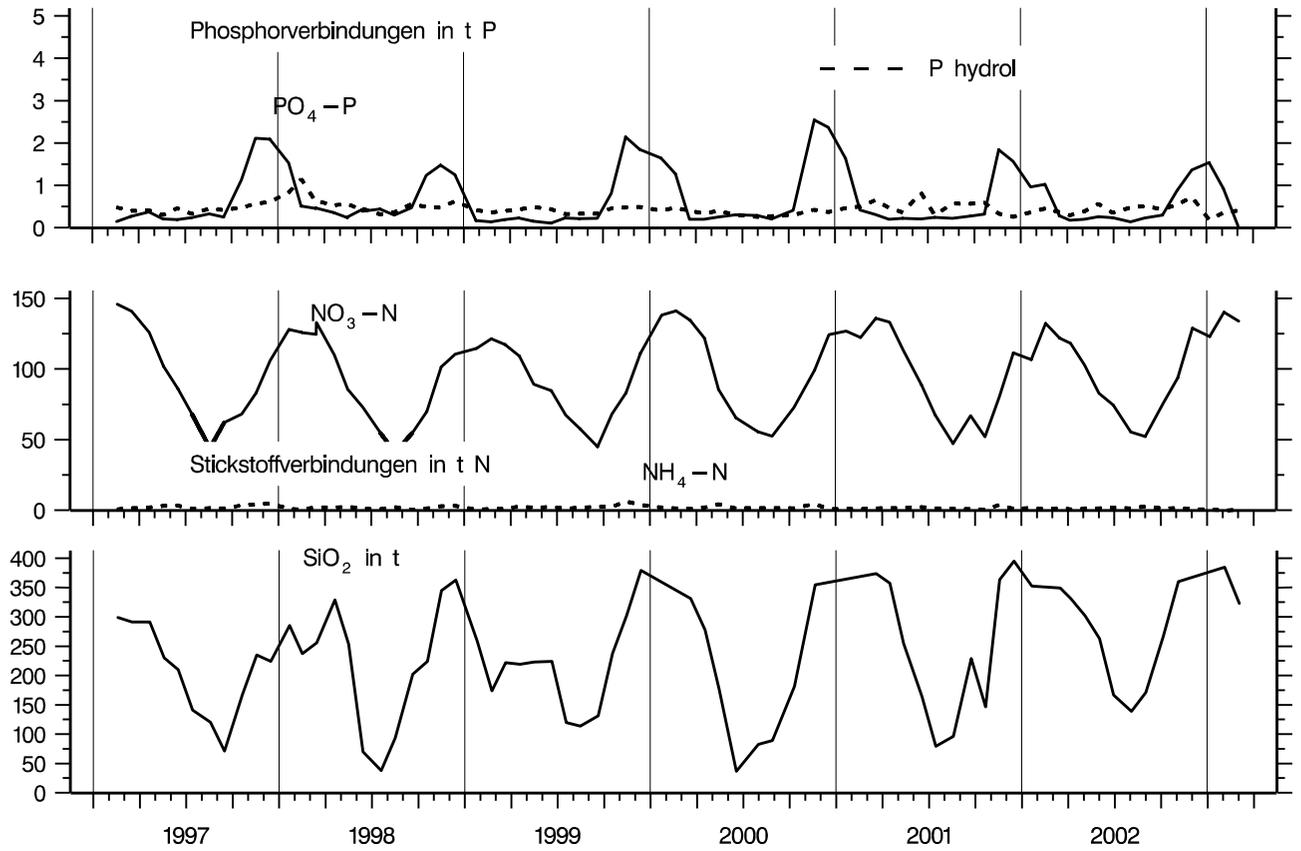
**Abb. 41:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Nitrit – Stickstoff ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )



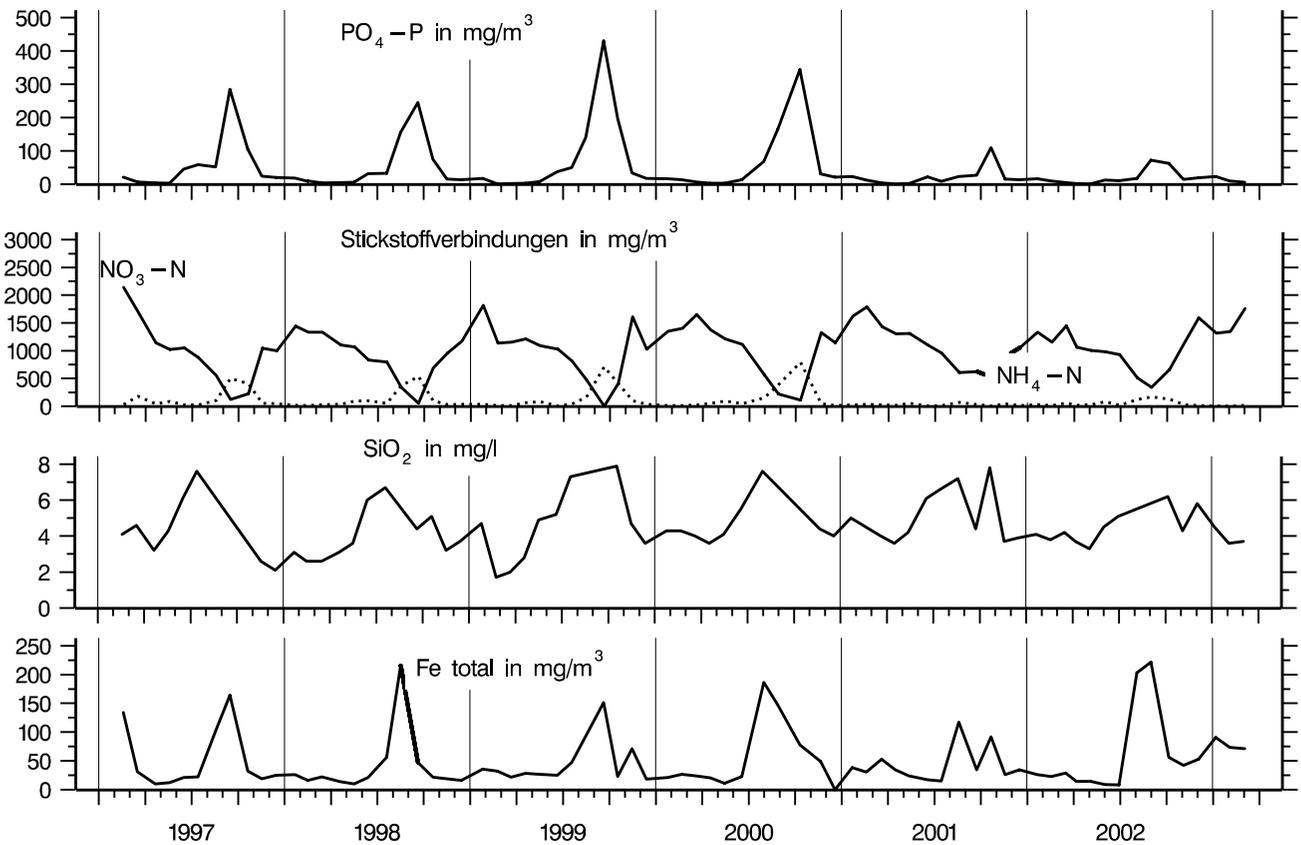
**Abb. 42:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Ammonium – Stickstoff ( $\text{mg/m}^3$ )



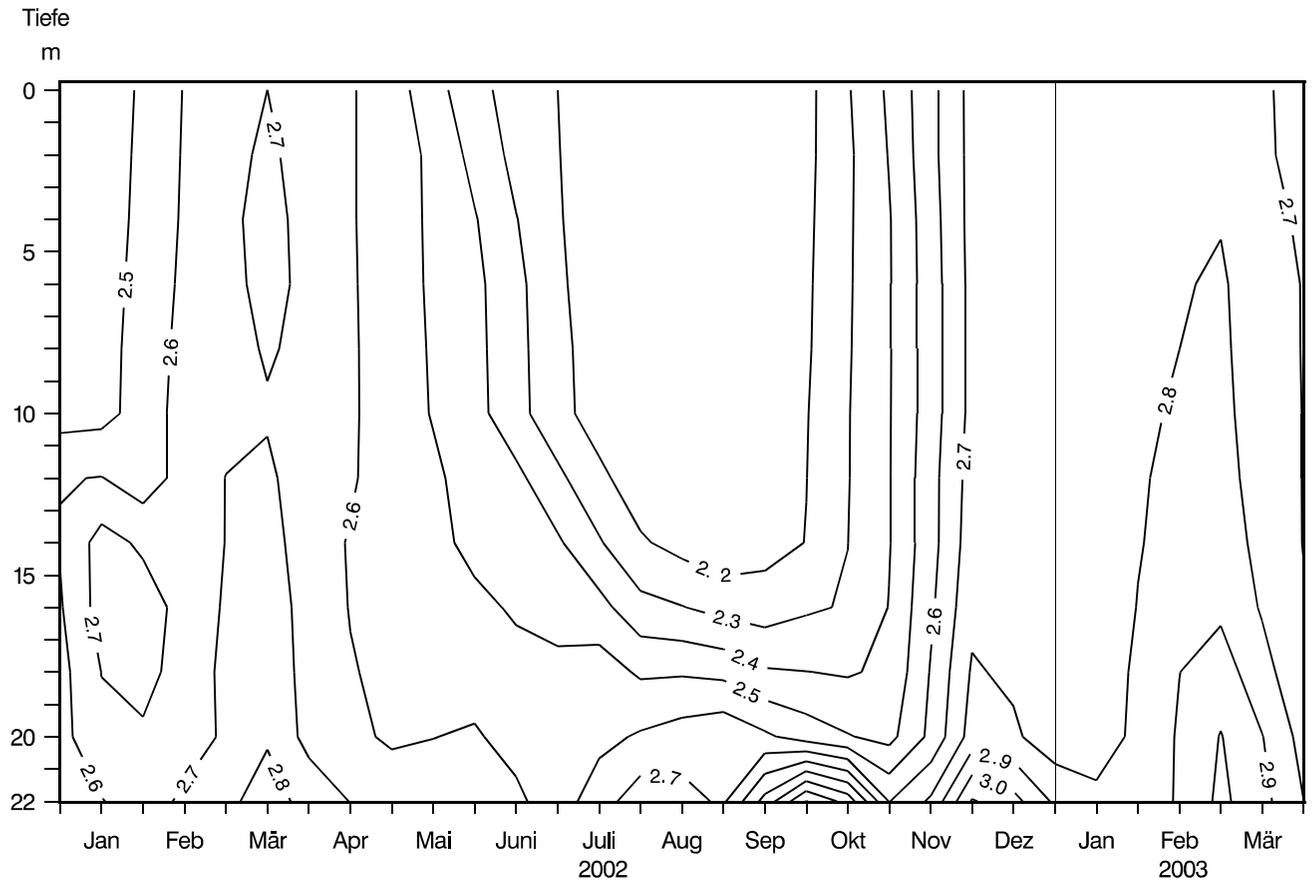
**Abb. 43:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Silikat ( $\text{mg/l}$ )



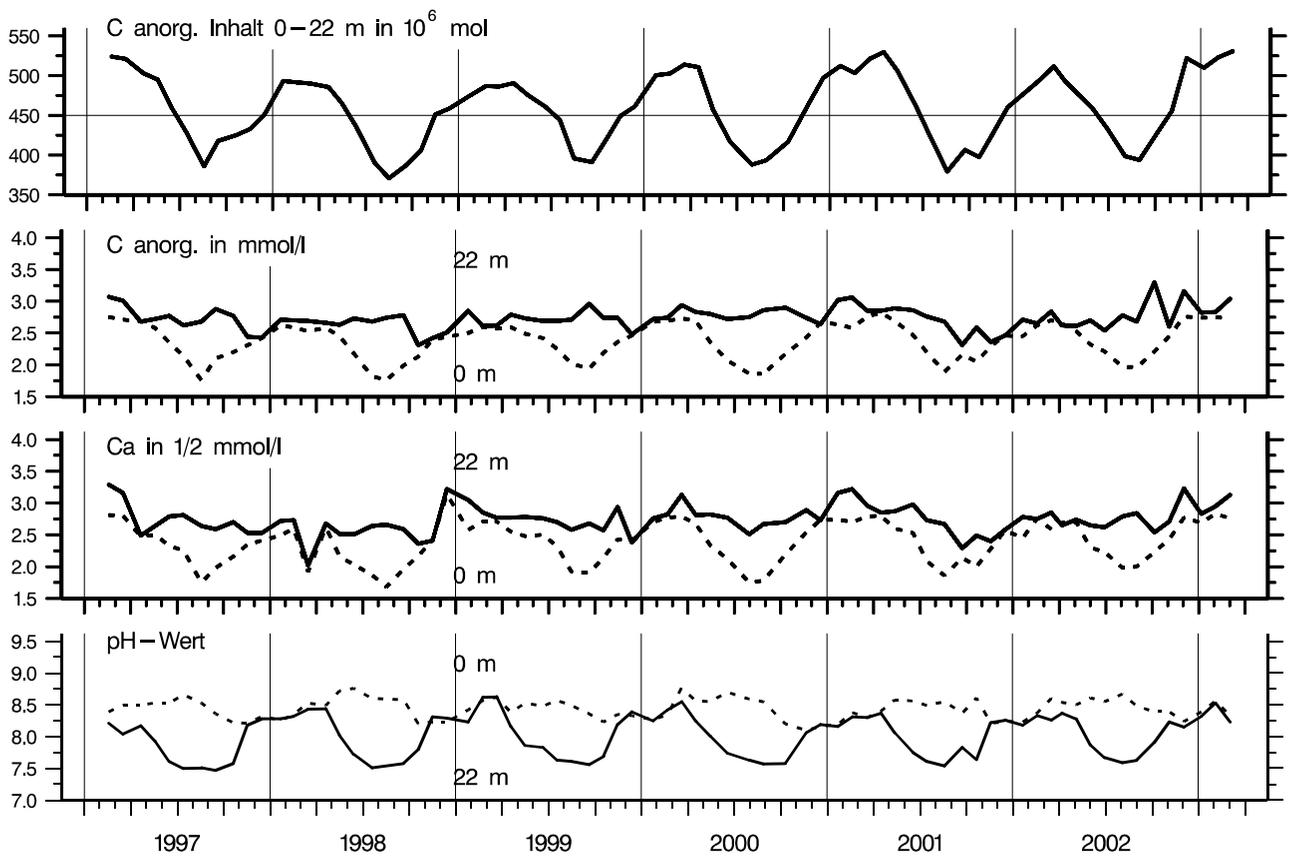
**Abb. 44:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Nährstoffinhalt im Epilimnion 0–10 m Tiefe



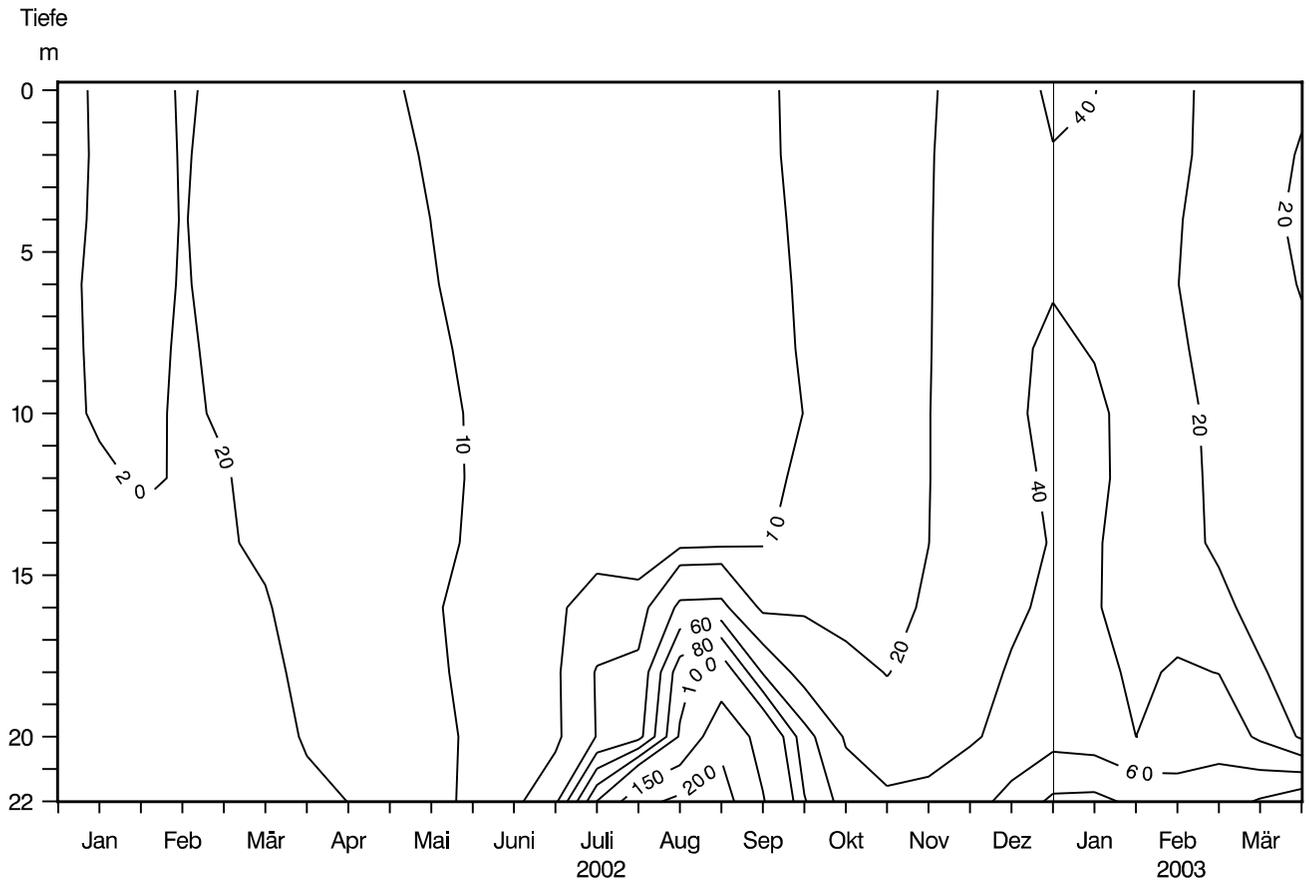
**Abb. 45:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Nährstoffkonzentration in 22 m Tiefe



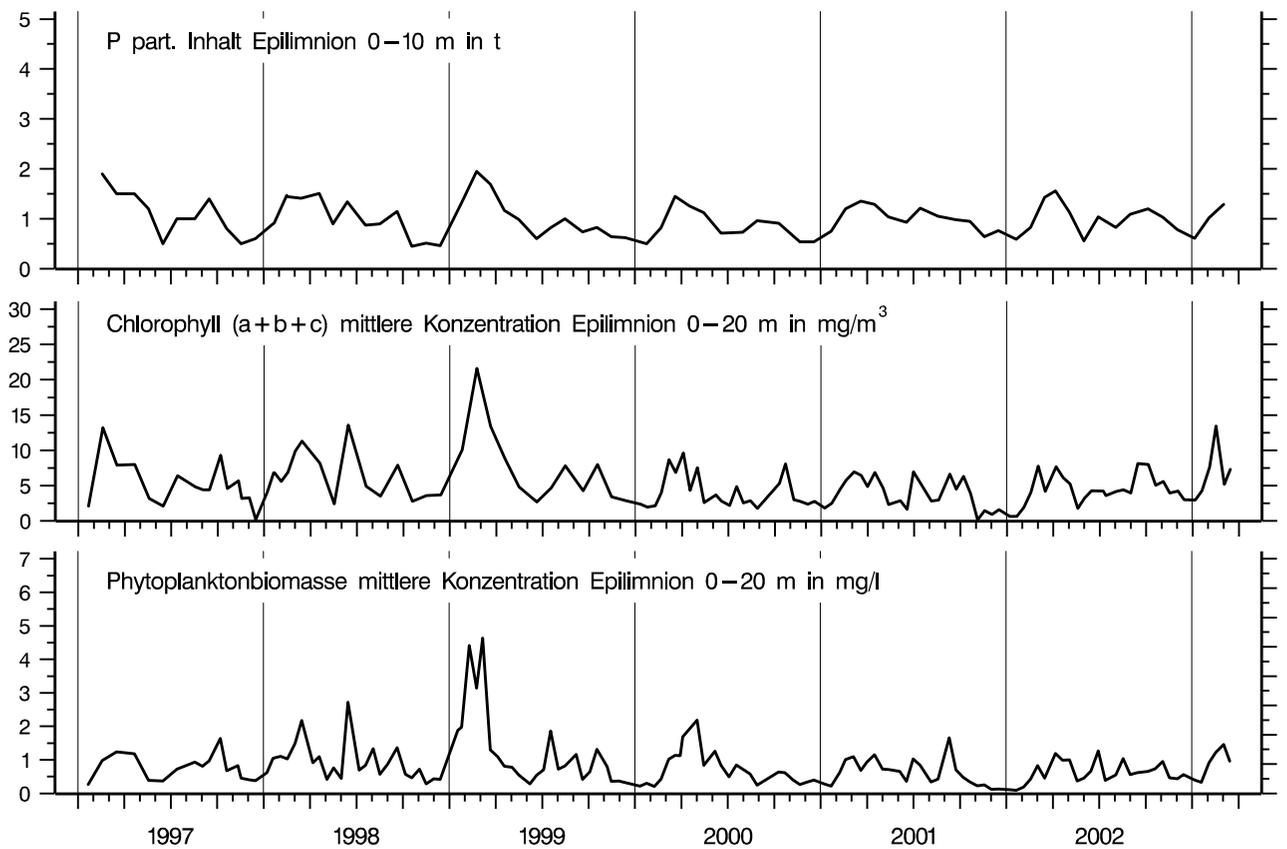
**Abb. 46:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Anorganischer Kohlenstoff (mmol/l)



