

Internationale Gewässerschutzkommission
für den
Bodensee

LIMNOLOGISCHER ZUSTAND DES BODENSEES

Nr. 16

Jahresbericht Januar 1988 bis März 1989
- Freiwasser, Seeboden, Stickstoffbelastung -

ISSN 1011-1271

Internationale Gewässerschutzkommission
für den
Bodensee

LIMNOLOGISCHER ZUSTAND DES BODENSEES

Nr. 16

Jahresbericht Januar 1988 bis März 1989
– Freiwasser, Seeboden, Stickstoffbelastung –

Bearbeiter: H. Müller

– 1990 –

VORWORT

Der vorliegende Bericht der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) enthält die Ergebnisse der regelmäßigen limnologischen Freiwasseruntersuchungen des Bodensees im Jahr 1988/89 sowie der Seebodenuntersuchungen in den Jahren 1985 bis 1987. Die allgemeinen Grundlagen und limnologischen Zusammenhänge, die zum Verständnis dieses Berichtes notwendig sind, wurden im Bericht Nr. 9: Limnologischer Zustand des Bodensees - Grundlagen (Stand 1984) dargestellt.

Am Bericht haben mitgearbeitet:

Dr. Heinrich Bühner, Dübendorf
Dr. Hans-Rudolf Bürgi, Dübendorf
Dr. Ulrich Einsle, Konstanz
Dipl. phil. nat. Urs Engler, St. Gallen
Dr. Hans Güde, Langenargen
Dr. Reiner Kümmerlin, Langenargen
Dr. Helmut Müller, Langenargen (Koordination)
L. Probst, Langenargen
Dr. Henno Roßknecht, Langenargen
Dr. Christian Ruhlé, St. Gallen
Dr. Wolf Sanzin, München
Dr. Hans Gert Schröder, Langenargen
Dr. Christian Steinberg, München
Dr. Benno Wagner, Bregenz

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

Vorarlberger Umweltschutzanstalt in Bregenz:
Untersuchungen des Chemismus in der Bregenzer Bucht;
Physikalische, chemische und biologische Sedimentuntersuchungen

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

Amt für Umweltschutz und Wasserwirtschaft des Kantons Thurgau, Frauenfeld:

Terminfahrten, Messungen und Untersuchungen des Chemismus und des Phytoplanktons im Untersee-Rheinsee;

Physikalische und chemische Sedimentuntersuchungen

Finanzdepartement des Kantons St. Gallen, Jagd- und Fischereiverwaltung:

Biologische Sedimentuntersuchungen

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Institut für Seenforschung, Langenargen:

Terminfahrten und Messungen, Untersuchungen des Chemismus, des Phyto- und Zooplanktons im Obersee und Untersee-Zellersee, bakteriologische Untersuchungen;

Physikalische, chemische und biologische Sedimentuntersuchungen

Physikalisch-chemische Untersuchungen des Überlinger Sees an der Probenahmestelle zwischen Überlingen und Wallhausen wurden von der Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein (AWBR) und vom Engler-Bunte-Institut, Bereich Wasserchemie, der Universität Karlsruhe durchgeführt. Die Ergebnisse werden jeweils in den AWBR-Jahresberichten veröffentlicht und sind daher hier nicht enthalten.

INHALT

	Seite	Abb.	Tab.
Einleitung	5	1	1
Zustandsbeschreibung für das Seejahr 1988/89 (Obersee und Untersee)	6		
Langfristige Entwicklung von			
Phosphor (Obersee)		2A	
Stickstoff (Obersee)		2C	
Chlorid (Obersee)		2C	
Sauerstoff (Obersee)		2B	
Phytoplankton (Obersee)		3	
Zooplankton (Obersee)		4	
Phytoplankton (Untersee: Zellersee)		5	
Obersee:			
Abbildungen und Tabellen			
Witterung	6		
Wasserstände	7		
Thermik	8, 9		2
Sauerstoff	10, 11		2
Orthophosphat	12, 15, 23		2
Andere Phosphorverbindungen	13, 14, 15, 23, 24		2
Nährstoffinhalt	15, 23		2
Nitrat	16, 23		2
Nitrit	17, 23		2
Ammonium	18, 23		2
Stickstoff partikulär	19, 24		2
Silikat	20, 23		
Anorganische Kohlenstoffverbindungen und Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht	21, 22, 23		2
Eisen und Mangan	25		2
Gelöste organische Stoffe			2
Weitere Stoffdaten			2
Phytoplankton	26 - 28		2
Zooplankton	29 - 31		
Bakterienplankton	32		
Seeboden	33 - 40		

Untersee:	Zellersee		Rheinsee	
Abbildungen und Tabellen	Abb.	Tab.	Abb.	Tab.
Thermik	41,42	4	61,62	5
Sauerstoff	43,44	4	63,64	5
Orthophosphat	45,48,53,54	4	65,68,73,74,	5
Andere Phosphor- verbindungen	46,47,48,53	4	66,67,68,73	5
Nährstoffinhalt	48,53,	4	68,73	5
Nitrat	48,49,53,54,	4	68,69,73,74,	5
Nitrit	50	4	70	5
Ammonium	48,51,53,54,	4	68,71,73,74	5
Silikat	52,53,54,	4	72,73,74,	5
Anorganische Kohlen- stoffverbindungen und Kalk-Kohlensäure- Gleichgewicht	55,56,	4	75,76	5
Eisen	54,55	4	74,77	5
Gelöste organische Stoffe		4		5
Weitere Stoffdaten		4		5
Phytoplankton	58-60	4	78,79	5
Seeboden	82	4	80,81	5
Seeboden Gnadensee	83			

**Vergleich des limnologischen
Zustandes an verschiedenen
Untersuchungsstationen im**

Obersee	Tab. 3
Untersee	Tab. 6

Anhang

Abschätzung möglicher Auswirkungen der zunehmenden Stickstoffbe-
lastung auf den Bodensee.

Auskünfte

EINLEITUNG

Der Bericht zum Seejahr 1988/89 enthält eine kurze Beschreibung des aktuellen Seezustandes, ergänzt durch langfristige Entwicklungskurven der wichtigsten Größen, die von Jahr zu Jahr fortgeschrieben werden.

Die dann folgenden Abbildungen und Tabellen geben eine Übersicht über Örtlichkeiten, Wassertiefe und Zeitpunkt der Probenahme und Messungen sowie über die Klimabedingungen, Thermik, chemische und biologische Verhältnisse im Freiwasser. Zusätzlich enthält dieser Bericht die Ergebnisse der Seebodenuntersuchungen in den Jahren 1985 bis 1987 als Fortschreibung der Daten im IGKB-Jahresbericht Nr. 10 (1985). Für den Bodensee-Obersee beschränken sich diese Darstellungen hauptsächlich auf die zentrale Untersuchungsstation Fischbach-Uttwil. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungsstelle wurden auch die Stoffinhalte des Obersees unter Verwendung der in Tabelle 1 des Berichtes Nr. 9 (grüner Bericht) mitgeteilten Seevolumina berechnet. Quervergleiche zwischen verschiedenen Obersee-Untersuchungsstationen werden nur für einige ausgewählte Parameter durchgeführt.

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 der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Institut für Seenforschung, den damit direkt befaßten Stellen zugestellt.

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.

ZUSTANDSBESCHREIBUNG FÜR DAS SEEJAHR 1988/89

Bodensee-Obersee:

Die Phosphorkonzentration hat im Seejahr 1988/89 weiter abgenommen, allerdings nicht so deutlich wie im Vorjahr. Der Gehalt an anorganischem Stickstoff - im wesentlichen als Nitrat - ist im Vergleich zum Vorjahr ebenfalls etwas zurückgegangen, zeigt jedoch langjährig eine steigende Tendenz. Die Biomasse des Phytoplanktons erreichte 1988 infolge der für das Algenwachstum günstigen Witterungsbedingungen und des bei den gegenwärtigen Phosphorkonzentrationen noch zu hohen Nährstoffpotentials im Jahresmittel den höchsten jemals beobachteten Wert. Zusammen mit der in den warmen Wintern 1987/88 und 1988/89 fehlenden Vollzirkulation und damit einer ungenügenden Wiederbelüftung des Tiefenwassers hatte diese hohe Algenbiomasse eine erhebliche Verschlechterung der Sauerstoffsituation im Vergleich zu 1987 zur Folge. Für 1989 muß mit einer weiteren Zunahme des Sauerstoffdefizits im Tiefenwasser gerechnet werden.

Die **hydrologische Situation** des Sees war durch die unvollständige vertikale Durchmischung in den beiden warmen Wintern 1987/88 und 1988/89 gekennzeichnet. Im April 1988 erreichte sie in Seemitte zwischen Fischbach und Uttwil maximal 170 m Tiefe und Anfang März 1989 lediglich kurzzeitig 120 m Tiefe. Die Temperatur der oberen durchmischten Schicht lag im Winter 1987/88 homogen bei ca. 4,5⁰ C. Darunter wurde eine allmähliche Temperaturabnahme bis auf 4,0⁰ C in 250 m Tiefe bis zum Beginn der neuen Schichtungsperiode beibehalten.

Im noch wärmeren Winter 1988/89 bestand unterhalb der nur kurzzeitig vorhandenen maximalen Durchmischungstiefe von 120 m eine fast lineare Schichtung der Temperatur von etwa 4,7 nach 4,3⁰ C in 250 m Tiefe. Diese lineare Schichtung erstreckte sich im Februar und März 1989 aufwärts bis in 40 m Tiefe, wo die Temperatur 4,9⁰ C erreichte. Dieses Verhalten zeigt an, daß die vertikale Durchmischung weitgehend unterdrückt war. Die Oberflächenschicht hatte eine geringste Temperatur von 4,9⁰ C. Die Folgen dieser mangelnden Durchmischung werden im Abschnitt "Sauerstoffsituation" erläutert.

Der relativ geringe Umfang von Sommerhochwässern 1988 hielt die Menge des in den Tiefenwasserkörper eindringenden Zuflußwassers gering.

Die **Phosphorkonzentration** hat seit dem letzten Berichtsjahr weiter abgenommen. Die Abnahme fiel mit 4 mg/m³ jedoch deutlich geringer aus als im Jahr davor mit 11 mg/m³. Die Konzentration des Gesamtphosphors im Rohwasser

betrug im Frühjahr 1989 während der Monate Februar bis Anfang April im Mittel 43 mg/m^3 (1988: 47 mg/m^3 , Abb. 2 A). Orthophosphat-P wurde von Anfang August bis Anfang November in begrenzten Tiefenbereichen der Produktionszone bis auf 1 mg/m^3 und darunter aufgezehrt (1987 von Anfang Juli bis Anfang November). Trotz der stetigen weiteren Abnahme des Phosphors liegt seine mittlere Konzentration jedoch immer noch so hoch, daß bei entsprechenden Witterungsverhältnissen eine den See stark belastende Steigerung der Algenbiomasse ermöglicht wird. Die 1988 beobachtete Algenentwicklung hat dies bestätigt.

Der **anorganische Stickstoff** (N aus $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$) mit Nitrat als Hauptkomponente hat 1988 gegenüber dem Vorjahr wieder leicht abgenommen auf $0,97 \text{ mg/l}$ (1987: $1,00 \text{ mg/l}$). Insgesamt ist während der letzten 15 Jahre dennoch eine leicht steigende Tendenz erkennbar (Abb. 2 C).

Chlorid als Anzeiger vielfältiger Salzbelastung hat 1988 im Jahresmittel wiederum deutlich zugenommen und eine Konzentration von 6 mg/l erreicht (Abb. 2 C).

Die **Sauerstoffsituation** des Sees im Jahre 1988 war insgesamt ungünstiger als im Vorjahr. Insbesondere die Sauerstoffkonzentration über Grund stieg von Anfang August bis Anfang November nie über 6 mg/l an. Im Oktober sank sie auf einen Minimalwert von $4,6 \text{ mg/l}$, der deutlich unter jenem der beiden Vorjahre lag (1986: $5,6 \text{ mg/l}$; 1987: $6,4 \text{ mg/l}$; Abb. 2 B). Dies ist einerseits auf die mangelhafte Wiederbelüftung wegen der fehlenden Vollzirkulation im Winter 1987/1988 und des geringen Nachschubs von sauerstoffreichem Zuflußwasser in den Tiefenwasserkörper und andererseits auf die überdurchschnittliche Belastung durch die sehr hohe Phytoplanktonbiomasse im Jahr 1988 zurückzuführen (s. u.).

Die Wiederbelüftung des Sees während der unvollständigen Frühjahrszirkulation 1989 war gegenüber der bereits im Vorjahr unbefriedigenden Situation nochmals verschlechtert. Während im Jahre 1987 der mittlere Gesamtgehalt des Sees im März und April bei $504\,000 \text{ t}$ Sauerstoff und 1988 noch bei $519\,000 \text{ t}$ lag, erreichte der See im selben Zeitraum 1989 nur noch $464\,000 \text{ t}$. Außerdem lag die Sauerstoffkonzentration 1 m über Grund im April 1989 mit $5,9 \text{ mg/l}$ für diese Jahreszeit extrem niedrig (1987: $9,1 \text{ mg/l}$; 1988: $7,3 \text{ mg/l}$). Von einer wirkungsvollen Wiederbelüftung kann damit im Frühjahr 1989 nicht gesprochen werden. Die weitere Entwicklung der grundnahen Sauerstoffsituation wird nun davon abhängen, inwieweit während der bevorstehenden Stagnationsphase andere Sauerstoffversorgungsmechanismen wie beispielsweise sauerstoffreiche Zuflußwässer in der Lage sein werden, eine zu erwartende weitere Verschärfung des Sauerstoffmangels wenigstens teilweise auszugleichen.

Das **Phytoplankton** erreichte 1988 mit $33,9 \text{ g/m}^2$ (0 - 20 m Tiefe) im Jahresmittel die höchste bisher im Obersee beobachtete Biomasse (Abb. 3). Die Werte der beiden Vorjahre (1986: $24,7 \text{ g/m}^2$; 1987: $18,8 \text{ g/m}^2$) lagen erheblich niedriger. Ursache dieser hohen Durchschnittsbiomasse war vor allem die außerordentlich starke Frühjahrsblüte mit einem Maximum von 135 g/m^2 Ende April. Ferner waren weitere starke Algenentwicklungen Anfang Juli (87 g/m^2), Mitte August (36 g/m^2) und Ende Oktober (65 g/m^2) festzustellen (Abb. 27).

Unter den einzelnen Algengruppen hatten wie in den Vorjahren die Diatomeen und Cryptophyceen den Hauptanteil. Die Diatomeen waren im Frühjahr vor allem durch *Fragilaria crotonensis*, *Stephanodiscus astraea* und *Stephanodiscus hantzschii* vertreten. Anders als in den Vorjahren war *Fragilaria crotonensis* über den ganzen Winter 1987/88 anzutreffen, möglicherweise als Folge der relativ warmen Witterung. Im Sommer herrschte *Fragilaria crotonensis* vor, begleitet von der Grünalge *Pandorina morum* und später gefolgt von *Tabellaria fenestrata*, *Ceratium hirundinella* und verschiedenen Cryptophyceen. Auch während des Herbstmaximums erreichte *Fragilaria crotonensis* einen erheblichen Anteil an der Gesamtbiomasse. Die Cryptophyceen zeigten wie in den Vorjahren vor allem im Frühjahr und Herbst eine stärkere Entwicklung, waren jedoch in geringerer Menge übers ganze Jahr anzutreffen. Unter den Dinophyceen erreichten vor allem *Gymnodinium helveticum* Anfang Mai und *Ceratium hirundinella* im Sommer und Herbst erhebliche Biomassen. Blaualgen, hauptsächlich vertreten durch *Anabaena spiroides* und *Aphanizomenon flos-aquae*, traten nur während des Herbstmaximums auf und waren insgesamt wie in den Vorjahren von untergeordneter Bedeutung.

Insgesamt ist somit wegen des hohen Produktionspotentials der gegenwärtig im See vorhandenen Phosphormenge noch keine direkte Auswirkung der rückläufigen Phosphorkonzentrationen auf die Gesamtbiomasse des Phytoplanktons erkennbar. Das starke Auftreten der Kieselalge *Tabellaria fenestrata* ist jedoch als Hinweis auf die weitere Oligotrophierung des Sees zu werten. Seit Mitte der 60er Jahre war diese Form fast vollständig aus dem Bodensee-Pelagial verschwunden.

Beim **Crustaceenplankton** sind die Bestände insgesamt angestiegen (Abb. 4). Dies ist auf ein Anwachsen der Individuenzahlen von *Mesocyclops* und *Cyclops vicinus* zurückzuführen, welches den weiteren Rückgang der Bestandsdichten aller Cladoceren sowie von *Eudiaptomus* und *Cyclops abyssorum* mehr als ausgeglichen hat.

Die Individuendichte h e r b i v o r lebender Copepoden nahm insgesamt

wieder zu, bedingt durch die relativ hohen, den Rückgang von Eudiaptomus überwiegenden Individuenzahlen der Copepodide von Mesocyclops und Cyclops vicinus. Diese Strukturverschiebungen bewirkten eine Änderung im zeitlichen Verlauf des Fraßdruckes auf das Phytoplankton.

Bei den *carnivor* oder *omnivor* lebenden Copepoden war vor allem ein deutliches Anwachsen der Bestände der erwachsenen Stadien von Cyclops vicinus im Frühjahr sowie der älteren Stadien von Mesocyclops zu vermerken.

Cyclops abyssorum, die vor 1950 einzige Cyclops-Art des Bodensees, war mengenmäßig kaum noch bedeutend. Acanthocyclops trat nur spärlich auf.

In qualitativer Hinsicht fiel auf, daß sich der Anteil der Daphnia galeata gegenüber Daphnia hyalina weiter verringert hat (Abb. 29 - 31).

Die Bakterien - bestimmt durch Direktzählung - erreichten wie im Vorjahr in der Produktionszone (0 - 20 m) schon Ende April ein erstes Maximum mit bis zu 7×10^6 Zellen pro ml. Nach einem Abfall Anfang Mai wurde ein weiteres Maximum (bis zu 10^7 Zellen pro ml) in der zweiten Maihälfte beobachtet. Das im Gegensatz zum Vorjahr wieder stark ausgeprägte Klarwasserstadium Anfang Juni war auch wieder von einem typischen Abfall der Bakteriendichten auf Werte im Bereich von 5×10^6 Zellen/ml begleitet. Nach einem erneuten Anstieg in der zweiten Junihälfte war in der ersten Juliwoche ein sommerliches Bakterienminimum im Bereich von 4×10^6 Zellen pro ml zu verzeichnen. Danach schwankten die Werte bis Ende September im Bereich von $5 - 7 \times 10^6$ Zellen pro ml. Der Abfall zu den winterlichen Minimumwerten begann Anfang Oktober und war im Januar mit beobachteten Zelldichten im Bereich von 10^6 Zellen abgeschlossen. In diesem Bereich bewegten sich die Zählwerte für das Tiefenwasser das ganze Jahr über (Abb. 32).

Der Seeboden wurde an acht repräsentativen Profilen untersucht (Abb. 1). Zur Bewertung der Belastung des Seebodens wurde der Belastungsindex IPA herangezogen, der neben der Individuendichte auch die Artenzusammensetzung der Oligochaeten berücksichtigt (vgl. IGKB-Bericht Nr. 38, 1988). Hier zeigte sich trotz der bisherigen Sanierungsmaßnahmen im Vergleich zu 1975/1978 und 1981/83 noch keine eindeutige Belastungsverminderung. Dies ist durch die langjährige Akkumulation von abbaufähigem organischem Material und die Bioturbation vor allem durch die Oligochaeten zu erklären. In einzelnen Fällen wurden durch lokale Einflüsse Erhöhungen der Individuenzahl und des IPA festgestellt (z. B.: Langenargen-West, Seemoos), in anderen Fällen Verringerungen der Individuenzahlen und des IPA (z. B. Bottighofen). Insgesamt ist aber für den Bodensee-Obersee kein Trend abzulesen (Abb. 33 - 40).

Bodensee-Untersee:

Die **Phosphorkonzentration** - bestimmt als Gesamtphosphor im Rohwasser - lag 1988 im Rheinsee im Jahresmittel (volumengewichtet) mit $42,5 \text{ mg/m}^3$ deutlich unter dem Vorjahreswert (50 mg/m^3). Im Zellersee lag sie mit 55 mg/m^3 höher als im Rheinsee, hat jedoch im Vergleich zu 1987 (62 mg/m^3) und den Vorjahren ebenfalls weiter abgenommen.

Der Inhalt an **anorganischem Stickstoff** (N aus $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$) mit Nitrat als Hauptkomponente hat im Rheinsee im Vergleich zum Vorjahr etwas abgenommen. Im Zellersee blieb er dagegen unverändert.

Die **Sauerstoffsituation** war 1988 ungünstiger als im Vorjahr. Im Zellersee, der bereits seit Jahrzehnten in der Tiefe zeitweise völligen Sauerstoffschwund aufweist, war in Seebodennähe von Ende Juni bis Ende Oktober totaler Sauerstoffschwund zu verzeichnen (im Vorjahr nur im Oktober und November). Im Rheinsee lagen die Sauerstoffkonzentrationen in Seebodennähe von Mitte August bis Anfang November unter 1 mg/l .

Beim **Phytoplankton** im Zellersee lag das Jahresmittel der Biomasse mit 48 mg/m^2 (0 - 20 m Tiefe) deutlich über den Vorjahren (1987: 37 g/m^2 ; 1986: 32 g/m^2 ; Abb. 5). Wie im Obersee war eine sehr starke Frühjahrspopulation mit einem Maximum von 236 g/m^2 im März die Hauptursache. Dominierend waren dabei die Kieselalgen *Stephanodiscus astraea*, *Stephanodiscus hantzschii* und *Fragilaria crotonensis*. Weitere Entwicklungsmaxima lagen im April (134 g/m^2) mit den Hauptarten *Asterionella formosa*, *Stephanodiscus hantzschii* und *Stephanodiscus astraea*, im Juli (75 g/m^2) mit *Fragilaria crotonensis* und *Melosira granulata* und im September (51 g/m^2) mit *Stephanodiscus binderanus*, *Mougeotia thylespora* und mehreren *Cryptomonas*-Arten.

Im Winter 1988/89 waren neben *Stephanodiscus astraea* und *Stephanodiscus hantzschii* hauptsächlich *Cryptomonaden* vertreten (Abb. 59 und 60).

Der **Seeboden** zeigte im Gnadensee, Zellersee und Rheinsee Fluktuationen von Jahr zu Jahr und in einzelnen Tiefenstufen. Ein eindeutig gerichteter Trend war weder für die Individuendichte noch für den IPA feststellbar (Abb. 80 - 83).

Bewertung und Schlußfolgerungen

Die trotz weiterer Phosphorabnahme im Jahre 1988 beobachteten hohen Algenbiomassen und die Verschlechterung der Sauerstoffsituation machen deutlich, daß sich der See immer noch in einem labilen Zustand befindet. Unter entsprechenden Witterungsbedingungen reicht das derzeitige Nährstoffpotential noch aus, erhebliche Biomassen entstehen zu lassen. Der sauerstoffzehrende Abbau dieser organischen Substanz kann - wie sich 1988 gezeigt hat - in Verbindung mit milden, windarmen Wintern ohne wirkungsvolle Zirkulation und geringem Zustrom sauerstoffreicher Zuflußwässer in die Tiefenzone zu einer kritischen Situation beim Sauerstoffhaushalt führen. Denn letztlich ist für den Seezustand die Menge der den Sauerstoffhaushalt belastenden Algenbiomasse entscheidend. Sie wird maßgeblich vom Phosphorgehalt des Sees beeinflusst. Daraus folgt zwingend die Notwendigkeit, die von der Kommission geforderte Absenkung der Phosphorkonzentration unter 30 mg/m^3 baldmöglichst zu erreichen. Dies erfordert ohne zeitliche Verzögerung sowohl die konsequente Verwirklichung der von der Kommission im Bau- und Investitionsprogramm 1986 - 1995 beschlossenen und bereits in Angriff genommenen abwassertechnischen Maßnahmen, als auch die Umsetzung der in der Denkschrift vorgeschlagenen Maßnahmen im Bereich der Landwirtschaft.

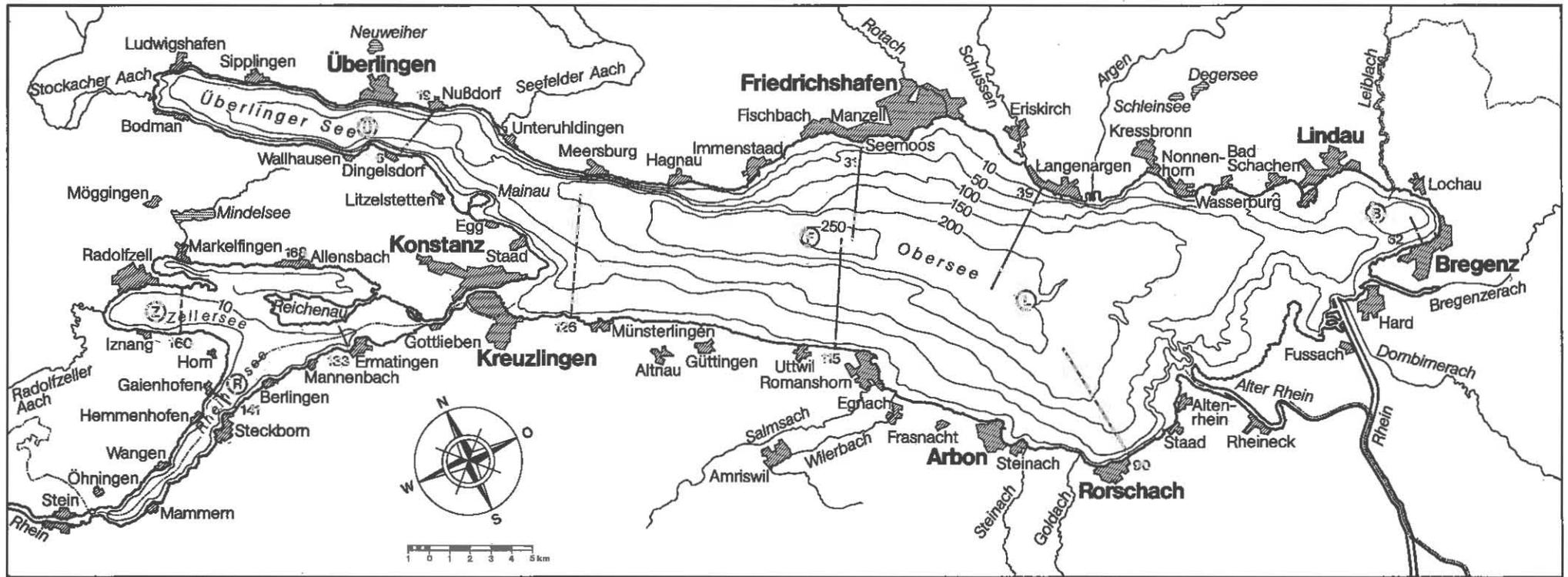


Abb. 1: Der Bodensee mit Lage der Untersuchungsstellen

a) Freiwasser:

Obersee: Fischbach-Uttwil (F)
 Langenargen-Arbon (L)
 Bregenzer Bucht (B)
 Überlinger See (Ü)

Untersee: Zellersee (Z)
 Rheinsee (R)

b) Seeboden:

Obersee: Profil Dingelsdorf (6)
 Profil Nußdorf (19)
 Profil Seemoos (31)
 Profil Langenargen-West (39)
 Profil Bregenz (62)
 Profil Rorschach (90)
 Profil Uttwil (115)
 Profil Bottighofen (126)

Untersee: Profil Ermatingen

- Insel Reichenau (133)
 Profil Steckborn
 - Gaienhofen (141)
 Profil Iznang-Ost
 - Mettnau (160)
 Profil Allensbach
 - Mittelzell (168)

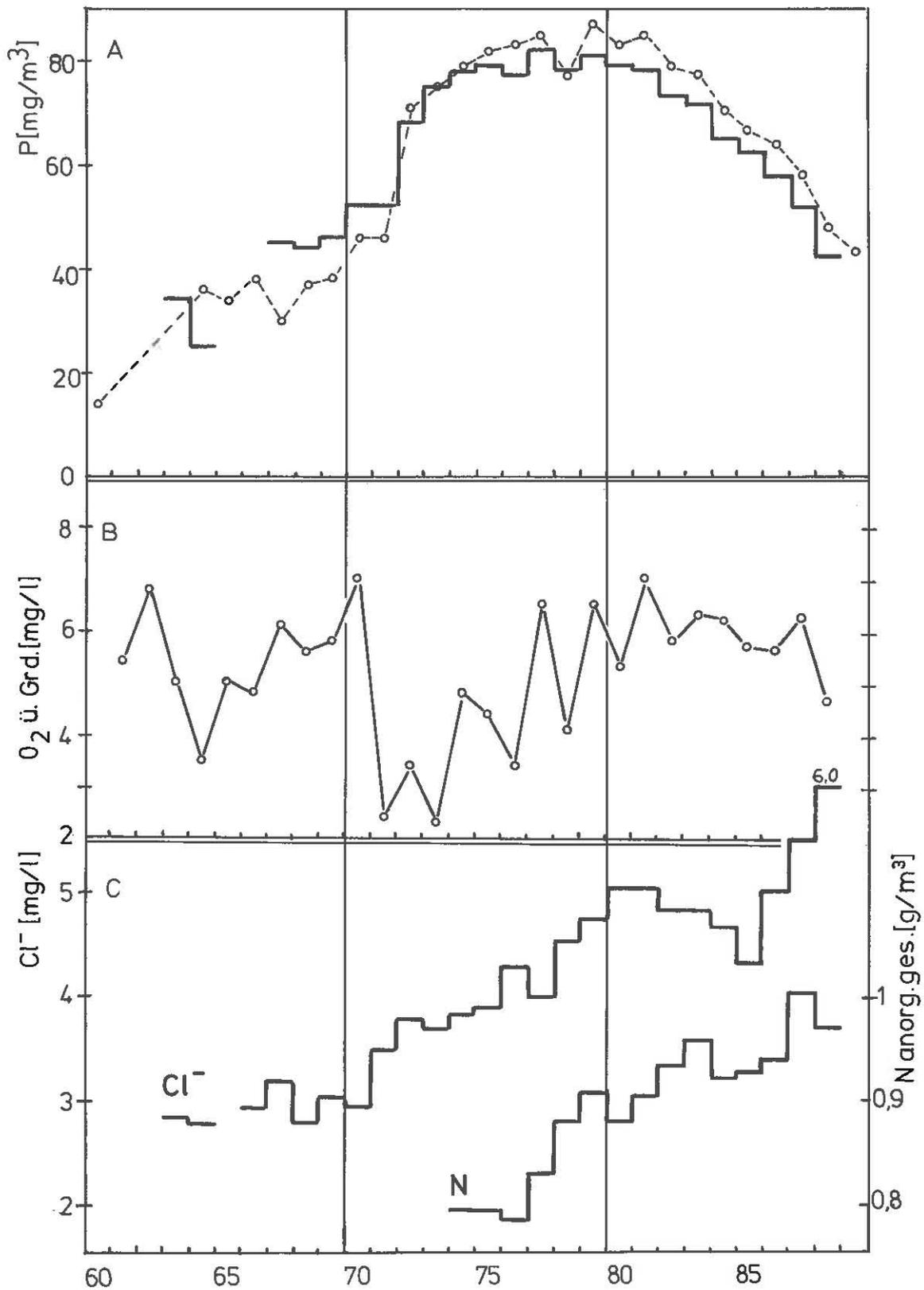


Abb. 2: Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Langfristige Entwicklung der Phosphor-, Sauerstoff-,
Stickstoff-, und Chloridkonzentration.

- A. — : Gesamtphosphor im Rohwasser, Jahresmittel,
volumengewicht
 ---- : Gesamtphosphor im Rohwasser, Konzentration während
 der Vollzirkulation
- B. Sauerstoffkonzentration, Minimalwerte 1 m über Grund
- C. Cl⁻: Chlorid, Jahresmittel volumengewichtet
 N: Stickstoff aus NO₃⁻ + NO₂⁻ + NH₄⁺, Jahresmittel,
 volumengewichtet.

Abb. 3
Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Langfristige Entwicklung des Phytoplanktons,
Biomassen in g/m² (0–20 m Tiefe) im Jahresmittel

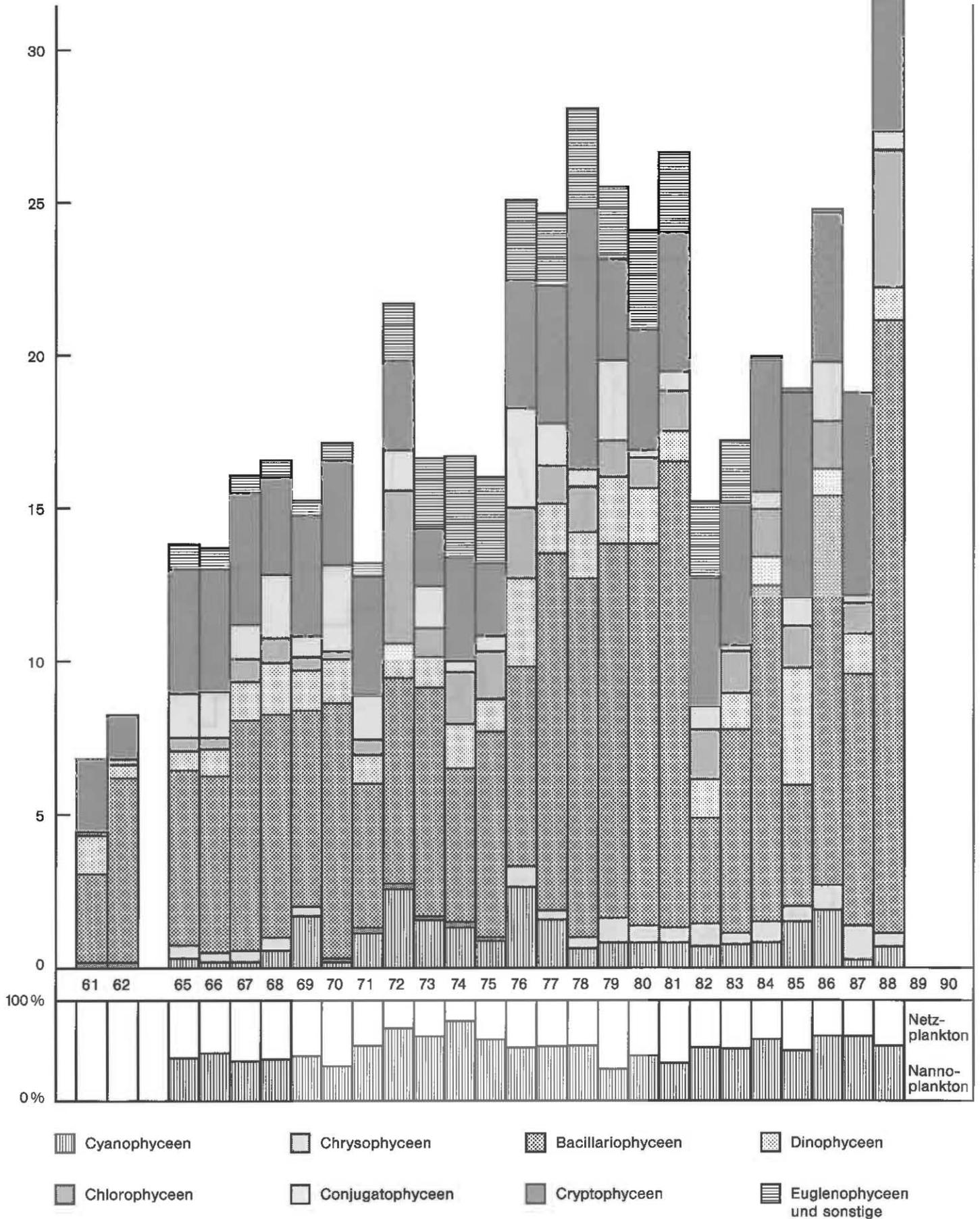
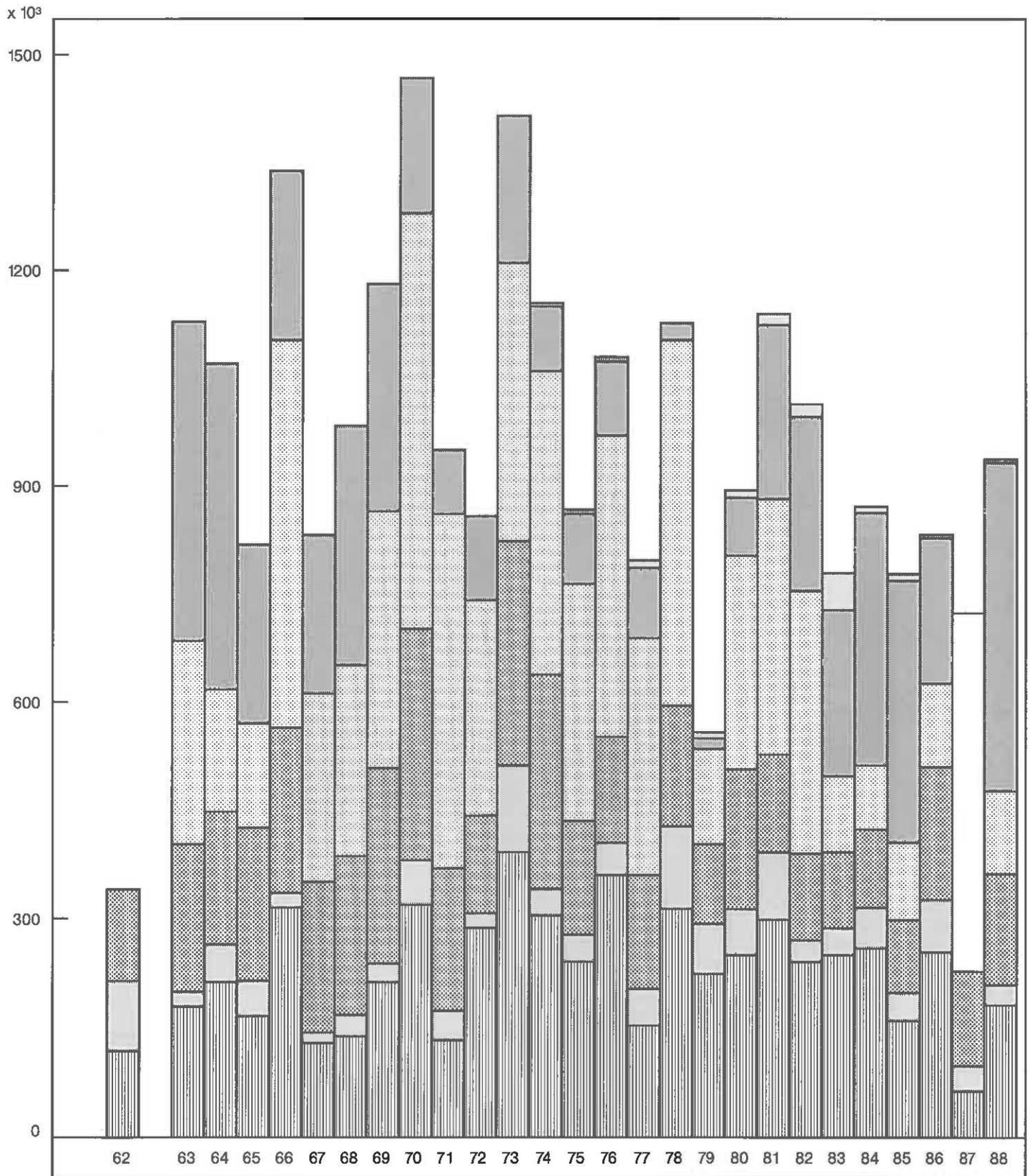
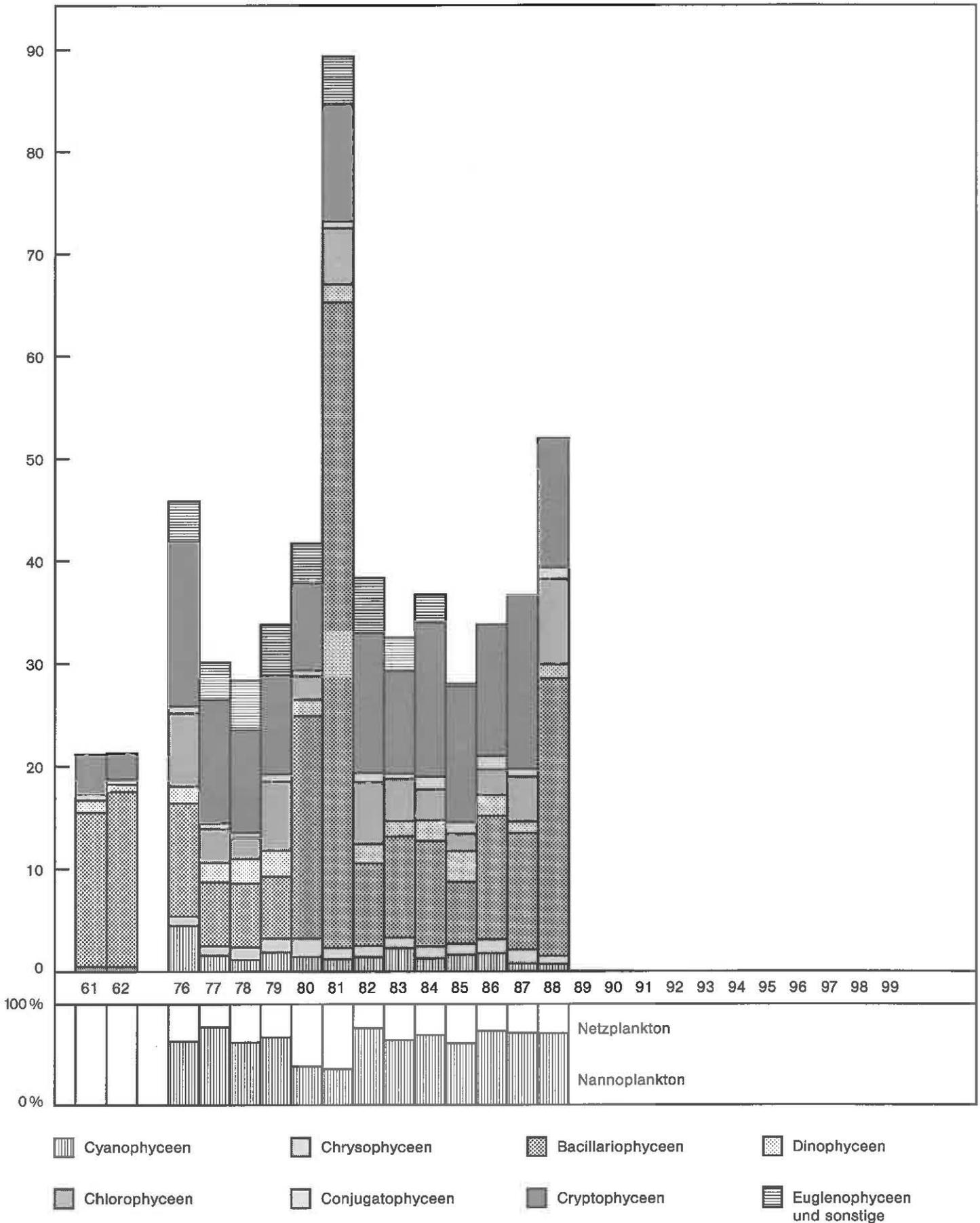


Abb. 4
Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Langfristige Entwicklung des Crustaceenplanktons,
Jahresmittelwerte (Tiere/m²)



- | | | |
|--|---|--|
|  Daphnia |  übrige Cladoceren |  Eudiaptomus |
|  Cyclops abyssorum,
Cyclops vicinus |  Mesocyclops |  Acanthocyclops |
|  Cyclops ssp. (1987 wurden die Cyclops- und Mesocyclopsarten nicht getrennt gezählt). | | |

Abb. 5
Bodensee – Untersee, Zellersee:
Langfristige Entwicklung des Phytoplanktons,
Biomassen in g/m² (0–20 m Tiefe) im Jahresmittel



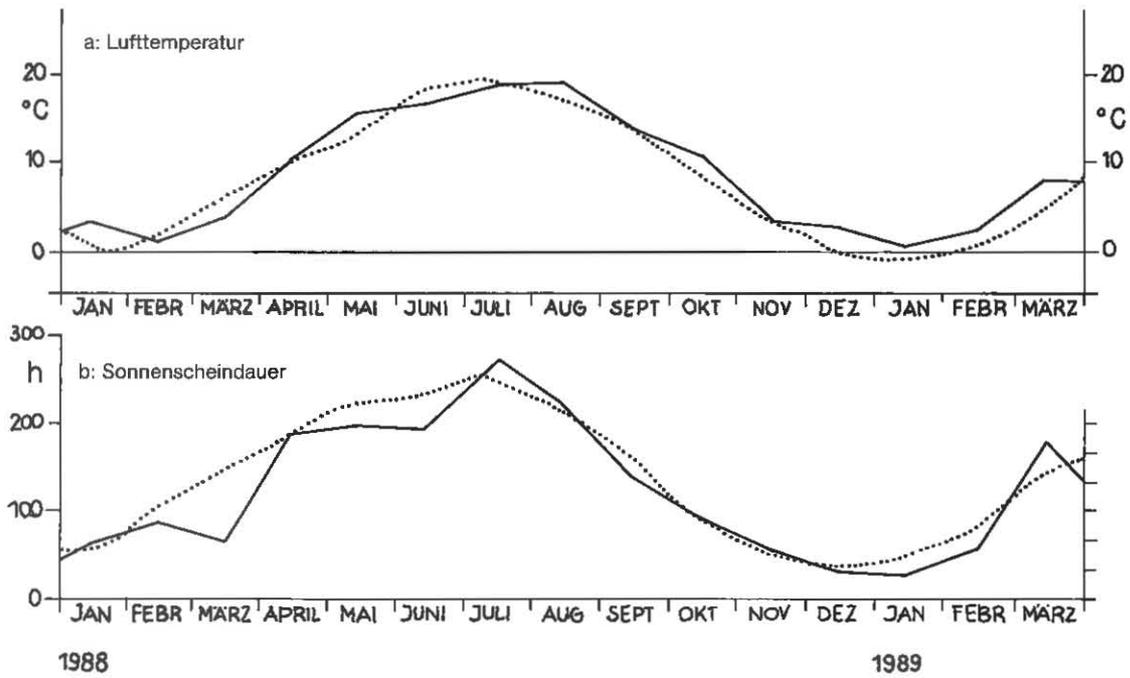


Abb. 6: Bodensee – Obersee:
 Monatliche Klimadaten der Wetterwarte Konstanz*)
 a. — Monatsmitteltemperatur
 langjährige Monatsmitteltemperatur (1931–1960)
 b. — monatliche Sonnenscheindauer in h
 langjährige monatliche Sonnenscheindauer in h (1951–1970)
 *) Die Wetterstation Friedrichshafen wurde aufgelöst

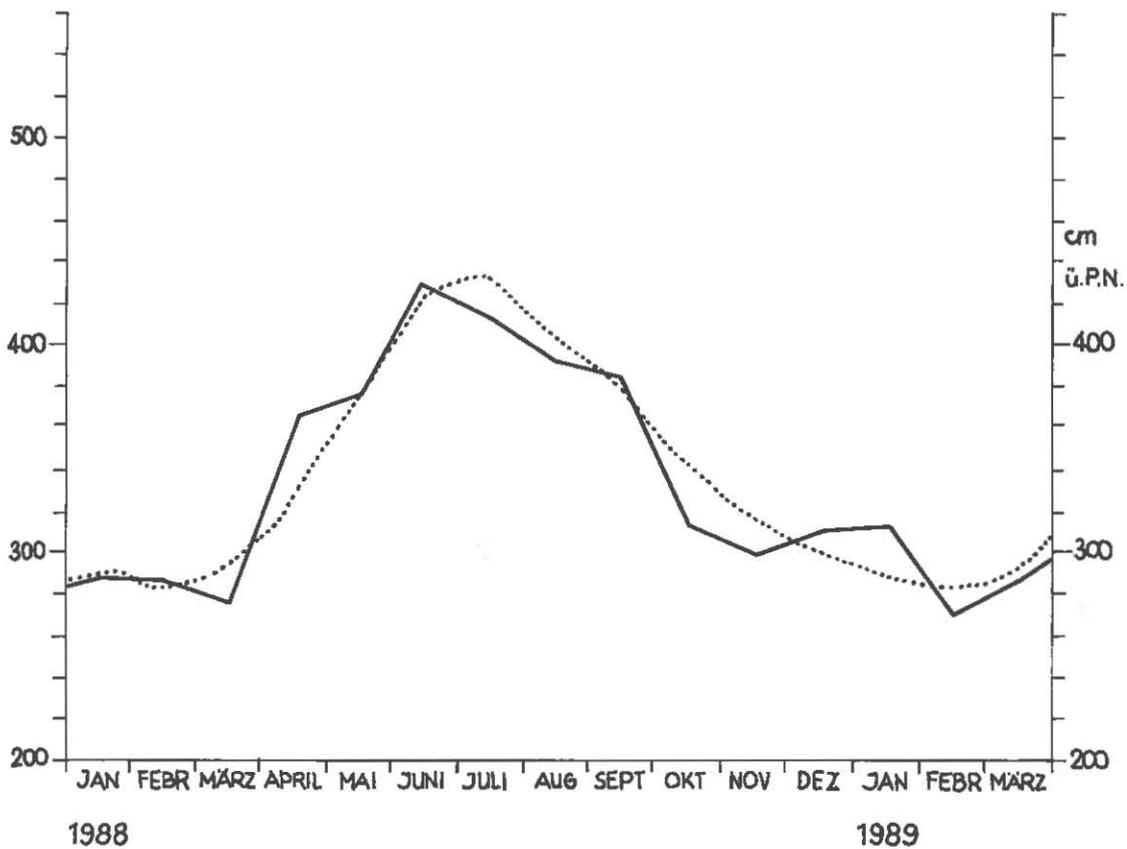


Abb. 7: Bodensee – Obersee:
 Wasserstand am Pegel Konstanz
 — mittlerer monatlicher Wasserstand
 langjähriger monatlicher Wasserstand (1877–1964)

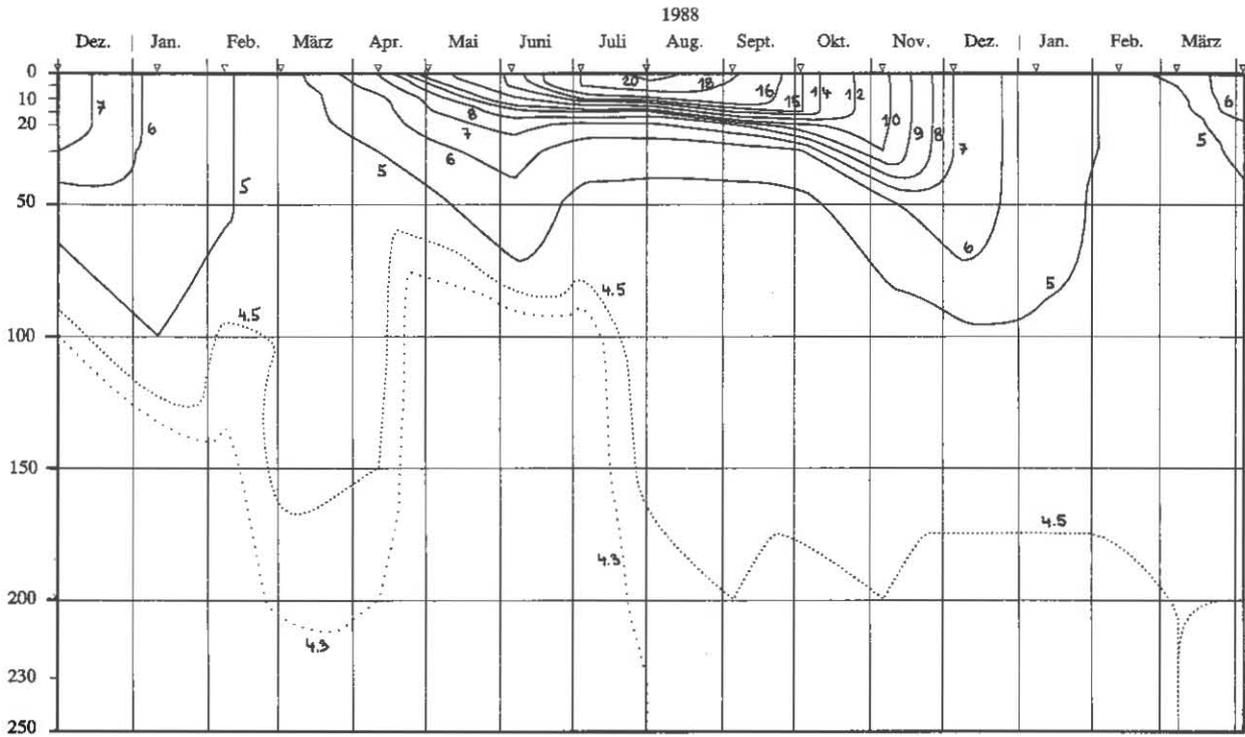


Abb. 8: Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Temperatur °C

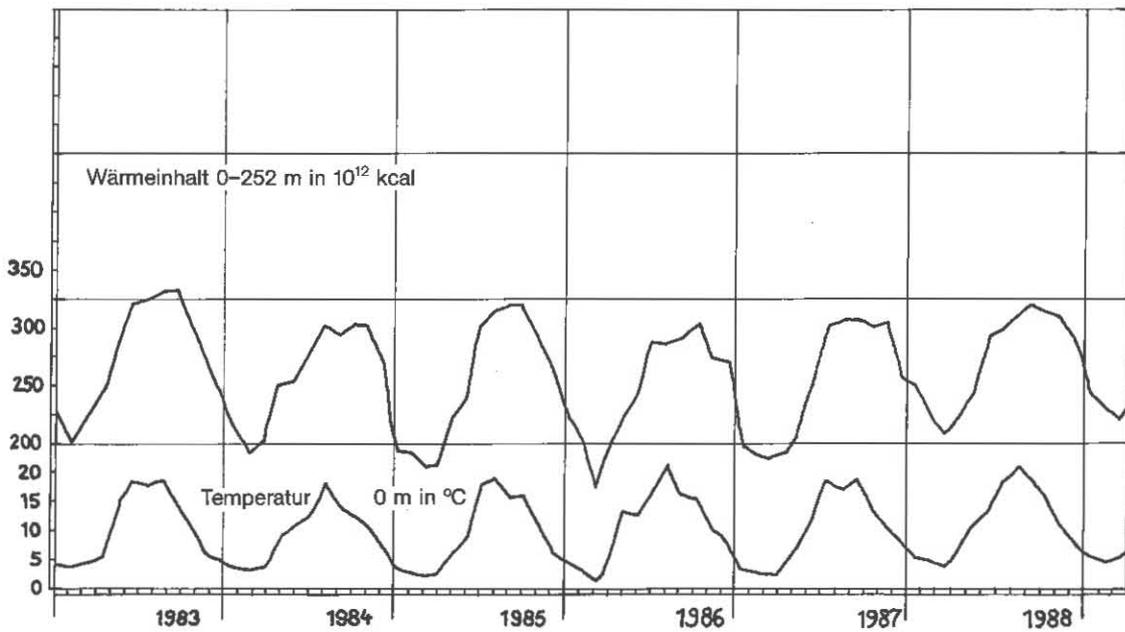


Abb. 9: Bodensee – Obersee:
Thermik

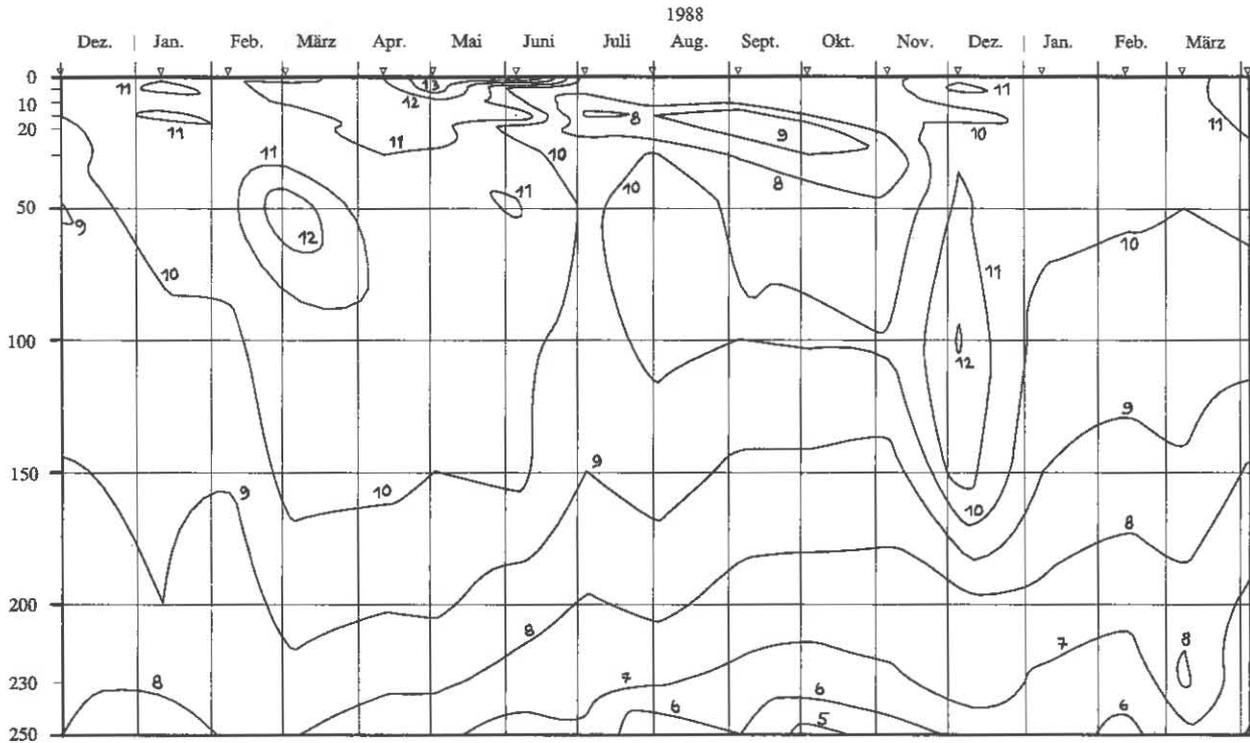


Abb. 10: Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Sauerstoff (mg/l)

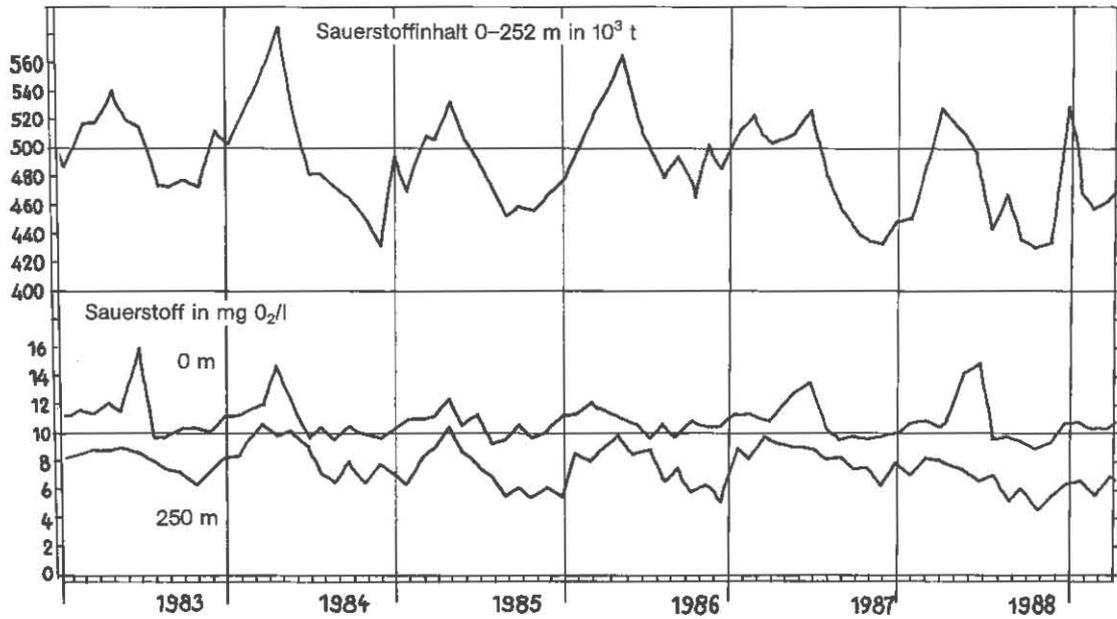


Abb. 11.: Bodensee – Obersee:
Sauerstoffinhalt 0-252 m und Sauerstoffkonzentration 0 bis 250 m Tiefe

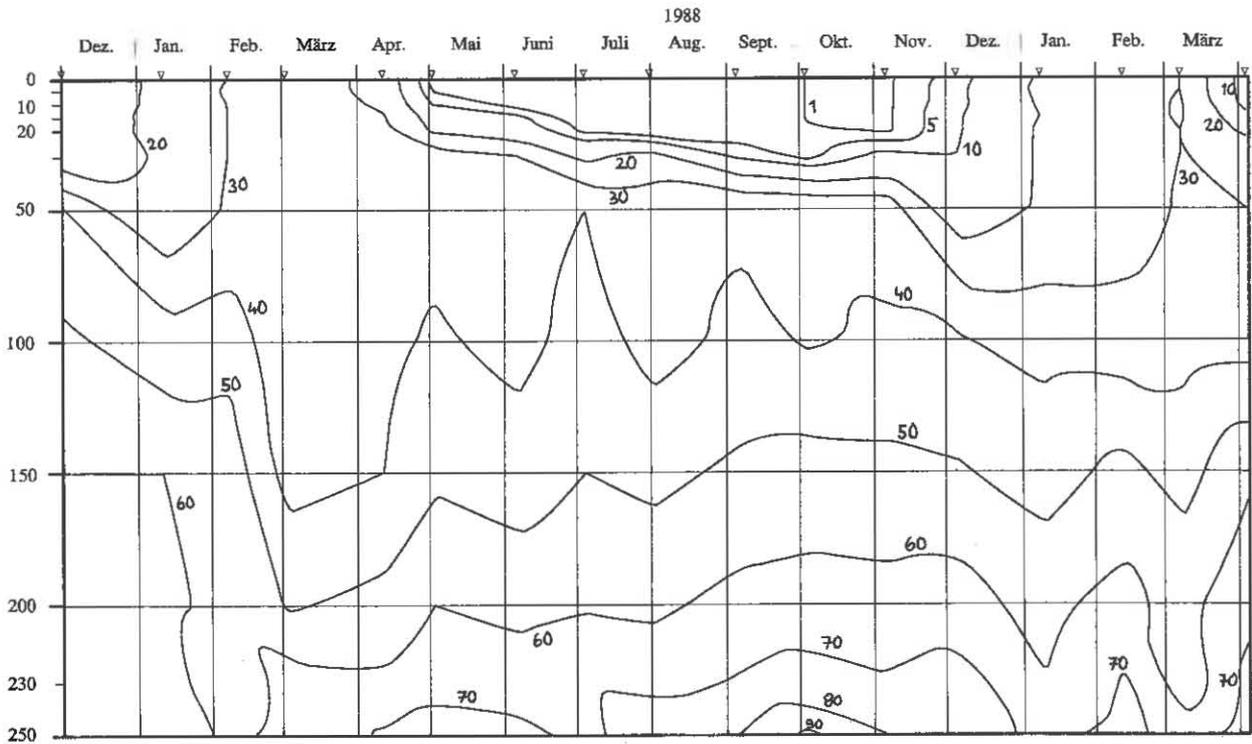


Abb. 12: Bodensee - Obersee, Fischbach-Uttwil:
Orthophosphat - Phosphor (mg/m^3)

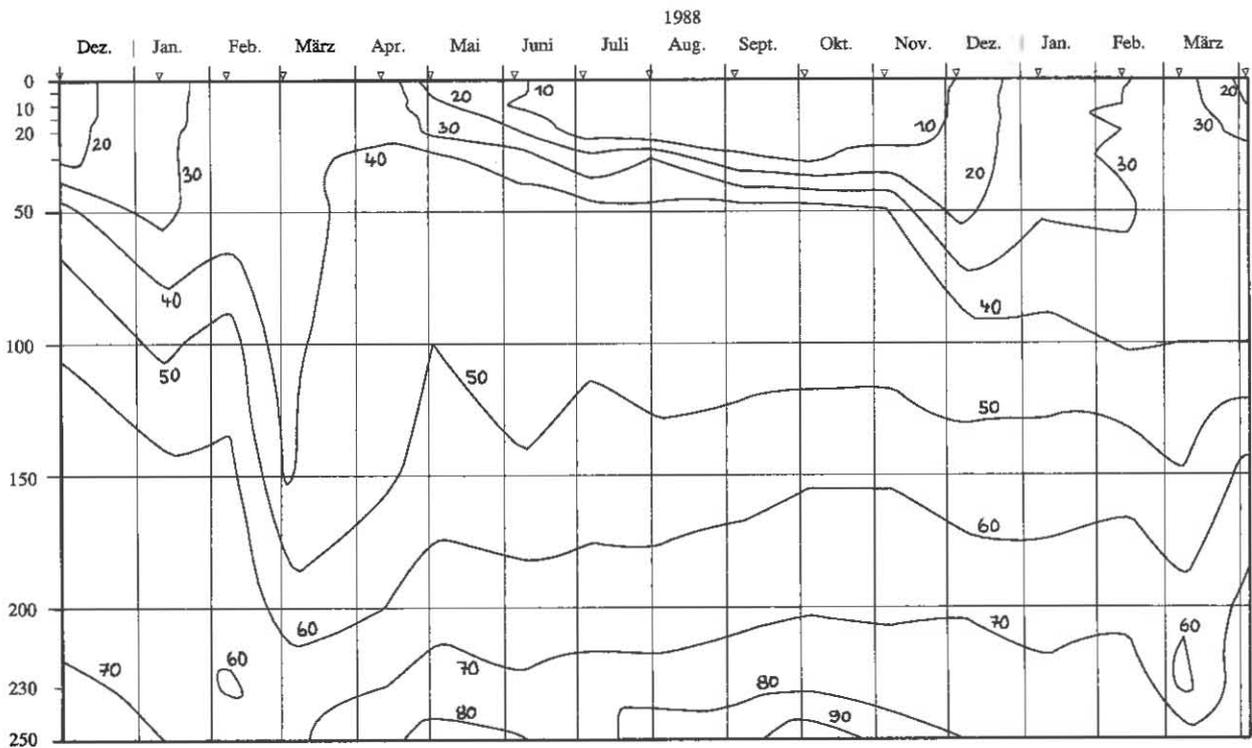


Abb. 13: Bodensee - Obersee, Fischbach-Uttwil:
Gesamter gelöster Phosphor (mg/m^3)

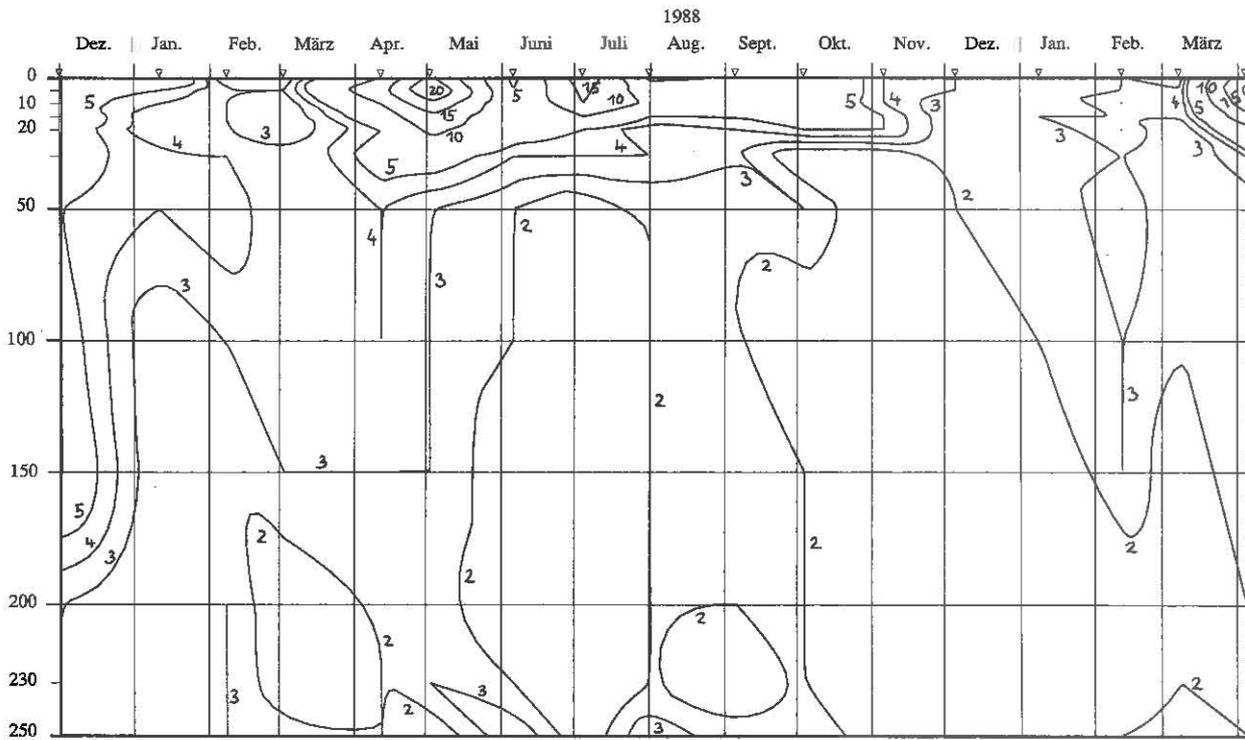


Abb. 14: Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Partikulärer Phosphor (mg/m^3)