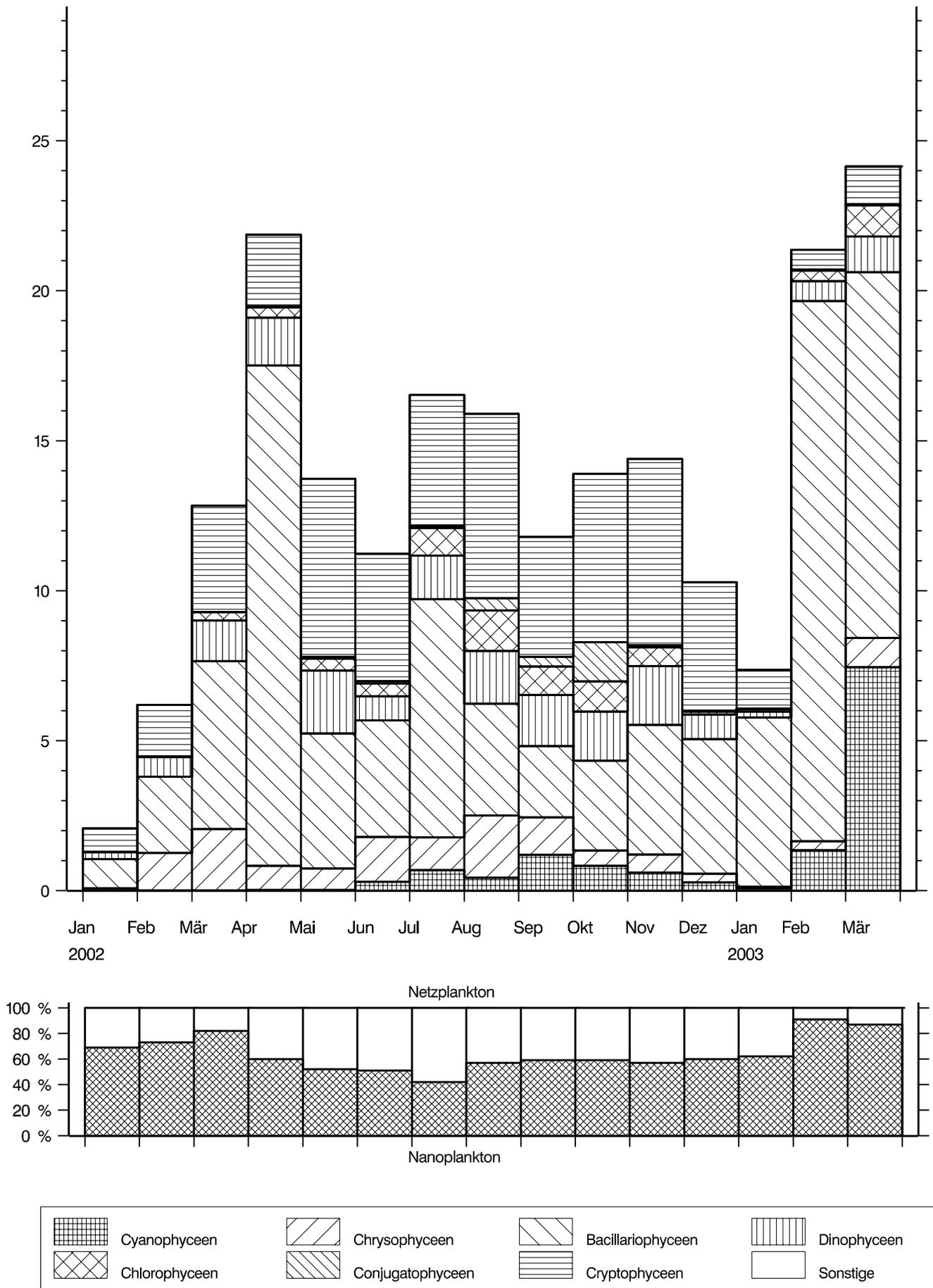
**Abb. 47:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Anorganischer Kohlenstoff, Inhalt 0–22 m Tiefe  
Konzentration von anorg. Kohlenstoff, Calcium; pH-Wert



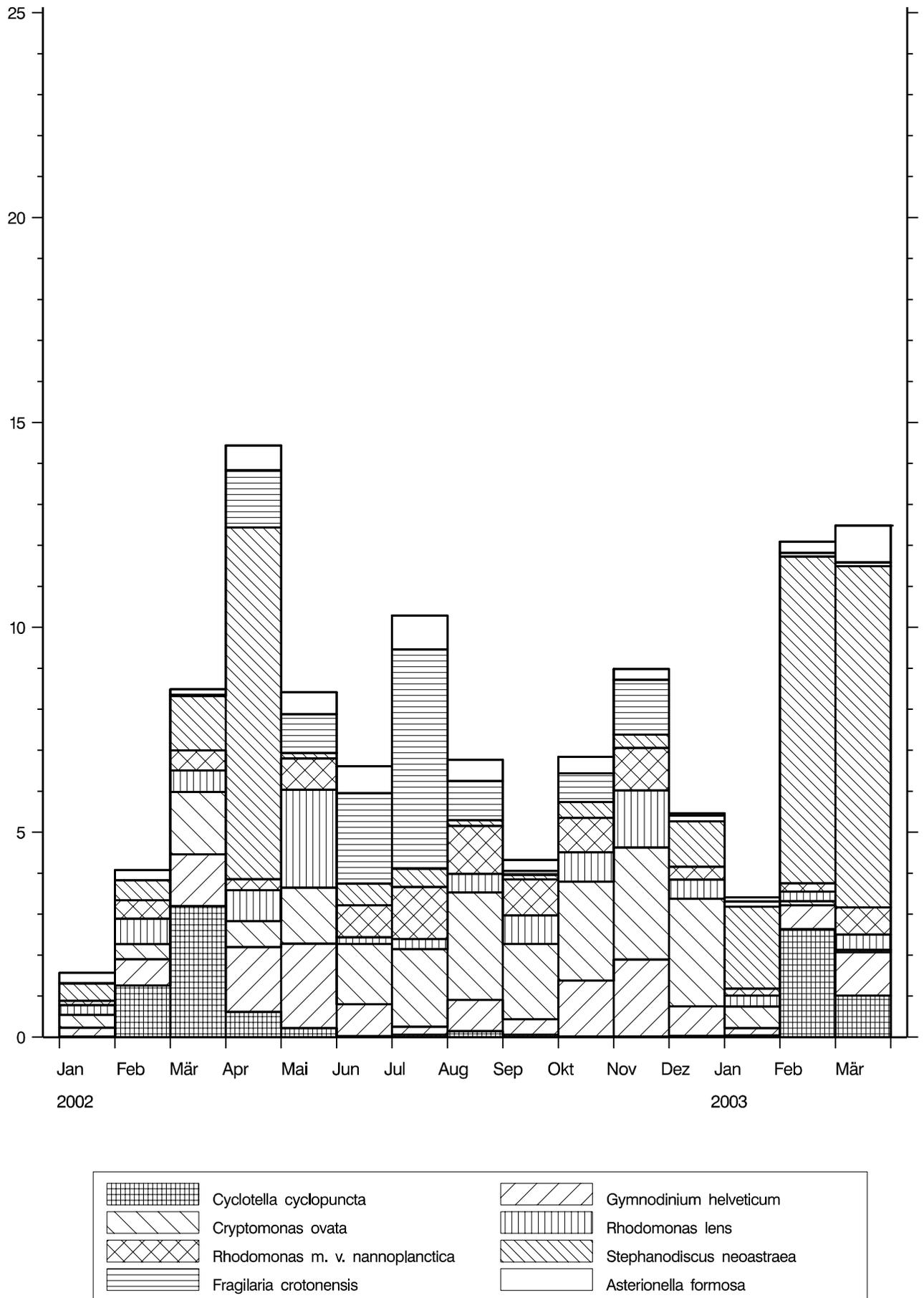
**Abb. 48:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Konzentration von Eisen total (mg/m<sup>3</sup>)



**Abb. 49:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
Chemische Biomasseindikatoren und Phytoplanktonbiomasse



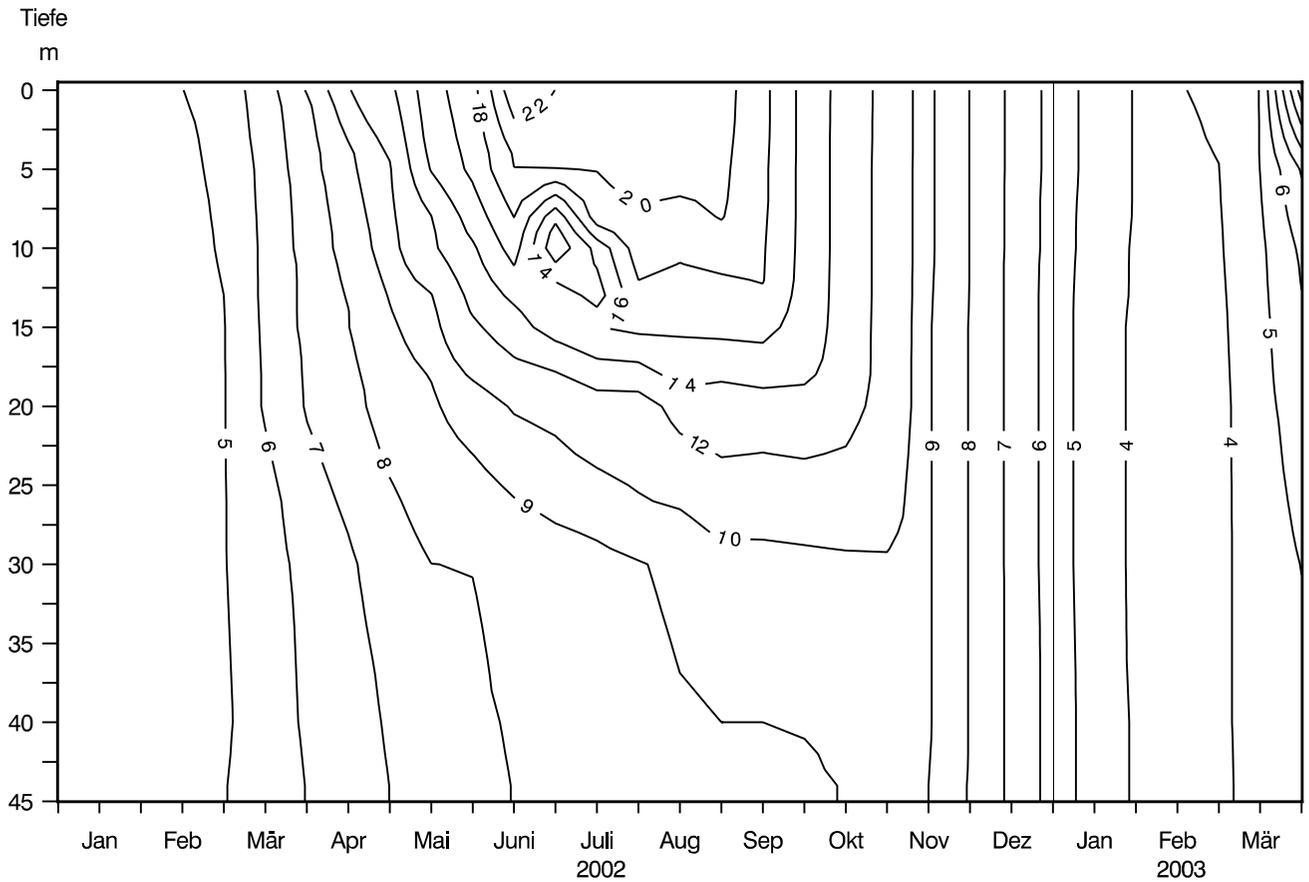
**Abb. 50:** Bodensee – Untersee, Zellersee:  
 Entwicklung des Phytoplanktons  
 Biomasse in g/m<sup>2</sup> (0–20 m Tiefe), Monatsmittelwerte



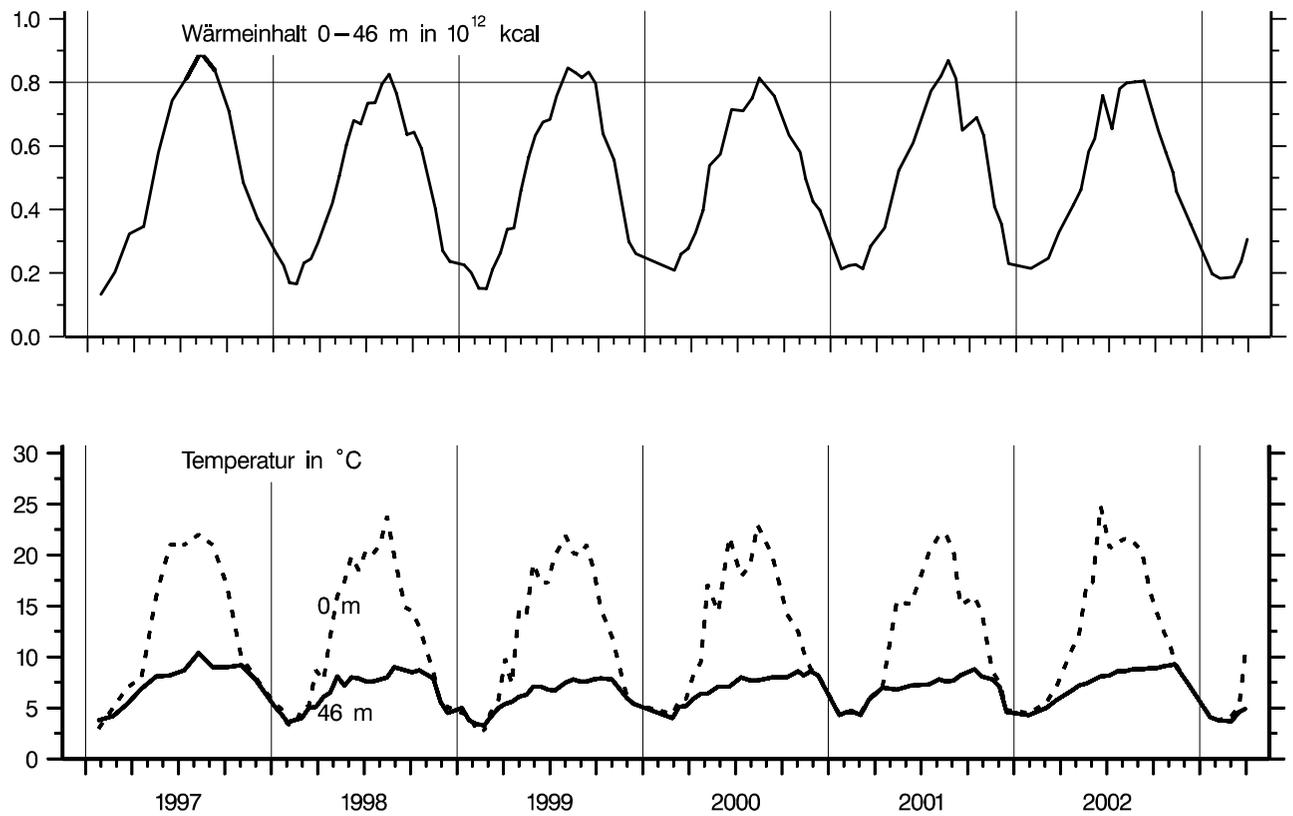
**Abb. 51:** Bodensee – Untersee, Zellersee:

Entwicklung des Phytoplanktons

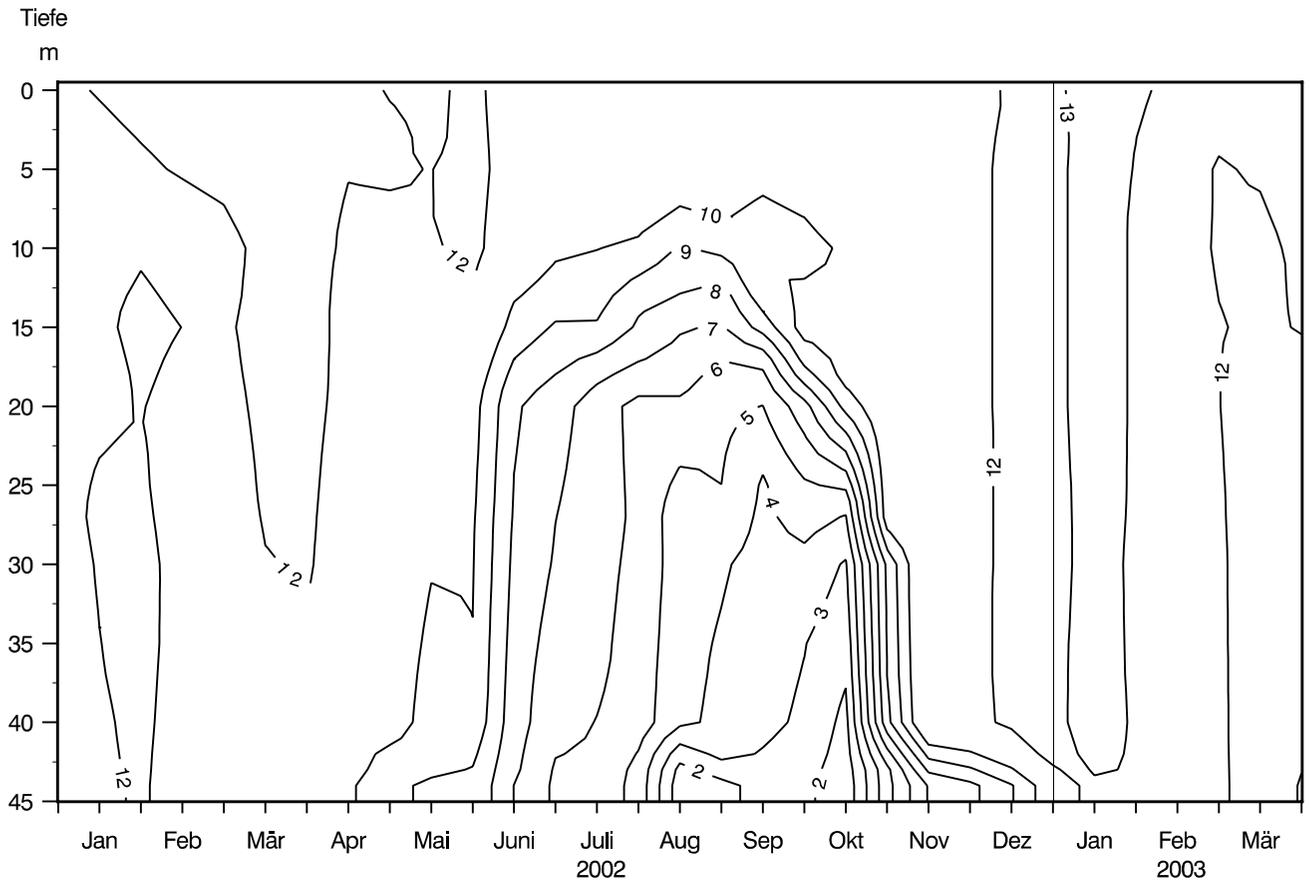
Biomasse der Hauptarten in  $\text{g/m}^2$  (0–20 m Tiefe), Monatsmittelwerte



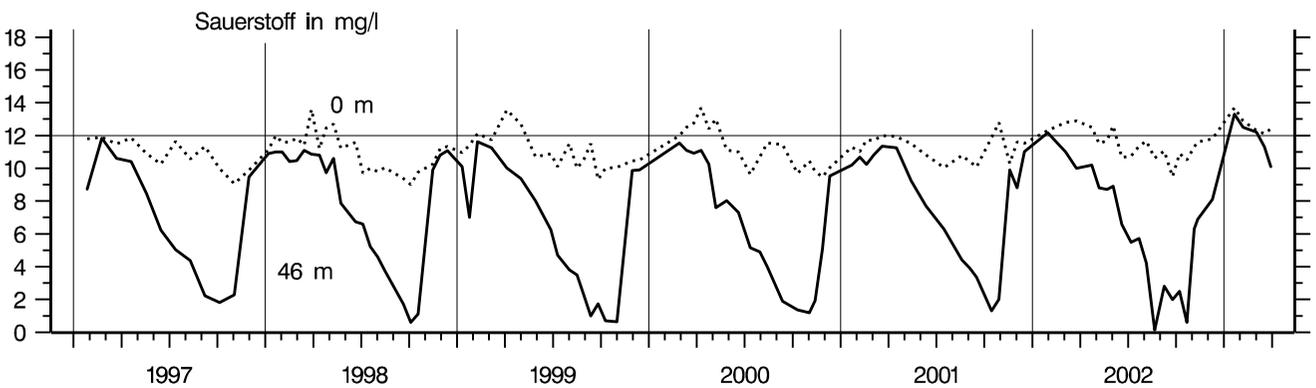
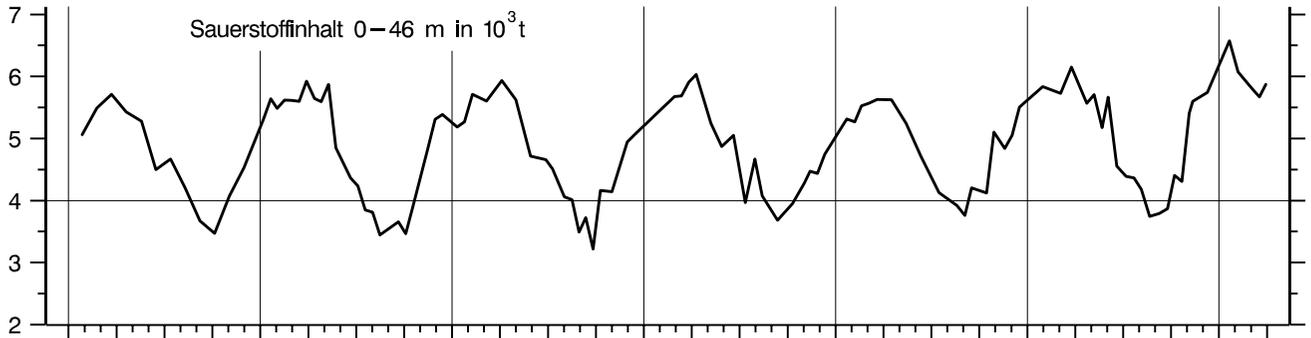
**Abb. 52:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Temperatur °C



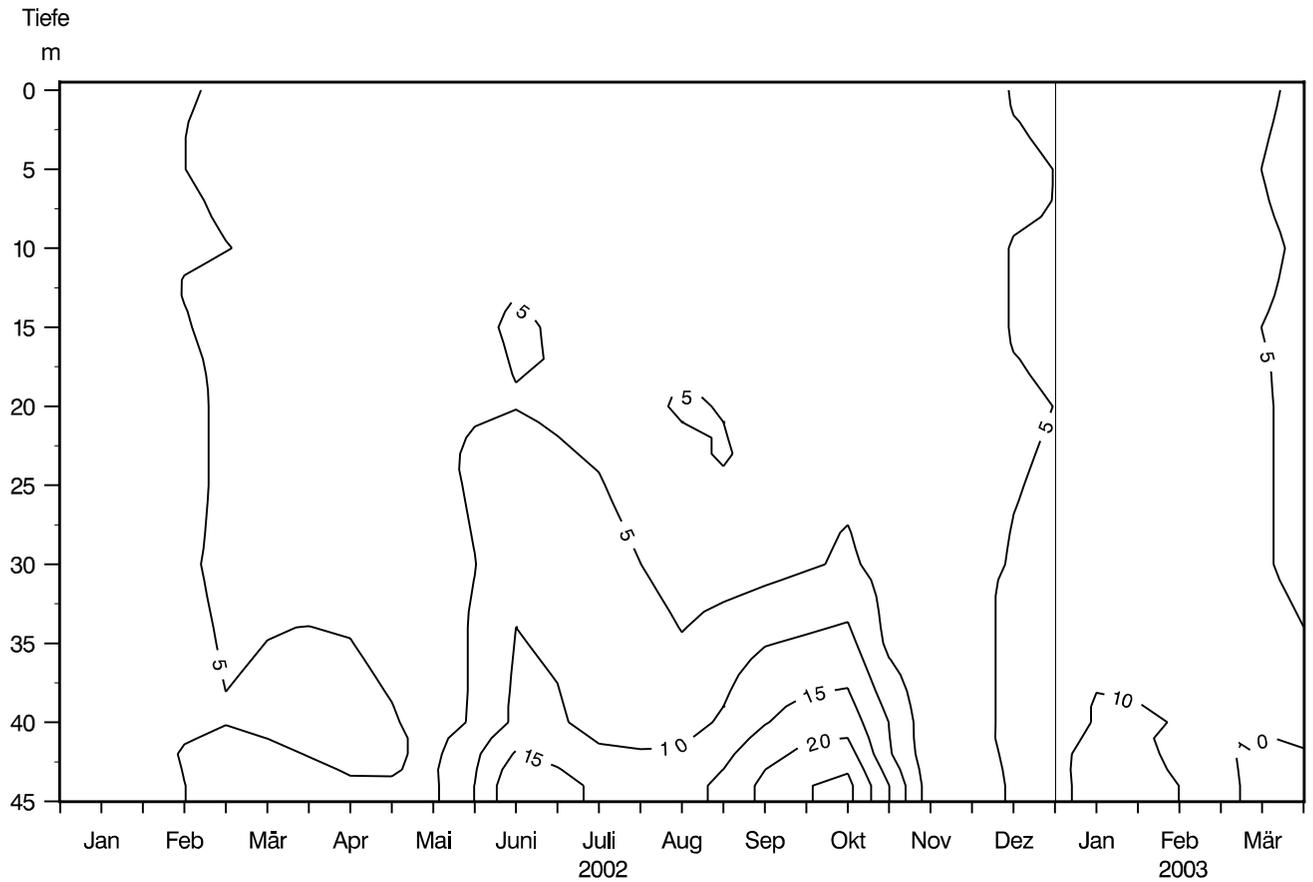
**Abb. 53:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Thermik



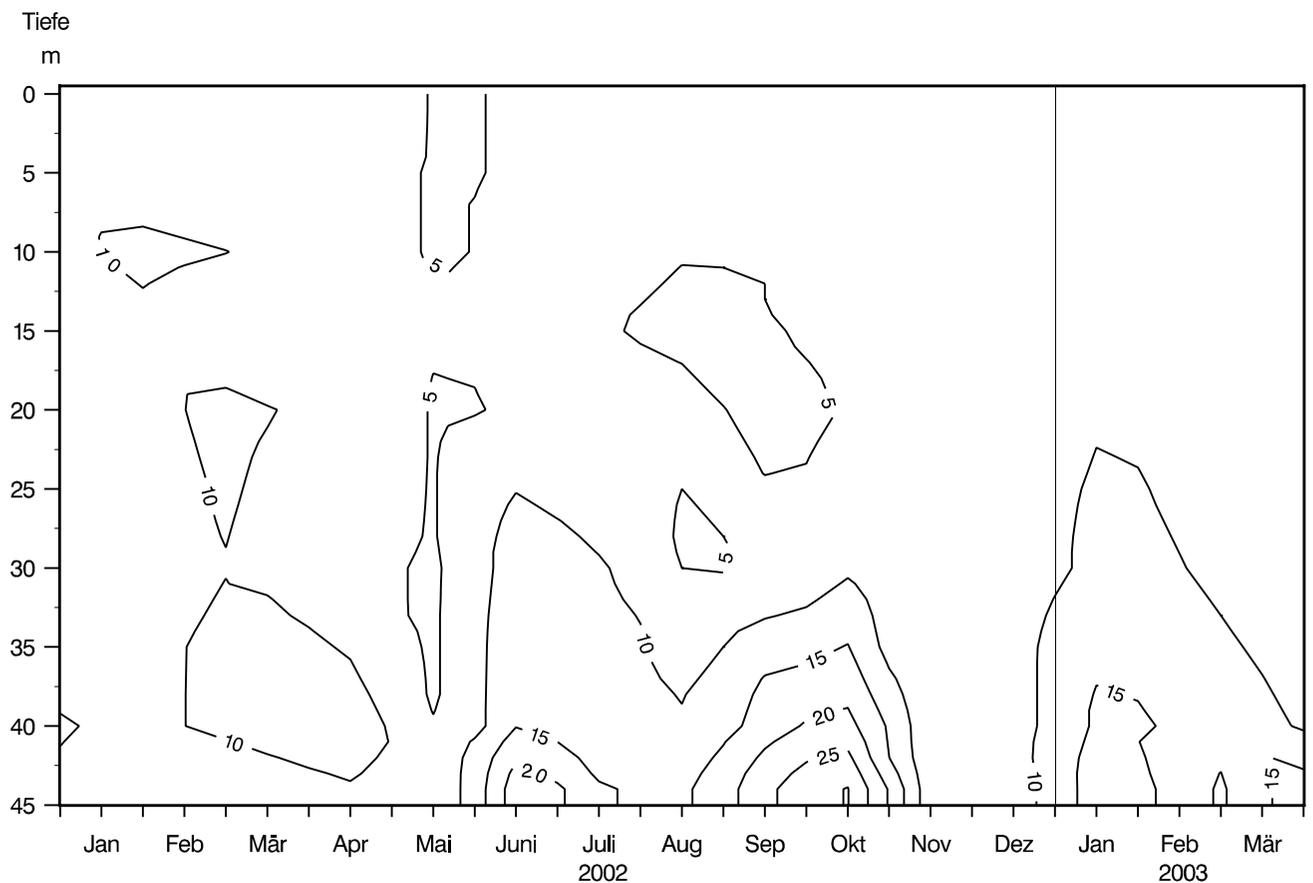
**Abb. 54:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Sauerstoff (mg/l)



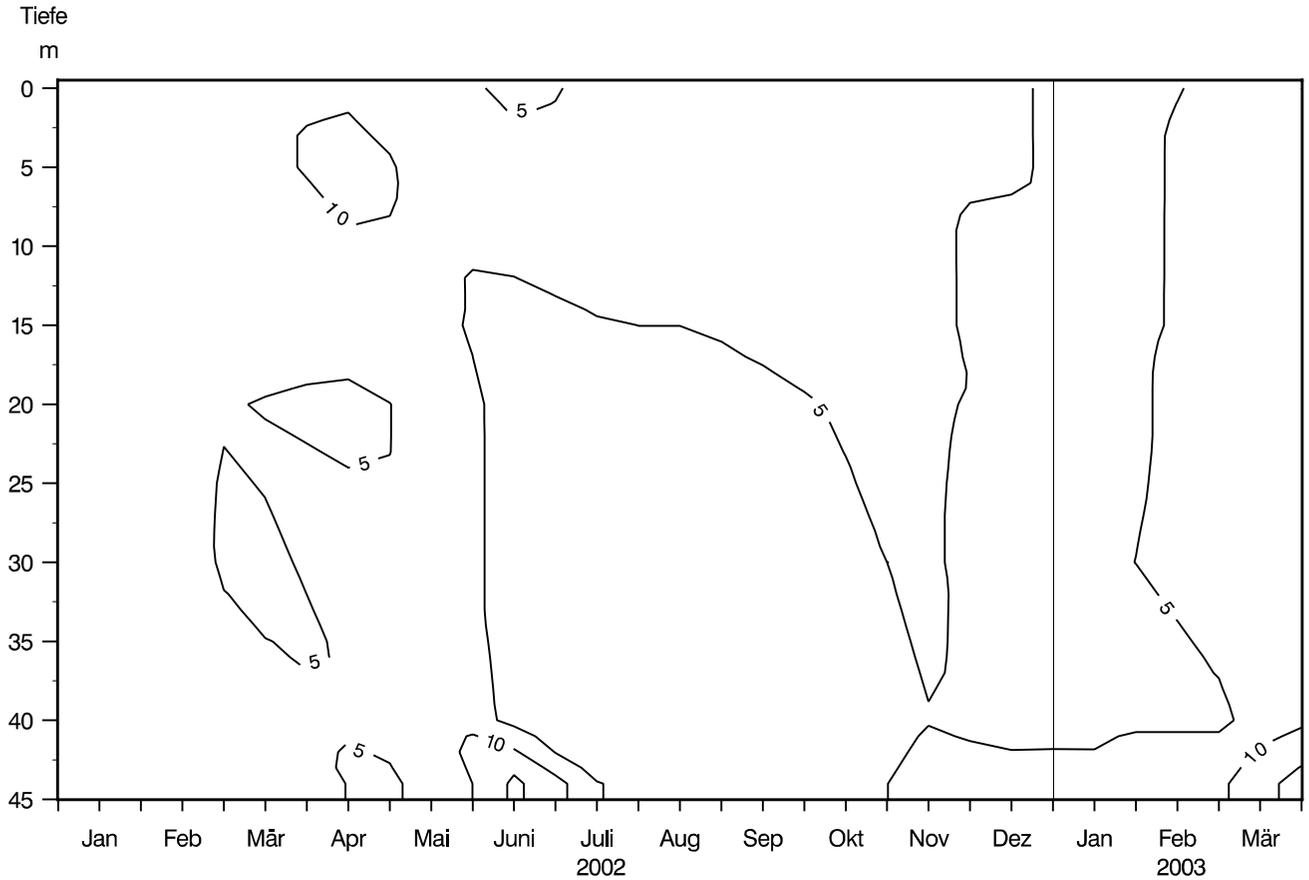
**Abb. 55:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Sauerstoffinhalt 0–46 m und Sauerstoffkonzentration in 0 und 46 m Tiefe



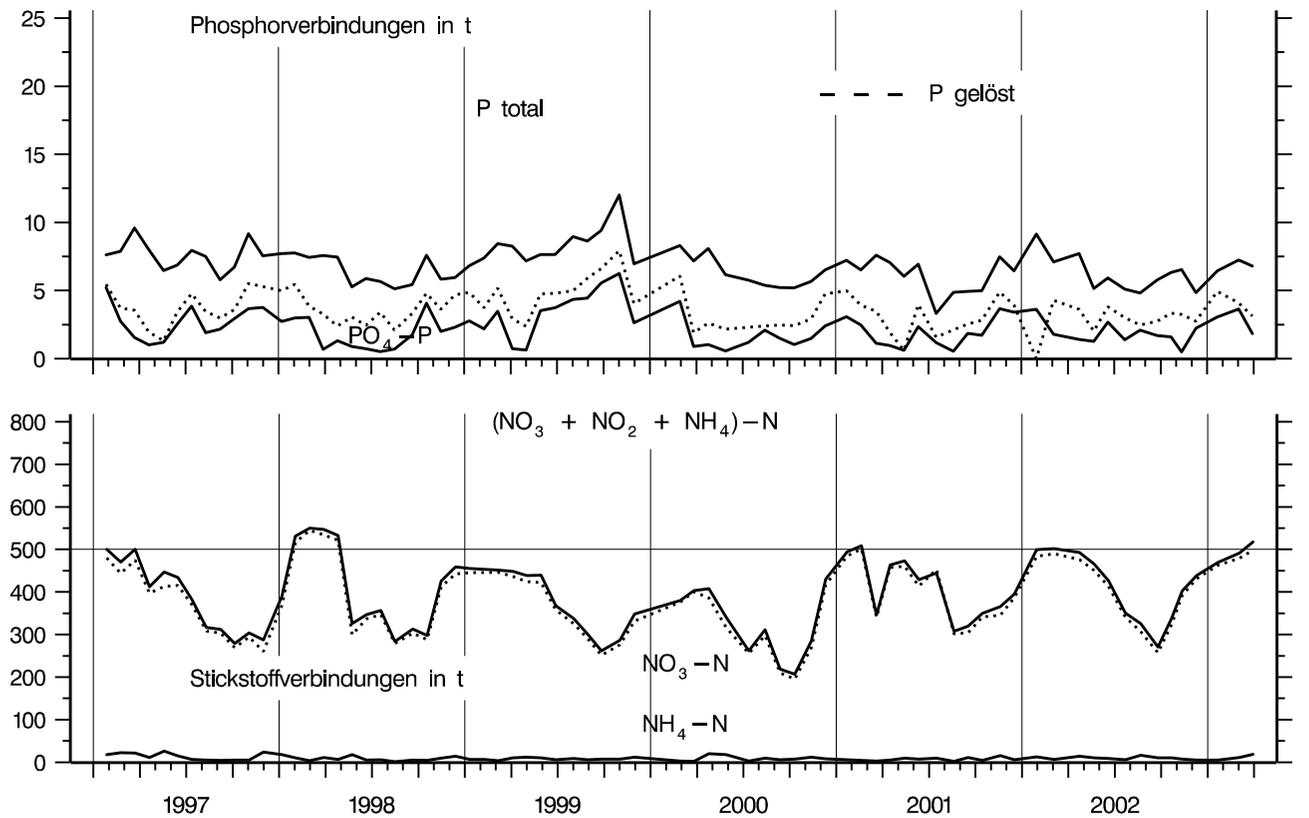
**Abb. 56:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Orthophosphat – Phosphor (mg/m<sup>3</sup>)



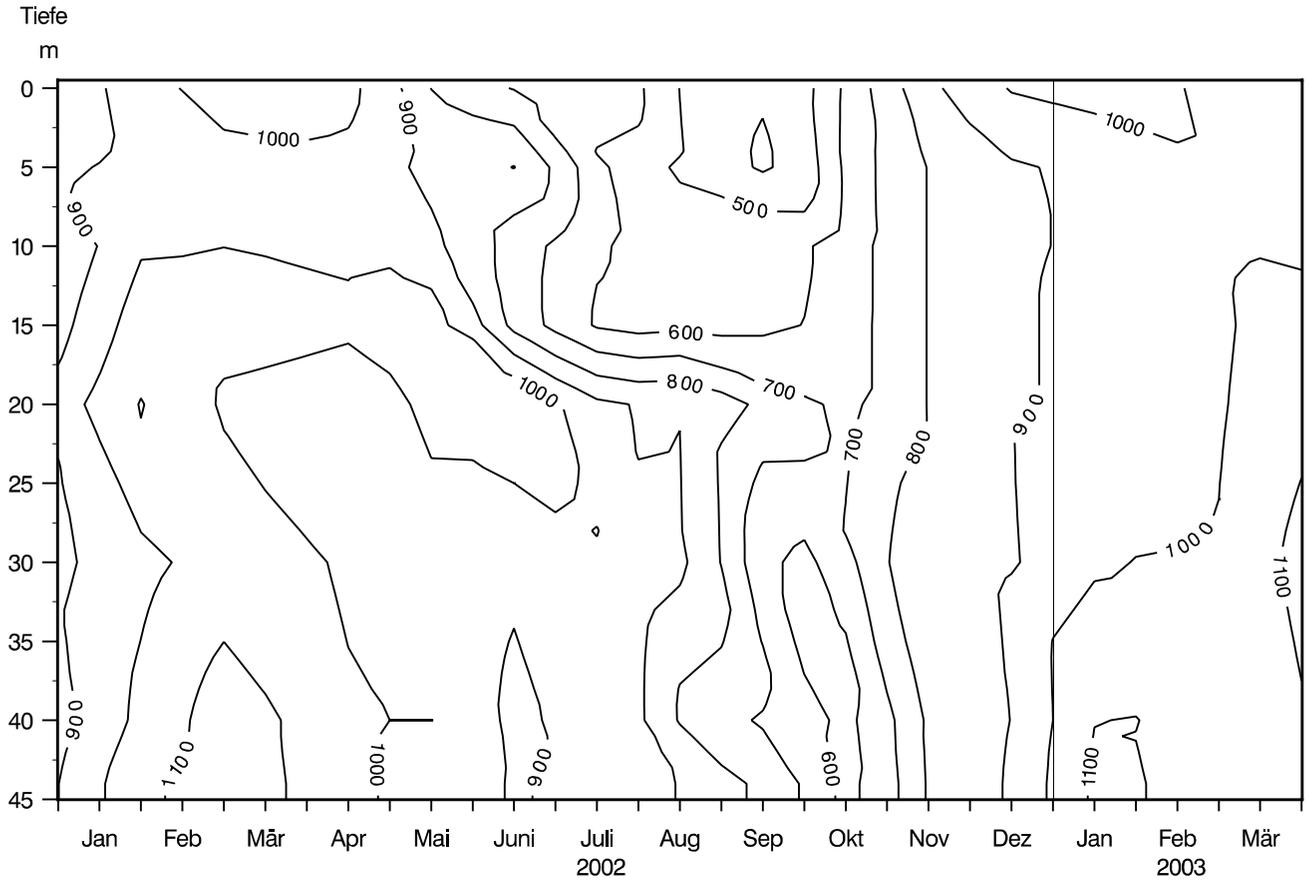
**Abb. 57:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Gesamt gelöster Phosphor (mg/m<sup>3</sup>)



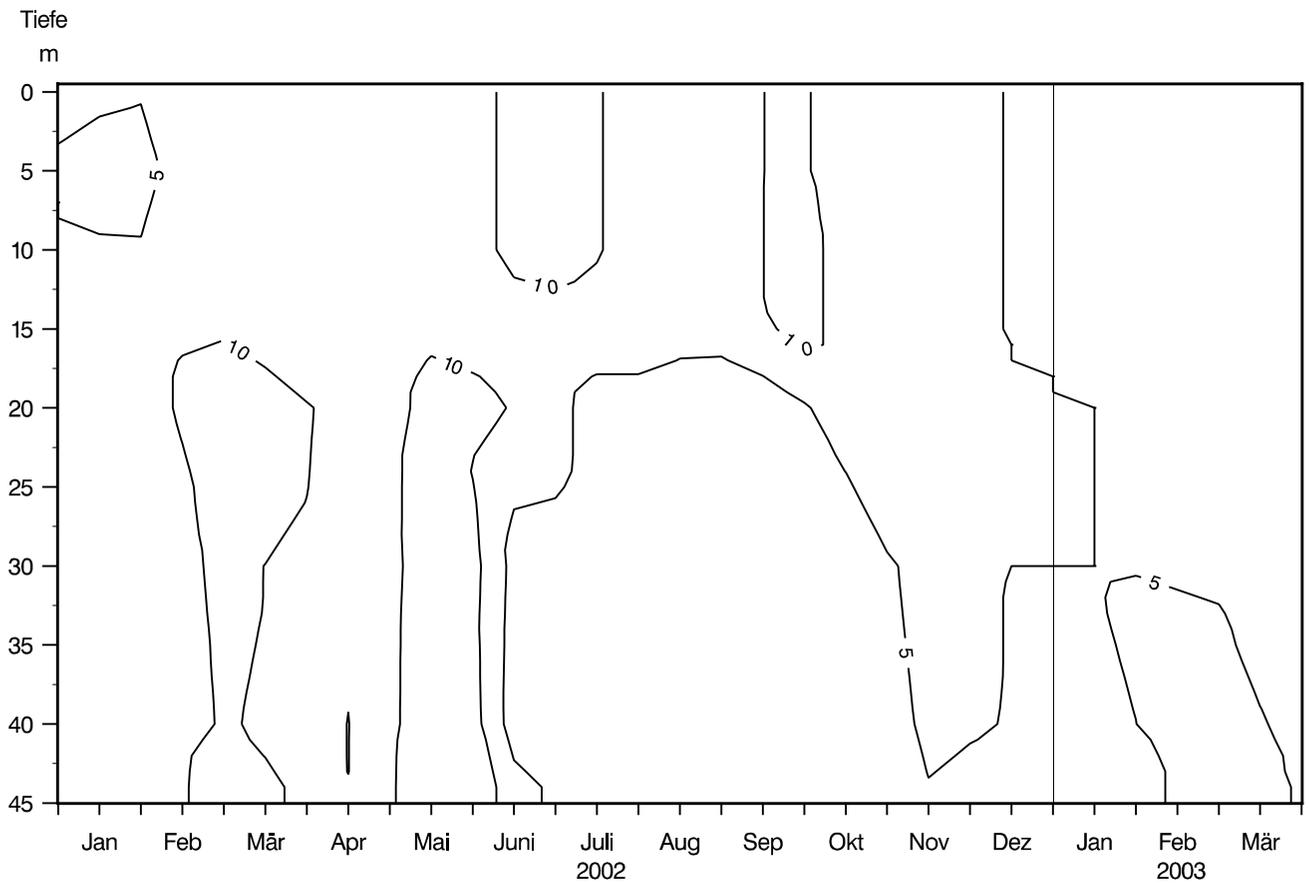
**Abb. 58:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Partikulärer Phosphor ( $\text{mg/m}^3$ )



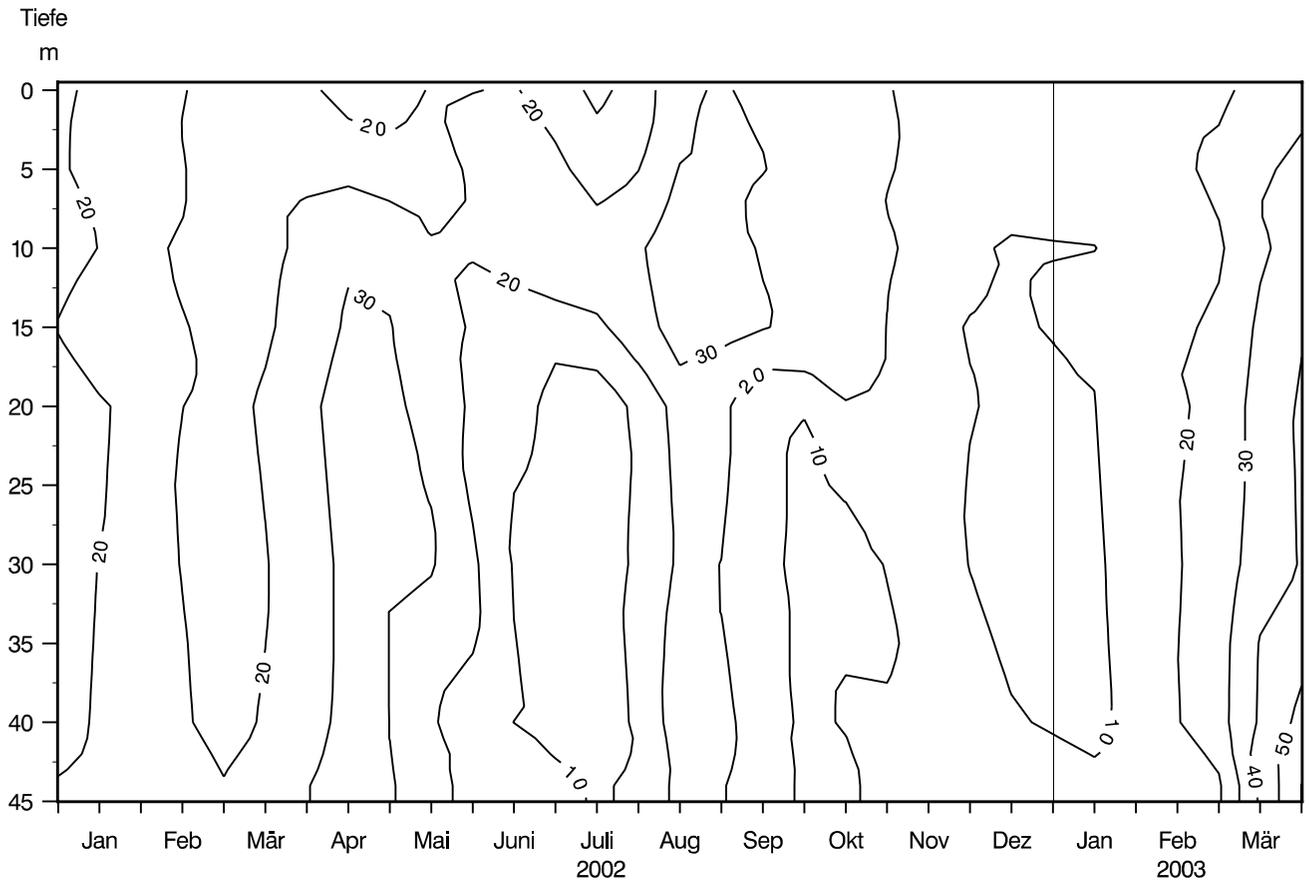
**Abb. 59:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Nährstoffinhalt 0–46 m Tiefe