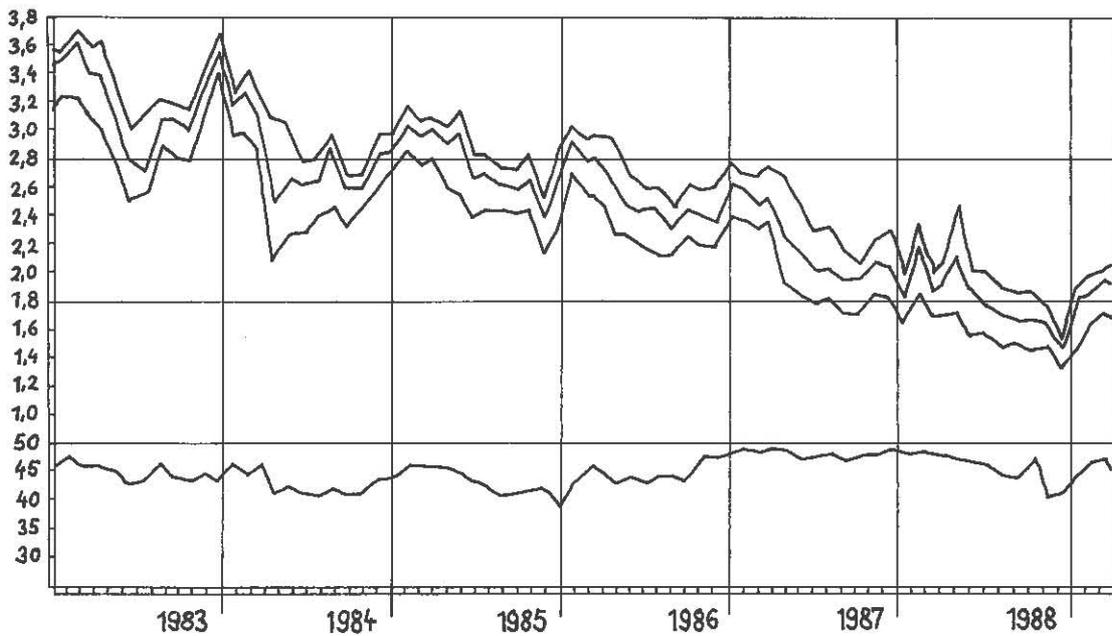


Abb. 15: Bodensee – Obersee:
Nährstoffinhalt (P, $\text{NO}_3\text{-N}$) 0–250 m Tiefe

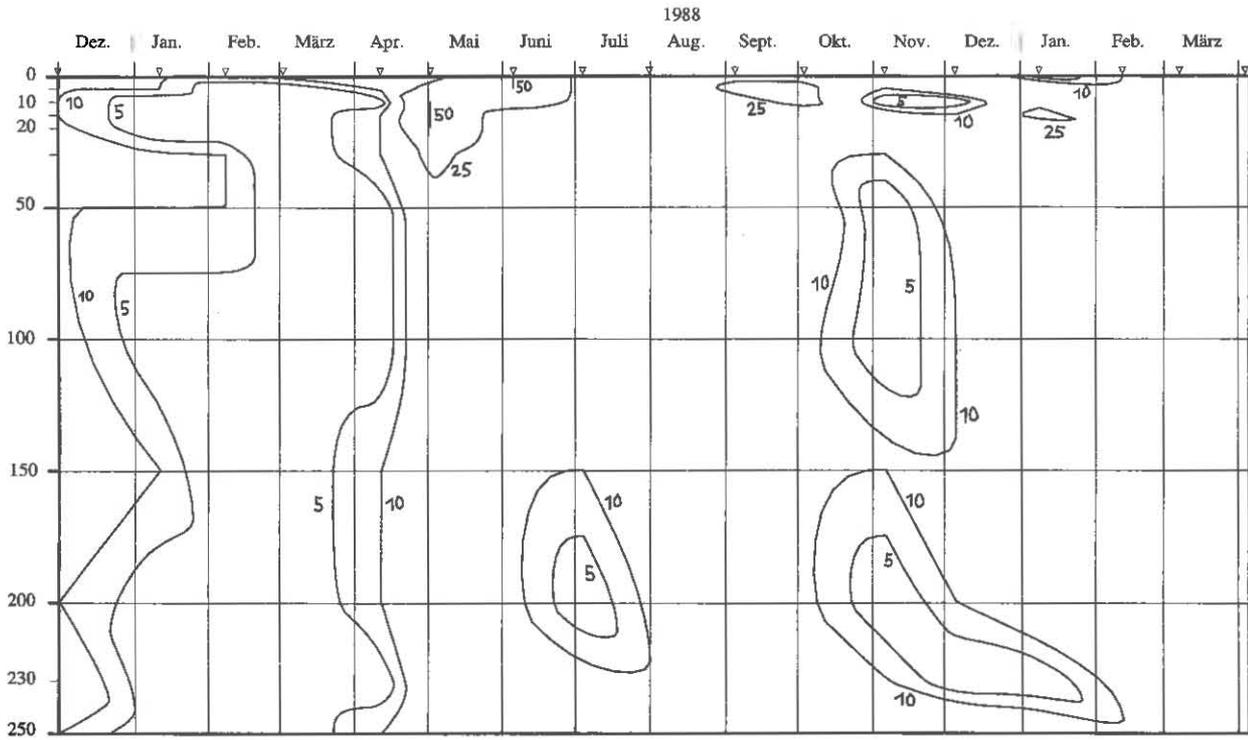


Abb. 18: Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Ammonium – Stickstoff (mg/m^3)

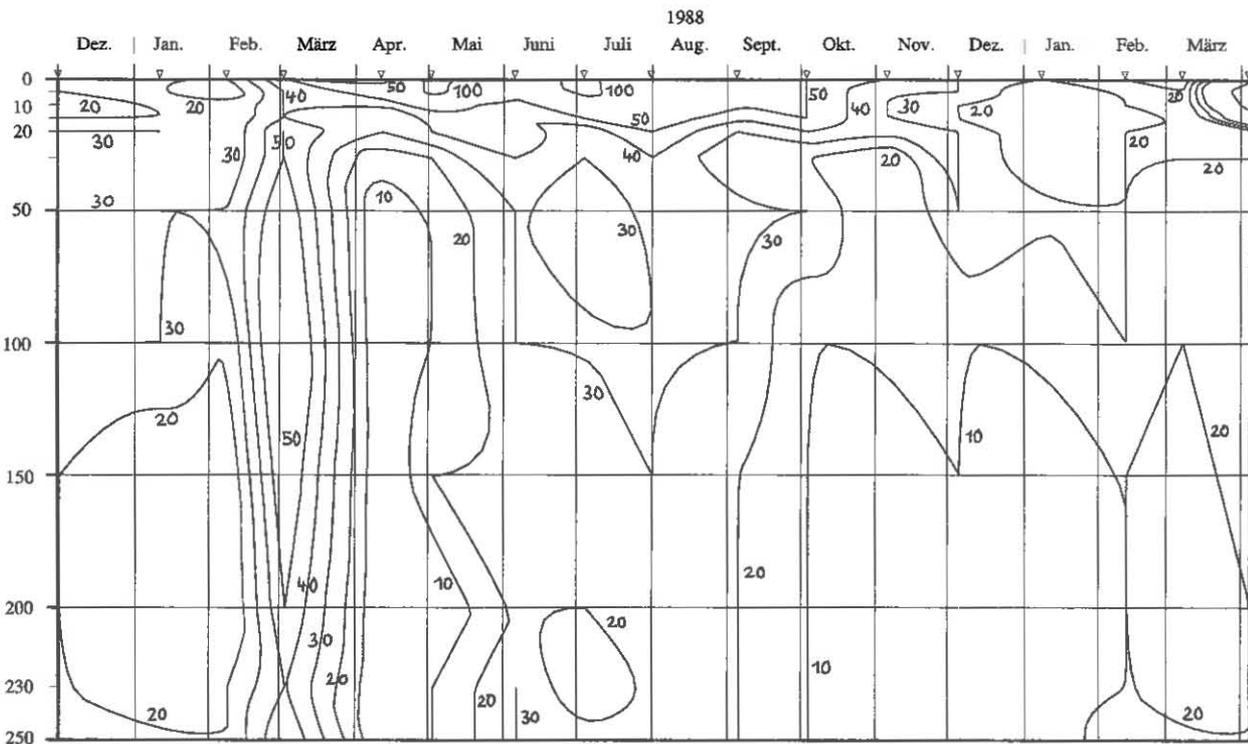


Abb. 19: Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Partikulärer Stickstoff (mg/m^3)

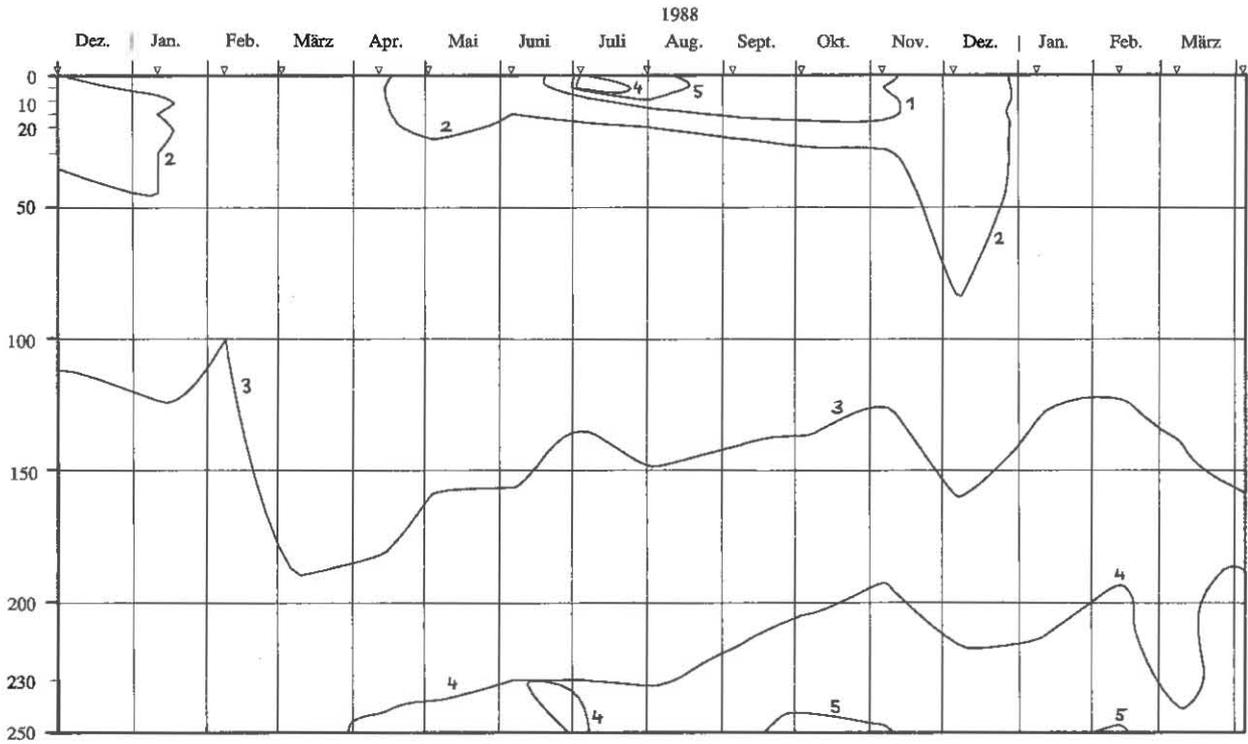


Abb. 20: Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Silikat (mg/l)

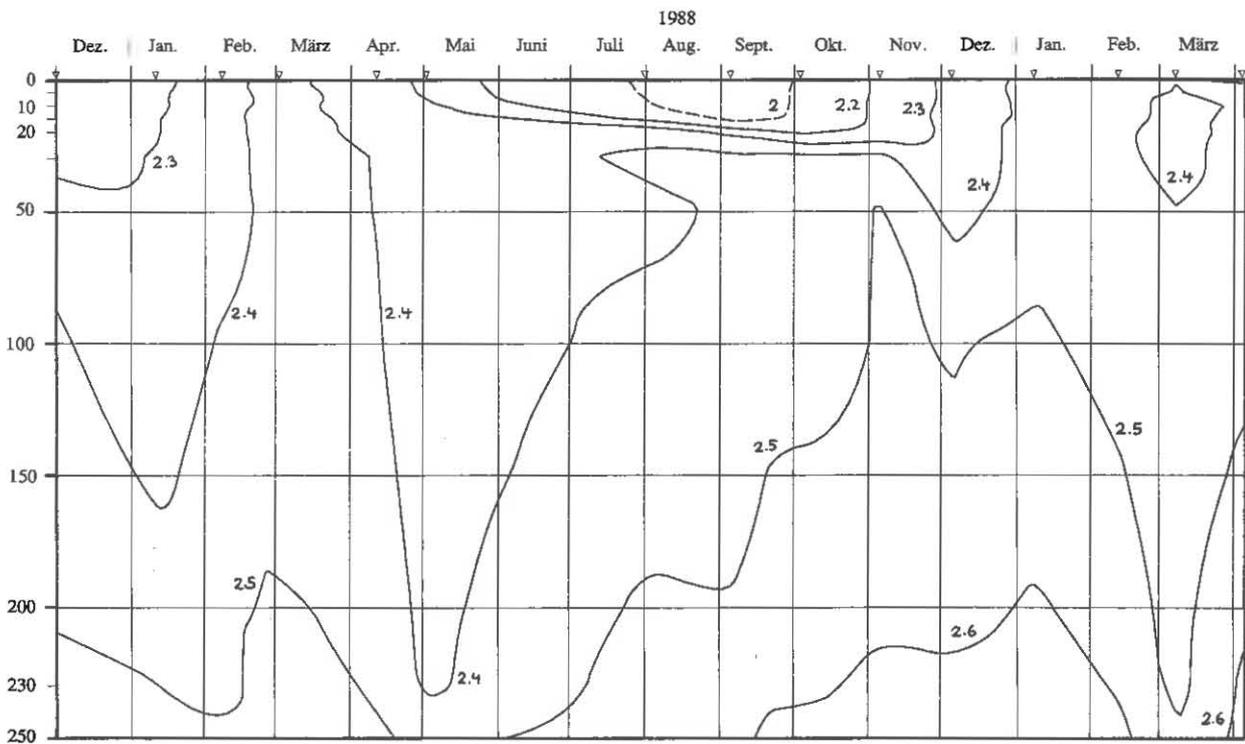


Abb. 21: Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Anorganischer Kohlenstoff (mmol/l)

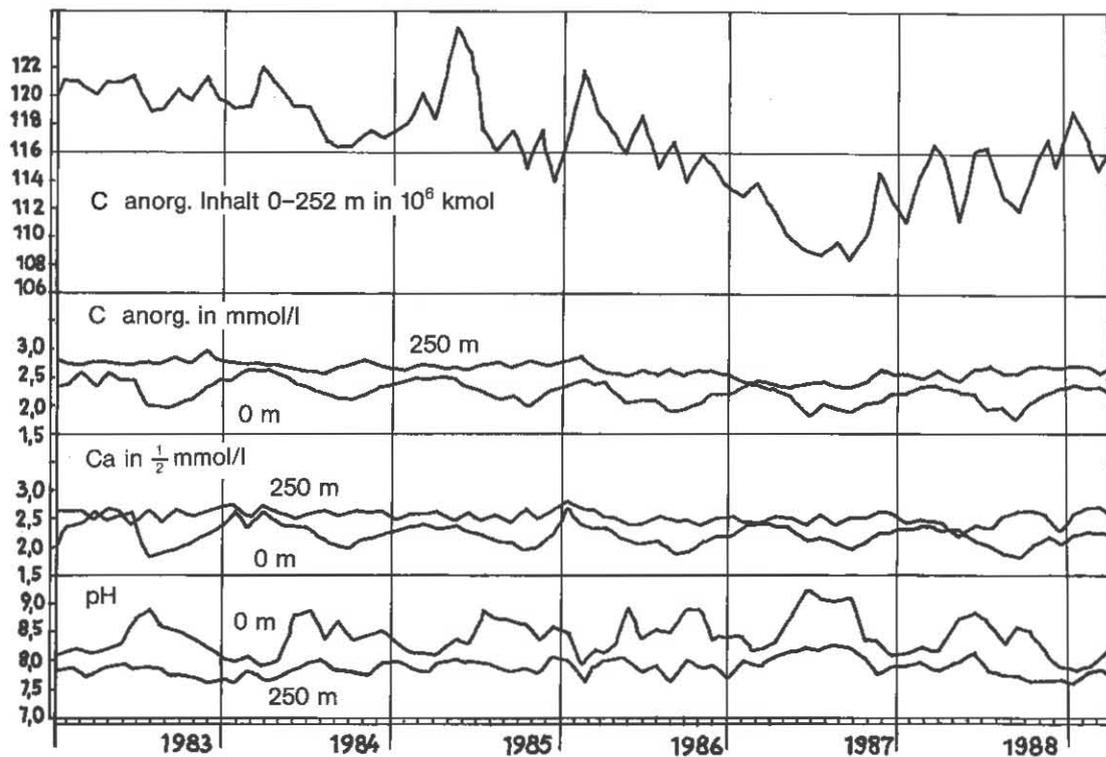


Abb. 22: Bodensee – Obersee:
Anorganischer Kohlenstoff, Inhalt 0–252 m Tiefe
Konzentrationen von anorg. Kohlenstoff, Calcium; pH-Wert

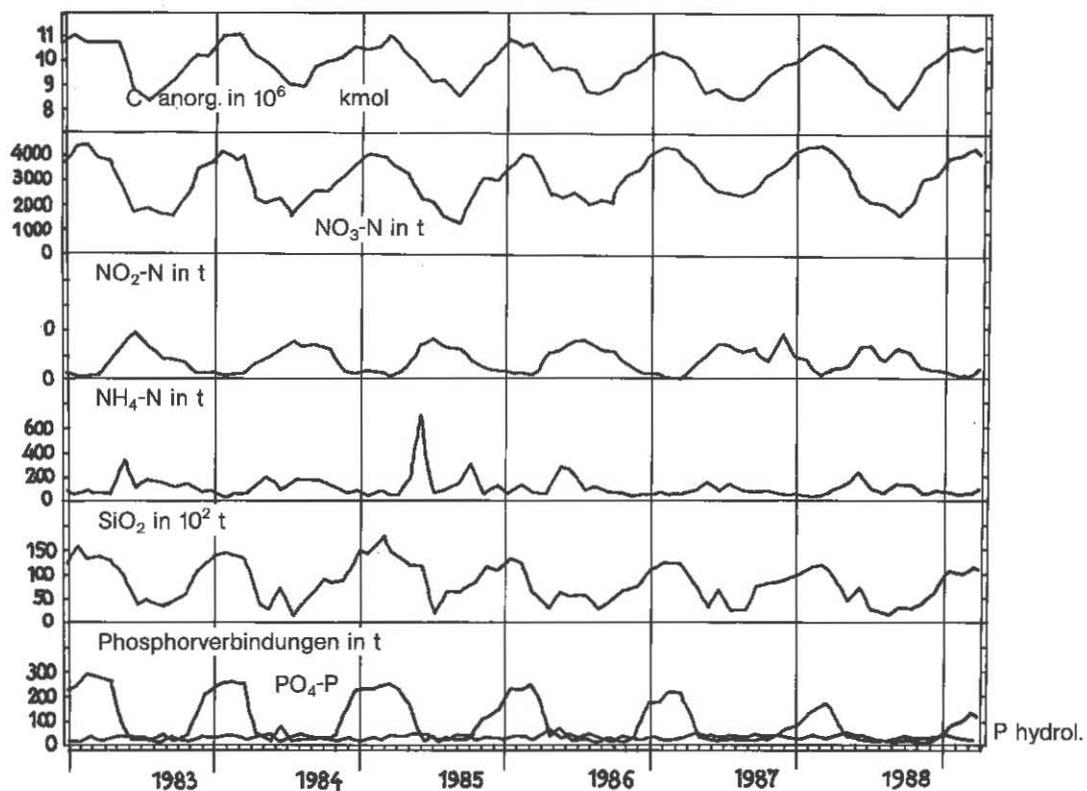


Abb. 23: Bodensee – Obersee:
Nährstoffinhalt (Phosphor, Stickstoff, Silikat,
anorg. Kohlenstoff) im Epilimnion 0–10 m Tiefe

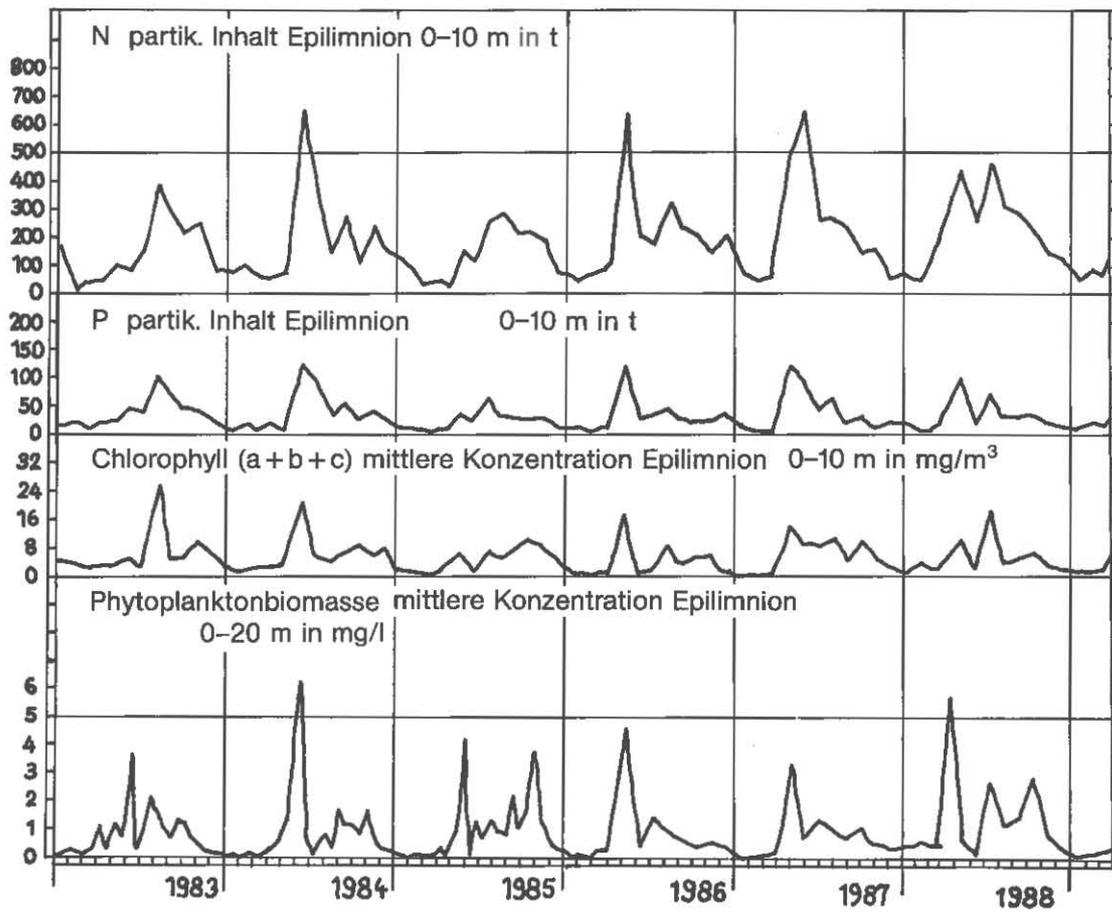


Abb. 24: Bodensee – Obersee:
Chemische Biomasseindikatoren und Algenbiomasse

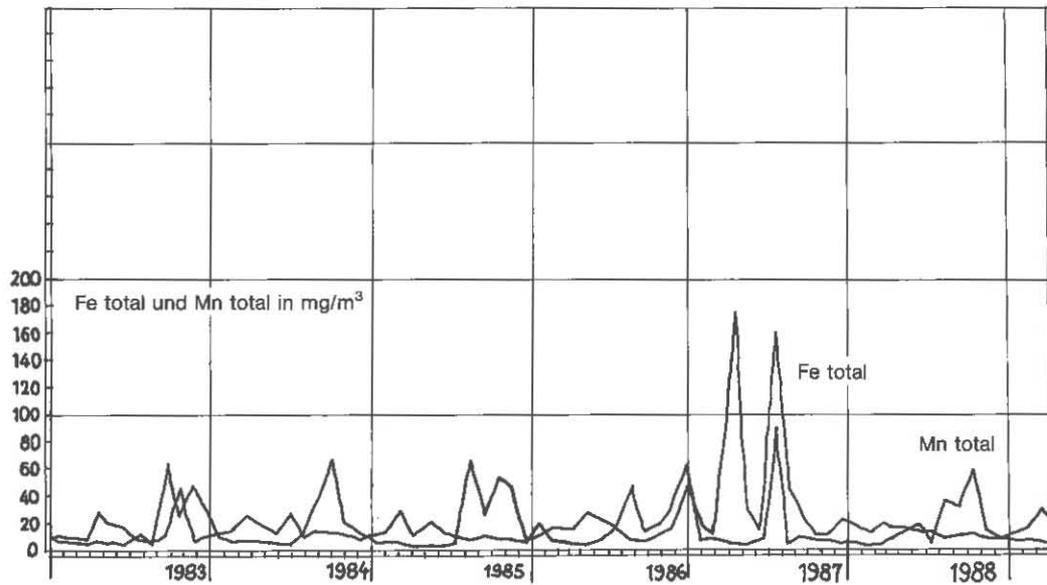


Abb. 25: Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Konzentrationen von Eisen total und Mangan total in 250 m Tiefe

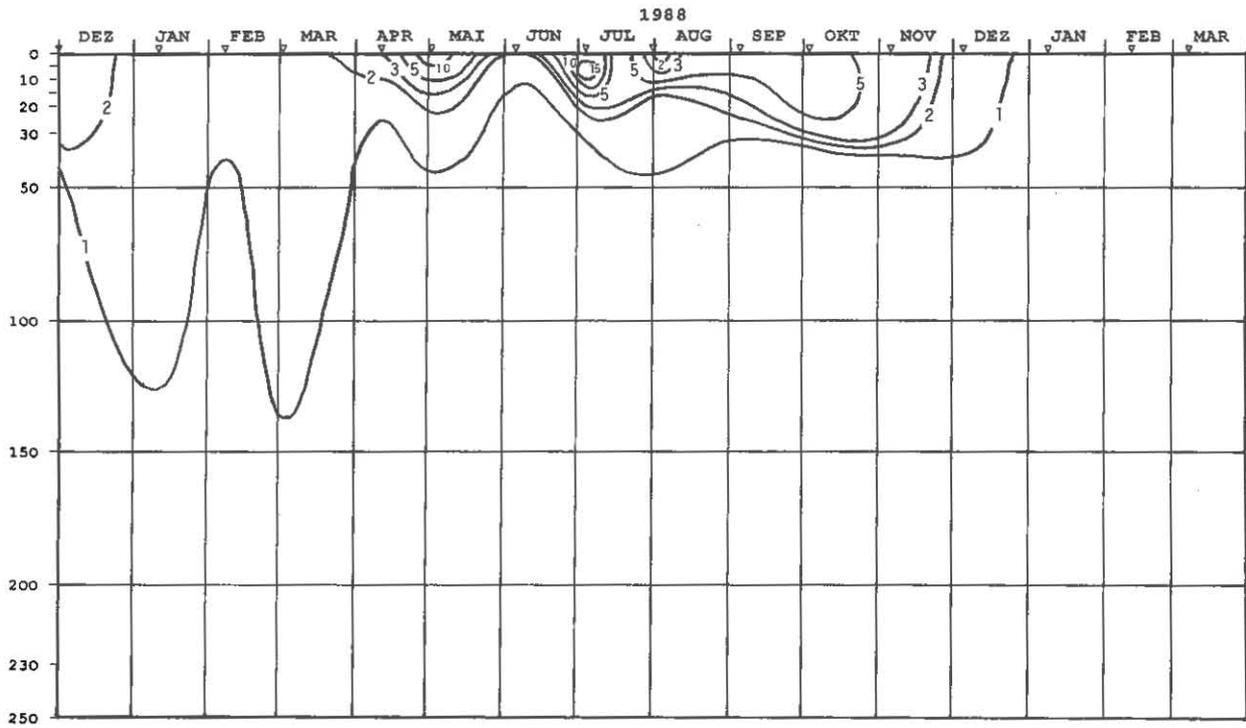


Abb. 26: Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Chlorophyll a (mg/m^3)

Abb. 27
Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Entwicklung des Phytoplanktons, Biomassen in g/m² (0–20 m Tiefe)
Monatsmittel 1988/89

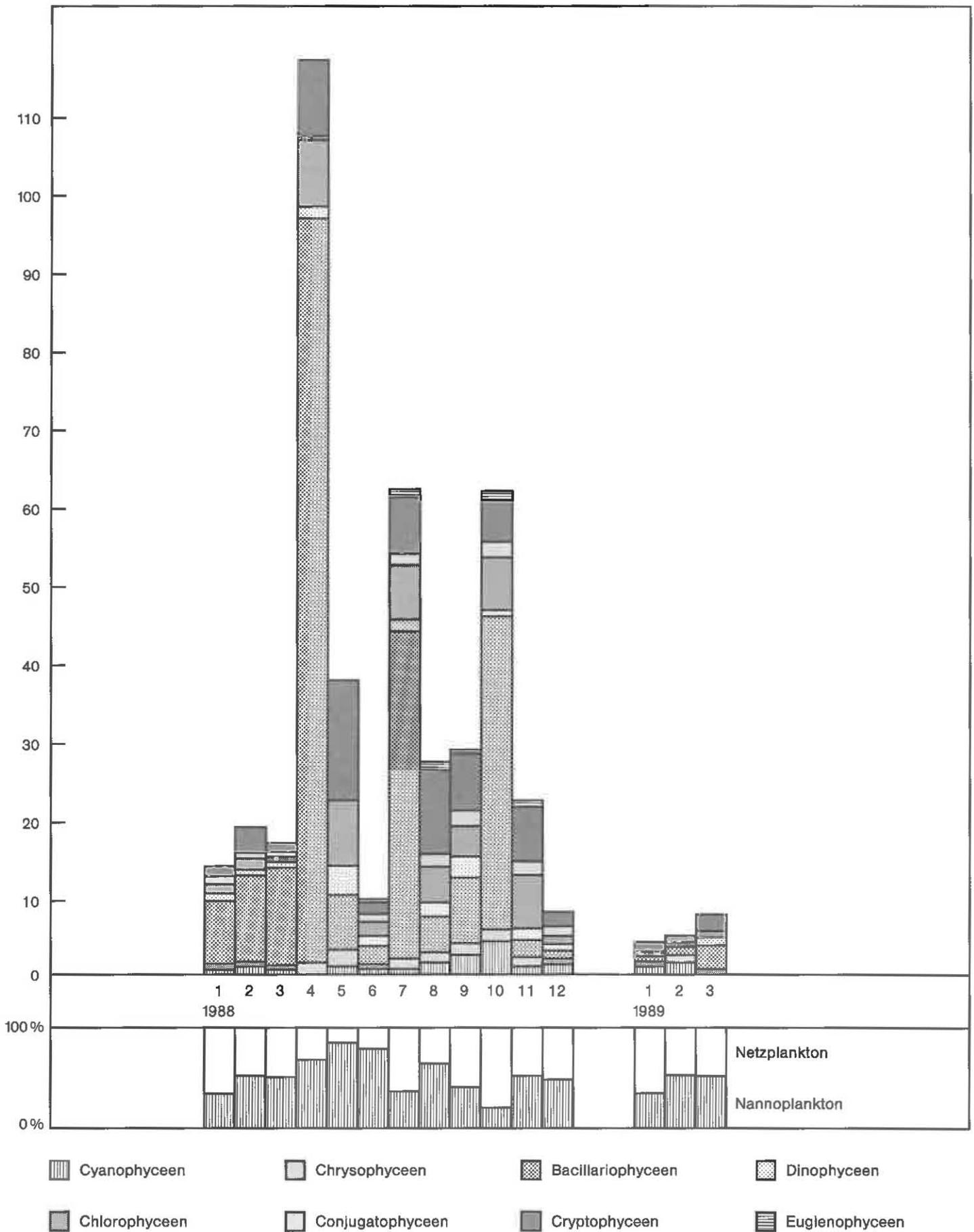
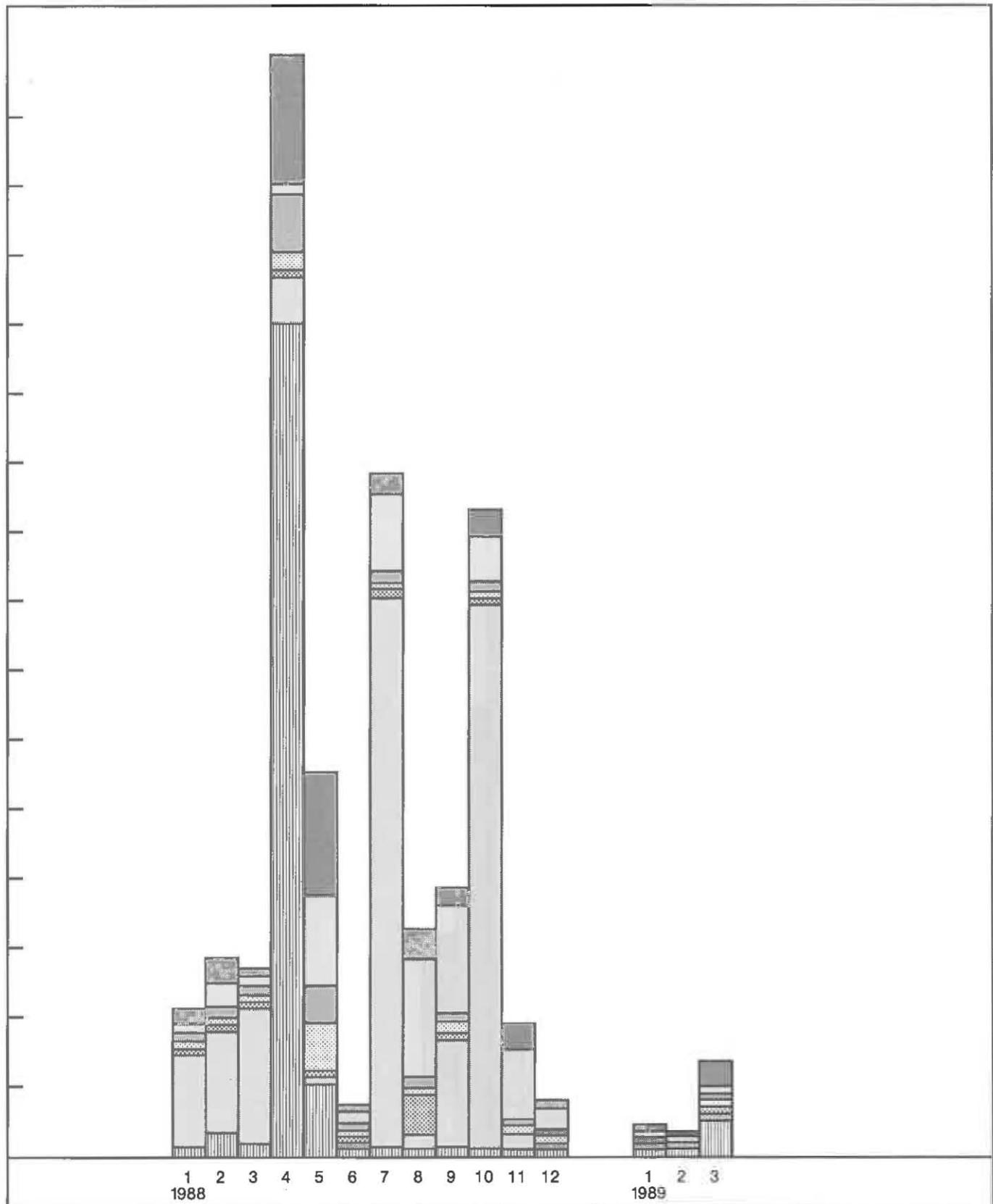