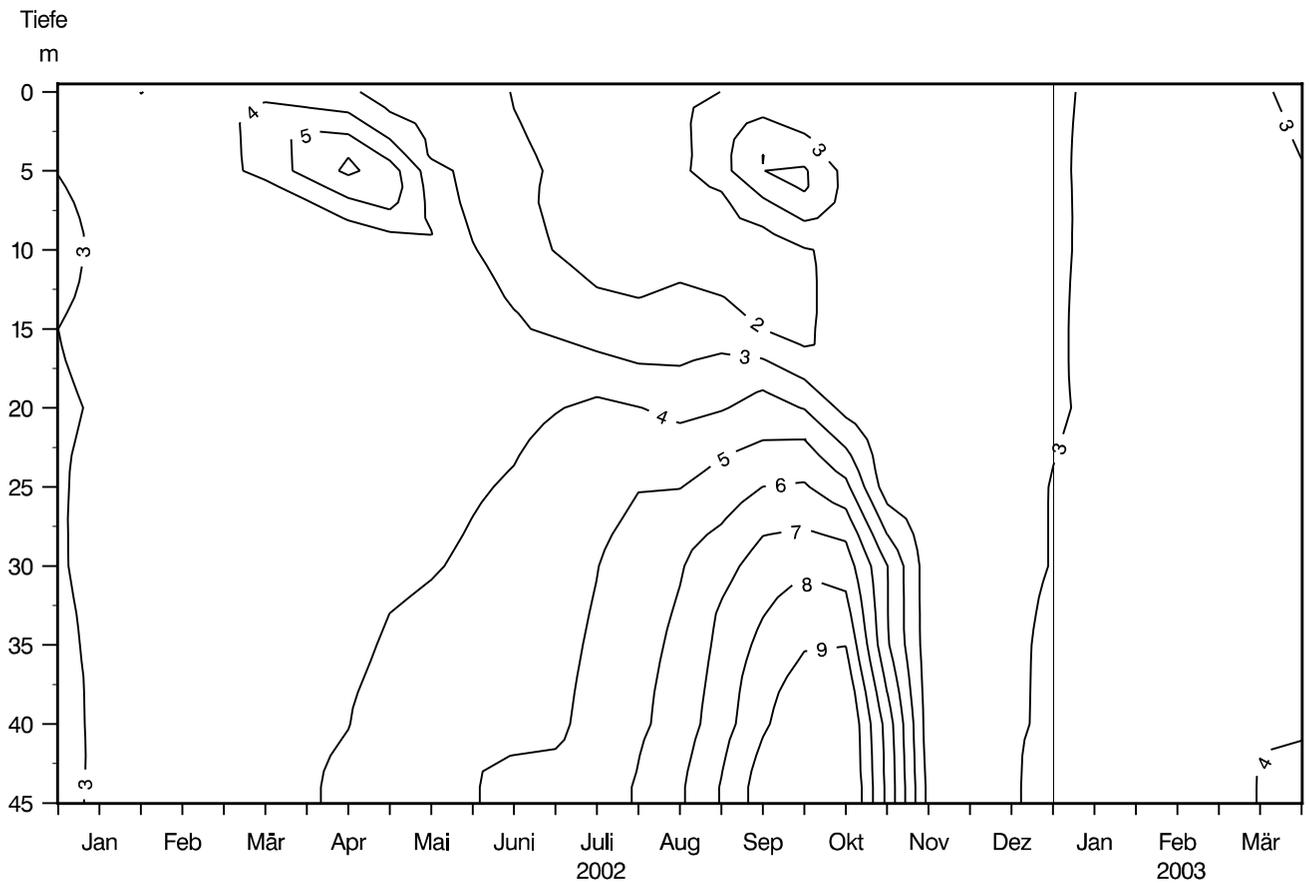
**Abb. 60:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Nitrat – Stickstoff ( $\text{mg/m}^3$ )



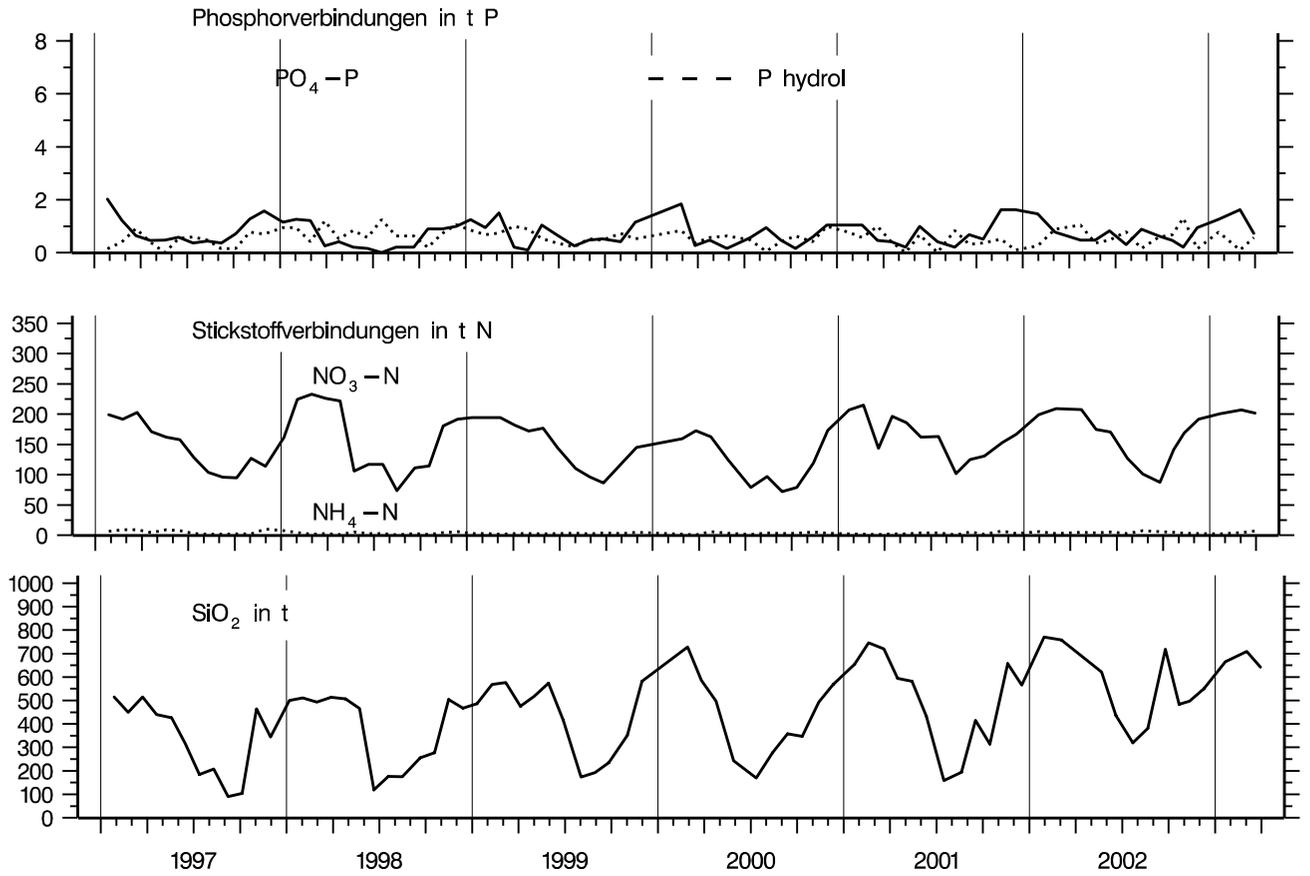
**Abb. 61:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Nitrit – Stickstoff ( $\text{mg/m}^3$ )



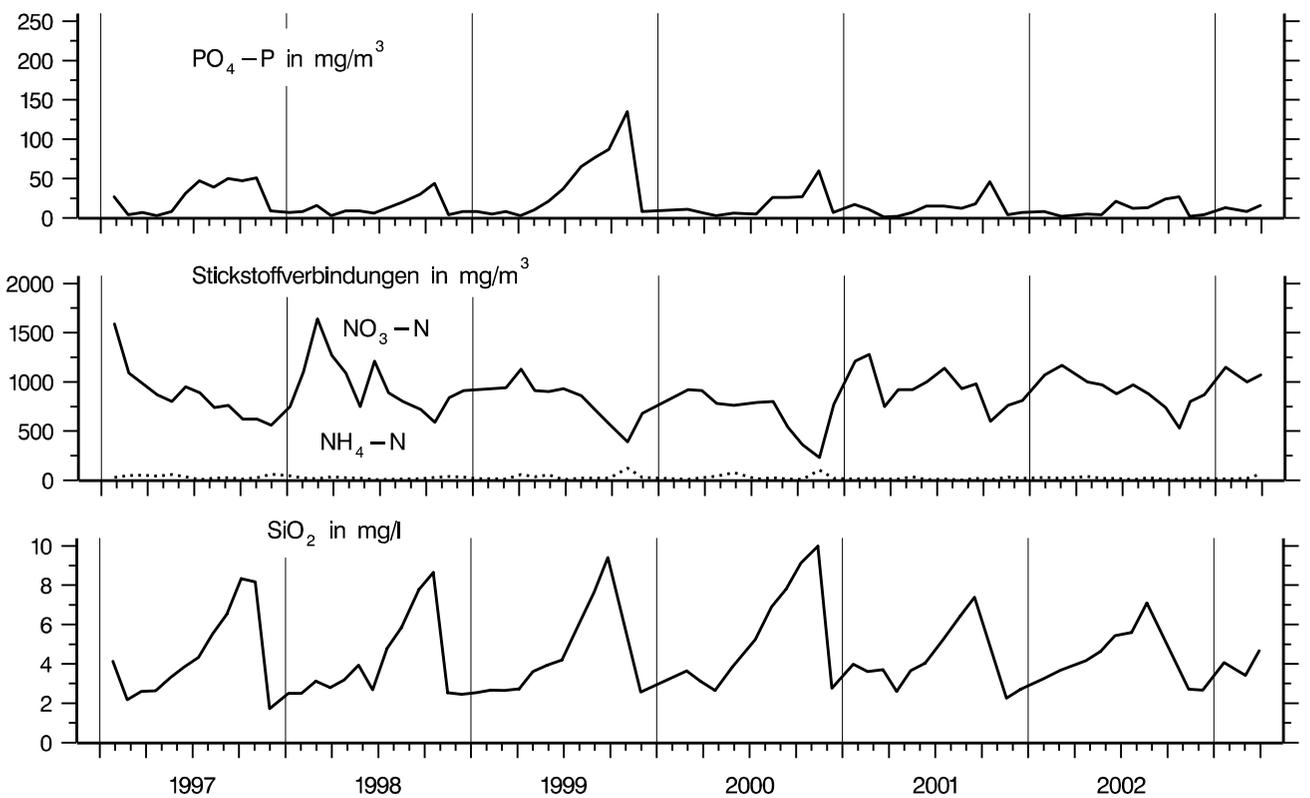
**Abb. 62:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Ammonium – Stickstoff ( $\text{mg/m}^3$ )



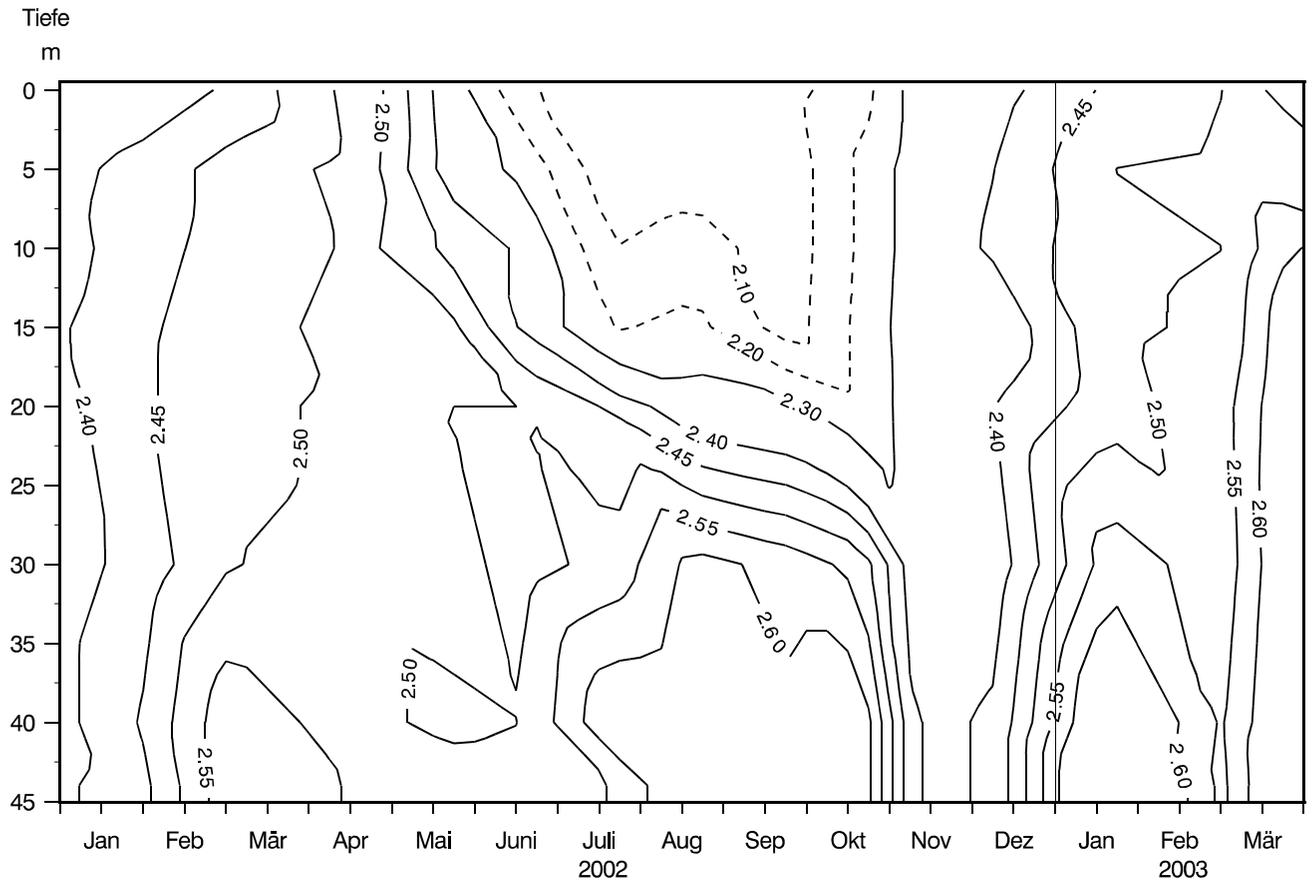
**Abb. 63:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Silikat ( $\text{mg/l}$ )



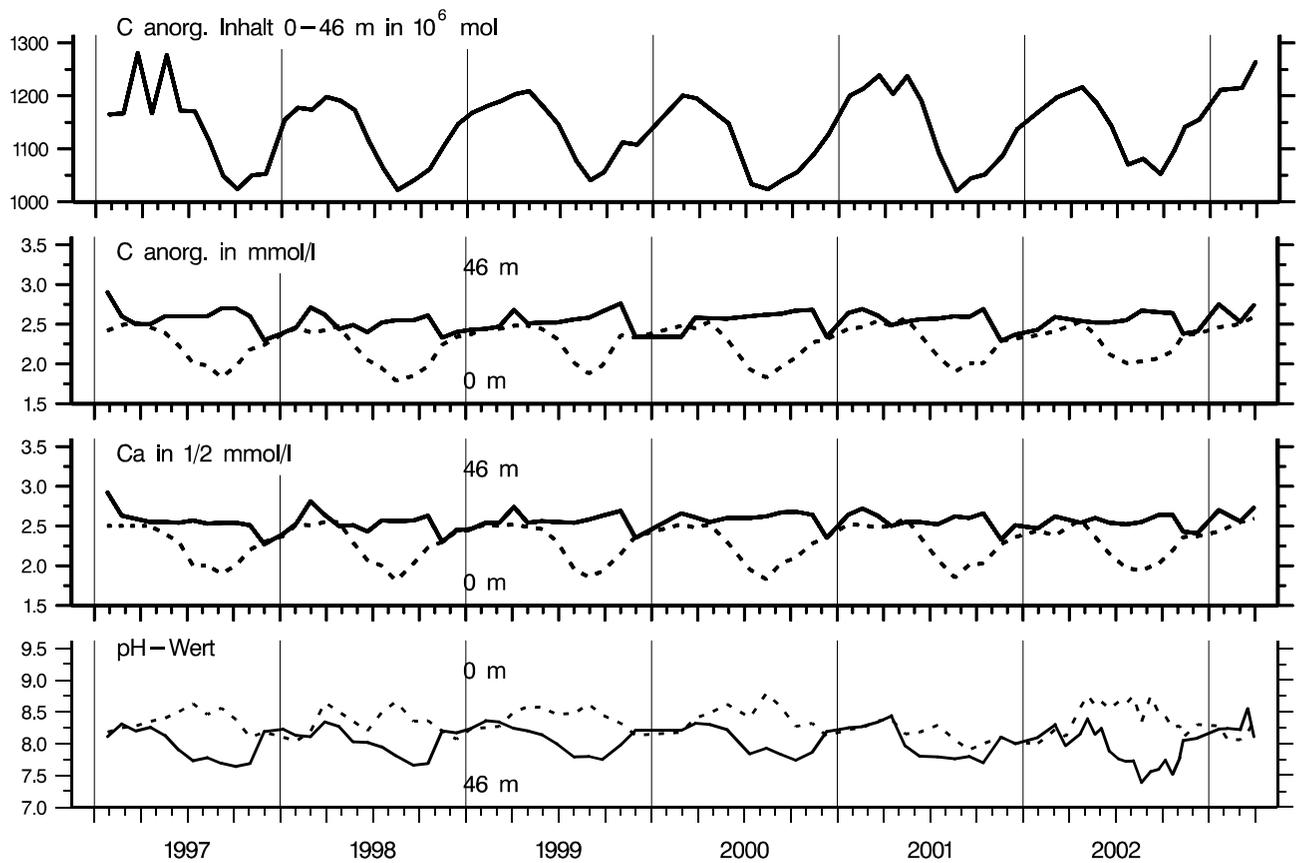
**Abb. 64:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Nährstoffinhalt im Epilimnion 0–10 m Tiefe



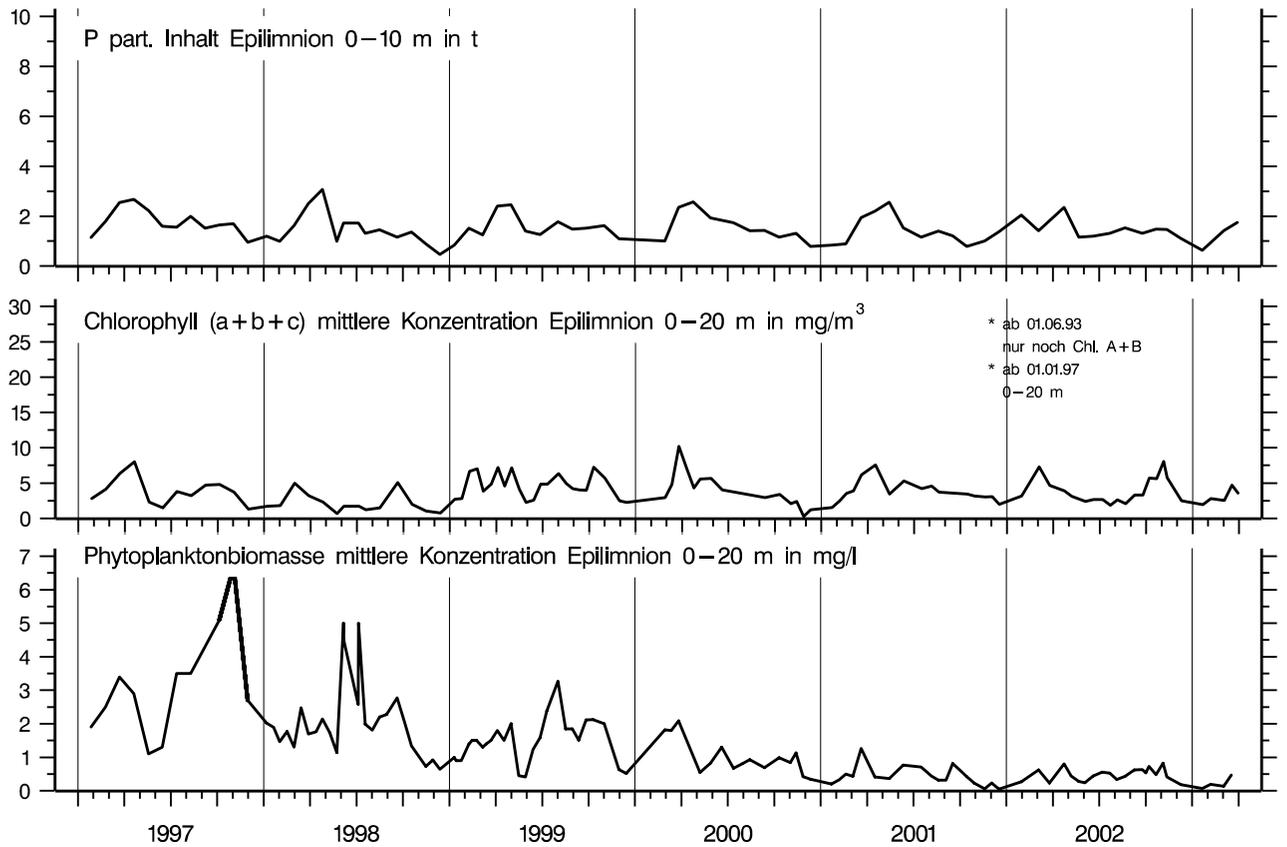
**Abb. 65:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Nährstoffkonzentration in 46 m Tiefe



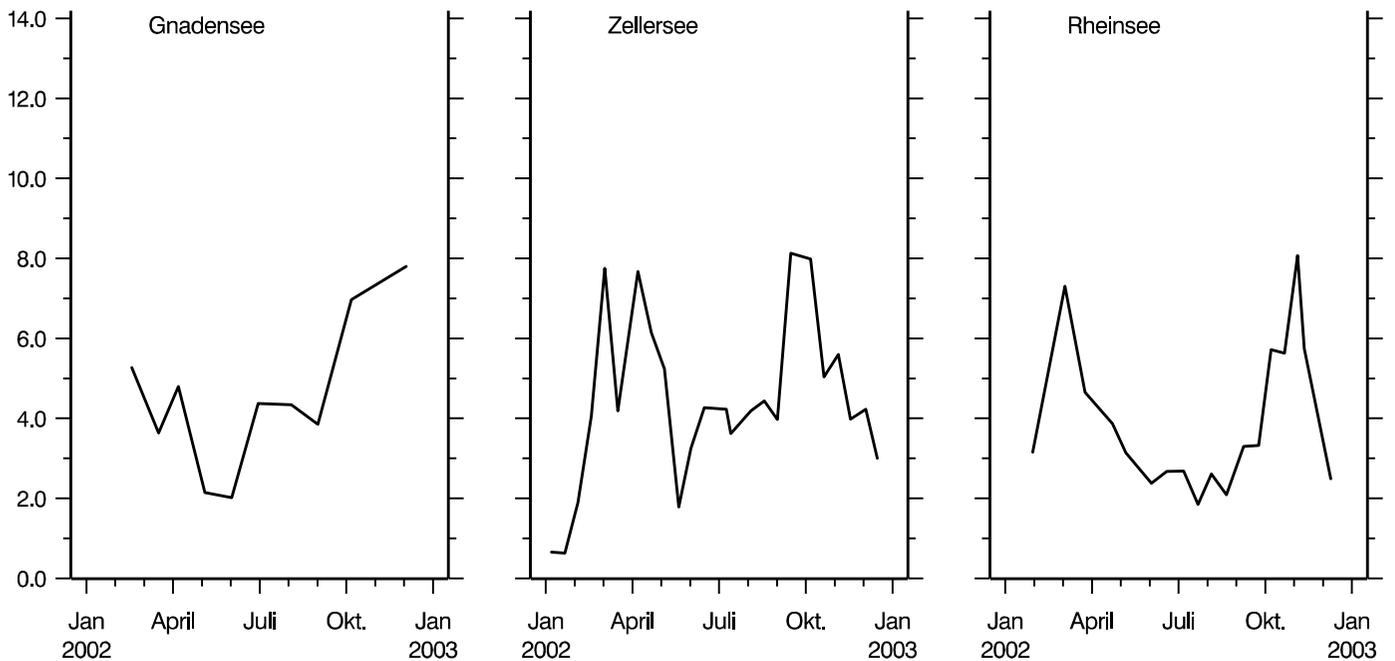
**Abb. 66:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Anorganischer Kohlenstoff (mmol/l)



**Abb. 67:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Anorganischer Kohlenstoff, Inhalt 0–46 m Tiefe  
Konzentration von anorg. Kohlenstoff, Calcium; pH-Wert



**Abb. 68:** Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):  
Chemische Biomasseindikatoren und Phytoplanktonbiomasse



**Abb. 69:** Bodensee – Untersee  
Chlorophyll a in  $\text{mg}/\text{m}^3$  im Gnadensee, Zellersee  
und Chlorophyll a+b in  $\text{mg}/\text{m}^3$  im Rheinsee;  
mittlere Konzentration 0–20 m Tiefe

**Tabelle 1 (1)****Normal - Tiefenserien an den Stationen**

<b>Fischbach - Uttwil:</b>	0, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100, 150, 200, 230, 250 m
<b>Bregenzer Bucht:</b>	Für chemische Untersuchungen: 0, 5, 10, 20, 30, 60 m  Für Sauerstoff- und Temperaturmessungen: 0, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 60 m
<b>Überlinger See:</b>	0, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 100, 140 m
<b>Zellersee:</b>	0, 5, 10, 15, 20, 21 oder 22 oder 23 m *
<b>Rheinsee:</b>	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 44 oder 45 oder 46 m *

\* je nach Wasserstand

Tabelle 1 (2)

Untersuchungstermine Januar 2002 bis März 2003 an den Stationen Fischbach-Uttwil (F),  
und Bregenzer Bucht (B) und von Januar 2002 bis März 2003  
an den Stationen Zellersee (Z) und Rheinsee bei Berlingen (R)

## Obersee - Stationen

08.01.	2002	F	
14.01.			B
04.02.			B
05.02.		F	
05.03.		F	
25.03.			B
09.04.		F	
23.04.		F	
24.04.			B
06.05.		F	
07.05.		F	
15.05.		F	
22.05.		F	
28.05.			B
04.06.		F	
18.06.		F	B
02.07.		F	
08.07.			B
10.07.		F	
05.08.			B
06.08.		F	
20.08.		F	
03.09.		F	
17.09.		F	
30.09.			B
08.10.		F	
09.10.			B
22.10.		F	
05.11.		F	
18.11.			B
19.11.		F	
03.12.		F	
11.12.			B
17.12.		F	
08.01.	2003	F	
14.01.			B
21.01.		F	
04.02.		F	
18.02.		F	
26.02.			B
04.03.		F	B
18.03.		F	

## Untersee - Stationen

21.01.	2002	Z	
30.01.			R
18.02.		Z	
05.03.			R
18.03.		Z	
26.03.			R
08.04.		Z	
22.04.		Z	
24.04.			R
06.05.		Z	
08.05.			R
21.05.		Z	
23.05.			R
03.06.		Z	
04.06.			R
17.06.		Z	
20.06.			R
01.07.		Z	
08.07.			R
15.07.		Z	
23.07.			R
05.08.		Z	
06.08.			R
19.08.		Z	
22.08.			R
02.09.		Z	
09.09.			R
16.09.		Z	
25.09.			R
07.10.		Z	
08.10.			R
21.10.		Z	
22.10.			R
05.11.		Z	R
12.11.			R
18.11.		Z	
04.12.		Z	
10.12.			R
16.12.		Z	
07.01.	2003	Z	
20.01.		Z	
21.01.			R
04.02.		Z	
06.02.			R
17.02.		Z	
04.03.			R
05.03.		Z	
17.03.		Z	
19.03.			R
31.03.			R

Tabelle 1 (3)

Liste der untersuchten Inhaltsstoffe für die Untersuchungsstationen Fischbach - Uttwil (F), Bregenzer Bucht (B), Zellersee (Z) und Rheinsee bei Berlingen (R)

Leitfähigkeit bei 20 °C	F	B	Z	R
pH	F	B	Z	R
Sauerstoff	F	B	Z	R
Säurekapazität KS 4,3	F	B	Z	R
Gesamthärte	F	B	Z	R
Calcium	F	B	Z	R
Magnesium	F	B		
Silikat	F		Z	R
Orthophosphat	F	B	Z	R
Phosphor gelöst (im Filtrat nach Aufschluß)	F	B	Z	R
Phosphor partikulär	F		Z	R
Phosphor total (im Rohwasser nach Aufschluß)	F	B	Z	R
Ammonium	F	B	Z	R
Nitrit	F	B	Z	R
Nitrat	F	B	Z	R
partikulärer Stickstoff direkt	F			R
Chlorophyll a	F		Z	R
Chlorophyll (a+b) - HPLC	F			R
Chlorid	F	B	Z	R
Sulfat	F	B	Z	R
Eisen total	F		Z	
Mangan total	F		Z	
Natrium	F	B		R
Kalium	F	B		R
UV – Extinktion (260 nm)				R

**Berechnete Inhaltsstoffe:**

pH korrigiert auf aktuelle

Temperatur	F		Z	R
Sauerstoffsättigung in %	F	B	Z	R
Restsauerstoff nach Oxidation der anorganischen Komponenten	F		Z	R
Rest - Sauerstoff nach Oxidation der anorganischen und organischen Komponenten	F			
Anorganischer Kohlenstoff	F		Z	R
Gleichgewichts - CO <sub>2</sub>			Z	R
Magnesium (aus Gesamthärte und Calcium)			Z	
			Z	R
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub>	F		Z	R
Hydrogenkarbonat	F		Z	R
Karbonat	F		Z	R
Gleichgewichtskohlensäure	F		Z	R
Calcitsättigung	F		Z	R
ausgefallener Kalk (nach Jacobsen / Langmuir)	F		Z	R
Phosphor total (P gelöst + P part.)	F	B	Z	R
Phosphor hydrolisierbar (P gelöst - PO <sub>4</sub> -P)	F	B	Z	R
Organischer Stickstoff gelöst (N-KJF - NH <sub>4</sub> -N)	F			
Organischer Stickstoff total (N-KJF + NH <sub>4</sub> -N)	F			
Gesamtsstickstoff anorganisch (NO <sub>3</sub> + NO <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> ) - N	F	B	Z	R
Gesamtstickstoff	F			
Summe der Kationen	F	B	Z	R
Summe der Anionen	F	B	Z	R

**Tabelle 2: Seekenddaten**  
**Bodensee-Obersee (Fischbach-Uttwil), Seejahr 2002 (Messdaten vom 09.04.02 bis 04.03.03)**  
 IV-XII: Monate 2002; I, II, III-03: Monate 2003

Parameter	Messwerte (a)			Stoffinhalt (b)						Stoffbilanz (b)		
	Epilimnion (0-10 m)	Seebodennähe (1m über Grund)		See total		Epilimnion (0-10 m)		Hypolimnion (200-252.5 m)		Beginn bis Ende Seejahr	03.09.2002 bis 04.03.2003	
		Maximum Minimum	Maximum Minimum	Beginn Ende	Maximum Minimum	Maximum Minimum	Maximum Minimum	Maximum Minimum				
<b>Thermik</b> (a) °C, (b) 10 <sup>12</sup> Kcal	23,0	4,9	264,7	360,6	IX	85,1	VIII	7,9	VIII, IX	-38	96	-134
	4,8	4,8		226,2	III	14,3	I	7,3	III			
<b>Sauerstoff</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) 10 <sup>3</sup> t	12,8	10,8	527,4	531,2	IV	54,3	IV	17,5	III	-13	-77	64
	7,4	6,8		449,7	X	23,5	I	12,9	X			
<b>Orthophosphat - P</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	8,2	19,8	268,6	421,0	I	34,3	III	27,3	IX	146	6	141
	0,4	9,5		258,0	IV	2,5	X	17,1	III	-35	-47	11
<b>Phosphor, hydrolisierb.</b> (A) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	6,6	5,5	123,2	123,2	IV	17,9	V	5,4	III			
	1,2	1,2		63,6	I	3,3	I	1,6	I			
<b>Phosphor, gelöst</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	9,7	24,2	391,8	502,7	III	40,9	III	30,0	IX	111	-41	152
	2,7	11,4		350,6	IX	12,6	VII	22,5	III			
<b>Phosphor, partikulär</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	10,6	9,5	205,1	84,2	IV	44,0	IV	4,5	XII	-121	-103	-18
	1,5	0,7		68,0	II	6,3	I	1,2	VII			
<b>Phosphor, total</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	16,9	30,1	596,9	596,9	IV	70,9	V	33,4	XII	-10	-144	134
	5,5	15,0		442,0	VIII	20,4	I	26,3	III			
<b>Nitrat - N</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	944,0	979,0	45761,5	43736,8	VI	3991,8	IV	1604,0	VI	-2025	-2885	861
	527,0	865,0		40783,2	I	1967,6	I	1378,1	I			
<b>Nitrit - N</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	14,4	1,3	44,3	97,6	V	52,4	VIII	0,3	XI	-44	11	-55
	0,0	0,0		0,0	XII - II	0,0	XII - III	0,0	IV, VI - II			
<b>Ammonium - N</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	22,3	8,3	188,5	267,7	VI	90,5	IX	5,0	VI	-54	62	-116
	2,0	0,5		78,3	II	14,7	II	0,7	II			
<b>Stickstoff, partikulär</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	84,0	23,0	1344,3	457,1	IX	315,8	IX	25,4	IX	-887	-153	-734
	6,0	7,0		417,7	I	28,5	I	8,4	XII			
<b>Silikat (SiO<sub>2</sub>)</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) 10 <sup>3</sup> t	3,3	5,6	158,8	161,5	IX	13,9	III	8,1	XII	3	-5	7
	0,6	3,6		149,1	XII	4,2	VIII	5,7	III			
<b>Kalium</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) 10 <sup>3</sup> t	1,2	1,3	59,1	58,8	VI	5,3	IV, XII	2,1	VII, X	0	0	-1
	1,1	1,2		56,9	V	2,7	I	1,9	V			
<b>Natrium</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) 10 <sup>3</sup> t	4,4	4,6	191,8	190,4	V	18,7	V	7,3	VIII	-1	9	-10
	3,3	4,1		190,4	III	8,7	I	6,6	IV			

Parameter	Messwerte (a)		Stoffinhalt (b)						Stoffbilanz (b)		
	Epilimnion (0-10 m)	Seebodennähe (1m über Grund)	See total		Epilimnion (0-10 m)		Hypolimnion (200-252,5 m)		Beginn bis Ende Seejahr	03.09.2002 bis 04.03.2003	
			Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum			
<b>Calcium</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) 10 <sup>3</sup> t	Maximum	Maximum	Beginn	Ende	Maximum	Maximum	Maximum	Maximum	-18	-109	91
	Minimum	Minimum	09.04.2002	04.03.2003	Minimum	Minimum	Minimum	Minimum			
<b>Magnesium</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) 10 <sup>3</sup> t	Maximum	Maximum	392,4	388,0	393,8	388,0	393,8	388,0	-4	-4	1
	Minimum	Minimum	243,3	233,5	243,3	233,5	243,3	233,5			
<b>Chlorid - Cl</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) 10 <sup>3</sup> t	Maximum	Maximum	243,3	233,5	243,3	233,5	243,3	233,5	-10	-12	2
	Minimum	Minimum	3,6	VIII	5,1	X, XII, I	3,6	VIII			
<b>Sulfat - SO4</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) 10 <sup>3</sup> t	Maximum	Maximum	1556,9	1545,2	1569,8	1545,2	1569,8	1545,2	-12	-14	2
	Minimum	Minimum	26,9	VIII	32,6	XII, III	26,9	VIII			
<b>Eisen total</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	Maximum	Maximum	936,7	595,7	1409,4	VIII	1409,4	VIII	-341	-248	-93
	Minimum	Minimum	3,5	VI	8,8	VIII	3,5	VI			
<b>Mangan total</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	Maximum	Maximum	39,6	46,4	83,8	II	83,8	II	7	8	-1
	Minimum	Minimum	0,3	IX	0,9	V	0,3	IX			
<b>Kohlenstoff anorg.</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) 10 <sup>3</sup> t	Maximum	Maximum	1404,4	1384,8	1404,4	IV	1404,4	IV	20	-42	22
	Minimum	Minimum	24,2	IX	29,4	II	24,2	IX			
<b>Säurekapazität KS 4,3</b> (a) mmol l <sup>-1</sup> , (b) 10 <sup>6</sup> kmol	Maximum	Maximum	118,0	116,4	118,0	IV	118,0	IV	-2	-4	2
	Minimum	Minimum	2,0	IX	2,5	II	2,0	IX			
<b>elektr. Leitfähigkeit</b> µS cm <sup>-1</sup> , 20 °C	Maximum	Maximum	301,0	X	301,0	X	301,0	X	-	-	-
	Minimum	Minimum	244,0	IX	295,0	VI	244,0	IX			
<b>pH-Wert</b>	Maximum	Maximum	8,1	VIII	8,1	III	8,1	III	-	-	-
	Minimum	Minimum	8,1	VII	7,8	VII	8,1	VII			
<b>Chlorophyll a</b> Mittelwert 0-20m (a) mg m <sup>-3</sup>	Maximum	Maximum	11,77	III	11,77	III	11,77	III	-	-	-
	Minimum	Minimum	0,3	II-03	0,3	II-03	0,3	II-03			

Tabelle 3

**Vergleich von Messwerten der verschiedenen Teile des Bodensees - Obersee  
Seejahr 2002 / 2003 an den Stationen Fischbach-Uttwil (F) und Bregenzer Bucht (B)**

Messwerte in " 0 " m		F	B
Temperatur in °C	Maximum	23,0	21,9
	Minimum	4,8	2,2
Sauerstoff in mg O <sub>2</sub> l <sup>-1</sup>	Maximum	12,8	13,5
	Minimum	9,4	9,7
Leitfähigkeit bei 20° C in µS cm <sup>-1</sup>	Maximum	292,0	327,0
	Minimum	244,0	277,0
pH in pH-Einheiten	Maximum	8,6	8,5
	Minimum	8,2	7,8
Orthophosphat in mg PO <sub>4</sub> -P m <sup>-3</sup>	Maximum	8,0	11,0
	Minimum	0,4	1,5
Phosphor gelöst in mg P m <sup>-3</sup>	Maximum	9,7	13,0
	Minimum	2,8	1,5
Phosphor total in mg P m <sup>-3</sup>	Maximum	16,6	20,0
	Minimum	5,5	9,0
Nitrat in mg NO <sub>3</sub> -N m <sup>-3</sup>	Maximum	957,0	966,0
	Minimum	527,0	506,0
Ammonium in mg NH <sub>4</sub> -N m <sup>-3</sup>	Maximum	22,3	48,4
	Minimum	4,6	3,9
Eisen total in mg Fe m <sup>-3</sup>	Maximum	37,9	—
	Minimum	3,5	—
Kohlenstoff anorg. in mmol C l <sup>-1</sup>	Maximum	2,5	2,5
	Minimum	2,0	2,1
Phosphor partikulär in mg P m <sup>-3</sup>	Maximum	10,4	—
	Minimum	1,6	—
Stickstoff partikulär in mg N m <sup>-3</sup>	Maximum	74,0	—
	Minimum	6,0	—

<b>Messwerte in Seebodennähe</b>		<b>F 250m</b>	<b>B 60m</b>
Temperatur in °C	Maximum	4,9	4,8
	Minimum	4,5	2,8
Sauerstoff in mg O <sub>2</sub> l <sup>-1</sup>	Maximum	10,8	11,4
	Minimum	6,8	8,0
Leitfähigkeit bei 20° C in µS cm <sup>-1</sup>	Maximum	301,0	337,0
	Minimum	295,0	322,0
pH in pH-Einheiten	Maximum	8,1	8,1
	Minimum	7,8	7,8
Orthophosphat in mg PO <sub>4</sub> -P m <sup>-3</sup>	Maximum	19,8	11,0
	Minimum	7,6	6,0
Nitrat in mg NO <sub>3</sub> -N m <sup>-3</sup>	Maximum	986,0	1012,0
	Minimum	865,0	897,0
Ammonium in mg NH <sub>4</sub> -N m <sup>-3</sup>	Maximum	8,3	42,9
	Minimum	0,5	3,9
Eisen total in mg Fe m <sup>-3</sup>	Maximum	125,3	—
	Minimum	8,8	—
Kohlenstoff anorg. in mmol C l <sup>-1</sup>	Maximum	2,6	2,6
	Minimum	2,5	2,4
Phosphor total in mg P m <sup>-3</sup>	Maximum	30,1	23,0
	Minimum	12,0	12,0

Tabelle 4: Seekennndaten  
 Bodensee-Untersee (Zellersee), Seejahr 2002 (Messdaten vom 21.01.02 bis 07.01.03)  
 I-XII: Monate 2002; I, II, III-03: Januar 2003

Parameter	Messwerte (a)			Stoffinhalt (b)				Stoffbilanz (b)				
	Epilimnion (0-10 m)	Seebodennähe (1m über Grund)		See total	Maximum Minimum	Zeit	Epilimnion (0-10 m)	Maximum Minimum	Zeit	Beginn bis Ende Seejahr	21.01.2002 bis 02.09.2002	02.09.2002 bis 07.01.2003
		Maximum Minimum	Zeit									
<b>Thermik</b> (a) °C, (b) 10 <sup>9</sup> Kcal	22,5 2,8	14,5 5,9	VII III	0,5 1,1	3,6 0,5	VII I	2,3 0,3	0,3 I	VII I	1	3	-2
<b>Sauerstoff</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) t	13,8 9,4	11,9 0,7	III X VIII, IX	2,1 2,0	2,3 1,5	III IX	1,5 1,0	1,0 I	III X	-99	-370	272
<b>Orthophosphat - P</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t*	16,6 0,9	7,1,8 1,4	I VIII	2,1 2,6	2,6 0,2	I VIII	1,5 0,1	1,5 I	I VIII	0	-2	2
<b>Phosphor, hydrolysiert.</b> (A) mg m <sup>-3</sup> , (b) t*	7,9 0,4	7,6 1,5	IX I	0,6 0,3	1,1 0,3	XII I	0,7 0,2	0,7 I	XII I	0	0	0
<b>Phosphor, gelöst</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t*	20,3 4,3	79,4 4,8	XII IV	2,7 2,9	3,4 0,8	XII IV	2,1 0,5	2,1 I	XII IV	0	-2	2
<b>Phosphor, partikulär</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t*	14,8 2,7	30,1 4,7	IV I	1,0 3,8	2,4 1,0	IV VI	1,6 0,6	1,6 I	IV VI	0	0	0
<b>Phosphor, total</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t*	27,8 10,7	95,0 16,2	XII VI	3,7 3,8	4,7 2,3	XII VIII	2,9 1,4	2,9 I	XII VI	0	-1	2
<b>Nitrat - N</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	1283,0 480,0	1595,0 340,0	II IX	199,6 205,8	215,8 92,6	II IX	132,3 52,1	132,3 I	II IX	6	-95	101
<b>Nitrit - N</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	23,6 5,8	27,3 5,8	I V	2,2 3,7	4,1 1,1	X V	2,3 0,6	2,3 I	X V	1	0	1
<b>Ammonium - N</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	31,9 4,9	167,8 6,1	VII I	3,5 0,8	6,1 0,8	IX I	2,8 0,5	2,8 I	IX I	-3	-1	-2
<b>Silikat (SiO<sub>2</sub>)</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) t	4,6 1,3	9,7 3,3	XII VIII	0,6 0,7	0,8 0,4	XII VIII	0,5 0,1	0,5 I	XII VIII	101	-292	392
<b>Calcium</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) t	55,9 39,7	64,7 50,9	II VIII	915,8 954,3	990,5 758,4	XII VIII	592,4 433,4	592,4 I	XII VIII	38	-158	196
<b>Chlorid</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) t	9,3 5,1	11,0 6,8	II, III IX	1463,1 1250,9	1647,8 946,9	II IX	990,5 544,8	990,5 I	II IX	-212	-390	177

Parameter	Messwerte (a)		Stoffinhalt (b)				Stoffbilanz (b)		
	Epilimnion (0-10 m)	Seebodennähe (1m über Grund)	See total	Epilimnion (0-10 m)		Beginn bis 21.01.2002	Ende 07.01.2003	Beginn bis 21.01.2002 bis Ende Seejahr 02.09.2002	02.09.2002 bis 07.01.2003
				Maximum	Minimum				
<b>Eisen total</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	48,9 4,8	221,6 8,0	7,9	7,9	3,1	7,9	5	-2	6
<b>Kohlenstoff anorg.</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) t	32,8 23,3	39,3 30,2	5383,6	5742,9	5383,6	5742,9	0	-1	1
<b>Säurekapazität KS 4,3</b> (a) mmol l <sup>-1</sup> , (b) 10 <sup>-3</sup> kmol	2,8 2,0	3,3 2,5	452,4	482,6	452,4	482,6	-30	-80	111
<b>elektr. Leitfähigkeit</b> µS cm <sup>-1</sup> , 20 °C	320,0 243,0	350,0 300,0							
<b>pH-Wert</b>	8,7 8,2	8,3 7,6							
<b>Chlorophyll a</b> Mittelwert 0-20m mg m <sup>-3</sup>	13,4 0,63	- -							