Abb. 28

Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:

**Entwicklung des Phytoplanktons, Biomassen der Hauptarten in g/m² (0–20 m Tiefe)
Monatsmittel 1988/89**



-
-

Stephanodiscus hantzschii

Tabellaria fenestrata

Gymnodinium helveticum

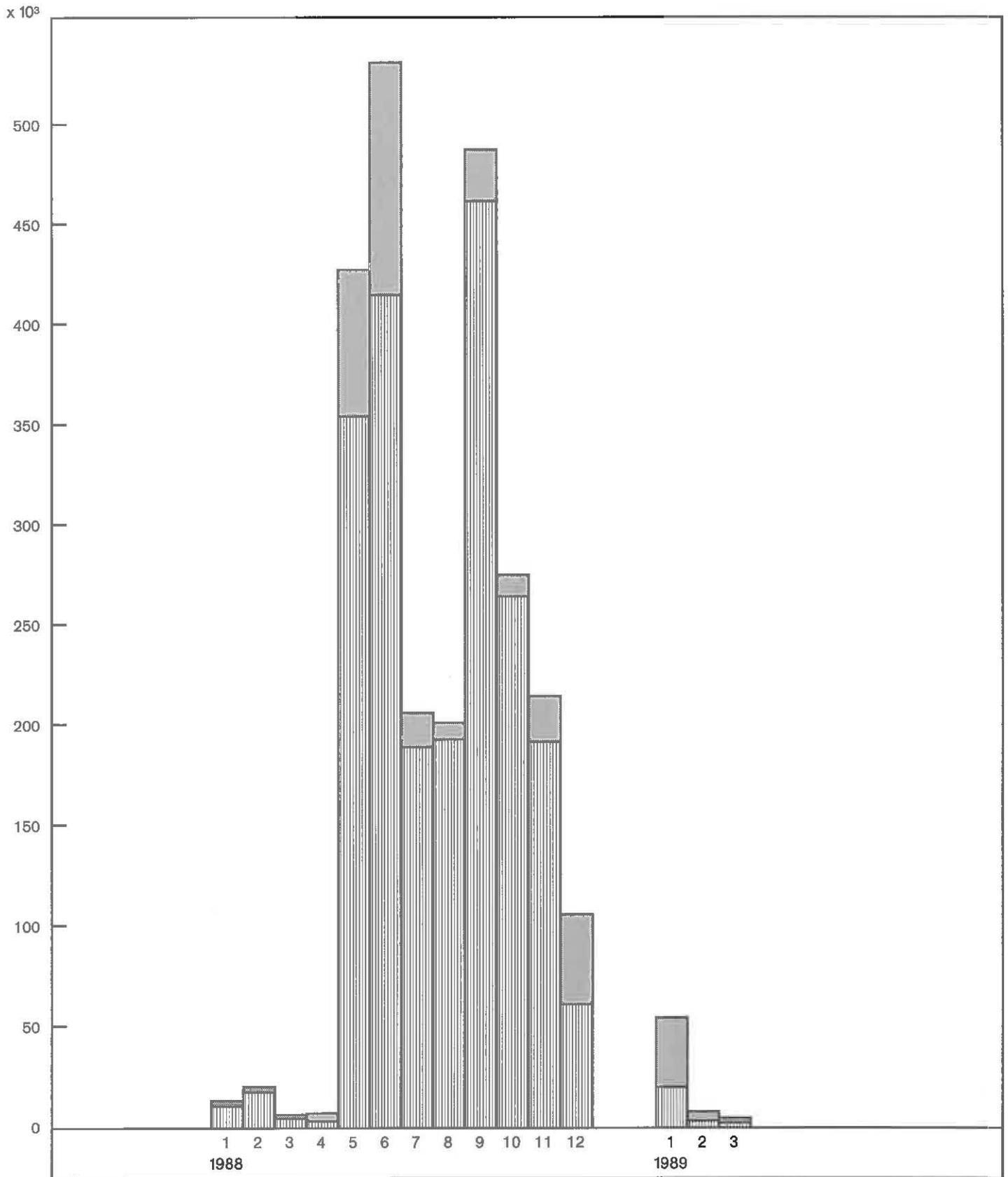
Chlorella ssp.

Cryptomonas ssp.

Rhodomonas ssp.

Fragilaria crotonensis

Abb. 29
Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Entwicklung der Cladoceren,
Monatsmittel 1988 (Tiere/m²)



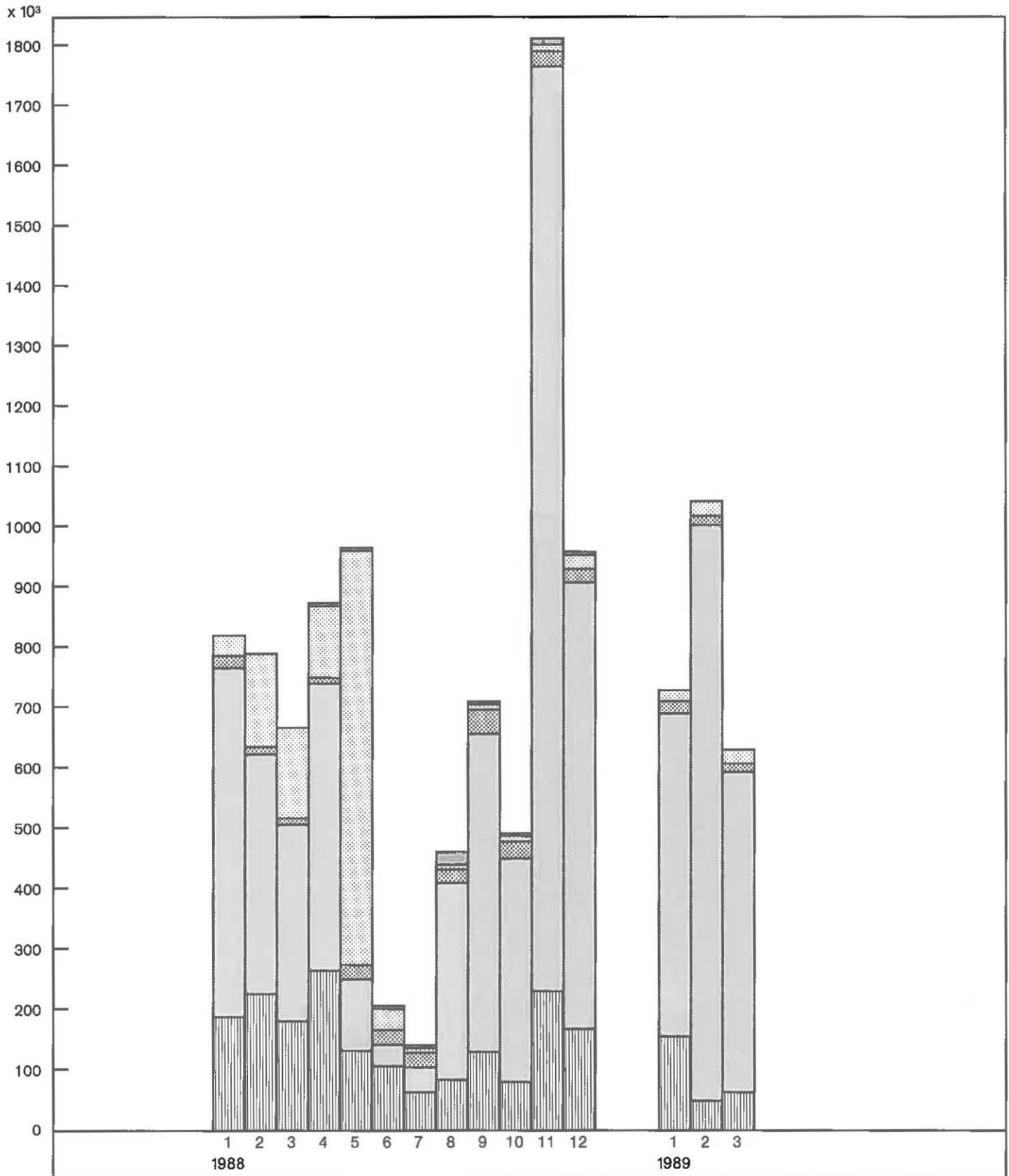
▨ Daphnia

■ übrige Cladoceren

Abb. 30

Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:

Entwicklung der Copepoden: adulte Tiere und Copepodide ohne Nauplien,
Monatsmittel 1988/89 (Tiere/m²)



Eudiaptomus

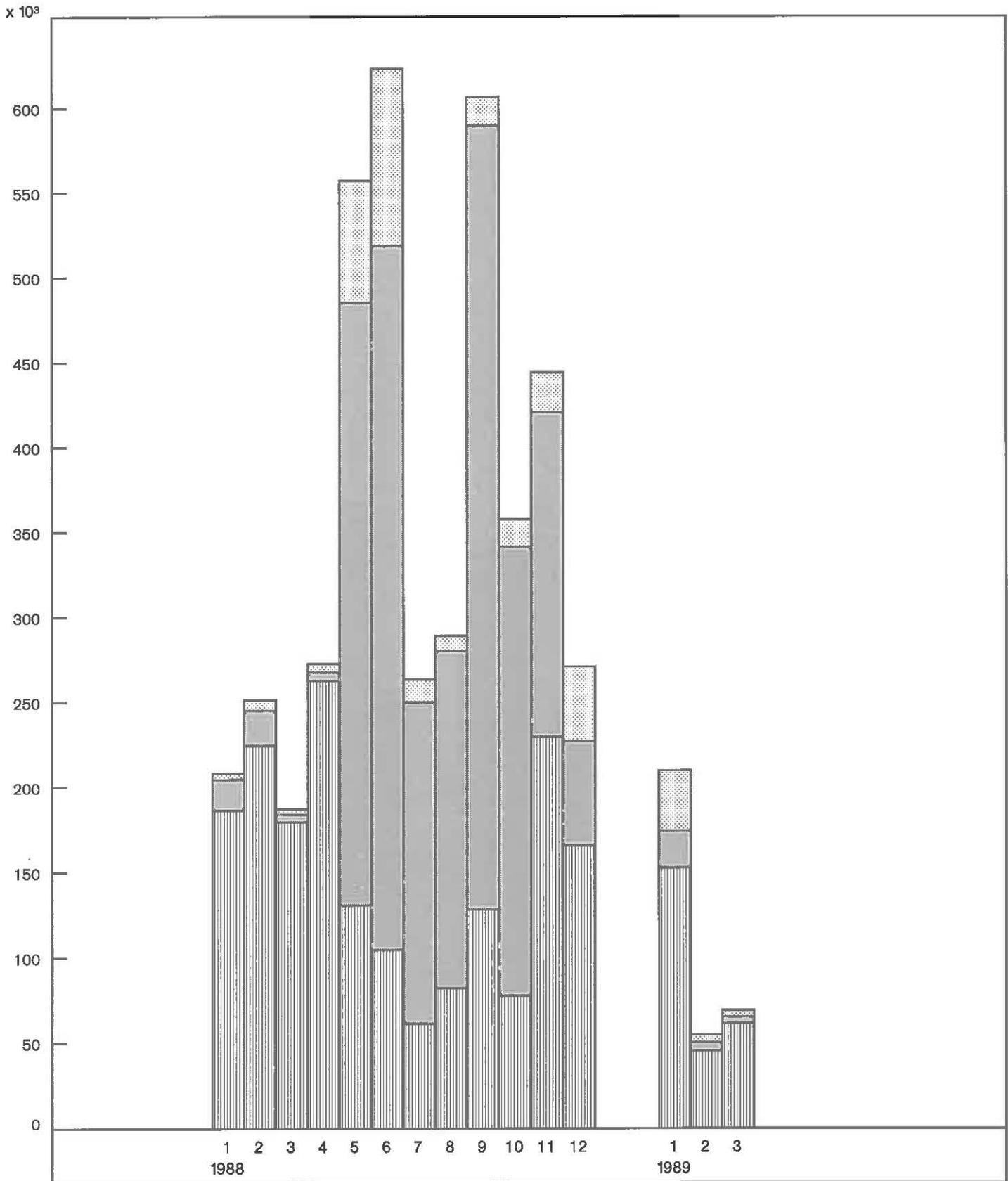
Mesocyclops

Cyclops
abyssorum

Cyclops
vicinus

Acanthocyclops

Abb. 31
Bodensee – Obersee, Fischbach-Uttwil:
Entwicklung der herbivor lebenden Crustaceen
Monatsmittel 1988/89 (Tiere/m²)



▨ Eudiaptomus

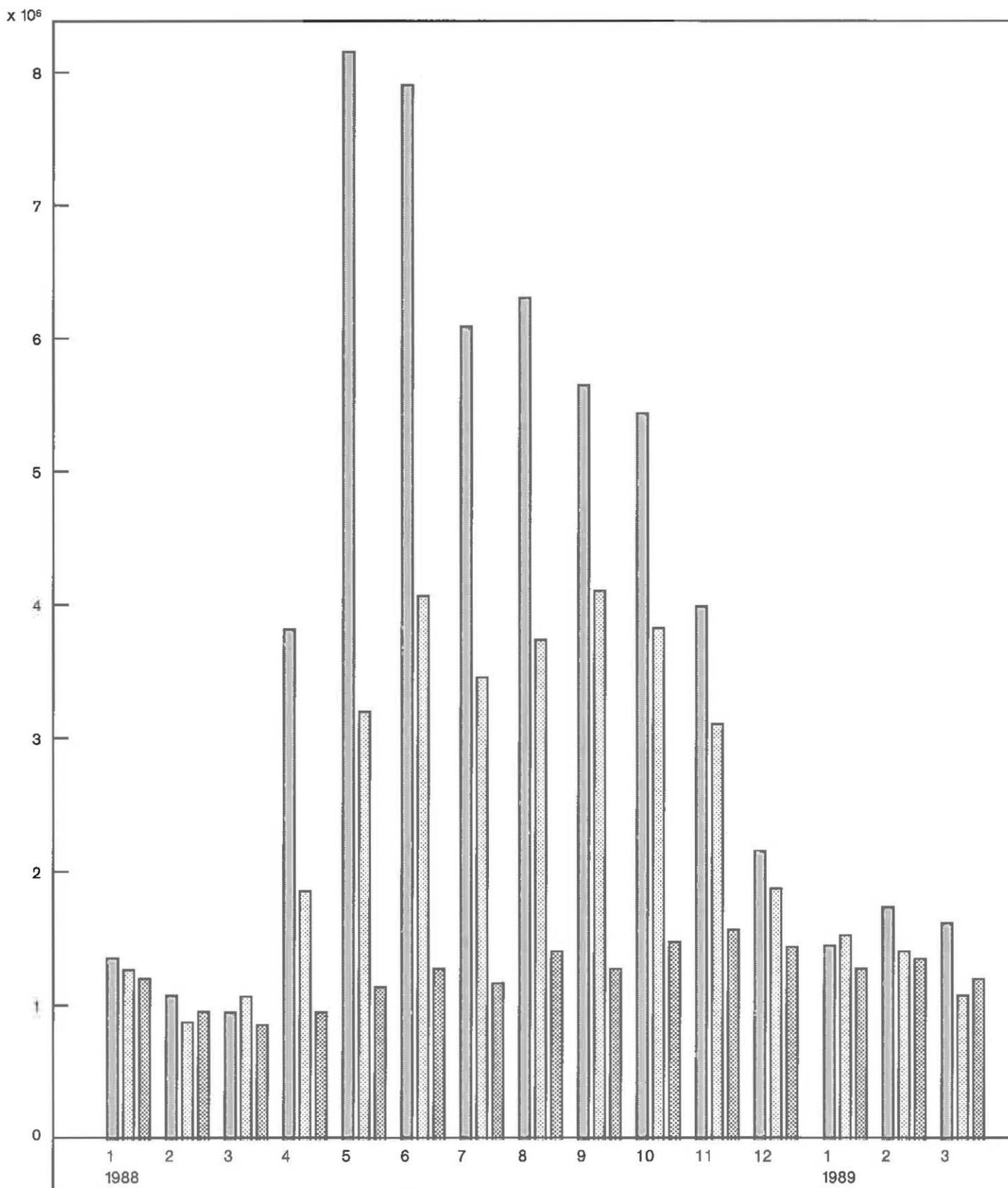
■ Daphnia

▤ Bosmina

Abb. 32

Bodensee – Obersee, Langenargen – Arbon:

**Entwicklung des Bakterienplanktons, Gesamtkeimzahlen (Direktzählung Zellen/ml)
in verschiedenen Tiefenstufen · Monatsmittel 1988/89**



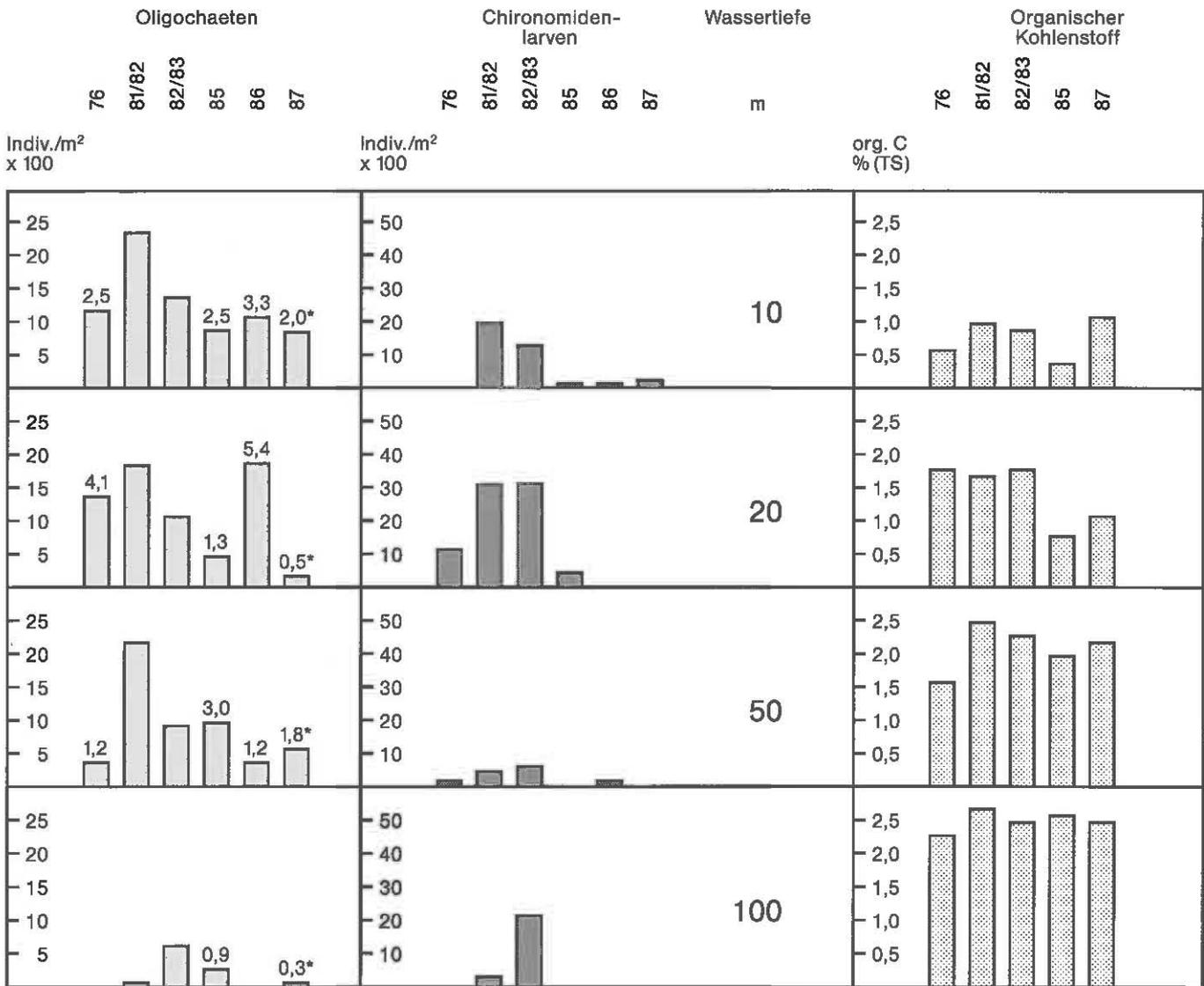
■ 0 - 10 m Tiefe

▨ 10 - 30 m Tiefe

▩ 30 - 200 m Tiefe

Abb. 33

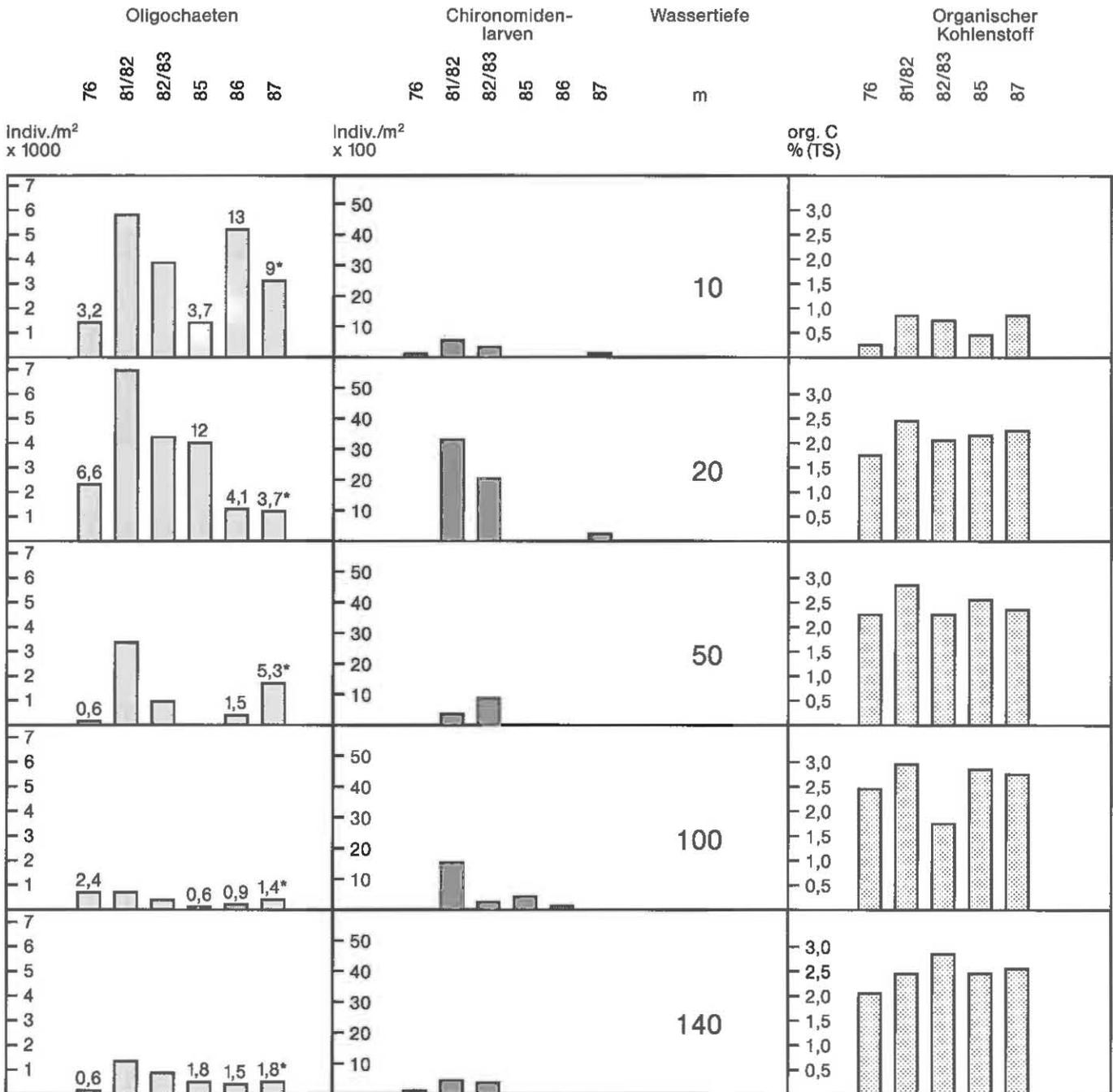
**Bodensee – Obersee, Seebodenprofil Dingelsdorf (Nr. 6):
Gehalt des Sediments an Oligochaeten, Chironomidenlarven,
organischem Kohlenstoff bei verschiedenen Wassertiefen**



* IPA-Index gemäß IGKB-Bericht Nr. 38 (1988) bis 0,8: geringe Belastung
IPA-Index 0,9 bis 10: mittlere Belastung / IPA-Index über 10: starke Belastung

Abb. 34

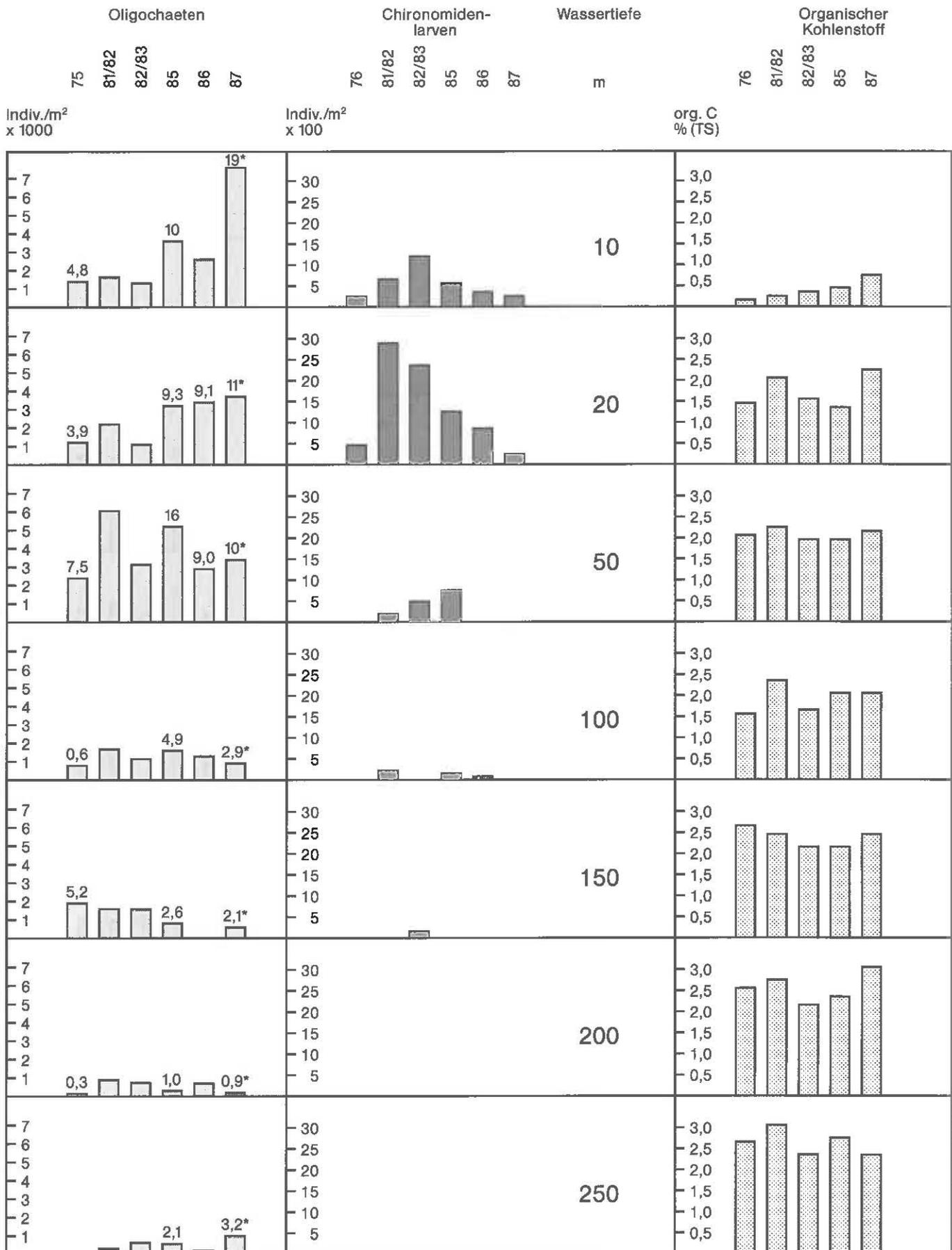
**Bodensee – Obersee, Seebodenprofil Nußdorf (Nr. 19):
Gehalt des Sediments an Oligochaeten, Chironomidenlarven,
organischem Kohlenstoff bei verschiedenen Wassertiefen**



* IPA-Index gemäß IGKB-Bericht Nr. 38 (1988) bis 0,8: geringe Belastung
IPA-Index 0,9 bis 10: mittlere Belastung / IPA-Index über 10: starke Belastung

Abb. 35

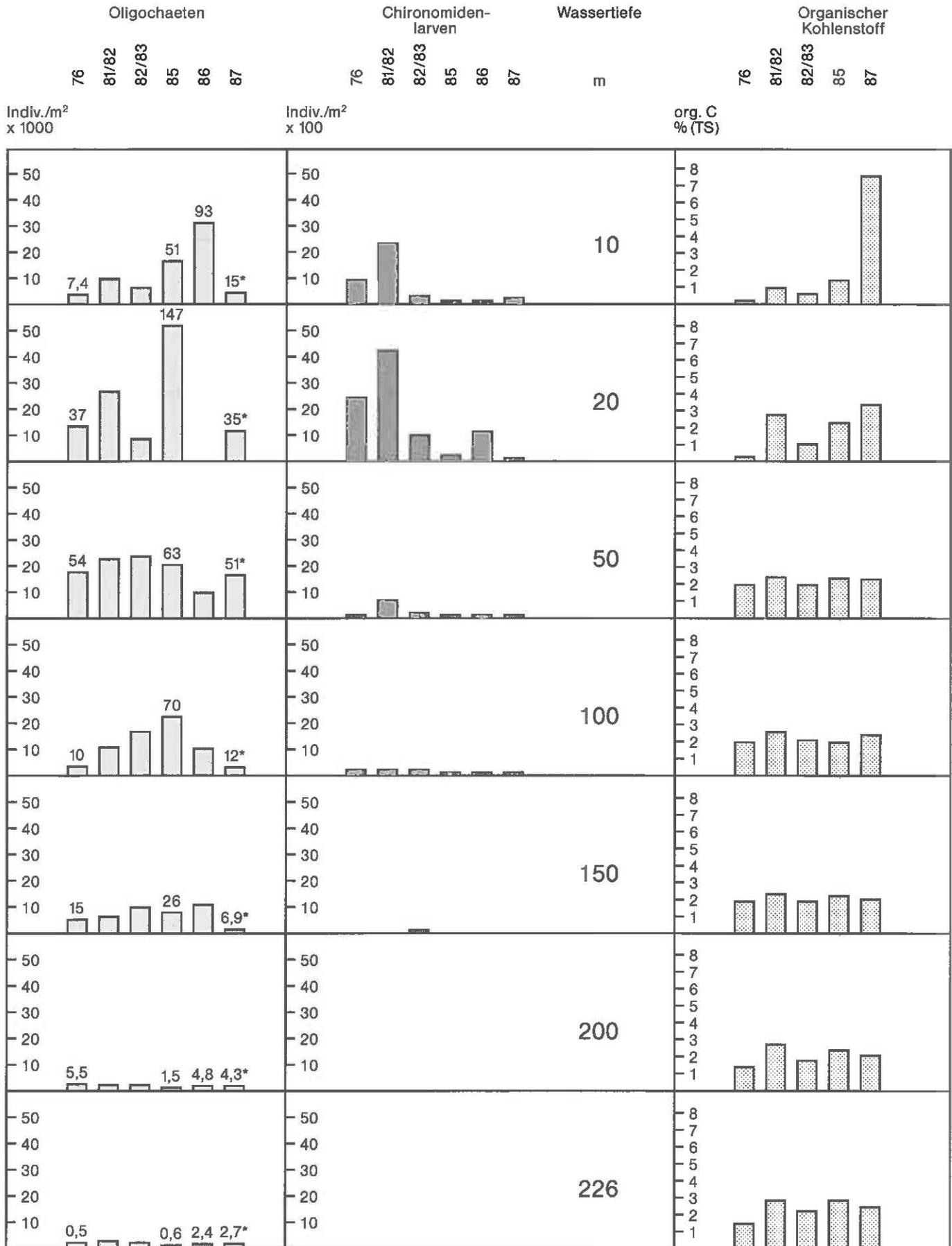
**Bodensee – Obersee, Seebodenprofil Seemoos (Nr. 31):
Gehalt des Sediments an Oligochaeten, Chironomidenlarven,
organischem Kohlenstoff bei verschiedenen Wassertiefen**



* IPA-Index gemäß IGKB-Bericht Nr. 38 (1988) bis 0,8: geringe Belastung
IPA-Index 0,9 bis 10: mittlere Belastung / IPA-Index über 10: starke Belastung

Abb. 36

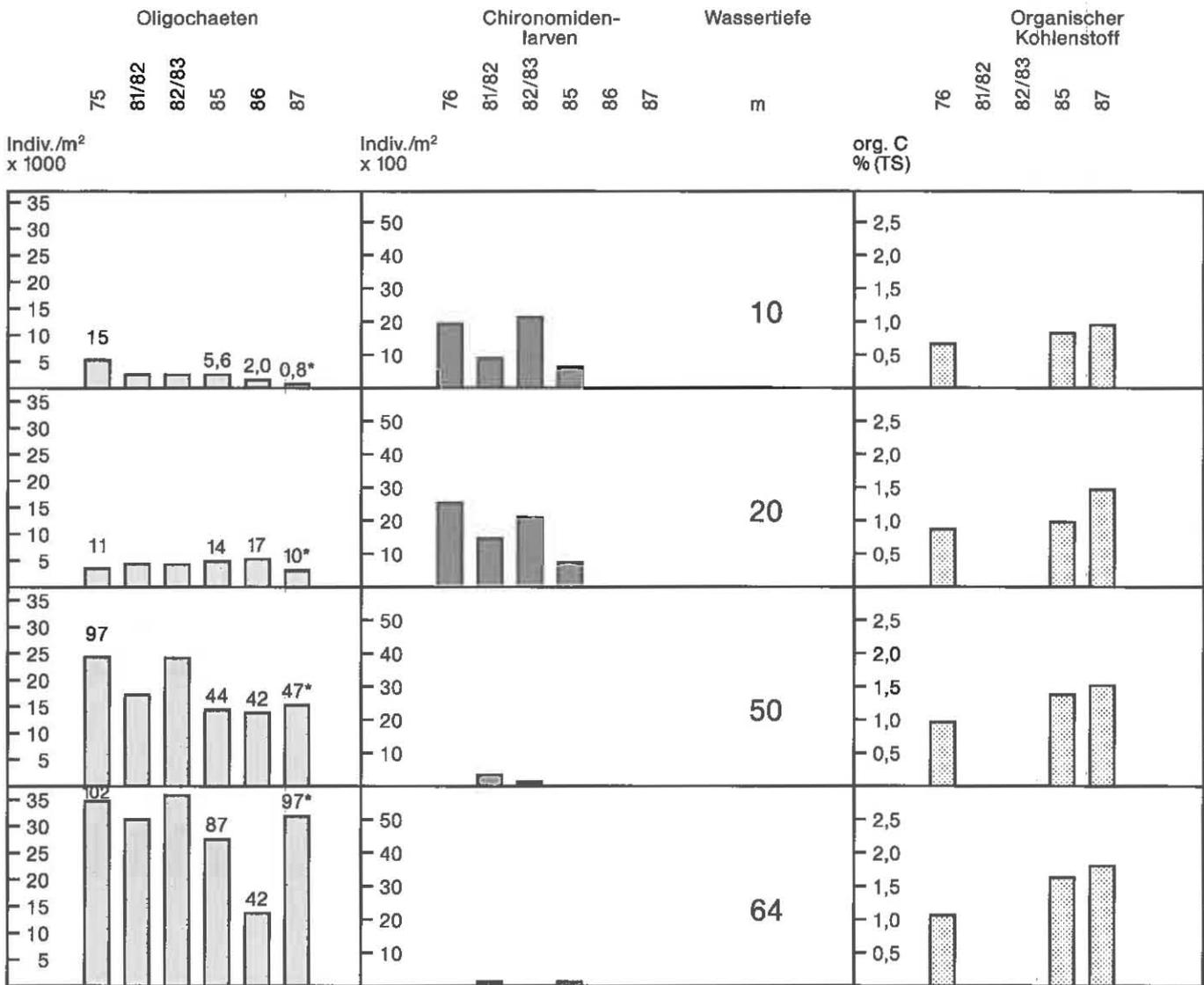
**Bodensee – Obersee, Seebodenprofil Langenargen-West (Nr. 39):
Gehalt des Sediments an Oligochaeten, Chironomidenlarven,
organischem Kohlenstoff bei verschiedenen Wassertiefen**



* IPA-Index gemäß IGKB-Bericht Nr. 38 (1988) bis 0,8: geringe Belastung
IPA-Index 0,9 bis 10: mittlere Belastung / IPA-Index über 10: starke Belastung

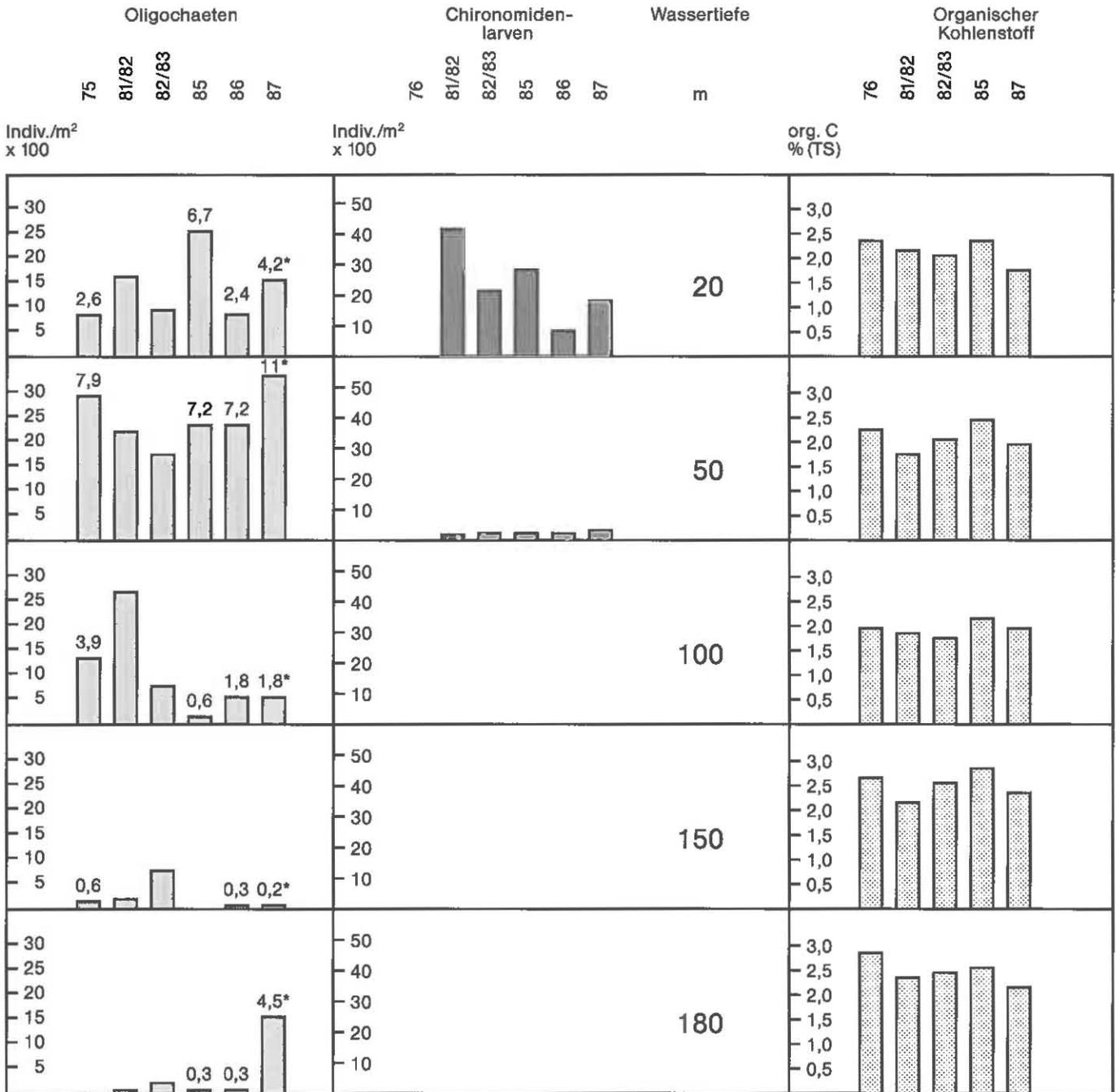
Abb. 37

**Bodensee – Obersee, Seebodenprofil Bregener Bucht (Nr. 62):
Gehalt des Sediments an Oligochaeten, Chironomidenlarven,
organischem Kohlenstoff bei verschiedenen Wassertiefen**



* IPA-Index gemäß IGKB-Bericht Nr. 38 (1988) bis 0,8: geringe Belastung
IPA-Index 0,9 bis 10: mittlere Belastung / IPA-Index über 10: starke Belastung

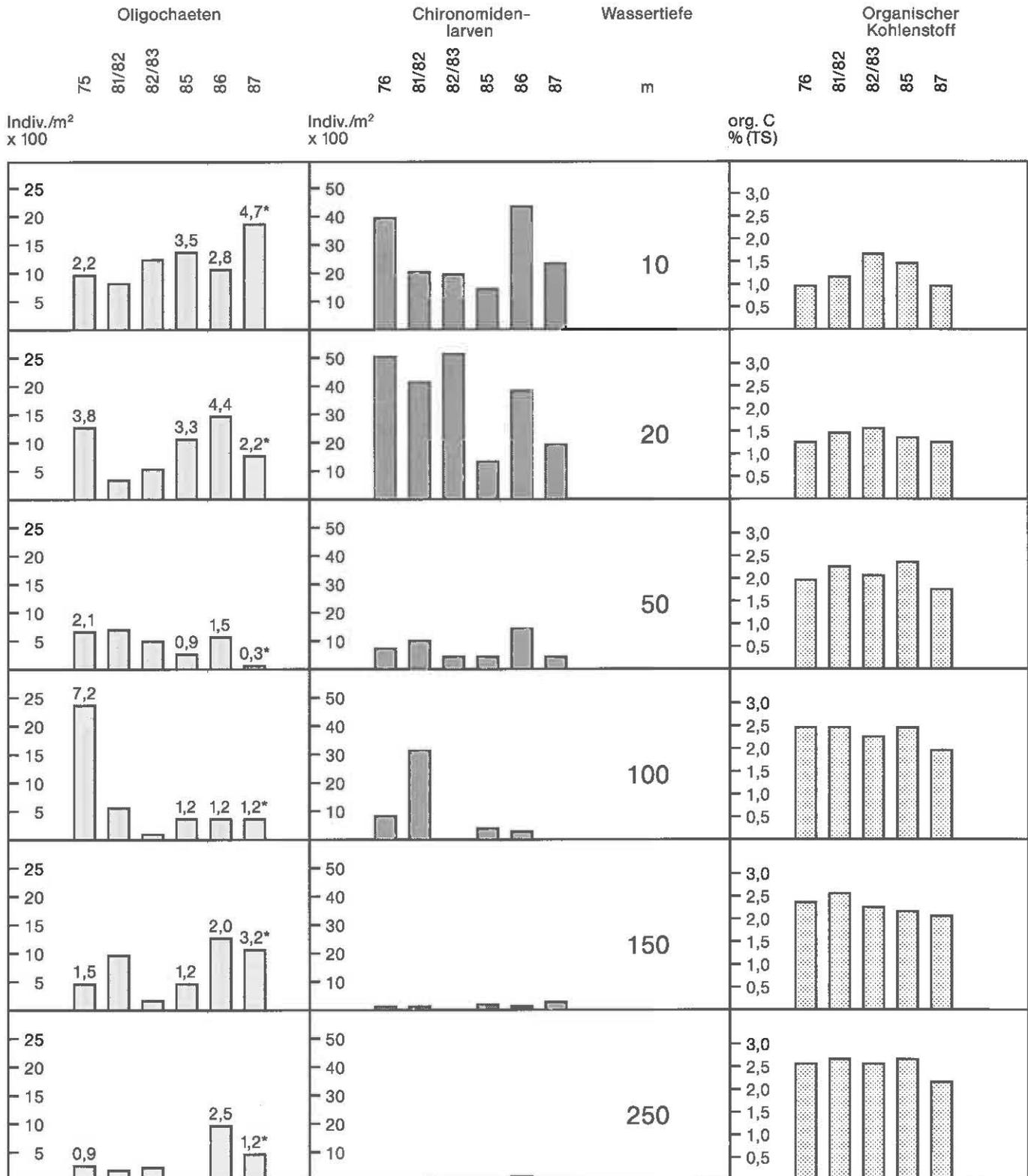
Abb. 38
Bodensee – Obersee, Seebodenprofil Rorschach (Nr. 90):
Gehalt des Sediments an Oligochaeten, Chironomidenlarven,
organischem Kohlenstoff bei verschiedenen Wassertiefen



* IPA-Index gemäß iGKB-Bericht Nr. 38 (1988) bis 0,8: geringe Belastung
 IPA-Index 0,9 bis 10: mittlere Belastung / IPA-Index über 10: starke Belastung

Abb. 39

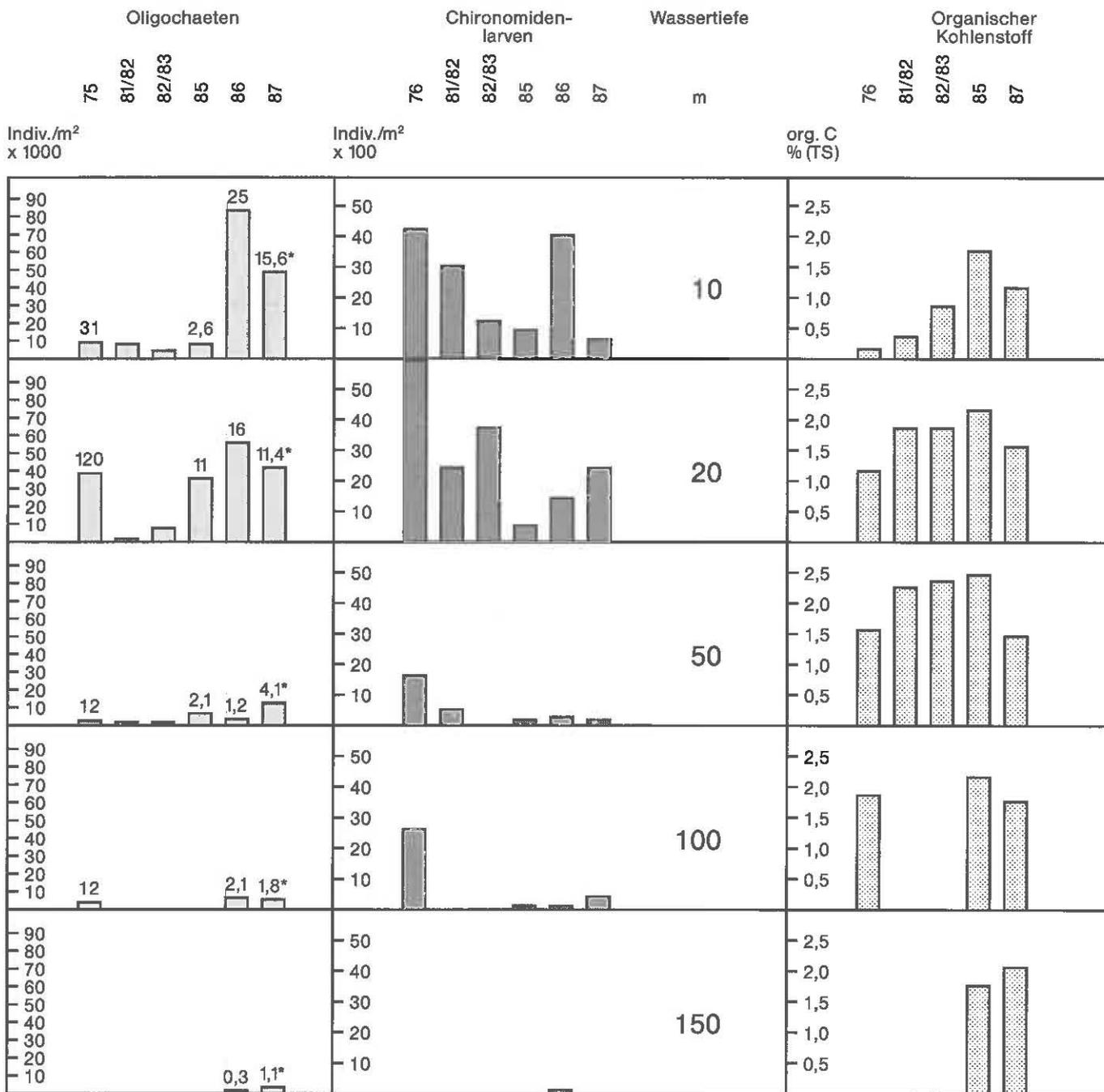
**Bodensee – Obersee, Seebodenprofil Uttwil (Nr. 115):
Gehalt des Sediments an Oligochaeten, Chironomidenlarven,
organischem Kohlenstoff bei verschiedenen Wassertiefen**



* IPA-Index gemäß IGKB-Bericht Nr. 38 (1988) bis 0,8: geringe Belastung
IPA-Index 0,9 bis 10: mittlere Belastung / IPA-Index über 10: starke Belastung

Abb. 40

**Bodensee – Obersee, Seebodenprofil Bottighofen (Nr. 126):
Gehalt des Sediments an Oligochaeten, Chironomidenlarven,
organischem Kohlenstoff bei verschiedenen Wassertiefen**



* IPA-Index gemäß IGKB-Bericht Nr. 38 (1988) bis 0,8: geringe Belastung
IPA-Index 0,9 bis 10: mittlere Belastung / IPA-Index über 10: starke Belastung

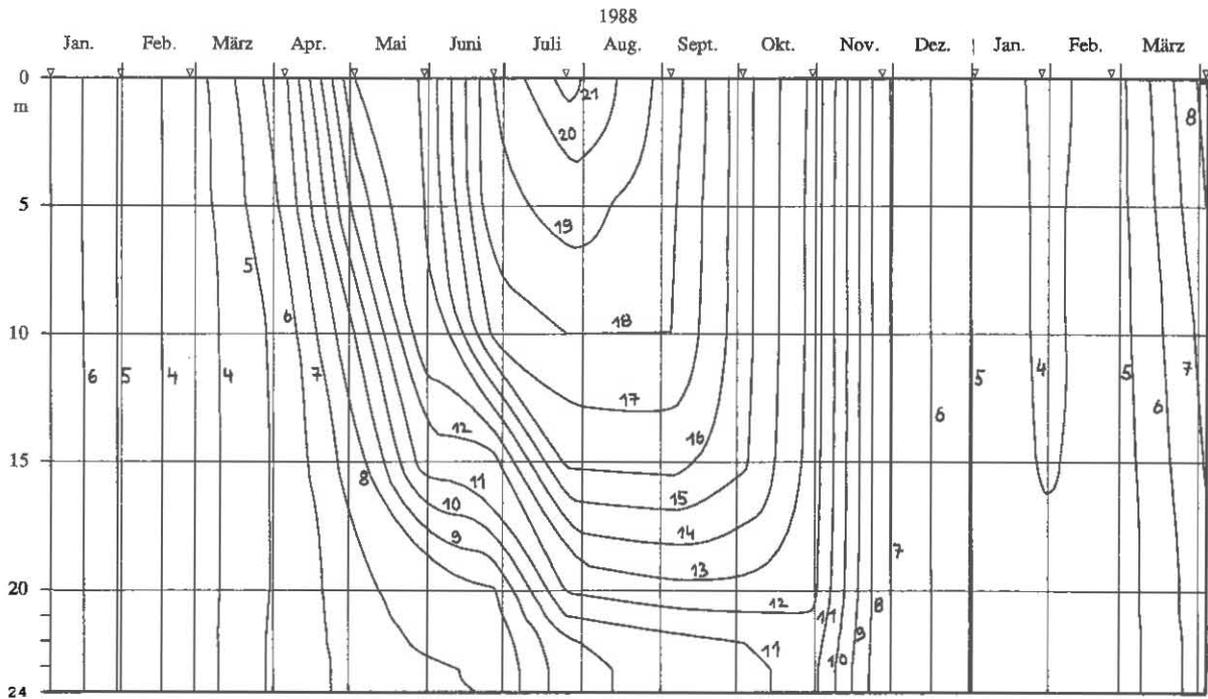


Abb. 41: Bodensee - Untersee, Zellersee:
Temperatur °C

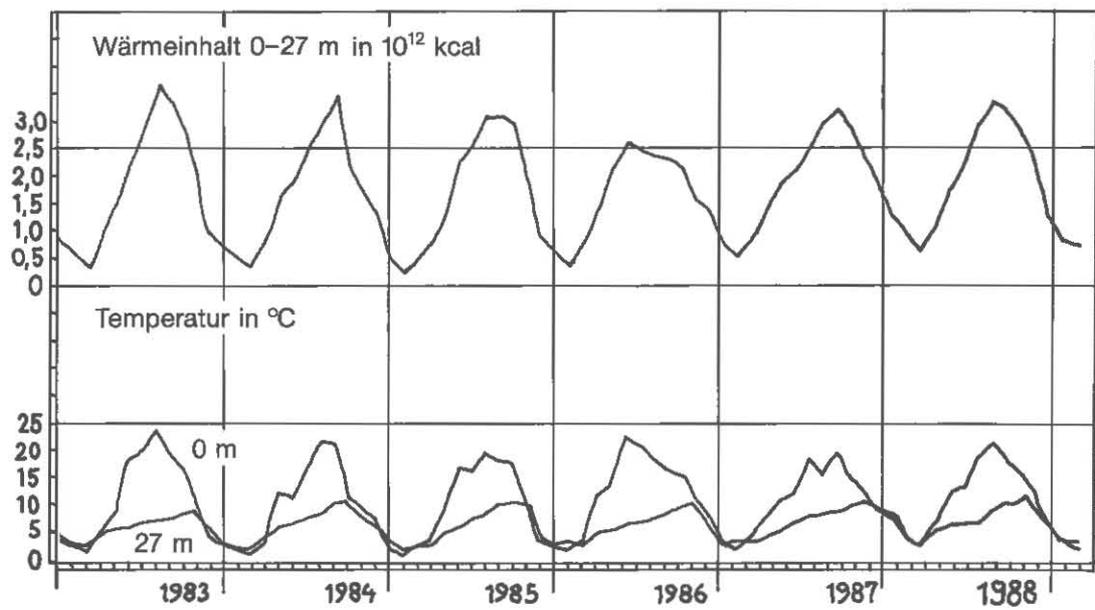


Abb. 42: Bodensee - Untersee, Zellersee:
Thermik

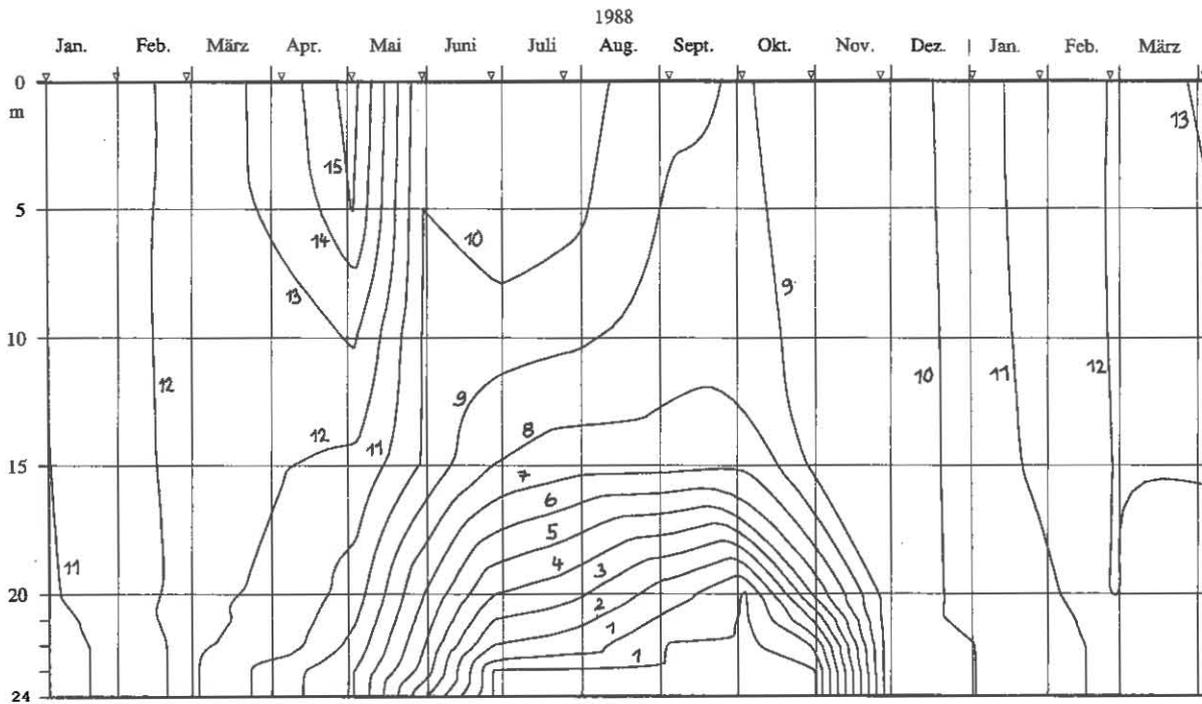


Abb. 43: Bodensee – Untersee, Zellersee:
Sauerstoff (mg/l)

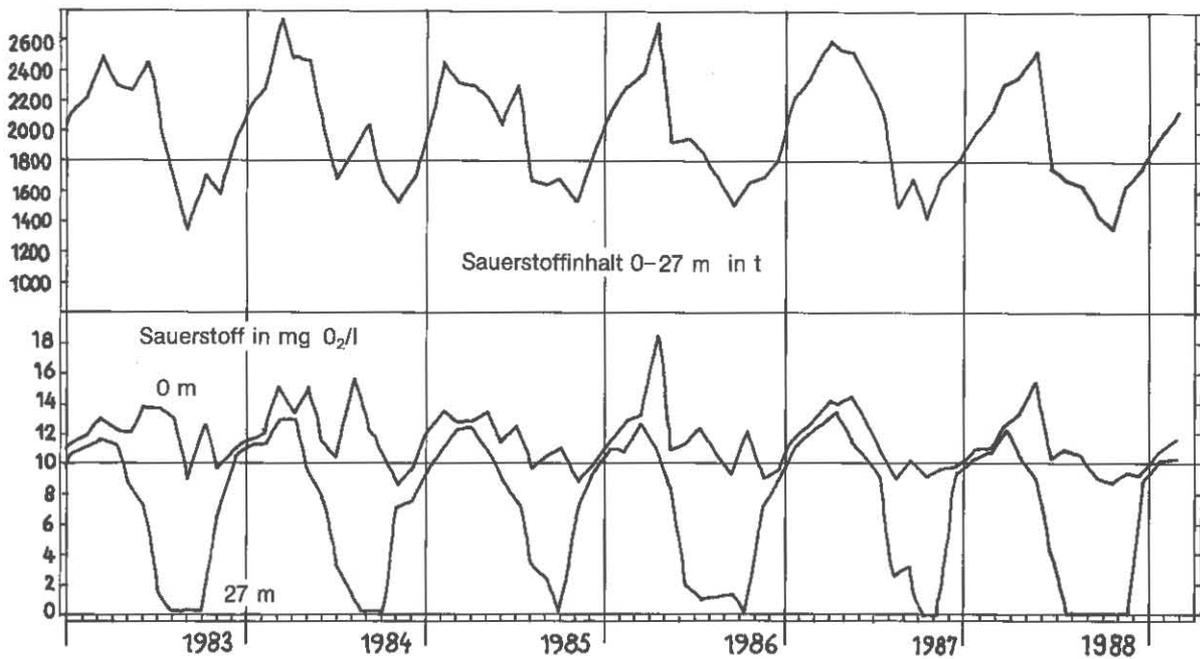


Abb. 44: Bodensee – Untersee, Zellersee:
Sauerstoffinhalt 0-27 m Tiefe und Sauerstoffkonzentration in 0 und 27 m Tiefe

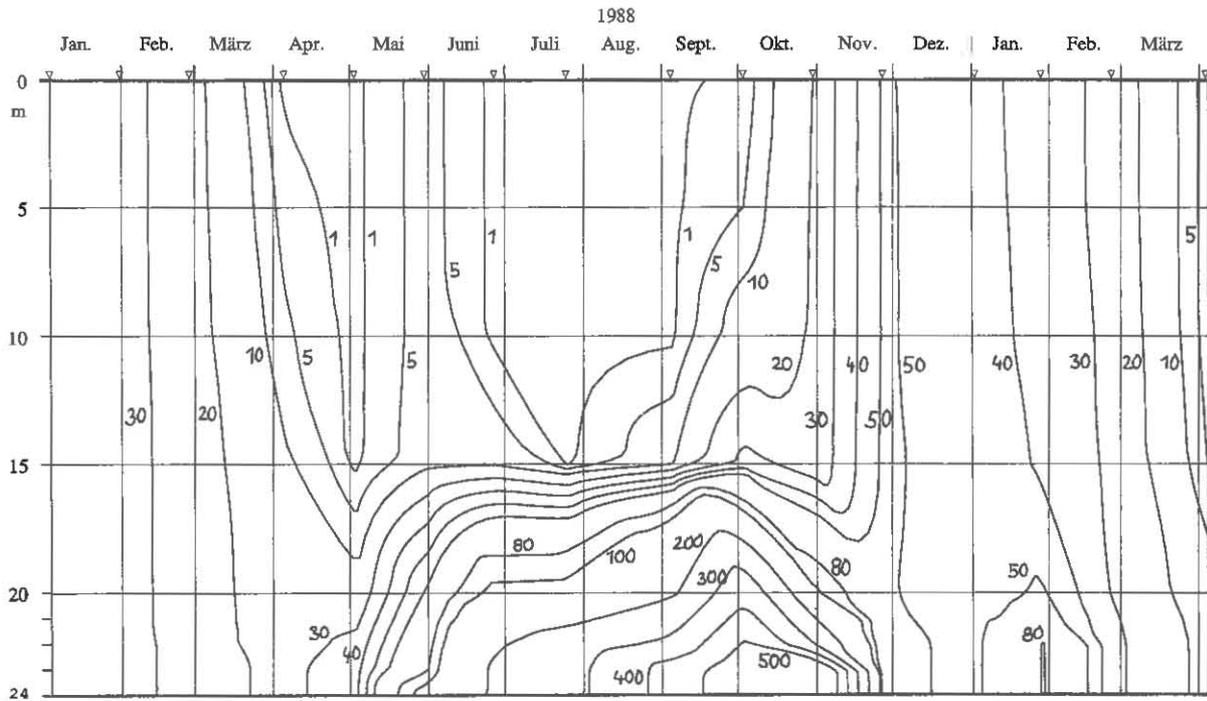


Abb. 45: Bodensee – Untersee, Zellersee:
 Orthophosphat – Phosphor (mg/m^3)

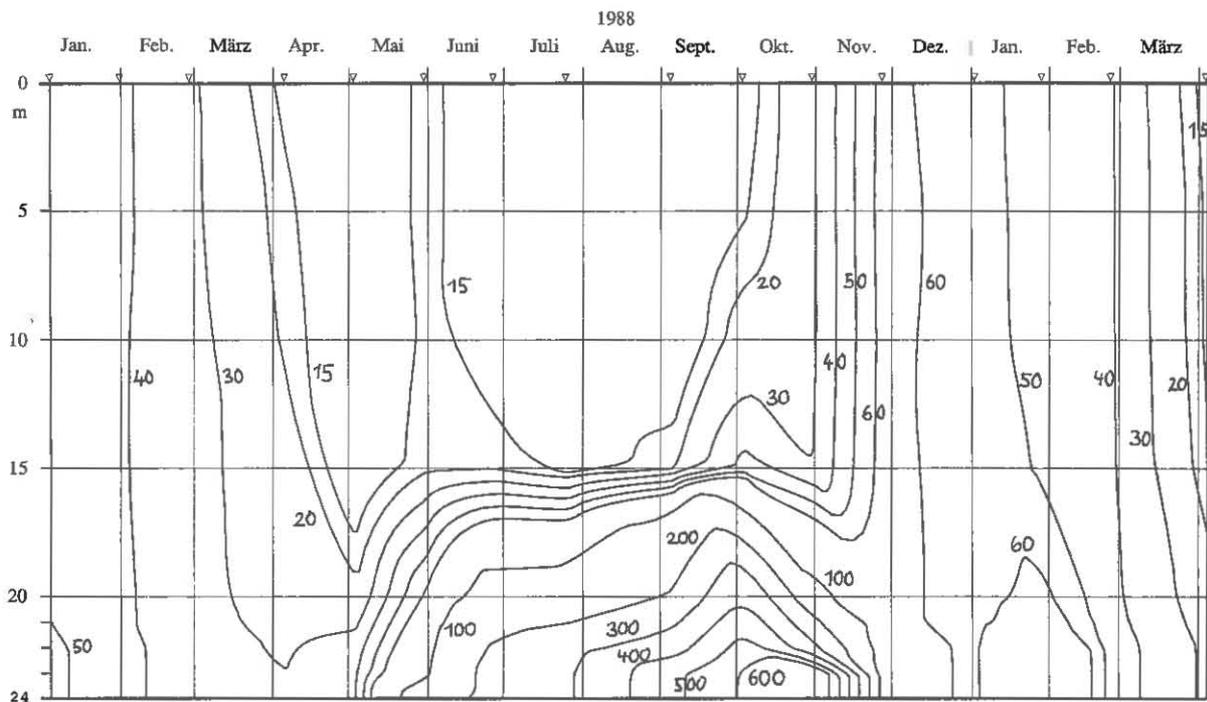


Abb. 46: Bodensee – Untersee, Zellersee:
 Gesamter gelöster Phosphor (mg/m^3)