**Tabelle 5: Seekennndaten**  
**Bodensee-Untersee** (Rheinsee, Berlingen), Seejahr 2002 (Messdaten vom 30.01.02 bis 21.01.03)  
 I-XII: Monate 2002; I, II, III - 03: Monate 2003

Parameter	Messwerte (a)			Messwerte (a)			Messwert (a)			Stoffinhalt (b)			Stoffbilanz (b)			
	Epilimnion (0-10 m)	Maximum	Minimum	Seebodennähe (1m über Grund)	Maximum	Minimum	Zeit	Beginn 30.01.2002	Ende 21.01.03	See total	Maximum	Minimum	Zeit	Beginn bis Ende Seejahr	30.01.2002 bis 09.09.2002	09.09.2002 bis 21.01.2003
	Maximum	Minimum	Zeit	Maximum	Minimum	Zeit	Maximum	Minimum	Zeit	Maximum	Minimum	Zeit	Maximum	Minimum	Zeit	
<b>Thermik</b> (a) °C, (b) 10 <sup>9</sup> Kcal	24,8 4,1	9,3 4,1	VI I	13,3 0,1	13,3 0,1	VI VIII	225,7 6141,1	208,0 6919,9	208,0 6919,9	846,5 208,0	456,0 90,4	IX I	VI I	-19	614	-633
<b>Sauerstoff</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) t	13,7 8,5	13,3 0,1	I VIII	7,0 1,0	27,0 2,0	X III, XI	3,8	3,2	3,2	6919,9 3939,0	2949,0 2122,6	I IX	I IX	731	-2209	2940
<b>Orthophosphat - P</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	7,0 1,0	27,0 2,0	I VII, XI	6,0 0,0	6,0 0,0	VII V, VII, XII	0,7	2,0	2,0	2,9 0,4	1,3 0,1	XI I	XI I	1	-2	1
<b>Phosphor, hydrolysiert</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	10,0 4,0	31,0 5,0	III, I V	17,0 3,0	17,0 3,0	VI VII, VIII	4,9	1,6	1,6	4,9 1,6	2,4 0,6	I I	IV I	-3	-2	-1
<b>Phosphor, gelöst</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	22,0 10,0	42,0 10,0	IV V, VII, XII	9,6 5,1	9,6 5,1	VI VIII	9,6	6,8	6,8	9,6 5,1	4,1 2,2	I VIII	IV V	-3	-5	2
<b>Nitrat - N</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	1060,0 360,0	1170,0 530,0	III IX	509,6	486,8	III	509,6	486,8	486,8	515,7 270,4	215,6 90,2	III IX	III IX	-27	-189	162
<b>Nitrit - N</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	11,0 4,0	20,0 1,0	VI, IX I	2,4	2,2	V	2,4	2,2	2,2	5,4 2,2	2,4 0,9	III I	VI, IX I	0	0	0
<b>Ammonium - N</b> (a) mg m <sup>-3</sup> , (b) t	40,0 5,0	37,0 6,0	VIII VII	13,4	5,4	IV	13,4	5,4	5,4	17,0 5,3	7,6 2,3	VIII I	VIII I	-8	3	-12
<b>Silikat (SiO<sub>2</sub>)</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) t	6,6 1,3	10,4 2,7	IV VII	1754,2	1645,1	X	1754,2	1645,1	1645,1	2021,1 1210,9	1036,2 329,3	IX XI	IV VII	-123	-294	170
<b>Calcium</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) t	51,7 38,9	54,1 48,3	IV VIII	2513,6	2562,8	I	2513,6	2562,8	2562,8	2616,0 2200,9	1114,6 869,5	IV VIII	IV VIII	15	-165	180
<b>Chlorid</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) t	6,7 4,4	8,4 4,8	IV IX	2865,4	2670,4	III	2865,4	2670,4	2670,4	3172,9 2432,4	1388,5 1000,5	III XII	IV X	-219	-104	-115

Parameter	Messwerte (a)		Stoffinhalt (b)				Stoffbilanz (b)
	Eplimnion (0-10 m)		See total		Eplimnion (0-10 m)		
	Maximum Minimum	Zeit	Maximum Minimum	Zeit	Maximum Minimum	Zeit	
<b>Kohlenstoff anorg.</b> (a) mg l <sup>-1</sup> , (b) t	30,1	IV	1467,0	1517,1	649,1	IV	Beginn bis 30.01.2002 bis Ende Seejahr 09.09.2002
	23,9	VII	28,3	XI	524,2	VII	
<b>Säurekapazität KS 4,3</b> (a) mmol l <sup>-1</sup> , (b) 10 <sup>-3</sup> kmol	2,5	IV	123,3	127,5	54,5	IV	3
	2,0	VII	2,4	XI	44,1	VII	
<b>UV - Extinktion</b> m <sup>-1</sup> (260 nm), d = 5 cm	0,04	VII	0,04	X			3
	0,03	VIII	0,03	VIII			
<b>elektr. Leitfähigkeit</b> µS cm <sup>-1</sup> , 20 °C	294,0	IV	316,0	I			3
	238,0	VIII	282,0	I			
<b>pH-Wert</b>	8,8	V	8,4	V			3
	8,0	I	7,4	VIII			
<b>Chlorophyll a</b> mg m <sup>-3</sup>	5,61	XI	6,07	III-03			3
	1,67	VII	0,24	VII			

Tabelle 6

Vergleich von Messwerten der verschiedenen Teile des Bodensee - Untersees  
Seejahr 2002 / 2003 an den Stationen Zellersee (Z), Rheinsee Station Berlingen (R)

Messwerte in " 0 " m		Z	R
Temperatur in °C	Maximum	22,5	24,8
	Minimum	2,9	4,2
Sauerstoff in mg O <sub>2</sub> l <sup>-1</sup>	Maximum	13,8	13,7
	Minimum	9,4	9,5
pH in pH-Einheiten	Maximum	8,7	8,8
	Minimum	8,2	8,0
Orthophosphat in mg PO <sub>4</sub> -P m <sup>-3</sup>	Maximum	16,6	7,0
	Minimum	1,7	1,0
Phosphor partikulär in mg P m <sup>-3</sup>	Maximum	14,2	9,0
	Minimum	3,5	3,0
Nitrat in mg NO <sub>3</sub> -N m <sup>-3</sup>	Maximum	1283,0	1060,0
	Minimum	480,0	400,0
Ammonium in mg NH <sub>4</sub> -N m <sup>-3</sup>	Maximum	25,0	33,0
	Minimum	5,0	5,0
Eisen total in mg Fe m <sup>-3</sup>	Maximum	27,9	—
	Minimum	4,8	—

**Messwerte in Seebodennähe**

		<b>Z</b>	<b>R</b>
		<b>20 - 22m</b>	<b>44 - 46m</b>
Temperatur in °C	Maximum	14,5	9,4
	Minimum	3,3	4,1
Sauerstoff in mg O <sub>2</sub> l <sup>-1</sup>	Maximum	12,3	13,6
	Minimum	0,7	0,1
pH in pH-Einheiten	Maximum	8,4	8,5
	Minimum	7,6	6,9
Orthophosphat in mg PO <sub>4</sub> -P m <sup>-3</sup>	Maximum	71,8	27,0
	Minimum	1,4	1,0
Nitrat in mg NO <sub>3</sub> -N m <sup>-3</sup>	Maximum	1595,0	1170,0
	Minimum	340,0	530,0
Ammonium in mg NH <sub>4</sub> -N m <sup>-3</sup>	Maximum	167,8	37,0
	Minimum	2,9	3,0
Eisen total in mg Fe m <sup>-3</sup>	Maximum	221,6	—
	Minimum	7,1	—

## ANHANG

### Bericht des Fachbereichs Einzugsgebiet über das Jahr 2001

#### 1. Abwasserbeseitigung

	2001
Zahl der Einwohner in ARA-Einzugsgebieten des Bodensees	1'635'900
Zahl der an Abwasserreinigungsanlagen angeschlossenen Einwohner	1'560'700
Zahl der nicht angeschlossenen Einwohner	75'200
davon: - ordnungsgemäss entsorgt <sup>1)</sup>	31'900
- nicht ordnungsgemäss entsorgt <sup>1)</sup>	43'300
Anschlussgrad (in Prozent)	95.4

Von den knapp 1,636 Mio. Einwohnern in ARA-Einzugsgebieten des Bodensees waren im Berichtsjahr rund 1,561 Millionen an eine zentrale Abwasserreinigungsanlage angeschlossen. Dies entspricht einem Anschlussgrad von über 95 Prozent. Daneben wird das Abwasser von etwa 90'000 Einwohnern zu Anlagen ausserhalb des Bodensee-Einzugsgebietes übergeleitet.

	2001
Anzahl Abwasserreinigungsanlagen (IGKB-Kategorien):	
- Kategorie I (50-1000 EW)	64
- Kategorie II (1000-40'000 EW)	125
- Kategorie III (>40'000 EW)	34
Gesamtzahl der Abwasserreinigungsanlagen	223
davon mit:	
- Nitrifikation	134
- Denitrifikation	72
- Phosphorelimination	145
- weitergehende Reinigung (z.B. Flockungsfiltration)	12
Regen- und Mischwasser:	
- Flächenanteil im Mischsystem (in Prozent)	52.7 <sup>2)</sup>
- Ausbaugrad Mischsystem (in Prozent)	68.6 <sup>3)</sup>
Ablaufmengen:	
- Jahresabwassermenge (in 1000 m <sup>3</sup> )	310'304
- Gesamtphosphor (in t)	114.3
- CSB (in t)	9'268 <sup>4)</sup>
- N <sub>anorg.</sub> (in t; ohne St.Gallen und Graubünden)	2'422

<sup>1)</sup> Begriffe gelten im Sinne des Arbeitsmanuals

<sup>2)</sup> ohne Vorarlberg und Thurgau

<sup>3)</sup> ohne Thurgau

<sup>4)</sup> 542 t TOC wurden mit Faktor 4 in CSB umgerechnet

Im Jahr 2001 wurden dem See aus den 223 zentralen Abwasserreinigungsanlagen rund 310 Mio. m<sup>3</sup> Abwasser zugeführt. In 145 dieser Anlagen wird das Abwasser einer Reinigung mit Phosphatfällung unterzogen, eingeschlossen die 12 Anlagen mit einer weitergehenden Phosphorentfernung durch Flockungsfiltration. Mit 302 Mio. m<sup>3</sup> werden über 97 Prozent des im Bodensee-Einzugsgebiet anfallenden Abwassers einer Phosphorelimination unterzogen.

Die Restfracht an Phosphor im Abwasser der Abwasserreinigungsanlagen betrug im Berichtsjahr rund 114 Tonnen. Der Anteil der seeanliegenden Anlagen, die jeweils in den Zuflussuntersuchungen beprobt worden sind, machte dabei 25,9 Tonnen aus. Auf der Basis einer Belastung des Abwassers mit 1,8 g Phosphor je Einwohner und Tag kann die Eliminationsrate im Bodensee-Einzugsgebiet überschlagsmässig auf knapp 90 Prozent geschätzt werden. In Wirklichkeit dürfte der Wert über 93 Prozent liegen. Dies ergibt sich aus Berechnungen, welche in Teileinzugsgebieten mit gemessenen Zu- und Abauffrachten durchgeführt wurden. Im Jahresmittel ergab sich im Ablauf der Abwasserreinigungsanlagen eine mittlere Konzentration von 0,37 mg/l P<sub>ges</sub>.

Die CSB-Restfracht lag bei rund 9270 Tonnen. Im Mittel betrug die CSB-Konzentration 30 mg/l.

Die gezeichnete Arbeitskarte ist auf Grund des neu vorliegenden Datenmaterials angepasst worden (Beilage).

## 2. Fliessgewässer

Die Bodenseezuflüsse weisen heute überwiegend zumindest die biologische Güteklasse II und besser auf, d.h. sie sind nur noch mässig oder gering belastet. Es sind jedoch im gesamten Einzugsgebiet immer noch vereinzelt stark belastete Gewässer bzw. Gewässerabschnitte vorzufinden.

Vom Alpenrhein liegen aussagekräftige Messergebnisse über die hier besonders interessierenden Belastungen mit Phosphor und Stickstoff vor. Die Auswertung dieser Daten aus dem NADUF-Messprogramm (14-Tage Mischprobe) ergab, dass dem Bodensee im Jahr 2001 über den Alpenrhein bei einem Jahresabfluss von 9353 Mio. m<sup>3</sup> insgesamt 907 Tonnen Phosphor und 6366 Tonnen Stickstoff zugeführt wurden. Die entsprechenden Frachten betragen in den Abflussjahren 1996 (Q = 5742 Mio. m<sup>3</sup>; eher Trockenwasserjahr) 352 t P<sub>ges</sub> bzw. 4643 t N<sub>ges</sub> und 1997 (Q = 7410 Mio. m<sup>3</sup>; Mittelwasserjahr) 805 t P<sub>ges</sub> bzw. 6100 t N<sub>ges</sub>. Bei den übrigen bedeutenden Bodenseezuflüssen Bregenzerach, Dornbirnerach, Argen, Alter Rhein und Schussen beschränkten sich die Untersuchungen jeweils auf das Erheben von Stichproben im Monatsturnus. Bei dieser geringen Datenbasis ist eine Abschätzung von Jahresfrachten je Zufluss nur bedingt möglich.

Angaben über die Belastung der Bodenseezuflüsse mit Pflanzenschutzmitteln (PSM) ergeben sich vor allem aus den sehr intensiven Untersuchungen der Seefelder Aach. Für den Untersuchungszeitraum Mai 1999 bis Mai 2000 wurde ein Gesamteintrag von 9,3 kg PSM (vor allem aus den Herbiziden Diuron und Isoproturon) über diesen Zufluss in den Bodensee ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass mehr als die Hälfte der Gesamtfracht der Pflanzenschutzmittel aus drei Abwasserreinigungsanlagen stammt. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass auch weitere Zuflüsse in anderen stark von der Landwirtschaft geprägten Teileinzugsgebieten entsprechend belastet sein könnten.

Während die Oberläufe der meisten Bodenseezuflüsse über weite Strecken einen guten morphologischen Zustand aufweisen, zeigen ihre Unterläufe und insbesondere deren Mündungsbereiche deutliche strukturelle Defizite. So werden im deutschen Einzugsgebiet des Bodensees 50 bis 60 Prozent des Laufes der Gewässer als naturfern bewertet. Im Vorarlberger Rheintal werden 50 Prozent des Laufes der untersuchten Gewässer als stark beeinträchtigt oder schlechter eingestuft. Es ist allerdings festzuhalten, dass die Methoden zur Erhebung und Beurteilung in den erwähnten Ländern unterschiedlich sind und ein direkter Vergleich deshalb nur bedingt möglich ist. In den Kantonen St.Gallen und Thurgau wird die Ökomorphologie der Fliessgewässer zu einem grossen Teil im Rahmen der Erarbeitung des Generellen Entwässerungsplanes der Gemeinden erhoben. Diese Erhebungen werden nach den Vorgaben des BUWAL (Mitteilung zum Gewässerschutz Nr. 27) durchgeführt. Mit Abschluss der Erhebungen ist im Jahr 2004 zu rechnen. Der Kanton Graubünden führt ein besonderes Programm durch.

### **3. Ländliches Areal**

Im Zusammenhang mit den Zuflussuntersuchungen der IGKB wurden in den hydrologischen Jahren 1985/86 und 1996/97 mit Hilfe eines Stofffluss-Modells (im folgenden IUL-Nährstoffmodell) die diffusen Phosphor- und Stickstoffeinträge aus dem ländlichen Areal in die Gewässer im Einzugsgebiet des Bodensees abgeschätzt (IGKB-Berichte Nr. 45 und 51). Das IUL-Nährstoffmodell zeigt zwischen den Ermittlungen von 1985/86 und 1996/97 erhebliche Rückgänge bei den Nährstoffeinträgen aus diffusen Quellen, die teilweise auf den veränderten klimatischen Bedingungen der Vergleichsperioden, teilweise auf veränderten Landnutzungen und Bewirtschaftungsweisen beruhen. Im Zeitraum 1996/97 waren von der Belastung des Bodensees mit Gesamtphosphor mehr als die Hälfte auf natürliche Erosion aus dem Hinterland zurückzuführen und immer noch rund ein Drittel durch diffuse anthropogene Quellen, d.h. vornehmlich durch die Landwirtschaft (überwiegend Abschwemmung und Erosion aus Grasland sowie Erosion aus dem Ackerland) verursacht. Beim Stickstoff stammte im Zeitraum 1996/97 rund ein Drittel der aktuellen Stickstofffrachten im Bodensee-Einzugsgebiet aus natürlichen Quellen und rund die Hälfte der Einträge aus anthropogenen diffusen Quellen, vor allem der Landwirtschaft (hauptsächlich aus Auswaschungen unter Ackerland und unter Grasland).

Im Rahmen des Programms Interreg III A wurde inzwischen von der IBK-Arbeitsgruppe Landwirtschaft/Gewässerschutz ein Controllingbericht zum Themenkreis Landwirtschaft und Gewässerschutz im Bodenseeraum erstellt. Ziele des Berichtes waren u.a.:

- Mit ausgewählten Indikatoren die Entwicklung der Bereiche Landwirtschaft und Gewässerschutz im Bodenseeraum darzustellen (der Bodenseeraum entspricht dem Gebiet der Länder und Kantone der IBK; er ist somit nicht mit dem Bodensee-Einzugsgebiet der IGKB identisch).
- Mit ausgewählten Indikatoren den IST-Zustand zu erheben und diesen wenn möglich mit dem SOLL-Zustand zu vergleichen (z.B. gesetzliche Anforderungen an Grund- und Trinkwasser).

Der Controllingbericht lässt folgende Aussagen zu:

- Die Tierbestände haben im Bodenseeraum seit 1980 abgenommen. Somit hat sich auch der Düngeranfall verringert.
- Der Anteil der nicht oder nur wenig genutzten Landwirtschaftsfläche (extensiv bewirtschaftete Fläche) hat im Bodenseeraum seit 1995 um etwa 7 Prozent zugenommen.
- Die Hofdüngerlagerkapazitäten haben in den letzten 10 Jahren zugenommen. Genaue quantitative Angaben können derzeit jedoch nicht von allen Ländern und Kantonen gemacht werden.
- Im Bodenseeraum erstellen je nach Land oder Kanton zwischen 85 und 100 Prozent der Landwirtschaftsbetriebe Nährstoff- bzw. Düngerbilanzen.
- Eine umweltschonende Bewirtschaftung wird von allen Ländern und Kantonen im Bodenseeraum finanziell unterstützt. In der Schweiz werden z.B. rund 95 Prozent der Landwirtschaftsbetriebe nach den Kriterien des ökologischen Leistungsnachweises oder nach den Richtlinien des Biologischen Landbaus bewirtschaftet.
- Hof- bzw. Wirtschaftsdünger wird in den letzten Jahren gezielter ausgebracht, so dass geringere Nährstoffmengen in die Gewässer gelangen.

Auf Grund der Resultate des vorliegenden Controllingberichtes kann die Aussage gemacht werden, dass sich der landwirtschaftliche Nährstoffeintrag in den Bodensee in Zukunft eher noch verringern wird. Ein zweiter Controllingbericht ist für das Jahr 2005 vorgesehen.

#### **4. Abschätzung des Phosphoreintrags in den Bodensee**

Zur Ermittlung der dem Bodensee zugeführten Stofffrachten wurden in den bisherigen gross angelegten 10-Jahresuntersuchungen jeweils die Jahresfrachten aus den Zuflüssen und aus den Randgebieten (gereinigtes und restliches Abwasser, diffuser Eintrag) sowie aus dem Niederschlag bilanziert. Solch umfangreiches Datenmaterial liegt heute nicht vor. Auf Grund der vorhandenen Untersuchungsergebnisse lässt sich jedoch überschlagsmässig die Entwicklung des Eintrags pflanzenverfügbaren Phosphors abschätzen.

Neben Phosphor aus direkt in den See eingeleiteten Abwässern aus dem Uferbereich wird der Phosphorinhalt des Sees entscheidend durch die gelösten Phosphorkomponenten aus den Zuflüssen geprägt:

- Der Eintrag von Phosphor in den Obersee aus den seeanliegenden Abwasserreinigungsanlagen (Espasingen, Uhdingen, Immenstaad, Friedrichshafen, Eriskirch, Kressbronn, Lindau, Leiblachtal, Bregenz, Hofsteig, Altenrhein, Morgental, Romanshorn, Kesswil, Münsterlingen, Aachtal) im Jahr 2001 wurde ermittelt; er betrug 25,9 Tonnen (zum Vergleich die Werte 1996/97: 30 Tonnen; 1995/96: 35 Tonnen; 1985/86: 53 Tonnen; 1978/79: 112 Tonnen).
- Demgegenüber ist eine näherungsweise Abschätzung des gelösten Phosphoreintrags aus den Zuflüssen nur möglich, wenn gewisse Annahmen getroffen werden. Aus den bisherigen Zuflussuntersuchungen geht hervor, dass der Alpenrhein am meisten zu den Frachten beiträgt. Bisher wurden folgende Frachten ermittelt: 1996/97: 45,3 t (= 35,9% der Gesamtfracht an  $P_{\text{gel}}$ ); 1995/96: 35,2 t (= 29,8%); 1985/86: 124 t (= 28,4%); 1978/79: 284 t (= 33,3%).

Die entsprechenden NADUF-Daten des Jahres 2001 können wegen der stofflichen Veränderungen in Mehrtagessammelproben nicht verwendet werden. Wird jedoch angenommen, dass im Alpenrhein das Verhältnis von gelöstem Phosphor zu Gesamtphosphor in einem verhältnismässig engen Rahmen konstant ist – was auf Grund der letzten Zuflussuntersuchungen der Fall zu sein scheint (1995/96: 10% von 352 t; 1996/97: 5,6% von 805 t) – so könnte der Eintrag an gelöstem Phosphor aus dem Alpenrhein im Jahr 2001 zwischen 51 Tonnen (5,6% von 907 t) und 91 Tonnen (10% von 907 t) betragen haben. Zieht man in Betracht, dass 1995/96 ein Trockenjahr war, dürften die Verhältnisse 2001 besser mit den Ergebnissen der Untersuchungen 1996/97 vergleichbar sein. Davon ausgehend ergibt die näherungsweise Abschätzung der dem Obersee im Jahr 2001 aus allen Zuflüssen zugeführten Fracht an gelöstem Phosphor dann hochgerechnet einen Wert zwischen 142 Tonnen (51 t/0,359) und 179 Tonnen (51 t/0,284).

Der Eintrag an gelöstem Phosphor aus seeanliegenden Abwasserreinigungsanlagen und Zuflüssen wurde nach dem Zuflussuntersuchungsprogramm im Abflussjahr 1995/96 (Trockenjahr) mit 153 Tonnen und im Abflussjahr 1996/97 (Mittelwasserjahr) mit 156 Tonnen genau ermittelt. Für das Jahr 2001 (eher Mittelwasserjahr) kann nach der vorliegenden Abschätzung für diese Teilfrachten von einem Wert von 168 bis höchstens 205 Tonnen ausgegangen werden. Auf Grund der wenigen auswertbaren Daten kann in Verbindung mit den getroffenen Annahmen aus dieser erstmaligen Abschätzung noch keine Tendenz über die Frachtentwicklung abgeleitet werden.