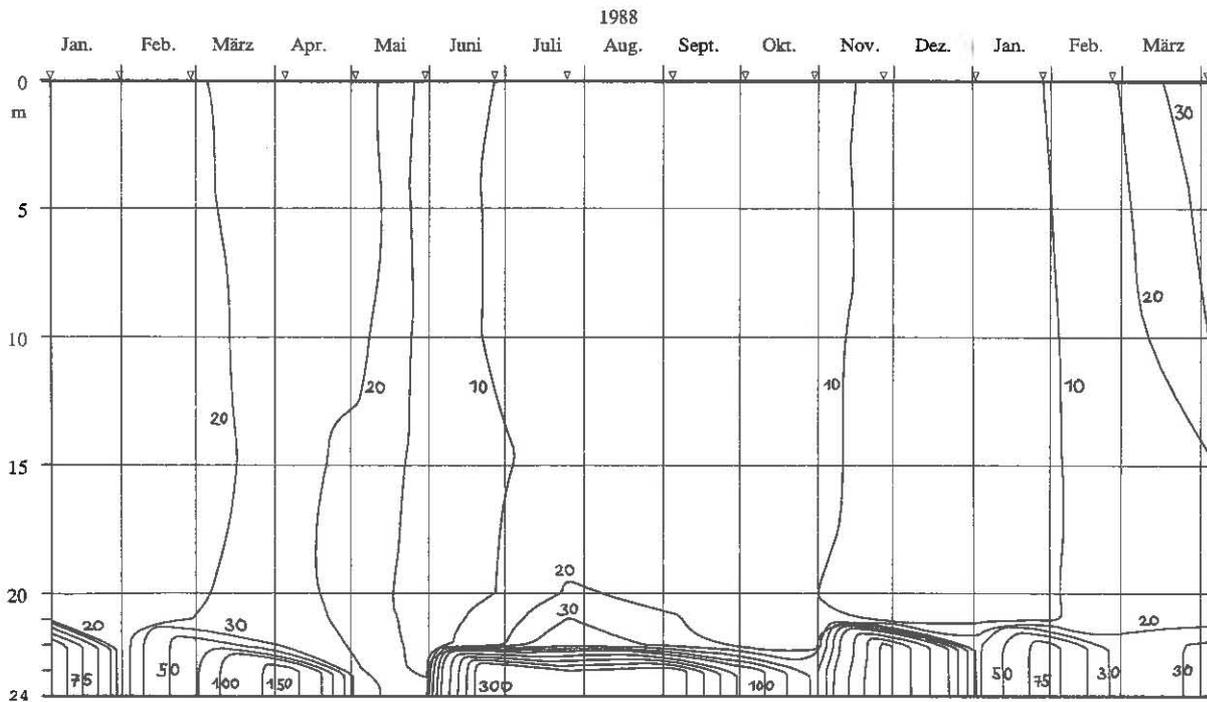


Abb. 47: Bodensee – Untersee, Zellersee:
Partikulärer Phosphor (mg/m^3)

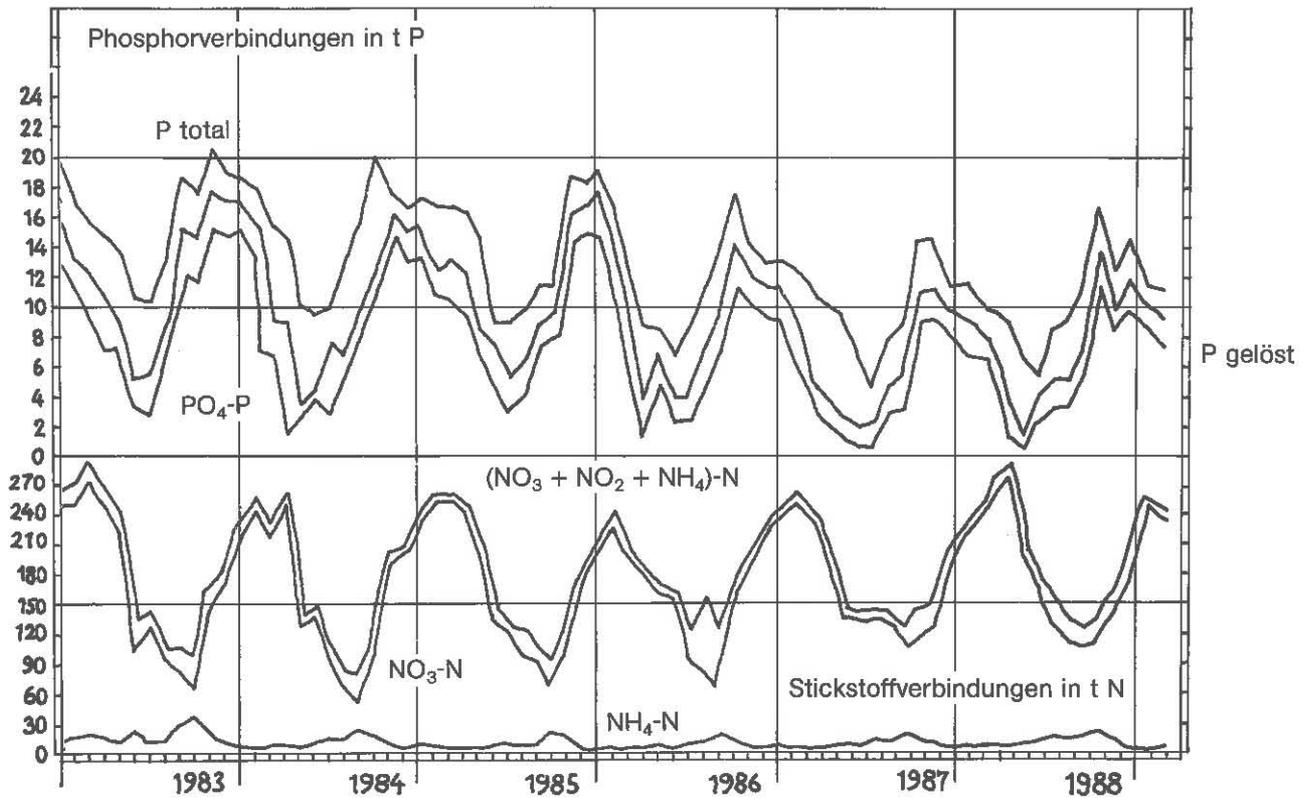


Abb. 48: Bodensee – Untersee, Zellersee:
Nährstoffinhalt 0–27 m Tiefe

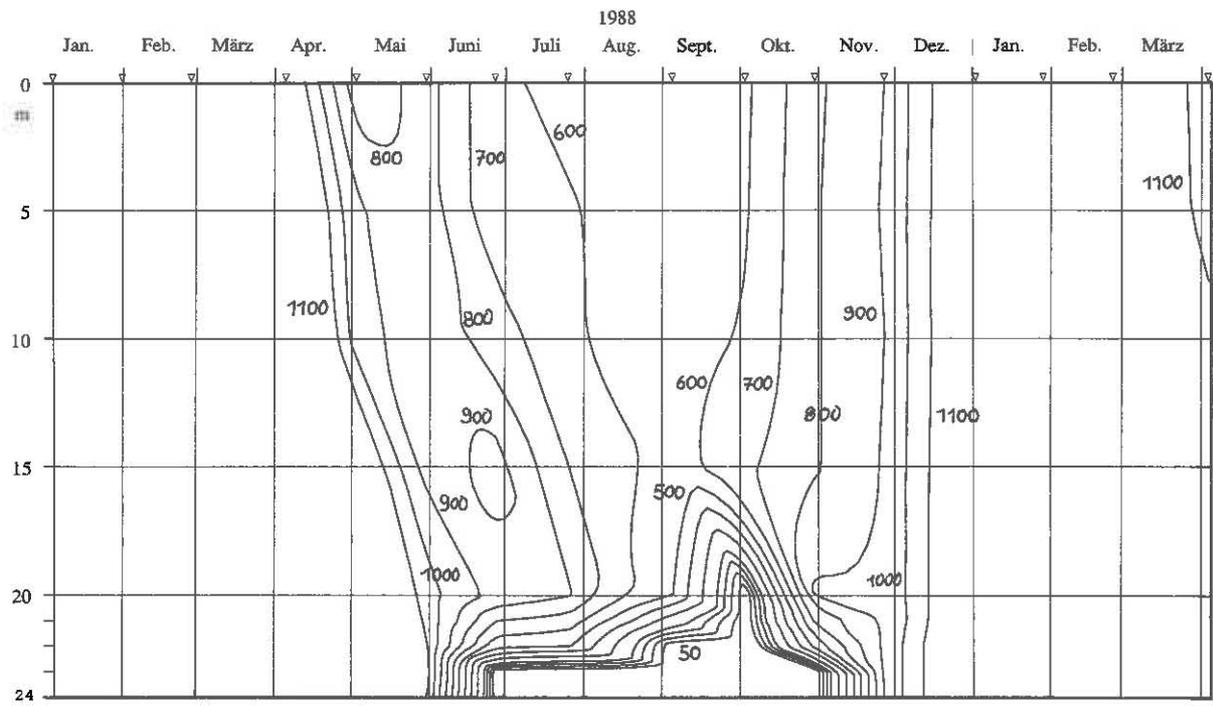


Abb. 49: Bodensee – Untersee, Zellersee:
Nitrat – Stickstoff (mg/m^3)

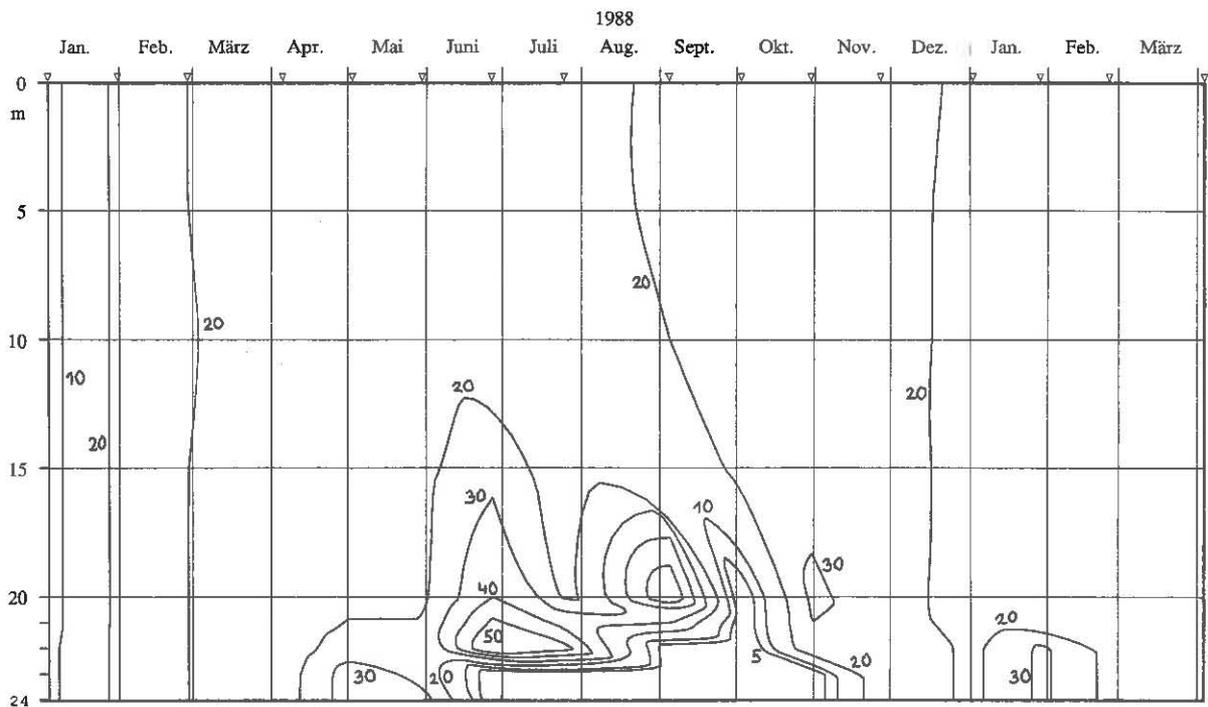


Abb. 50: Bodensee – Untersee, Zellersee:
Nitrit – Stickstoff (mg/m^3)

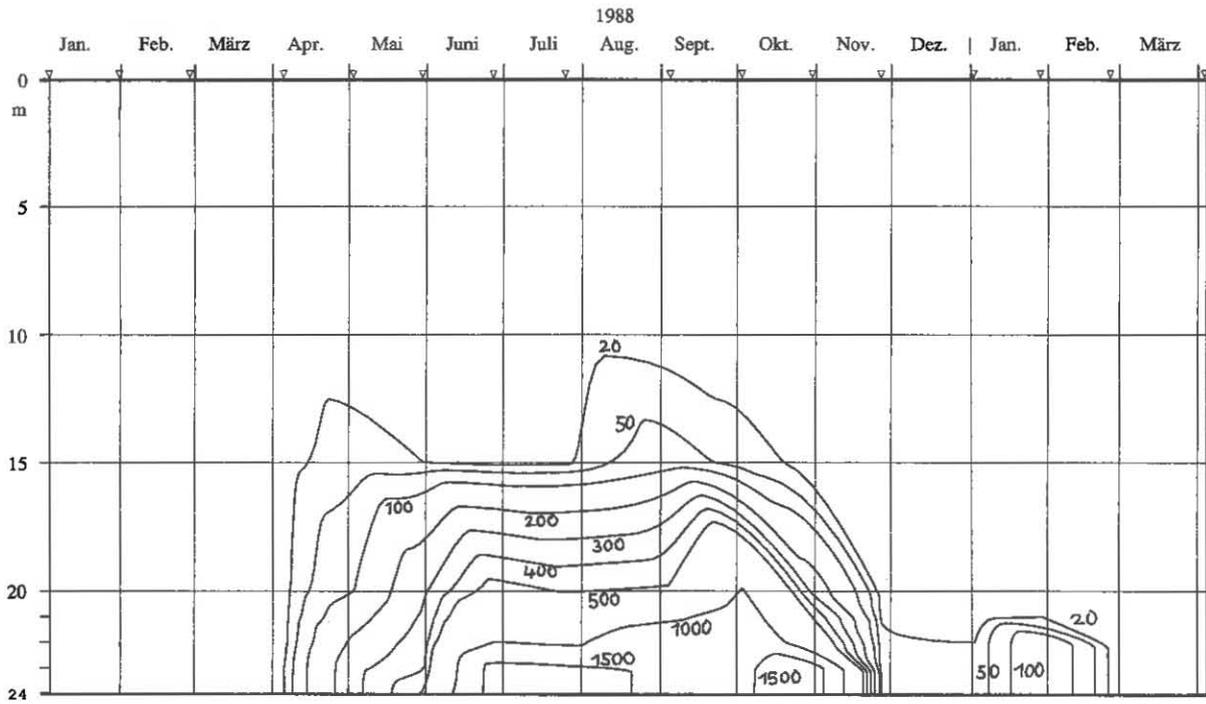


Abb. 51: Bodensee – Untersee, Zellersee:
Ammonium – Stickstoff (mg/m^3)

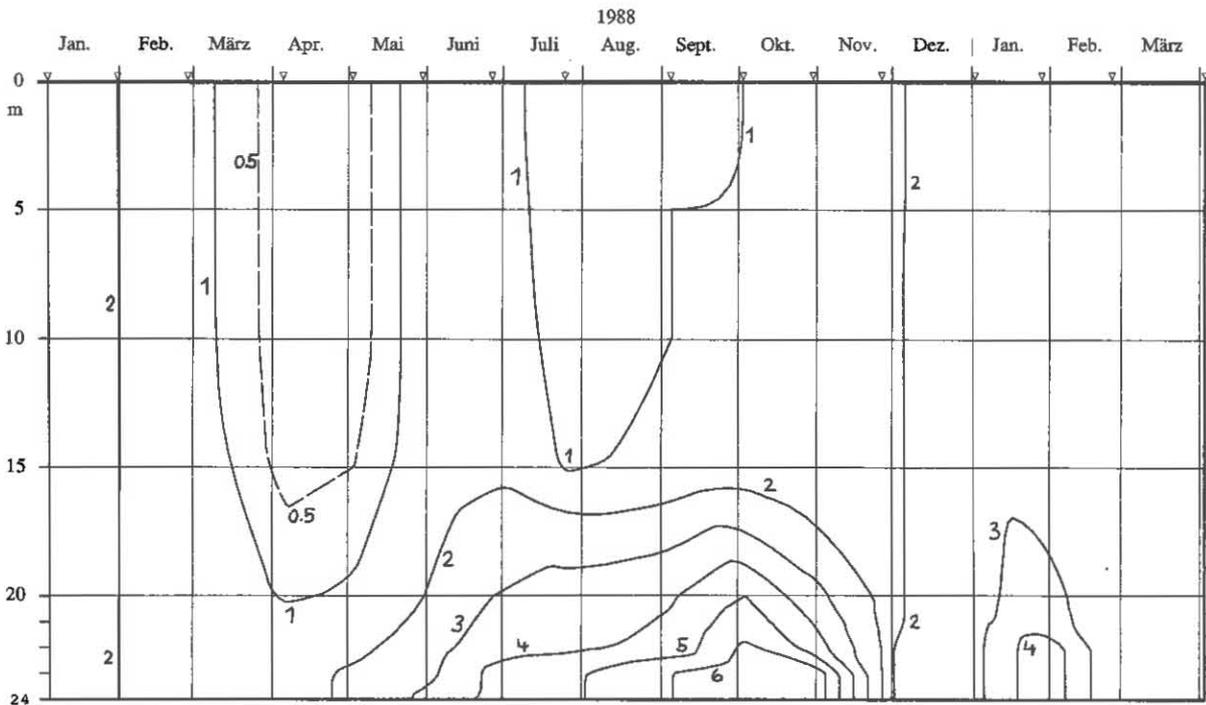


Abb. 52: Bodensee – Untersee, Zellersee:
Silikat (mg/l)

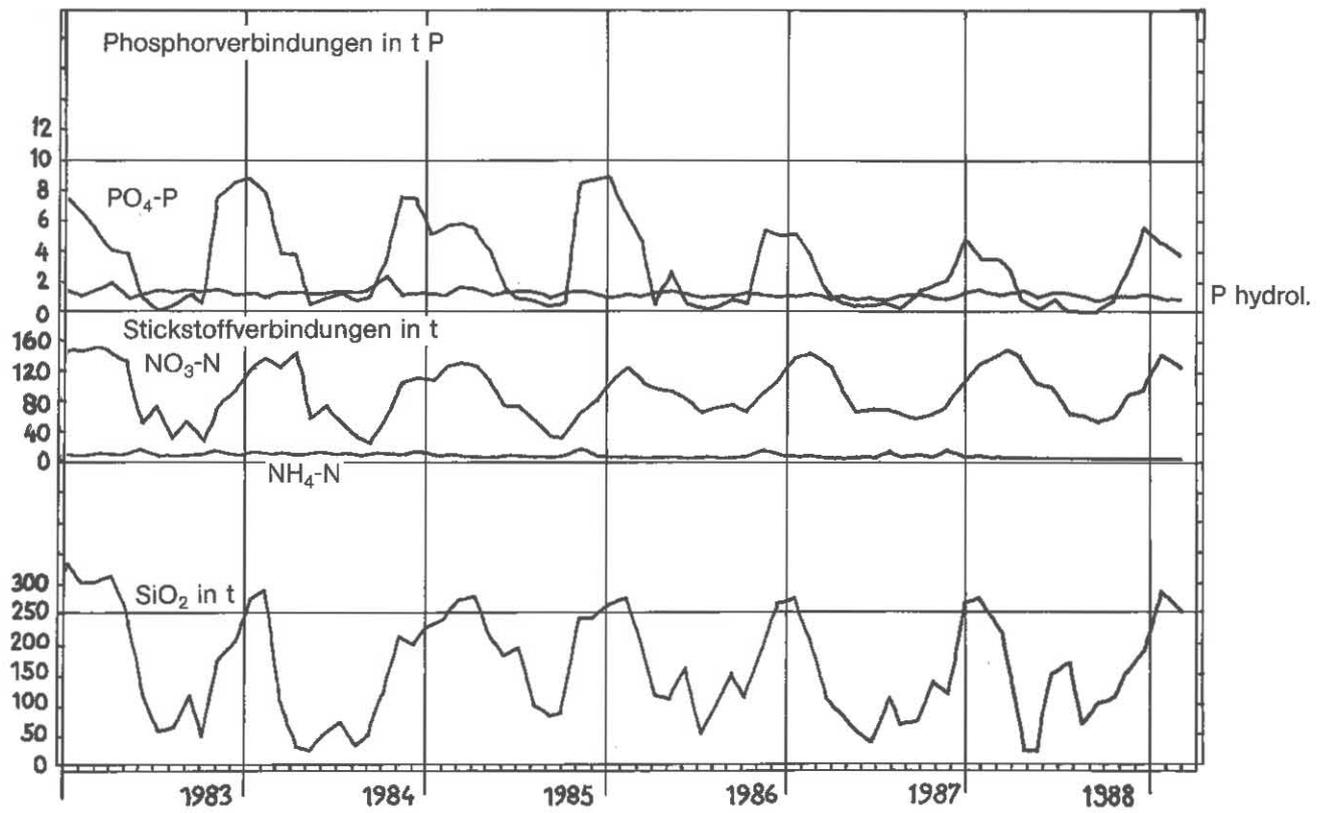


Abb. 53: Bodensee - Untersee, Zellersee:
Nährstoffinhalt im Epilimnion 0-10 m Tiefe

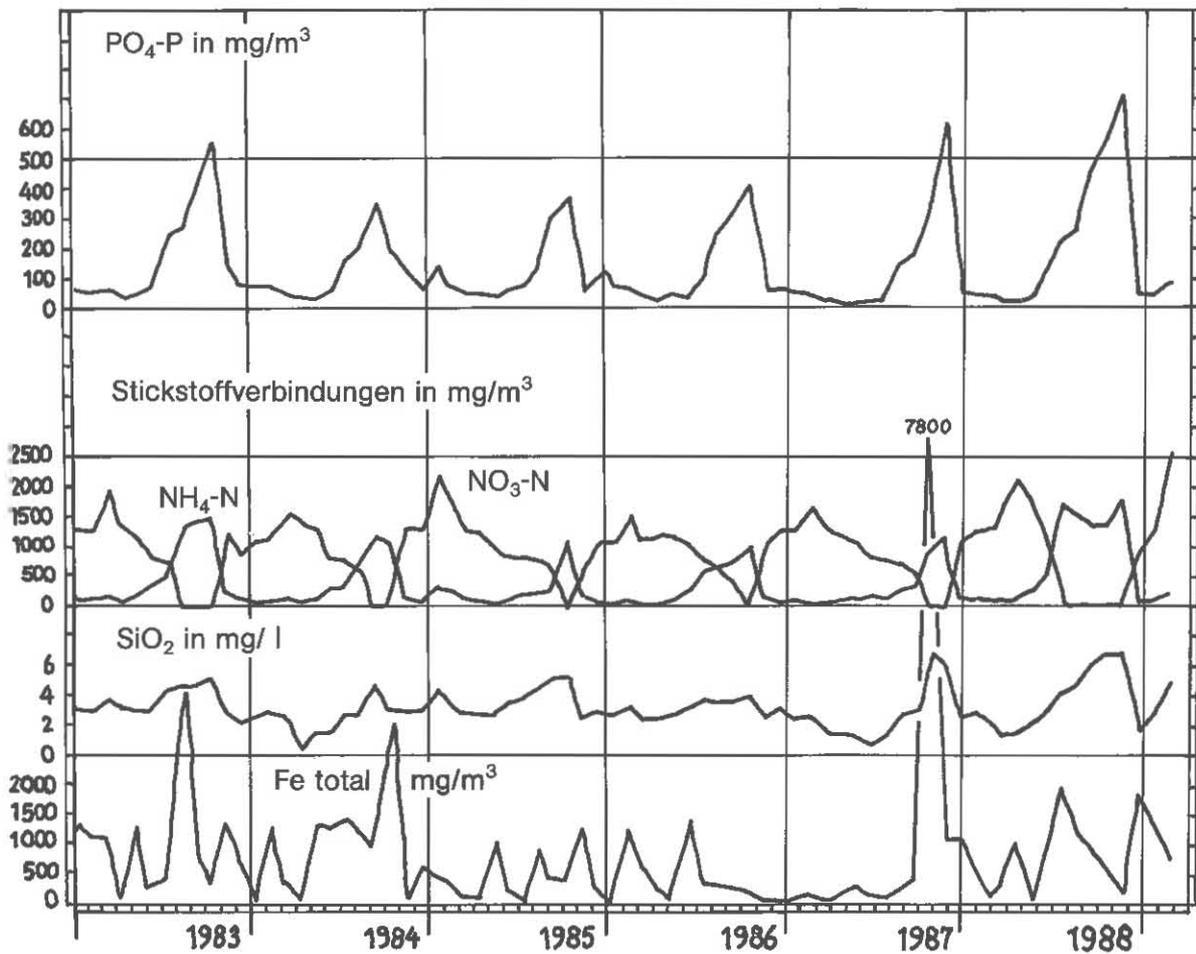


Abb. 54: Bodensee - Untersee, Zellersee:
Nährstoffkonzentration in 24 m Tiefe

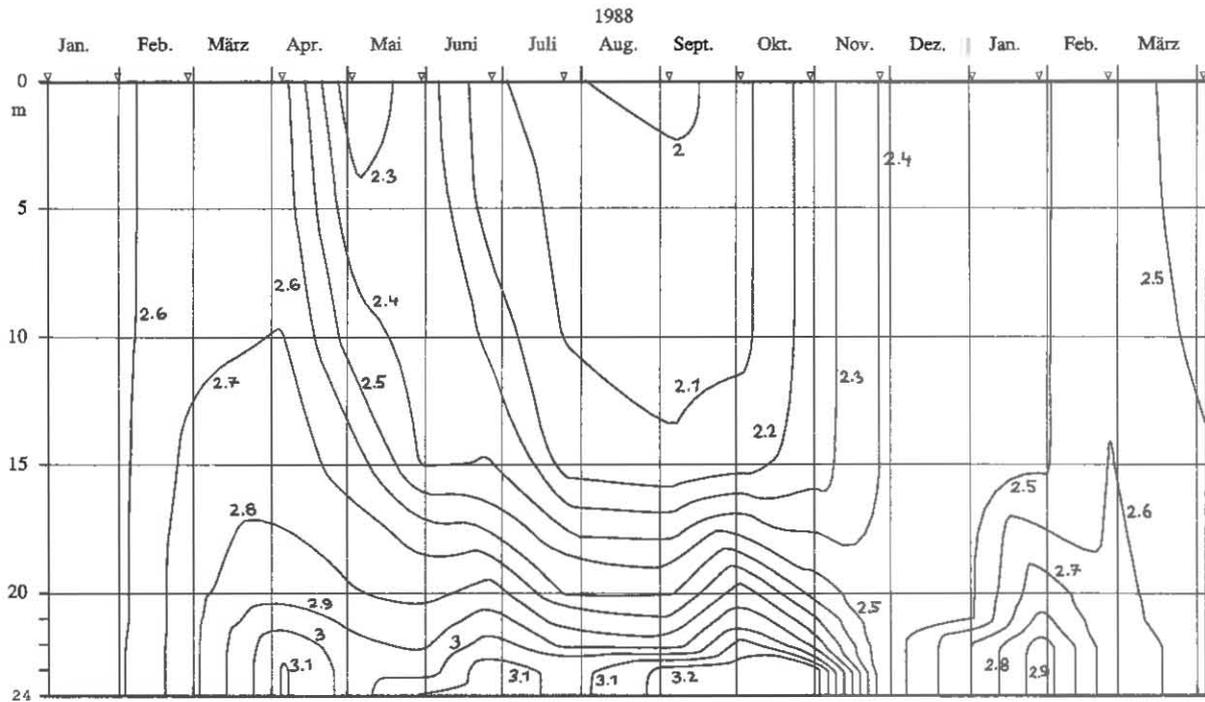


Abb. 55: Bodensee – Untersee, Zellersee:
Anorganischer Kohlenstoff (mmol/l)

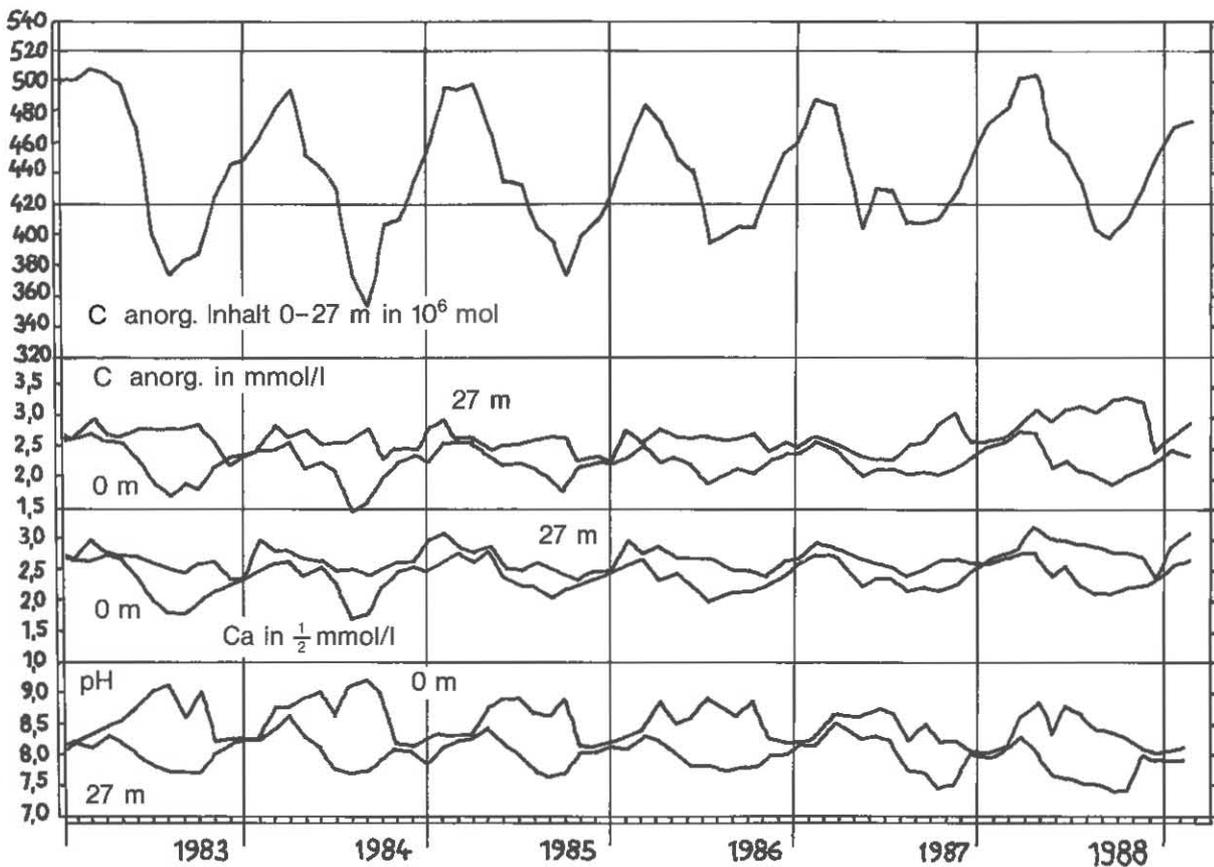


Abb. 56: Bodensee – Untersee, Zellersee:
Anorganischer Kohlenstoff, Inhalt 0–27 m Tiefe
Konzentrationen von anorg. Kohlenstoff, Calcium,
pH-Wert

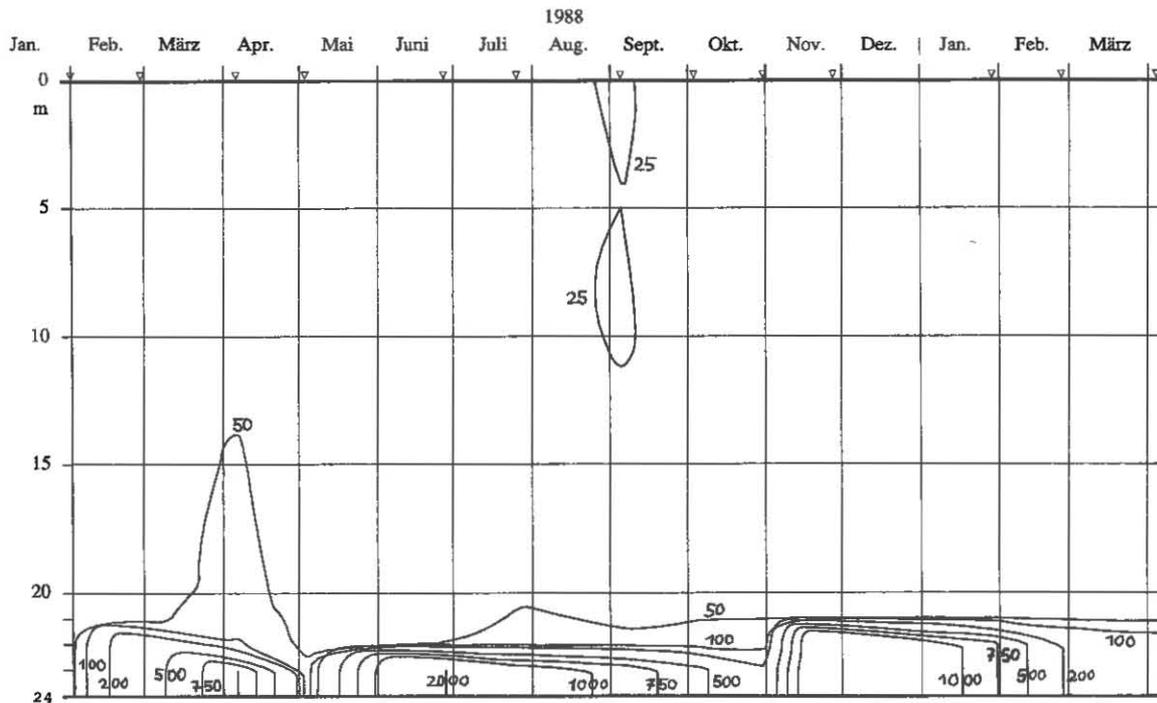


Abb. 57: Bodensee – Untersee, Zellersee:
Konzentration von Eisen total (mg/m^3)