## **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.<sup>00</sup>Uhr bis zum 6.1.1992 24.<sup>00</sup>Uhr. Sieben Tage nach dem Anfangszeitpunkt erreicht ein schwaches Hochwasser seinen höchsten Wert von 424 m<sup>3</sup>/s im Tagesmittel. Zu diesem Zeitpunkt - 23.12.1991 um 6.<sup>00</sup> 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, 6<sup>00</sup> 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>
<b>W91</b>	<b><i>Referenzlage 1989* ohne Wind</i></b>
<b>W91-VE</b>	<b><i>Endlage der Vorstreckung ohne Wind</i></b>
<b>W91-Wr</b>	<b><i>Referenzlage 1989* mit realer Westwindperiode Dez.1991/ Jan. 1992</i></b>
<b>W91-VE-Wr</b>	<b><i>Endlage der Vorstreckung mit realer Westwindperiode Dez.1991/ Jan. 1992</i></b>
<b>W91-W1</b>	<b><i>Referenzlage 1989* mit starker Westwindlage von Jan./Feb. 1990</i></b>
<b>W91-VE-W1</b>	<b><i>Endlage der Vorstreckung mit starker Westwindlage von Jan./Feb. 1990</i></b>
<b>W91-W2</b>	<b><i>Referenzlage 1989* mit mäßigen Nordostwinden Nov./Dez. 1995</i></b>
<b>W91-VE-W2</b>	<b><i>Endlage der Vorstreckung mit mäßigen Nordostwinden Nov./Dez. 1995</i></b>

\* 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, 6<sup>00</sup> Uhr, und vom Schluß, am 6.1.1992, 6<sup>00</sup> 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 6<sup>00</sup> 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 6<sup>00</sup> 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, 6<sup>00</sup> 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 6<sup>00</sup> 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, 6<sup>00</sup> 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 einsetzen.

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 6<sup>00</sup> 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, 6<sup>00</sup> 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, 6<sup>00</sup> 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, 6<sup>00</sup> 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, 6<sup>00</sup> 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): Bodenseeufenerosion: 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 <sup>3</sup> /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

<b>Szenario</b>	<b>W91-VE</b>	<b>W91</b>	<b>W91-VE</b>	<b>W91</b>
	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.

<b>Szenario</b>	<b>W91-VE-Wr</b>	<b>W91-W1</b>	<b>W91-Wr</b>	<b>W91-VE-W1</b>
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.

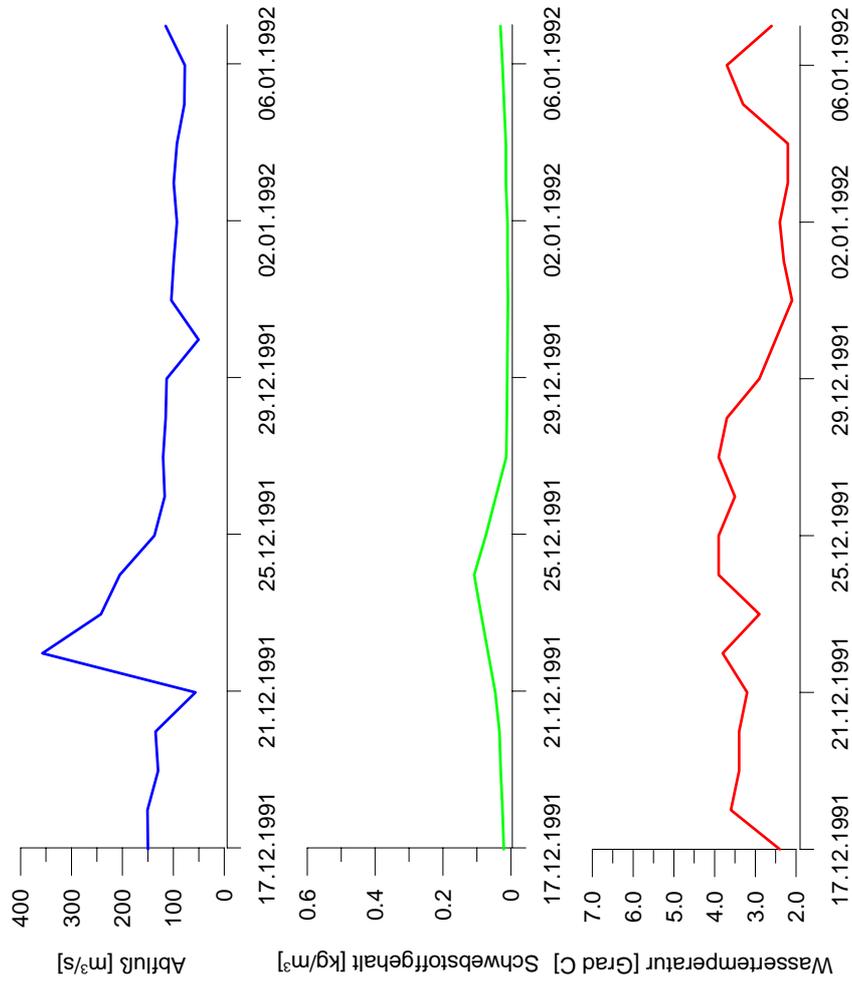


Abb. 1: Verlauf von Schwefelstoffgehalt, Temperatur und Abfluß des Alpenrheins vom 17.12.1991 bis 07.01.1992 an der Station Rhein-Diepoldsau, Rietbrücke

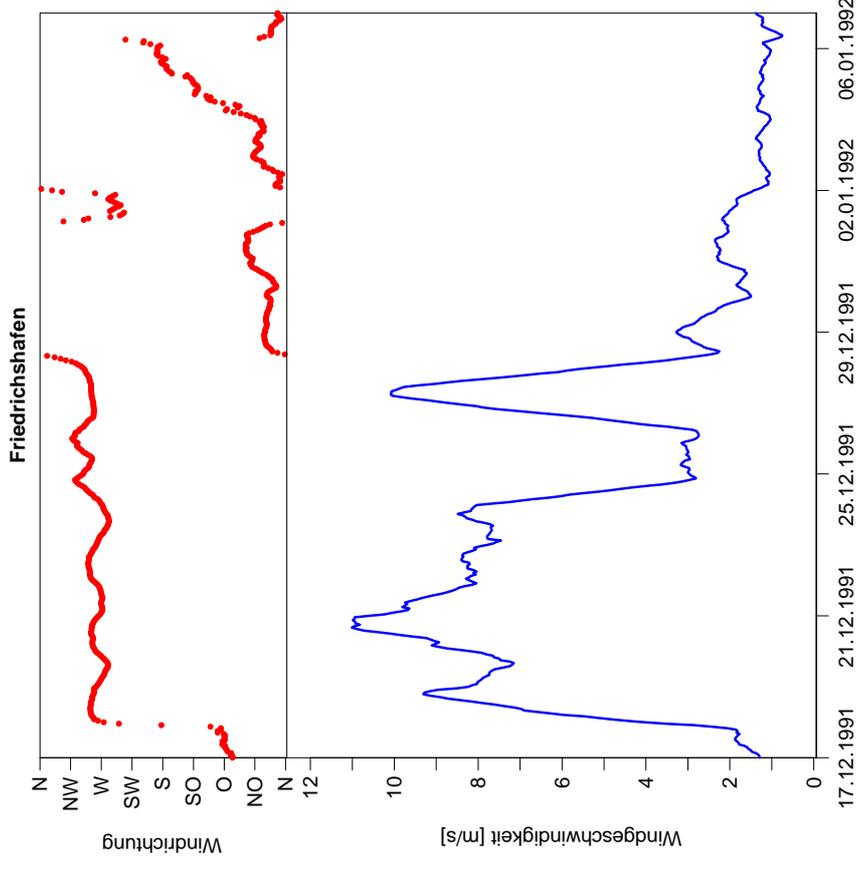


Abb. 2: Windrichtung und Windgeschwindigkeit in Friedrichshafen vom 17.12.1991 bis 07.01.1992 (gleitendes Tagesmittel) als Grundlage für den Fall W91-Wr

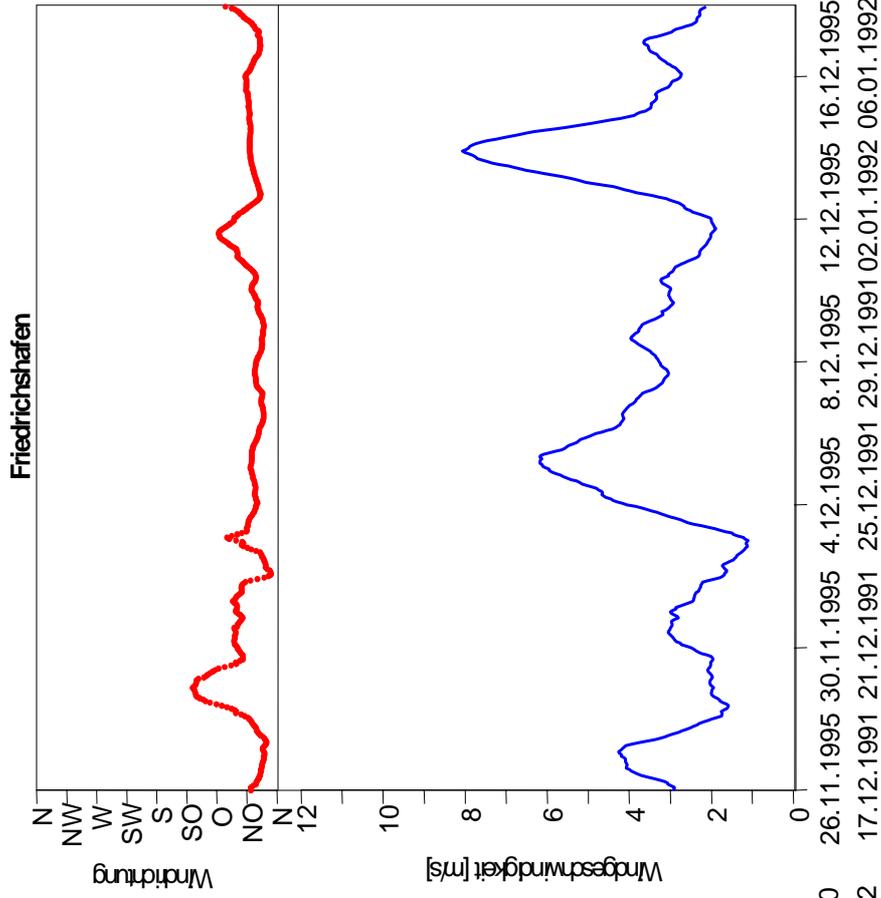


Abb. 4: Windrichtung und Windgeschwindigkeit in Friedrichshafen vom 26.11.1995 bis 18.12.1995 (gleitendes Tagesmittel) als Grundlage für den Fall W91-W2

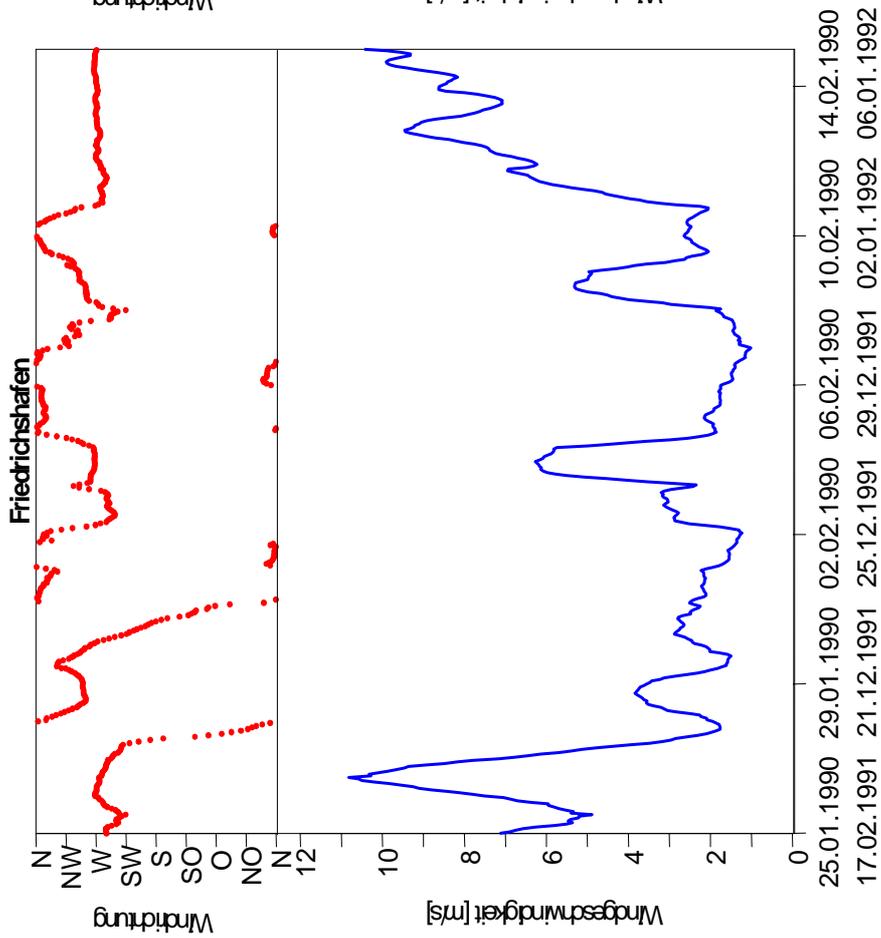


Abb. 3: Windrichtung und Windgeschwindigkeit in Friedrichshafen vom 25.01.1990 bis 15.02.1990 (gleitendes Tagesmittel) als Grundlage für den Fall W91-W1

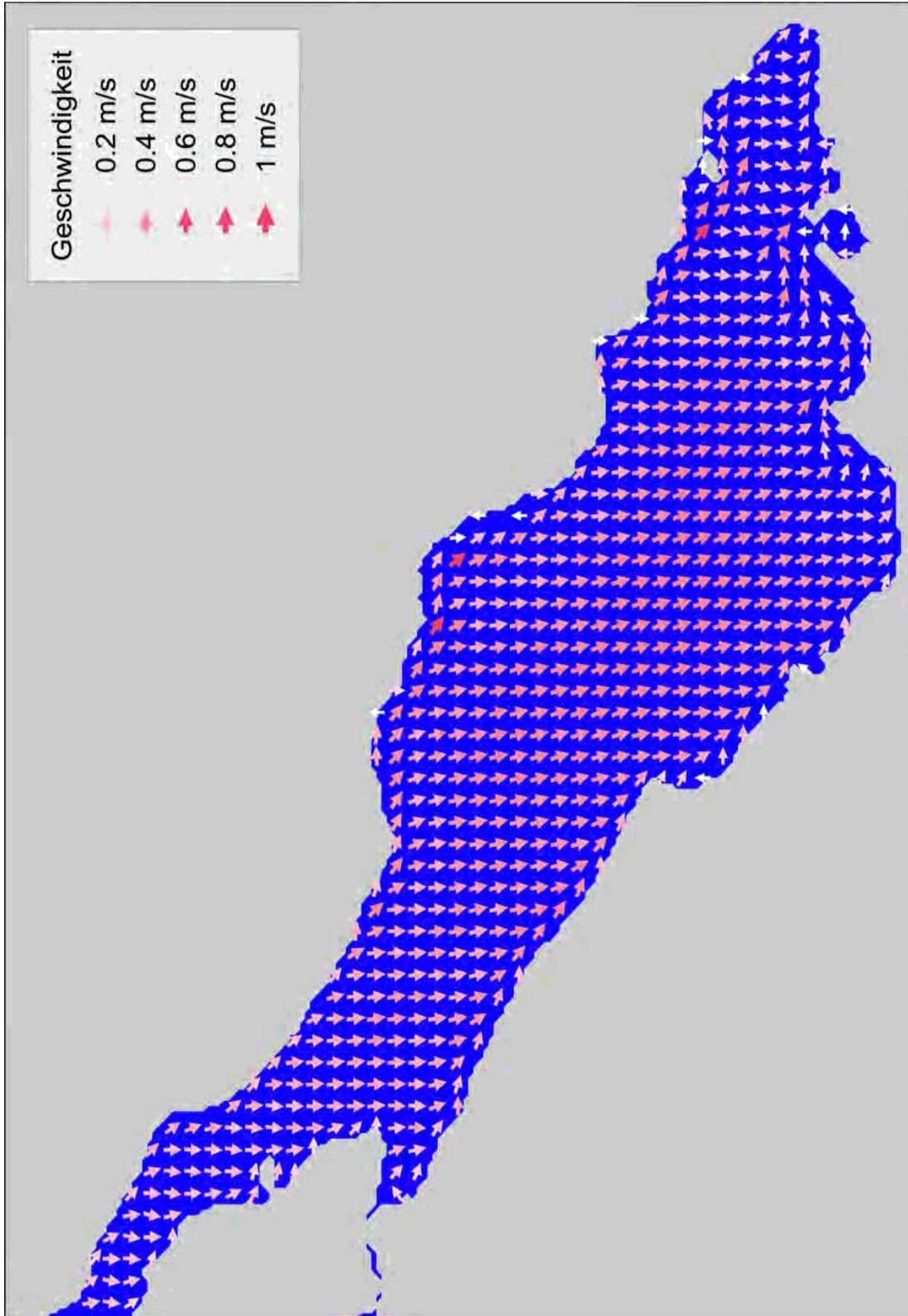
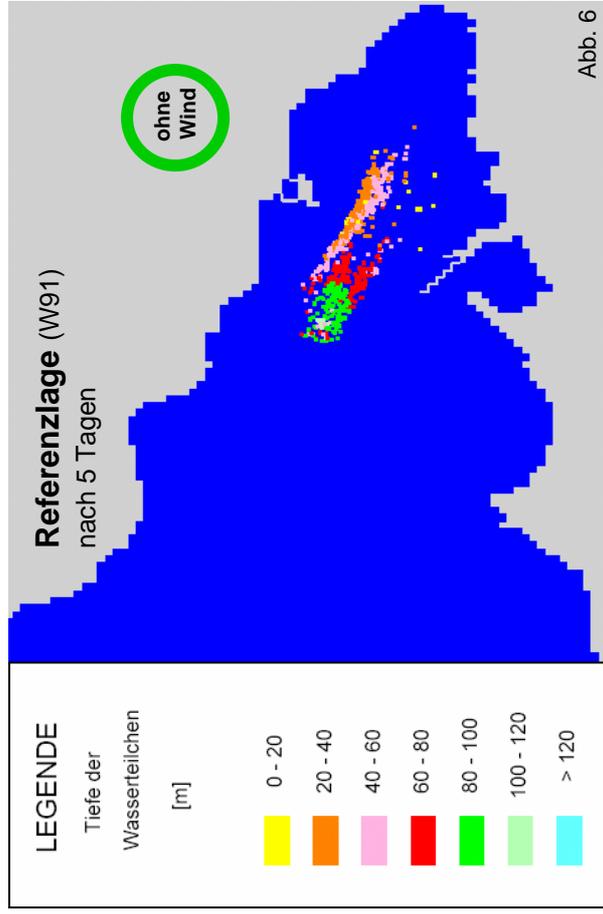
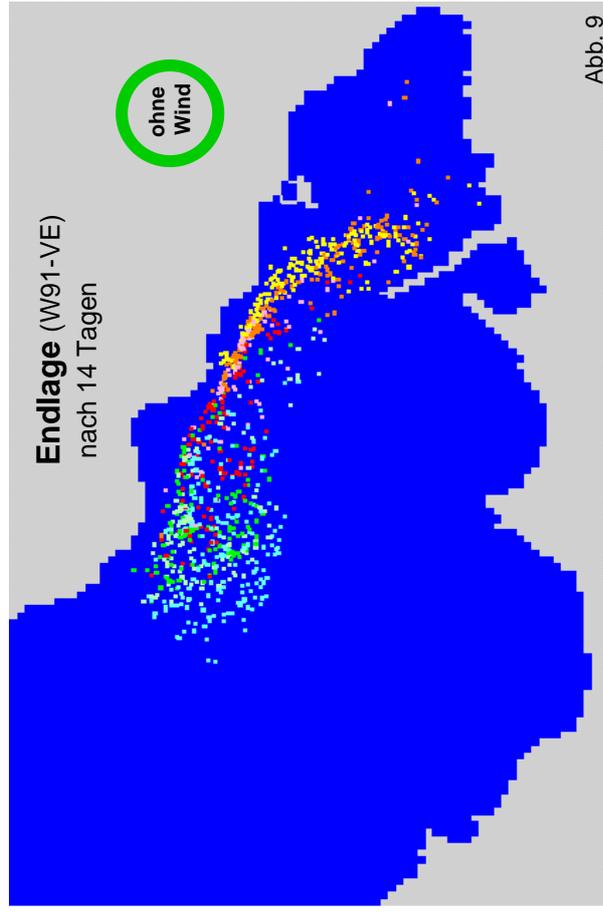
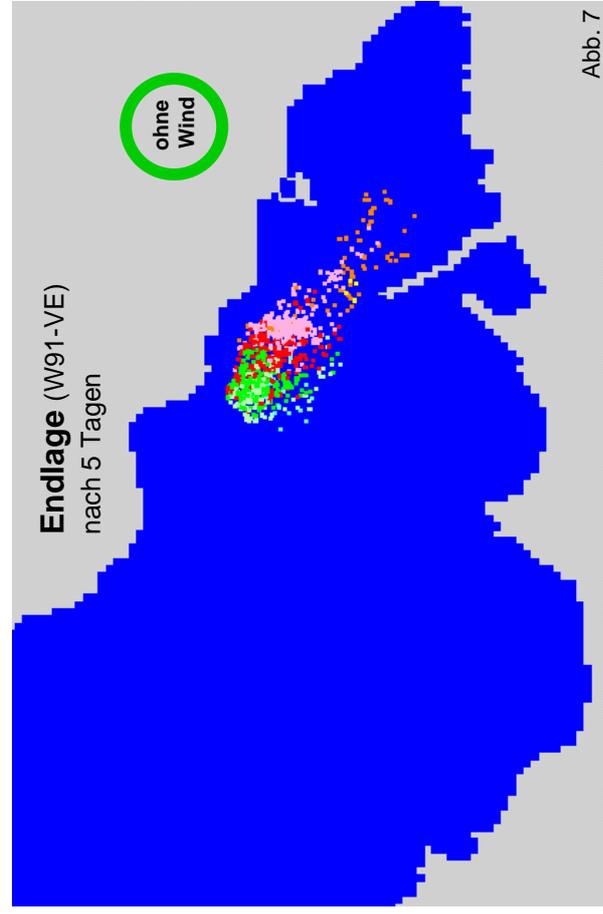
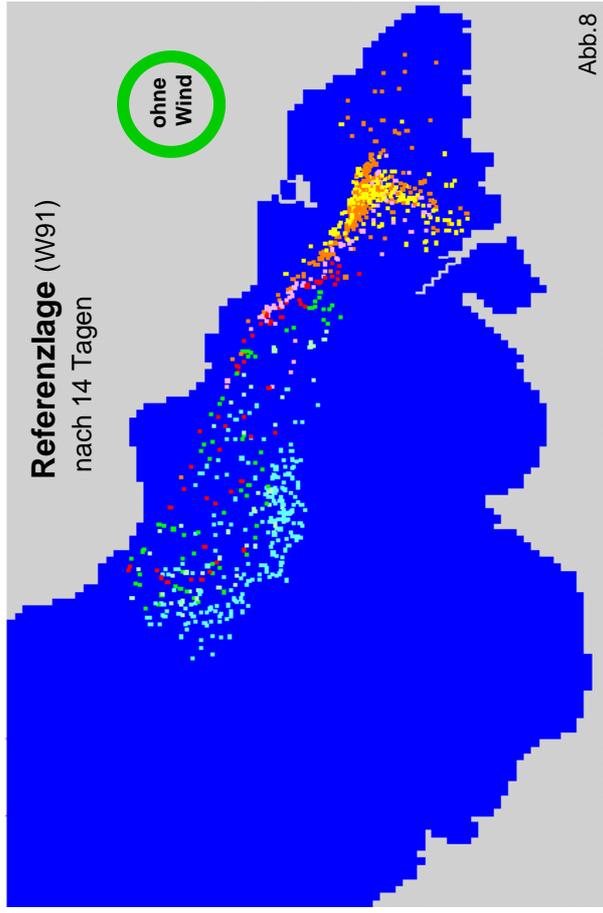