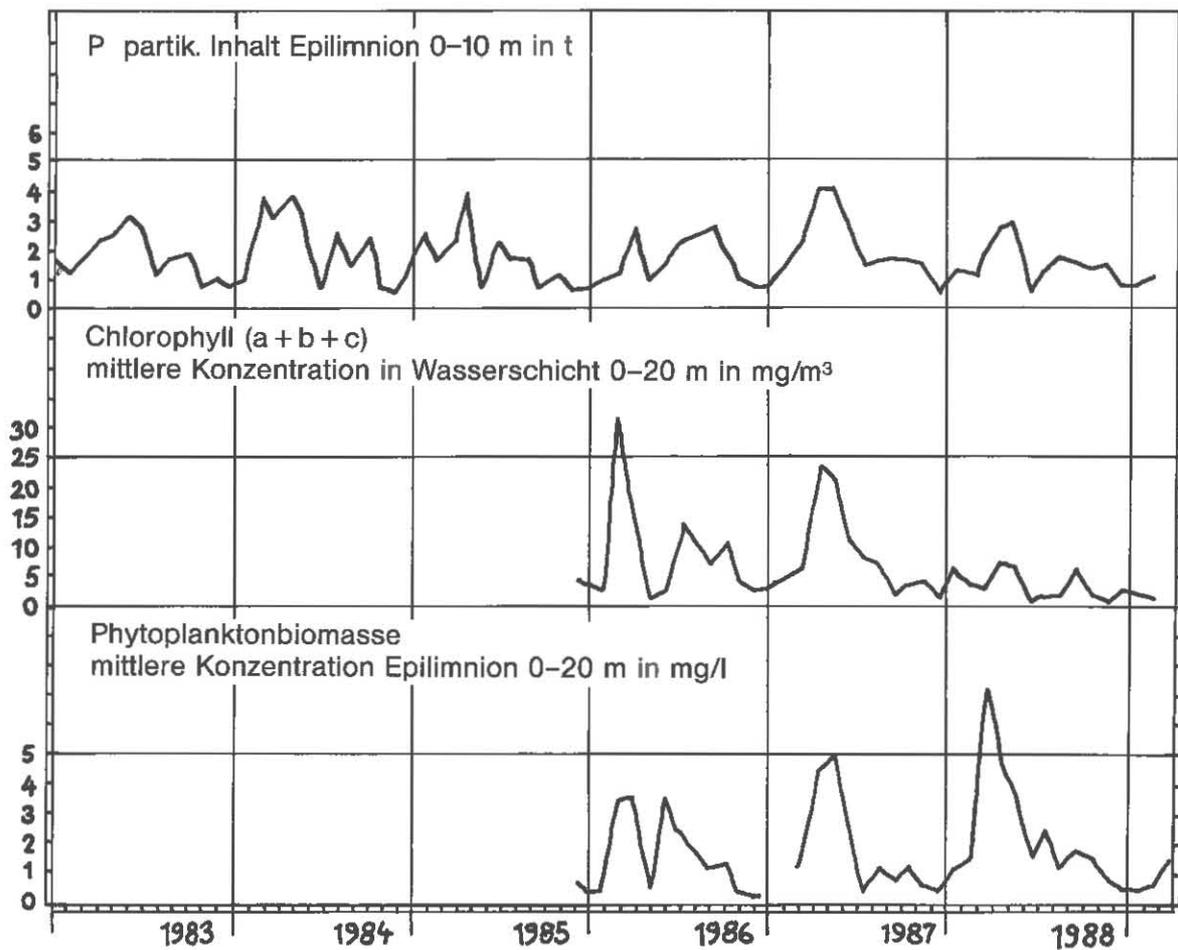


Abb. 58: Bodensee – Untersee, Zellersee:
Chemische Biomassenindikatoren und Algenbiomasse

Abb. 59
Bodensee – Untersee, Zellersee:
Entwicklung des Phytoplanktons, Biomassen in g/m² (0–20 m Tiefe)
Monatsmittel 1988/89

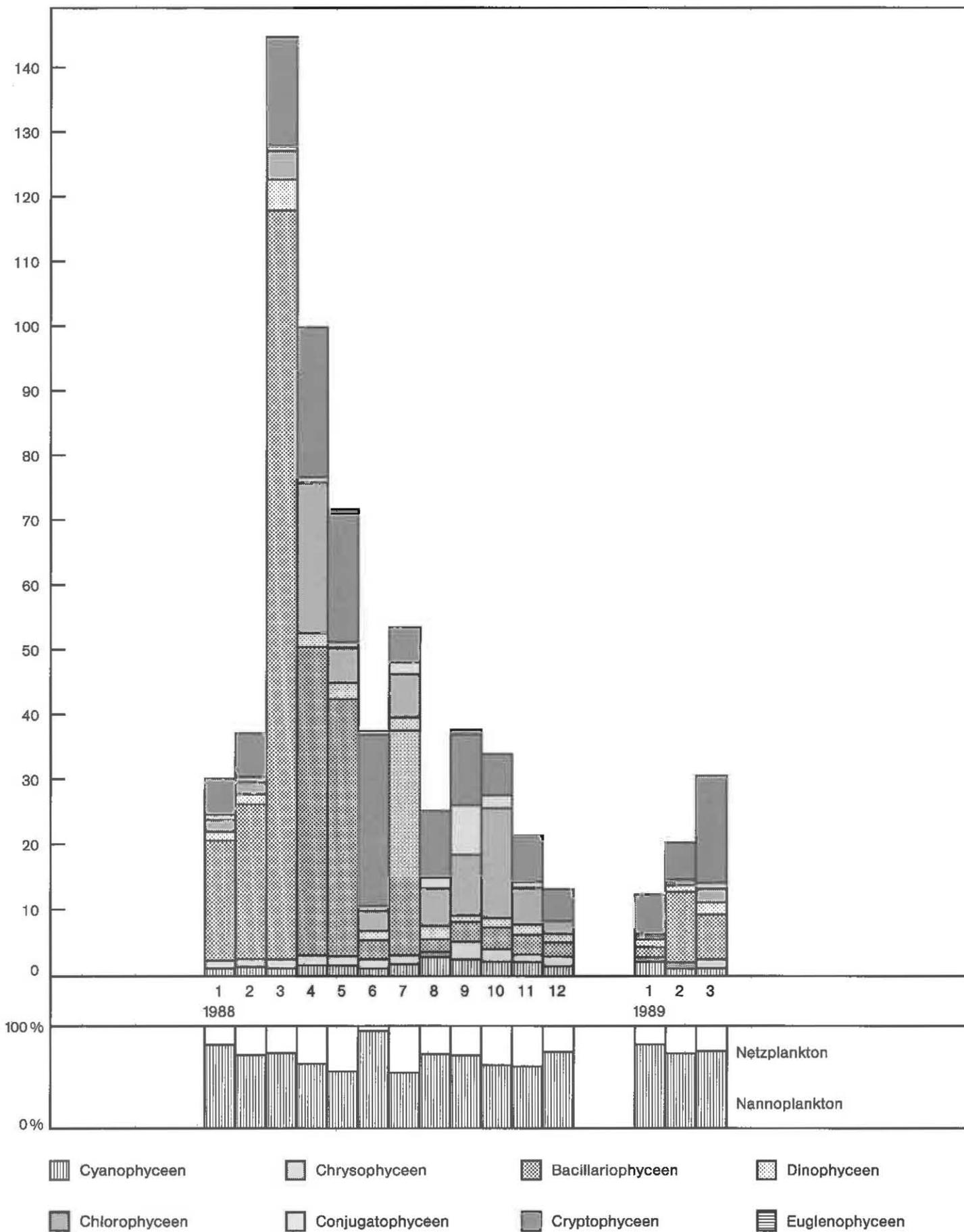
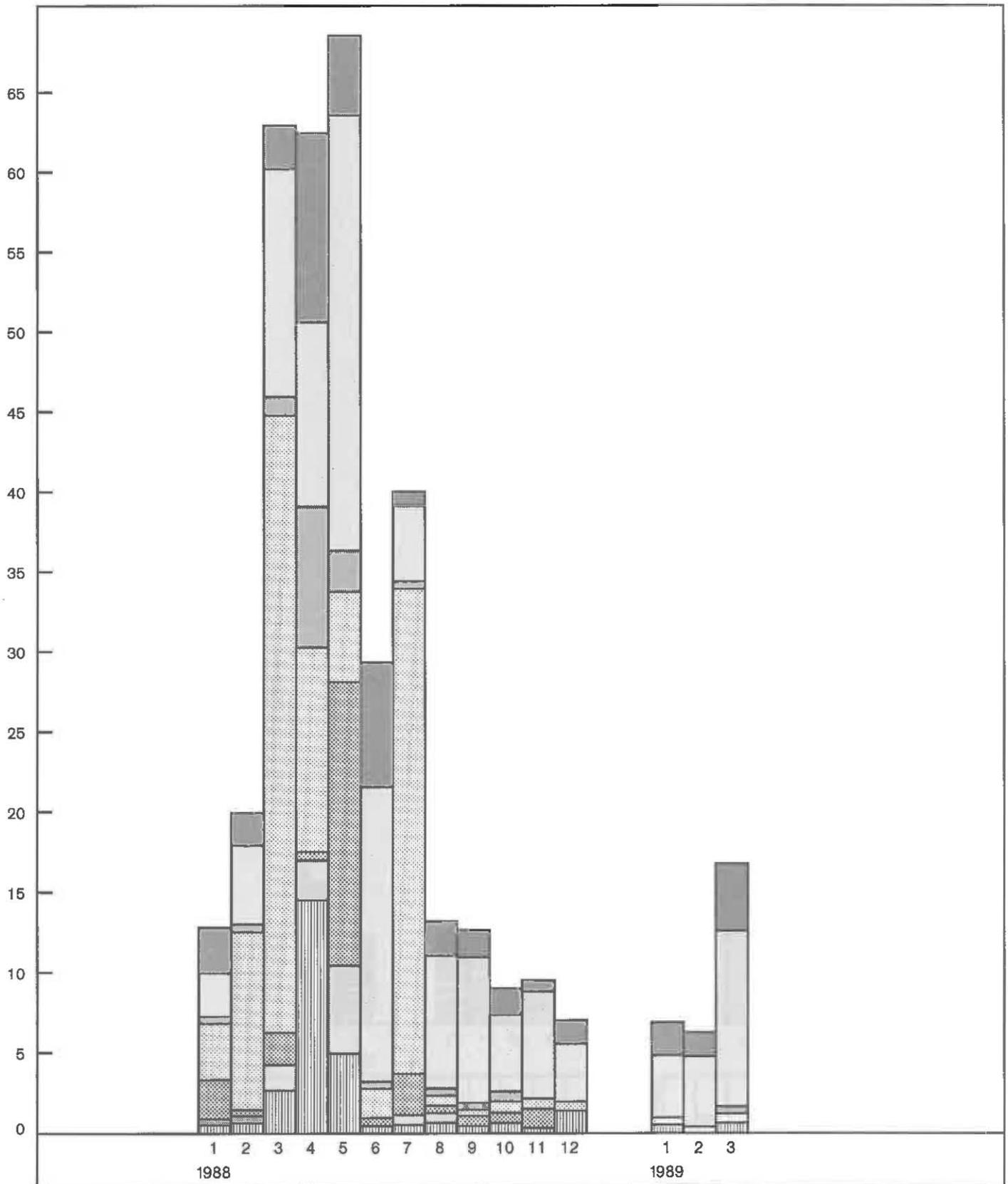


Abb. 60

Bodensee – Untersee, Zellersee:

Entwicklung des Phytoplanktons, Biomassen der Hauptarten in g/m² (0–20 m Tiefe)

Monatsmittel 1988/89



- Asterionella formosa
- Tabellaria fenestrata
- Melosira italica
- Fragilaria crotonensis
- Synedra ssp.
- Cryptomonas ssp.
- Rhodomonas ssp.

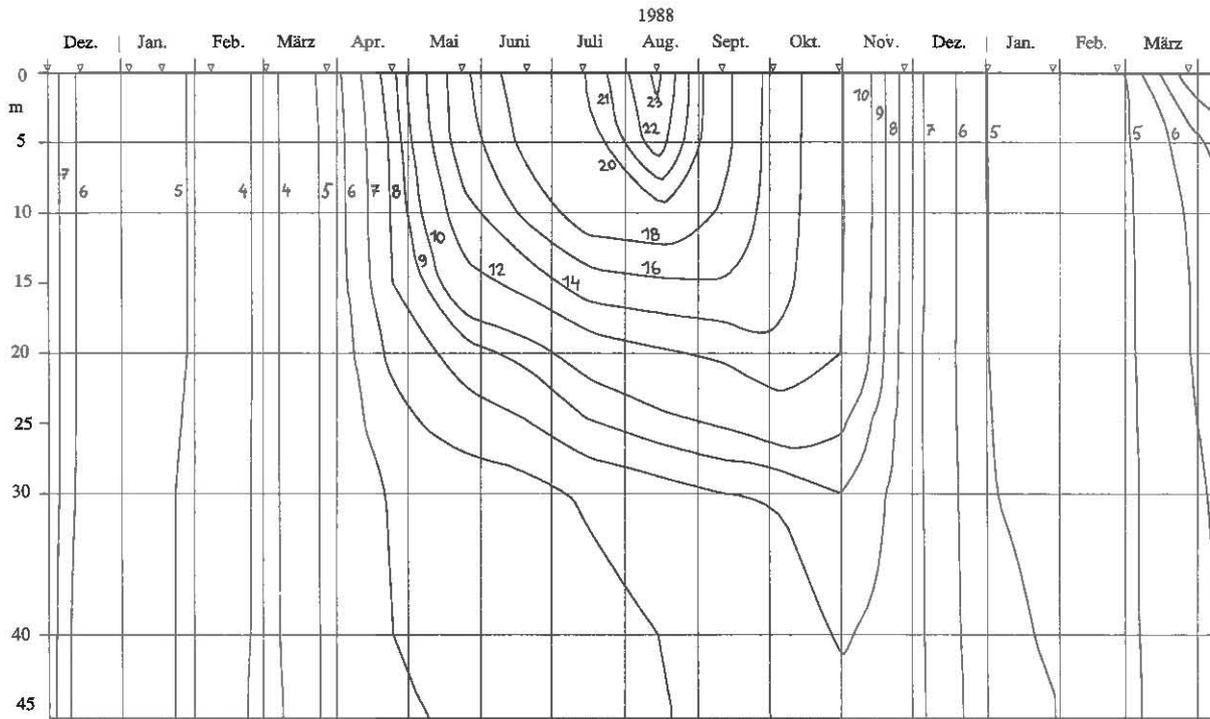


Abb. 61: Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):
Temperatur °C

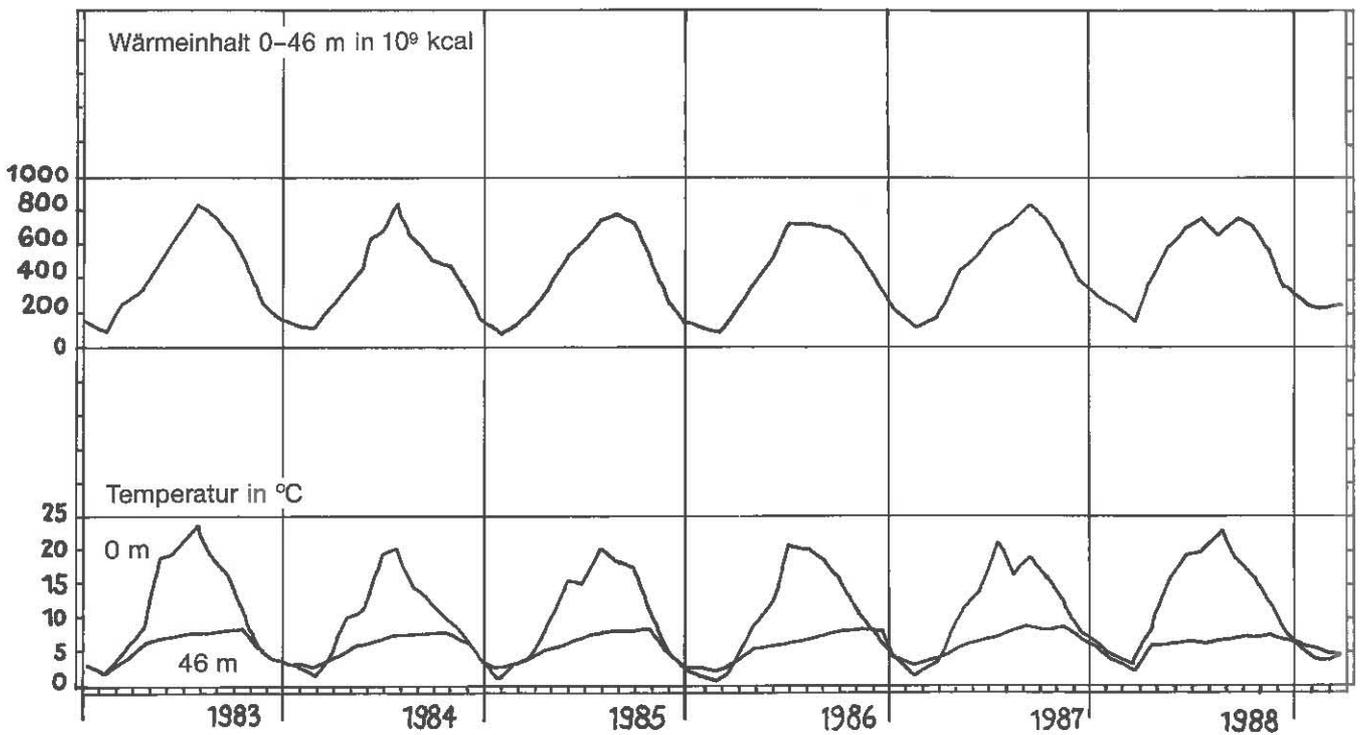


Abb. 62: Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):
Thermik

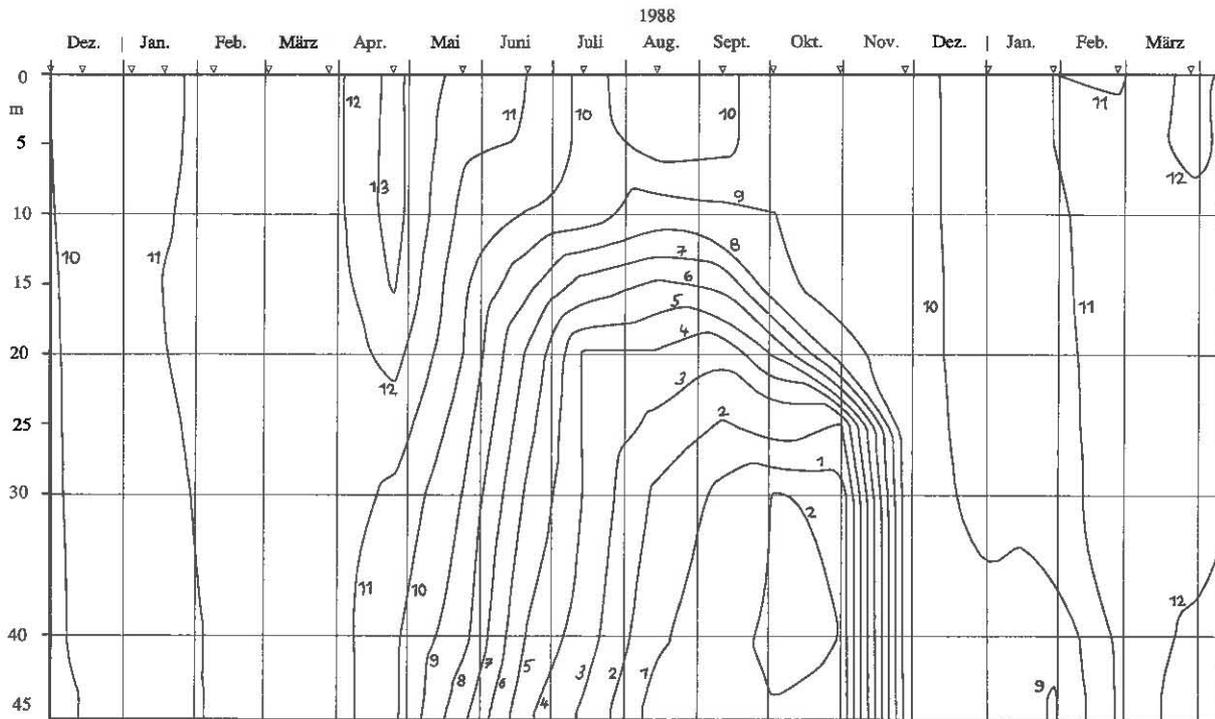


Abb. 63: Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):
Sauerstoff (mg/l)

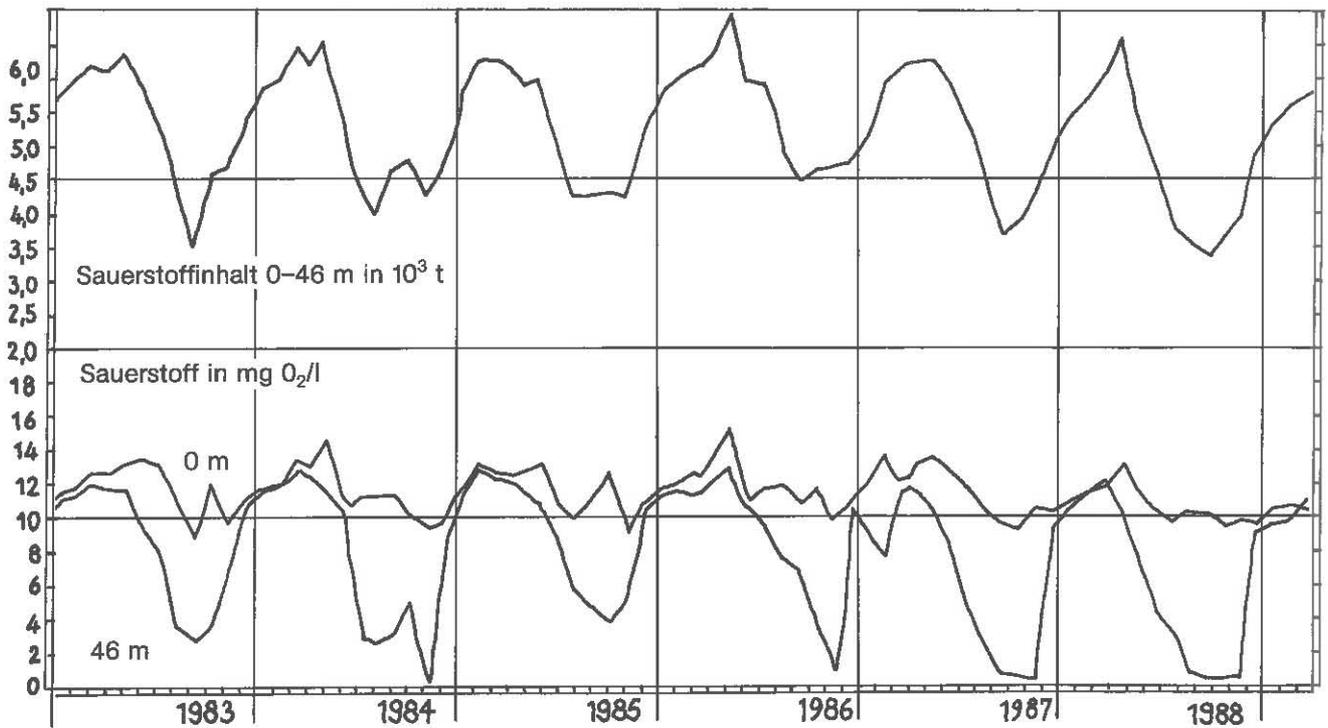


Abb. 64: Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):
Sauerstoffinhalt 0–46 m Tiefe und Sauerstoffkonzentration in 0 und 46 m Tiefe

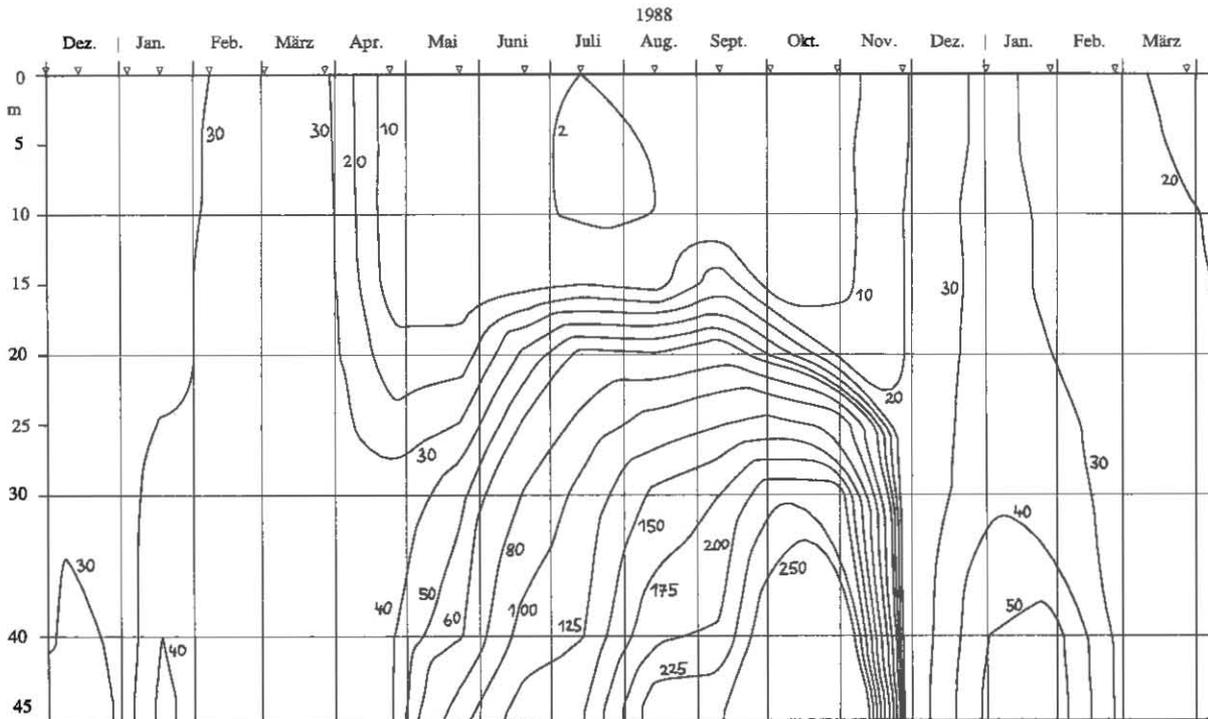


Abb. 65: Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):
Orthophosphat – Phosphor (mg/m^3)

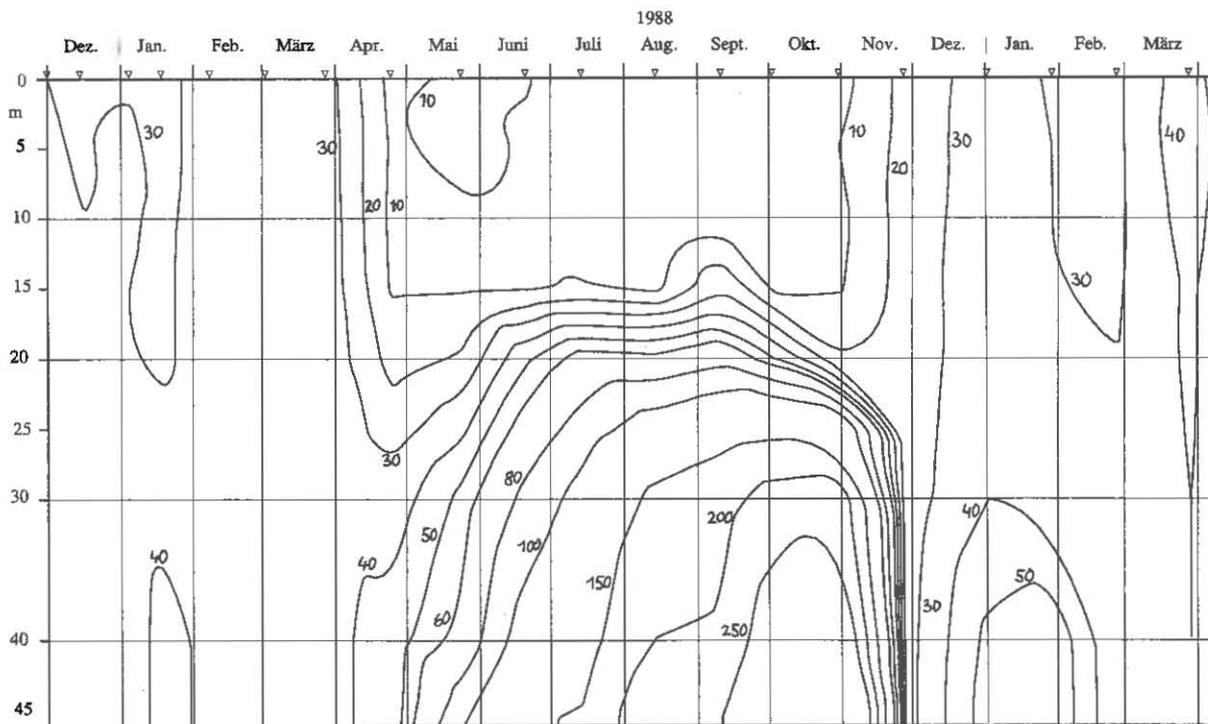


Abb. 66: Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):
Gesamter gelöster Phosphor (mg/m^3)

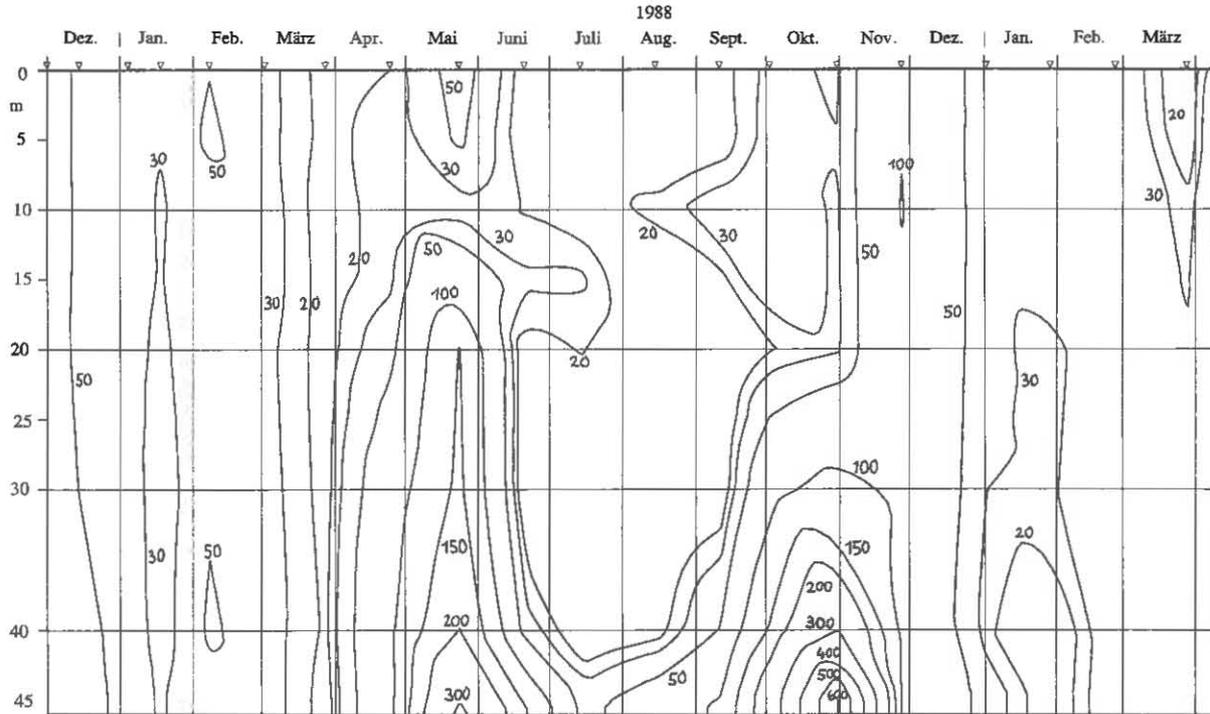


Abb. 71: Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):
Ammonium – Stickstoff (mg/m^3)

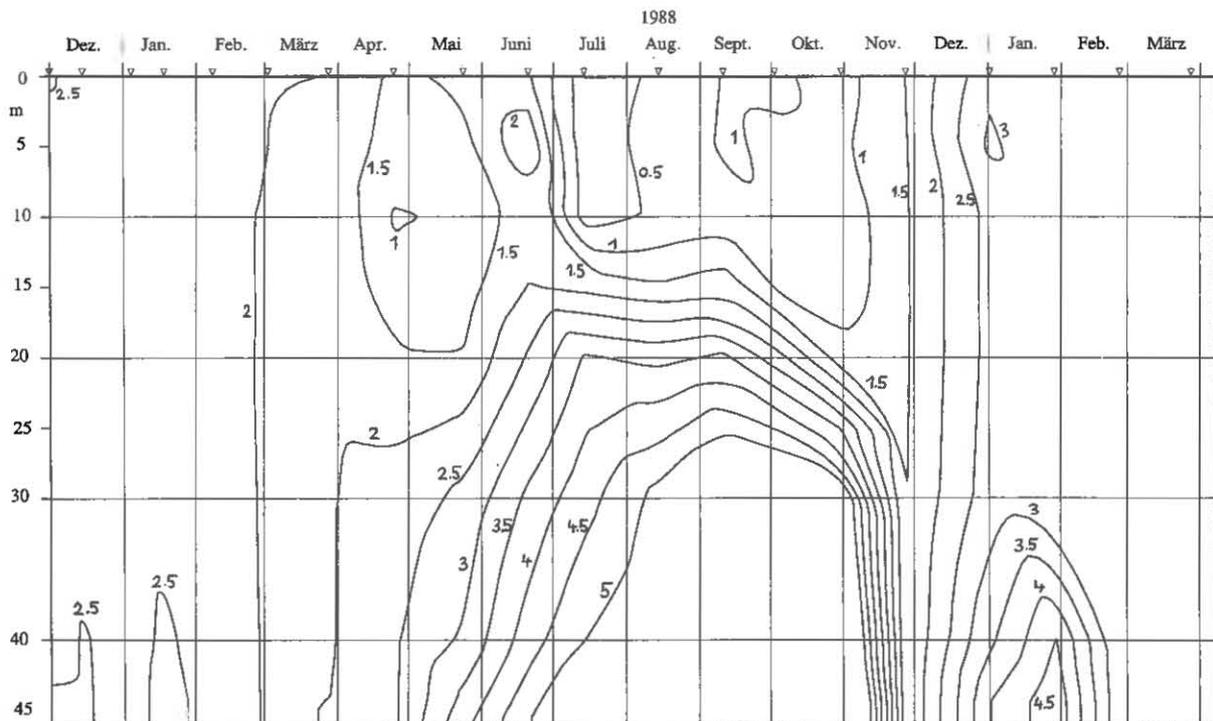


Abb. 72: Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):
Silikat (mg/l)