Abb. 5: Strömungsverteilung an der Oberfläche des Bodensee-Obersees im 200m-Modell am 23.12.1991 um 6.00 Uhr (aus Darstellungsrunden sind Pfeile im 800 m Abstand gezeigt, Windfeld siehe Abb. 2)

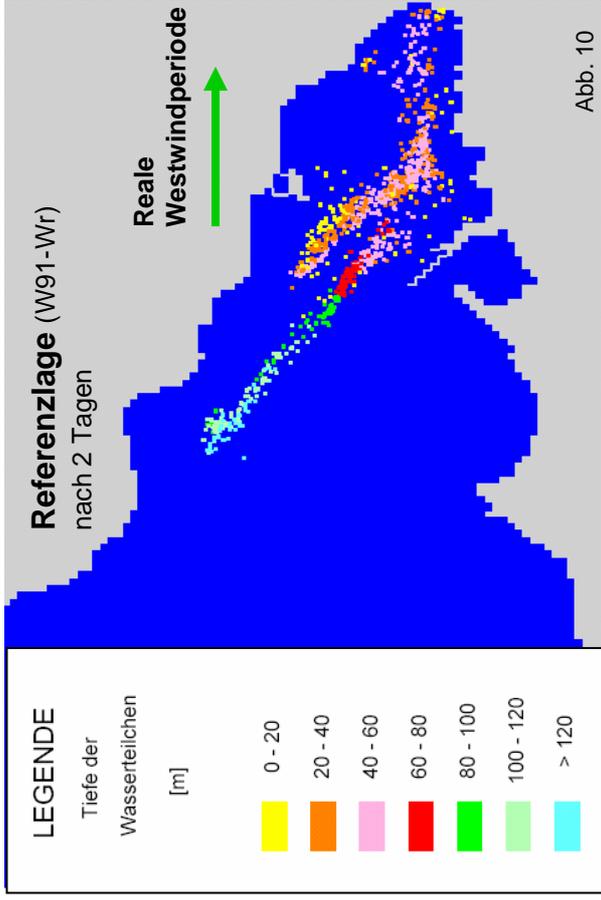
Einschichtung des Alpenrheins 28.12.1991 06.00 Uhr



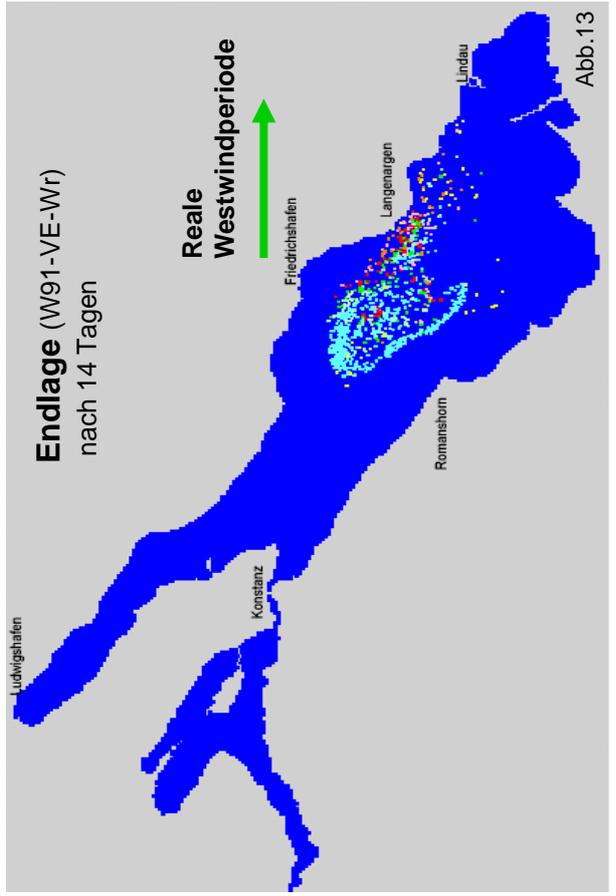
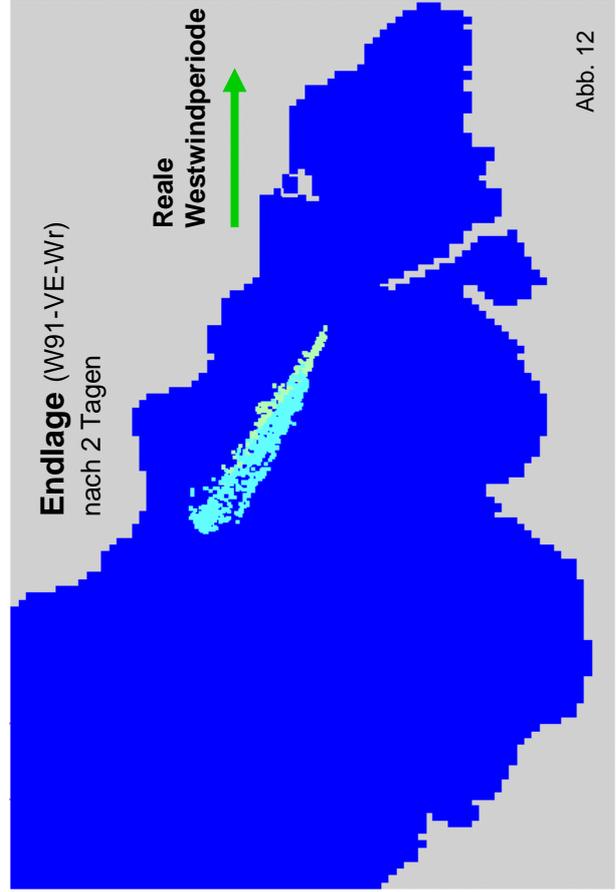
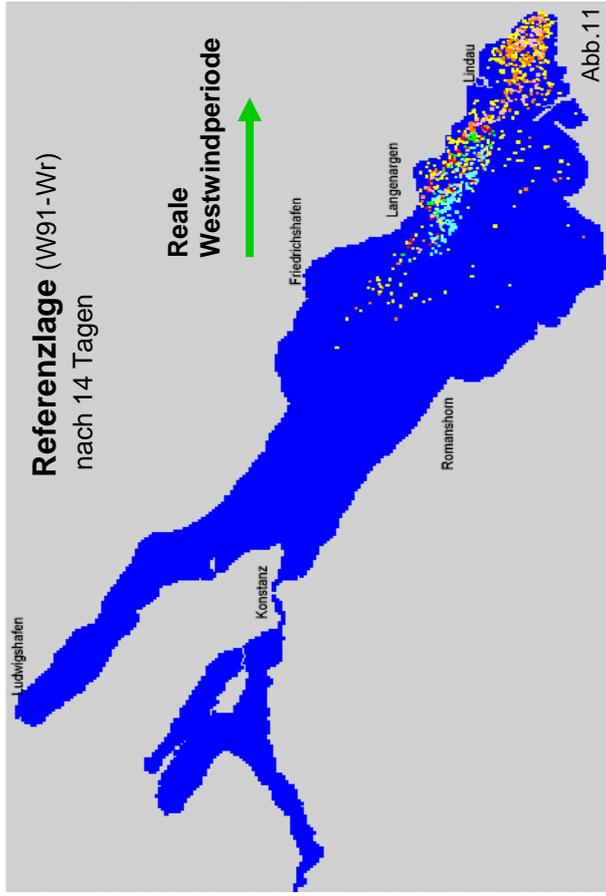
Einschichtung des Alpenrheins 06.01.1992 06.00 Uhr



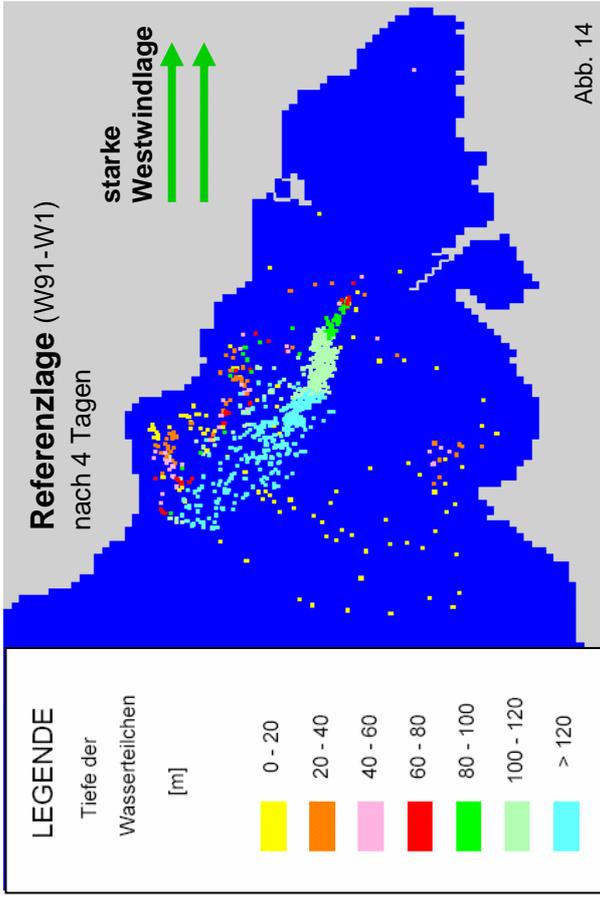
Einschichtung des Alpenrheins 25.12.1991 06.00 Uhr



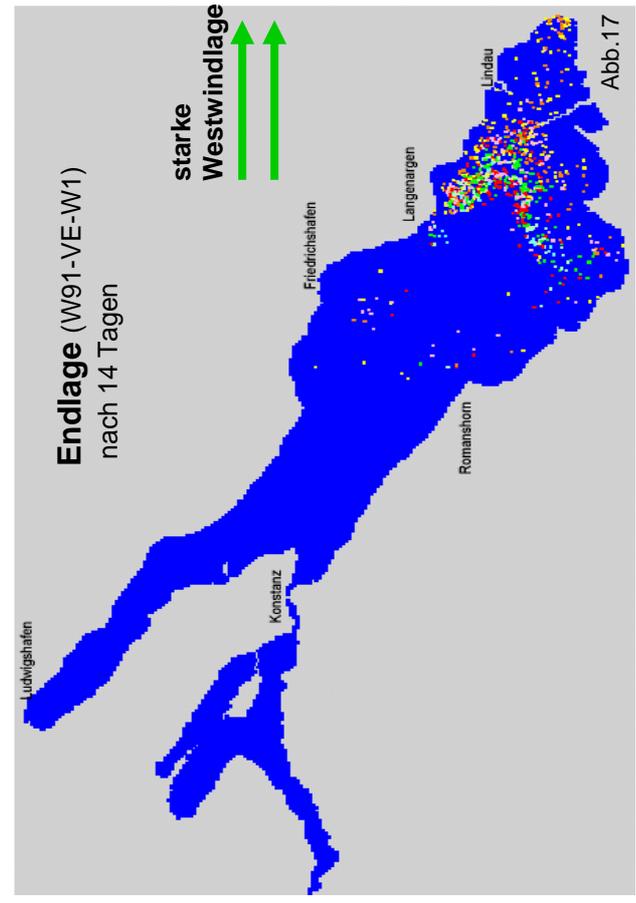
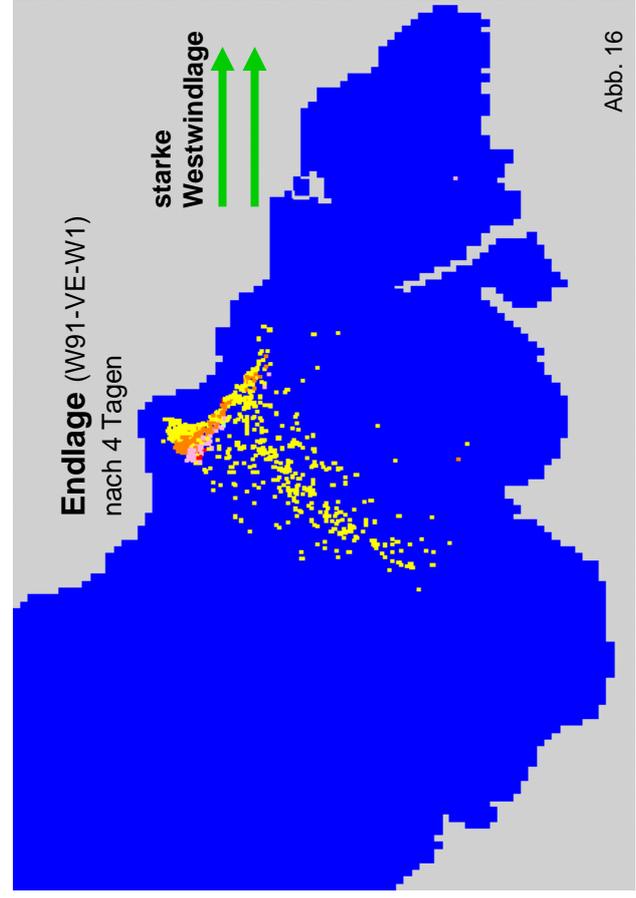
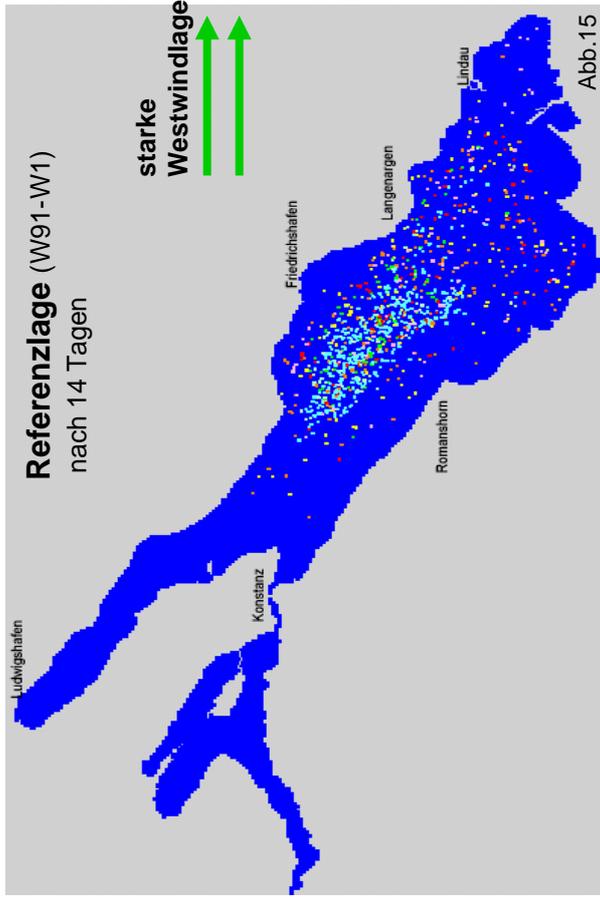
Einschichtung des Alpenrheins 06.01.1992 06.00 Uhr



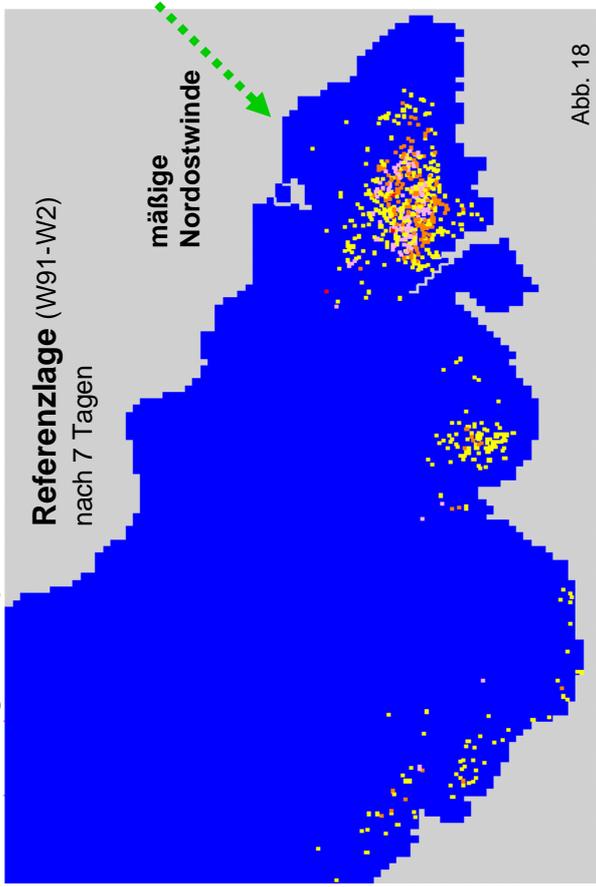
Einschichtung des Alpenrheins 27.12.1991 06.00 Uhr



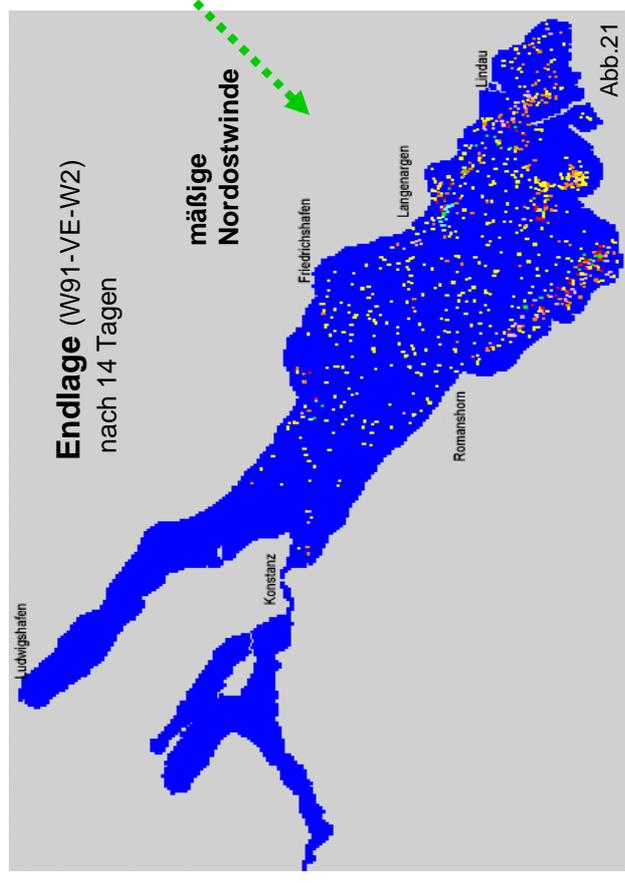
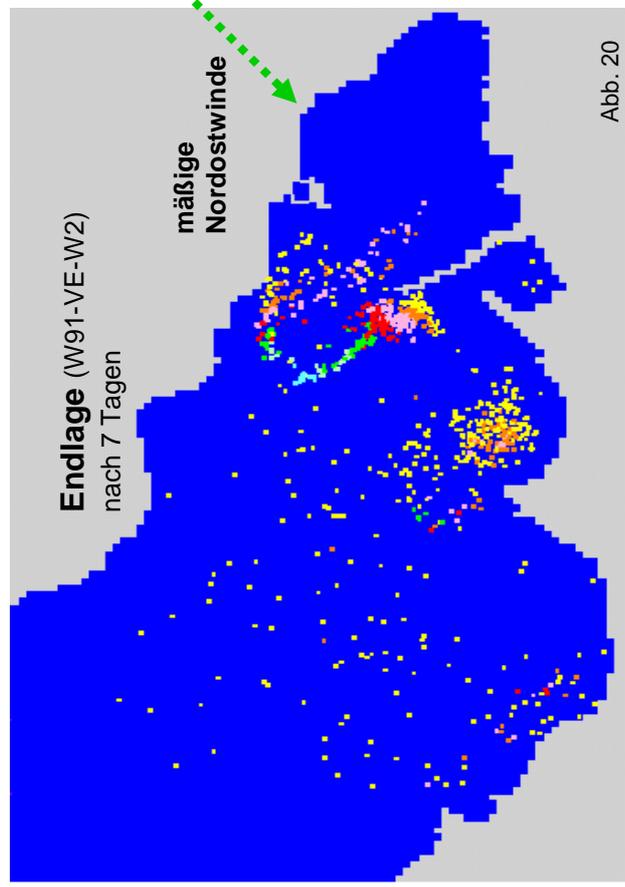
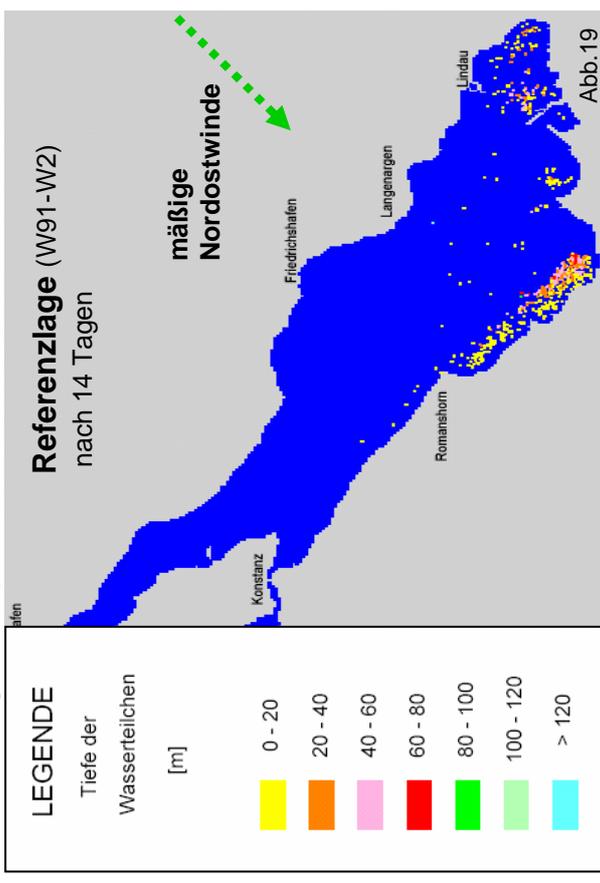
Einschichtung des Alpenrheins 06.01.1992 06.00 Uhr



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 <sup>3</sup> /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 6<sup>00</sup> 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 6<sup>00</sup> 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