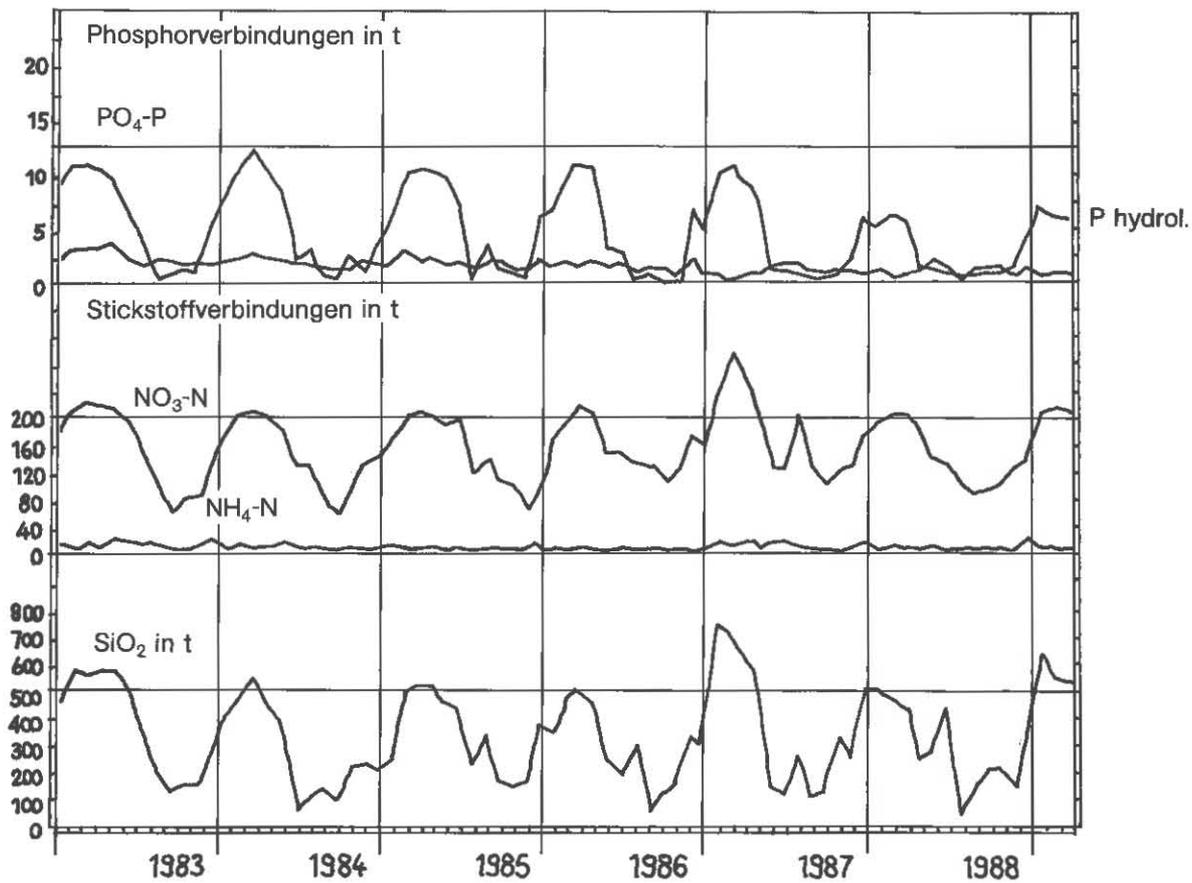


Abb. 73: Bodensee - Untersee, Rheinsee (Berlingen): Nährstoffinhalt im Epilimnion 0-10 m Tiefe

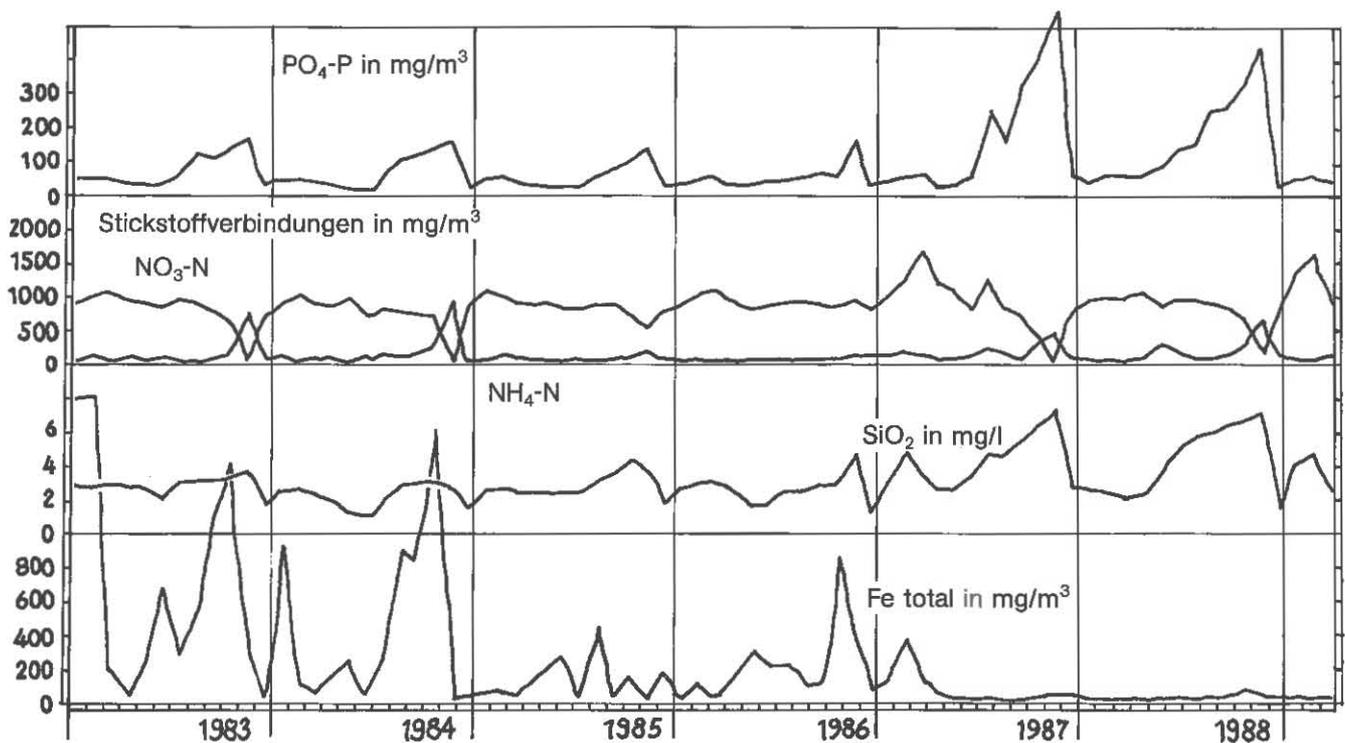


Abb. 74: Bodensee - Untersee, Rheinsee (Berlingen): Nährstoffkonzentration in 46 m Tiefe

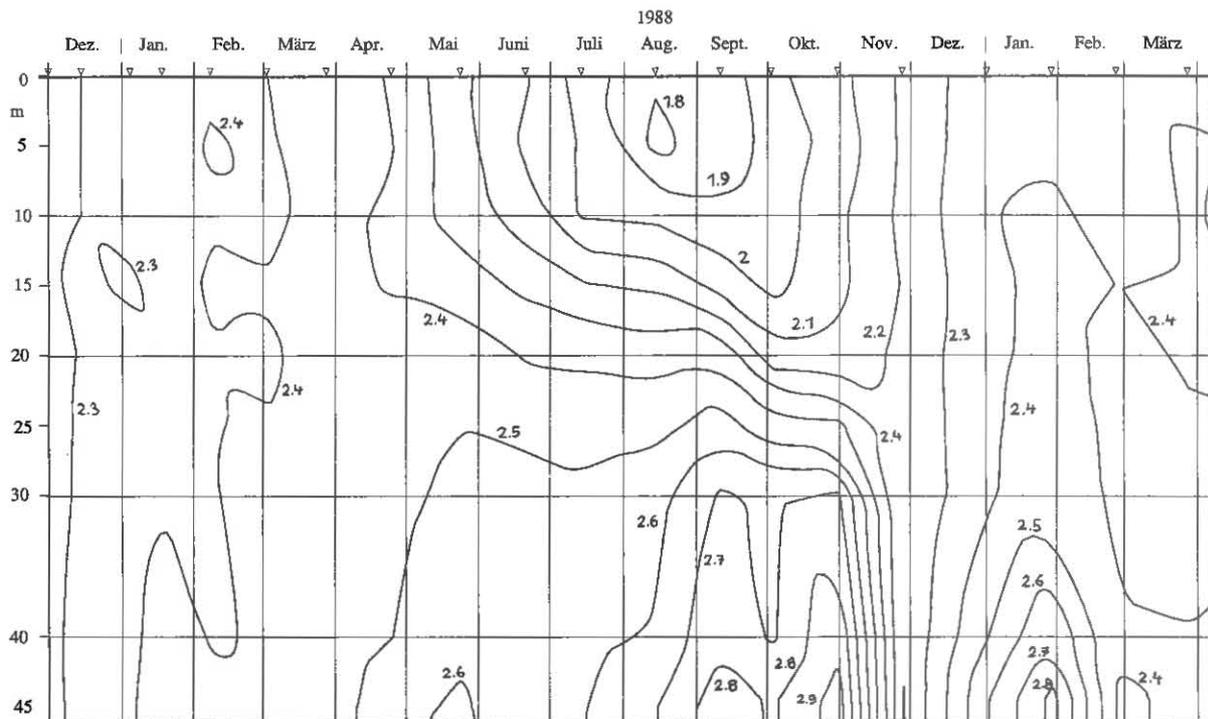


Abb. 75: Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):
Anorganischer Kohlenstoff (mmol/l)

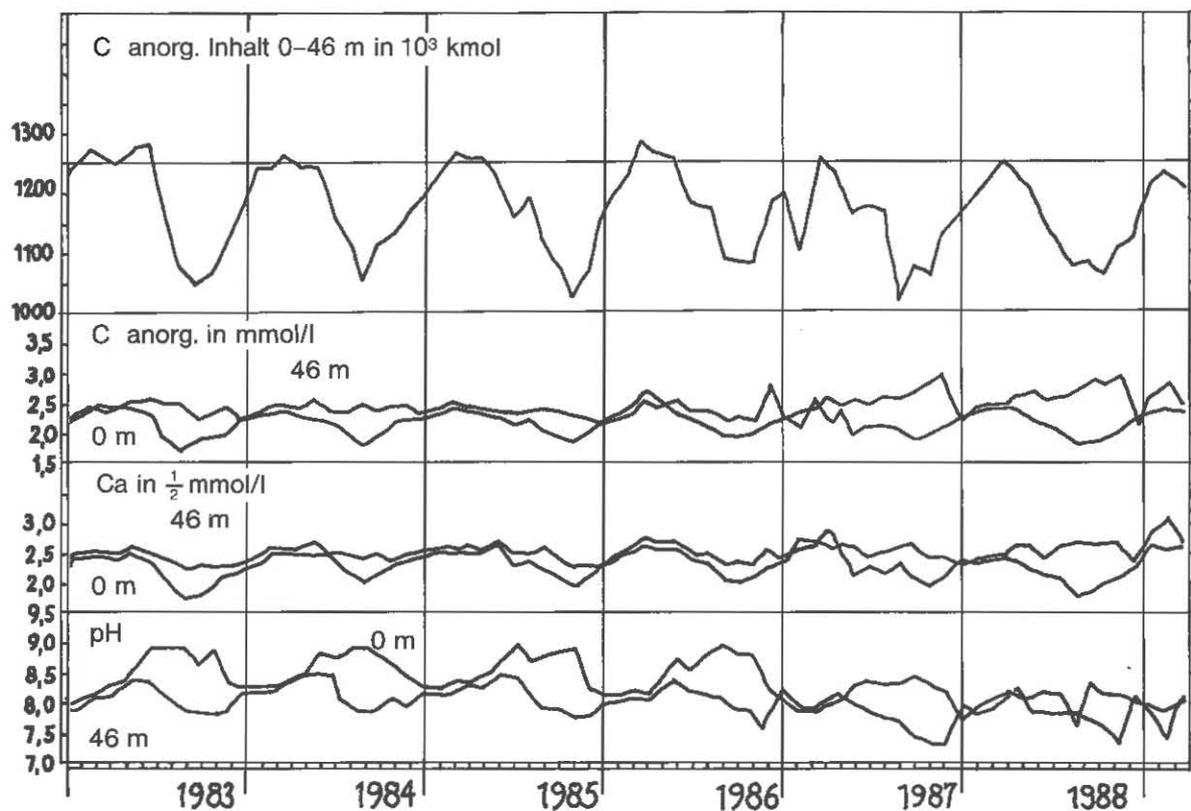


Abb. 76: Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):
Anorganischer Kohlenstoff, Inhalt 0–46 m Tiefe;
Konzentrationen von anorg. Kohlenstoff, Calcium;
pH-Wert

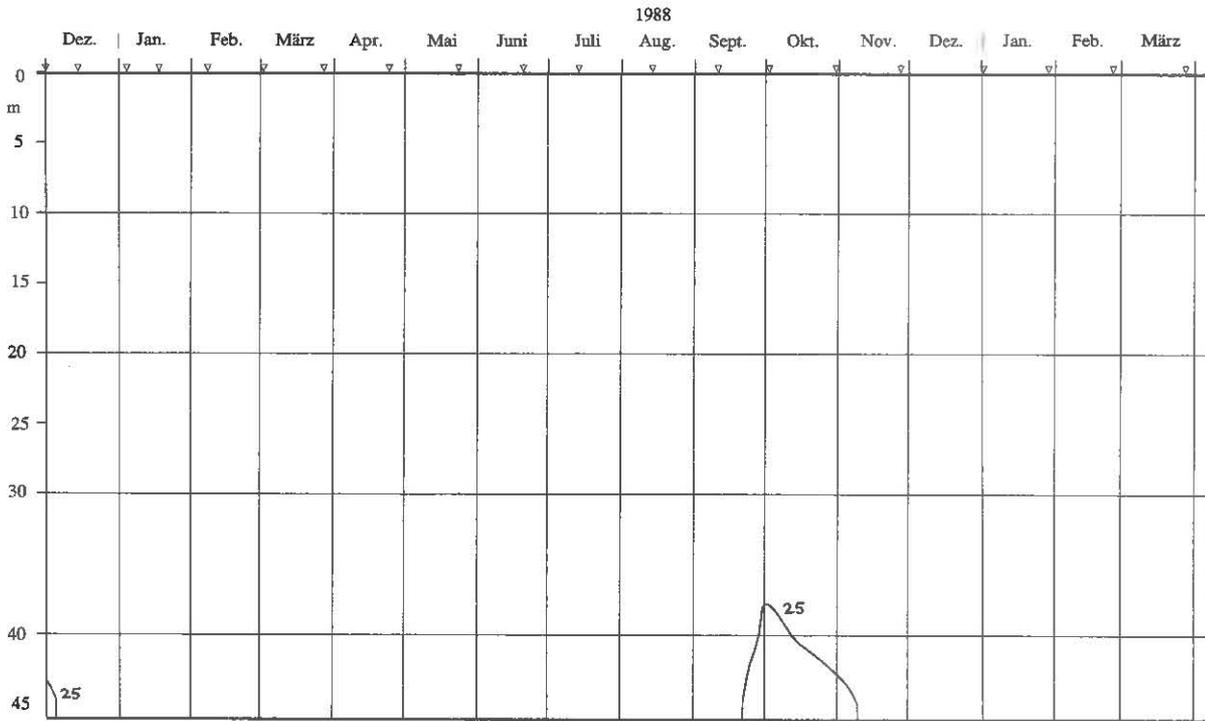


Abb. 77: Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):
Konzentration von Eisen total (mg/m^3)

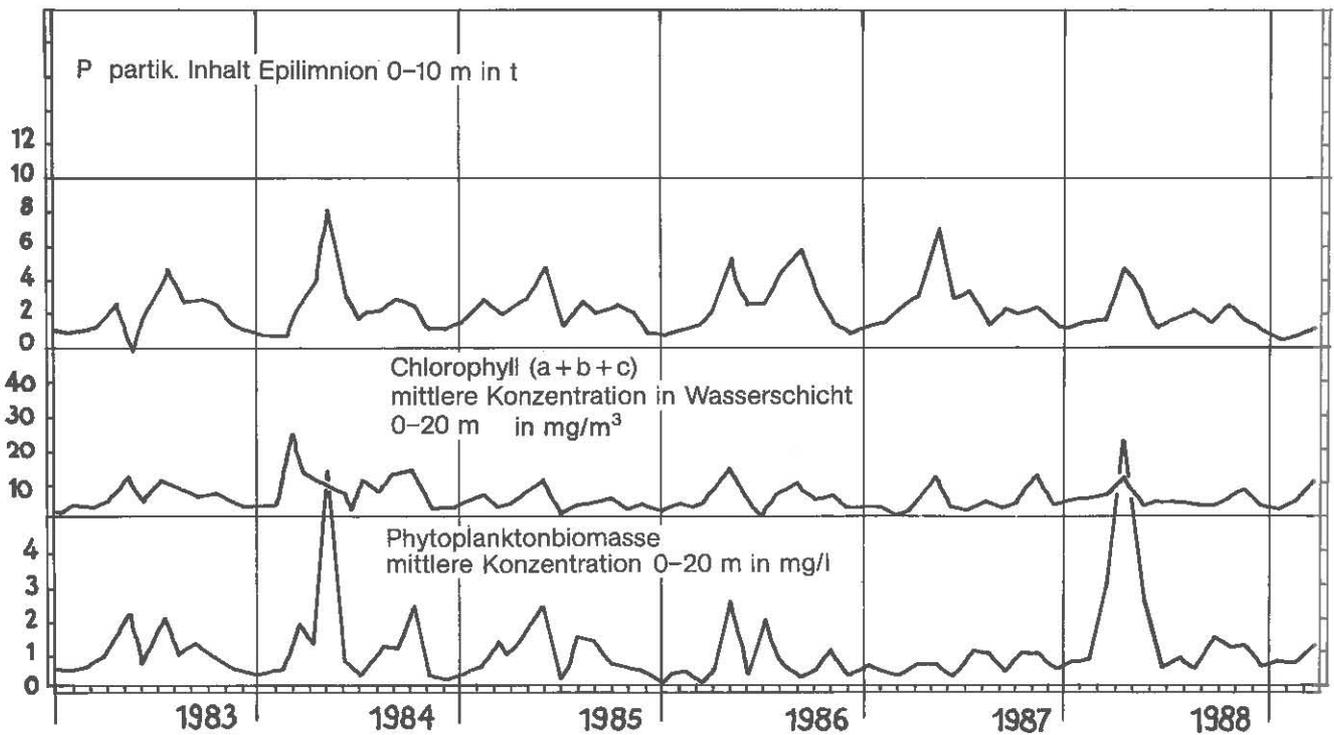
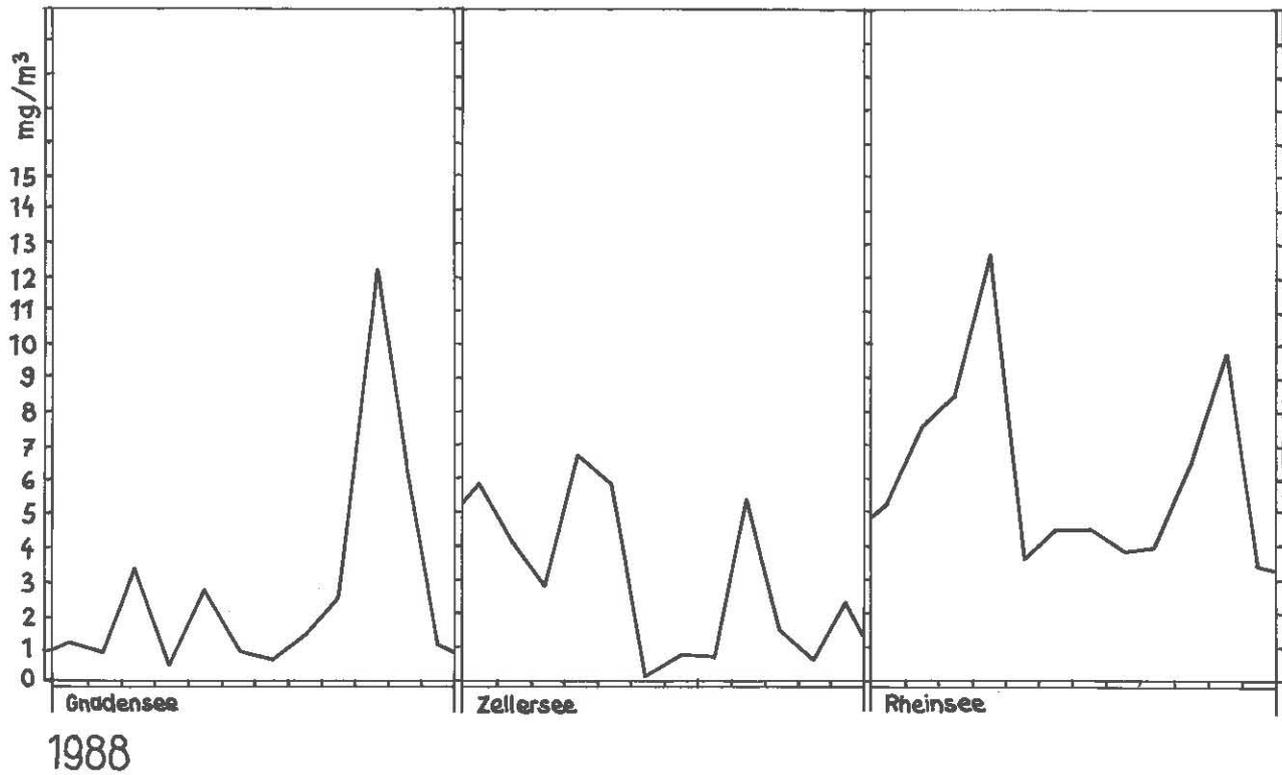


Abb. 78: Bodensee – Untersee, Rheinsee (Berlingen):
Phytoplanktonbiomasse und chemische Biomassenindikatoren

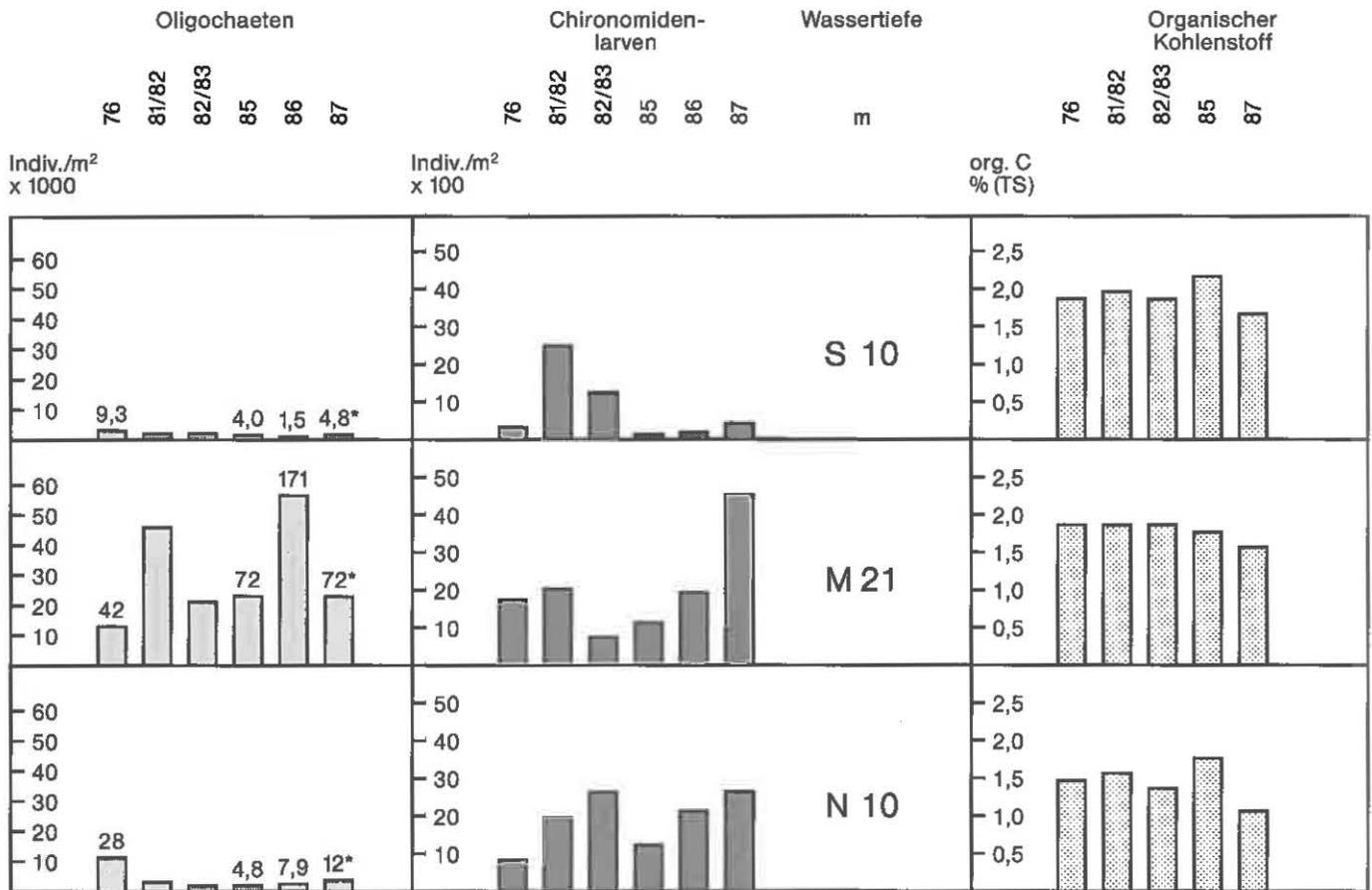


1988

Abb. 79: Bodensee – Untersee:
Chlorophyll a + b + c im mg/m^3 im Gnadensee, Zellersee und Rheinsee,
mittlere Konzentration 0–20 m Tiefe

Abb. 80

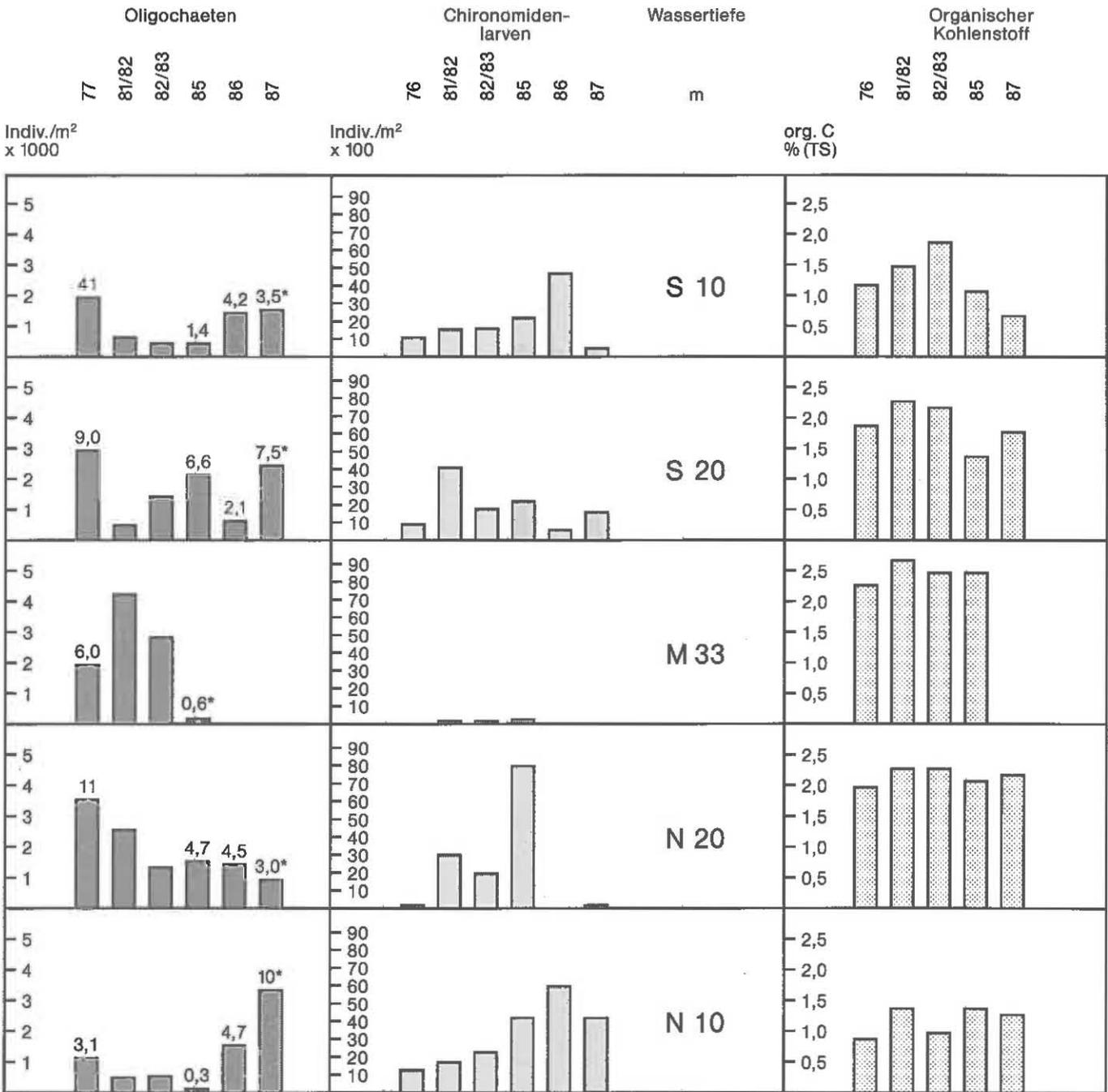
**Bodensee – Untersee (Rheinsee), Seebodenprofil Ermatingen (Nr. 133):
Gehalt des Sediments an Oligochaeten, Chironomidenlarven,
organischem Kohlenstoff bei verschiedenen Wassertiefen**



* IPA-Index gemäß IGKB-Bericht Nr. 38 (1988) bis 0,8: geringe Belastung
IPA-Index 0,9 bis 10: mittlere Belastung / IPA-Index über 10: starke Belastung

Abb. 81

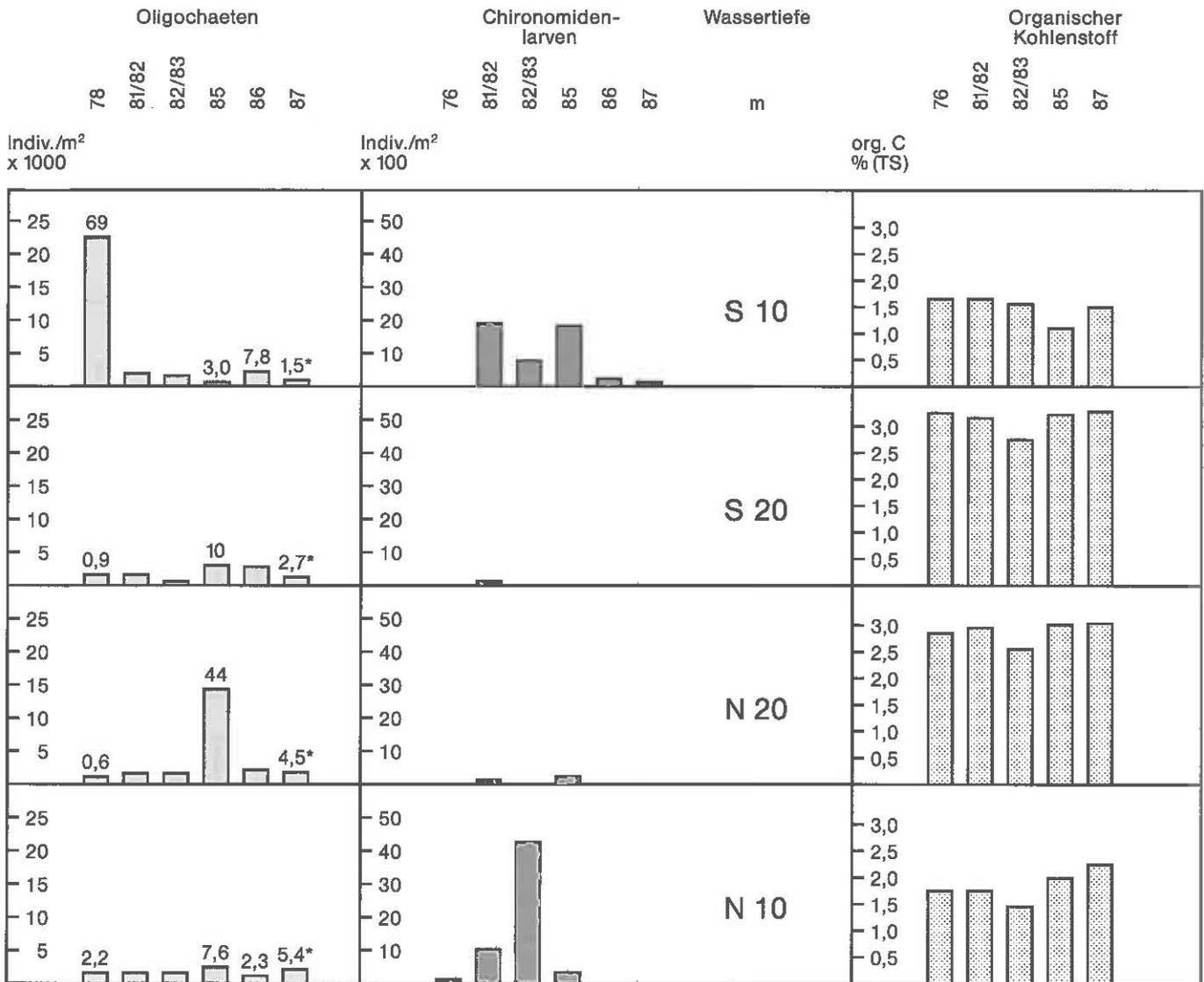
**Bodensee – Untersee (Rheinsee), Seebodenprofil Steckborn (Nr. 141):
Gehalt des Sediments an Oligochaeten, Chironomidenlarven,
organischem Kohlenstoff bei verschiedenen Wassertiefen**



* IPA-Index gemäß IGKB-Bericht Nr. 38 (1988) bis 0,8: geringe Belastung
IPA-Index 0,9 bis 10: mittlere Belastung / IPA-Index über 10: starke Belastung

Abb. 82

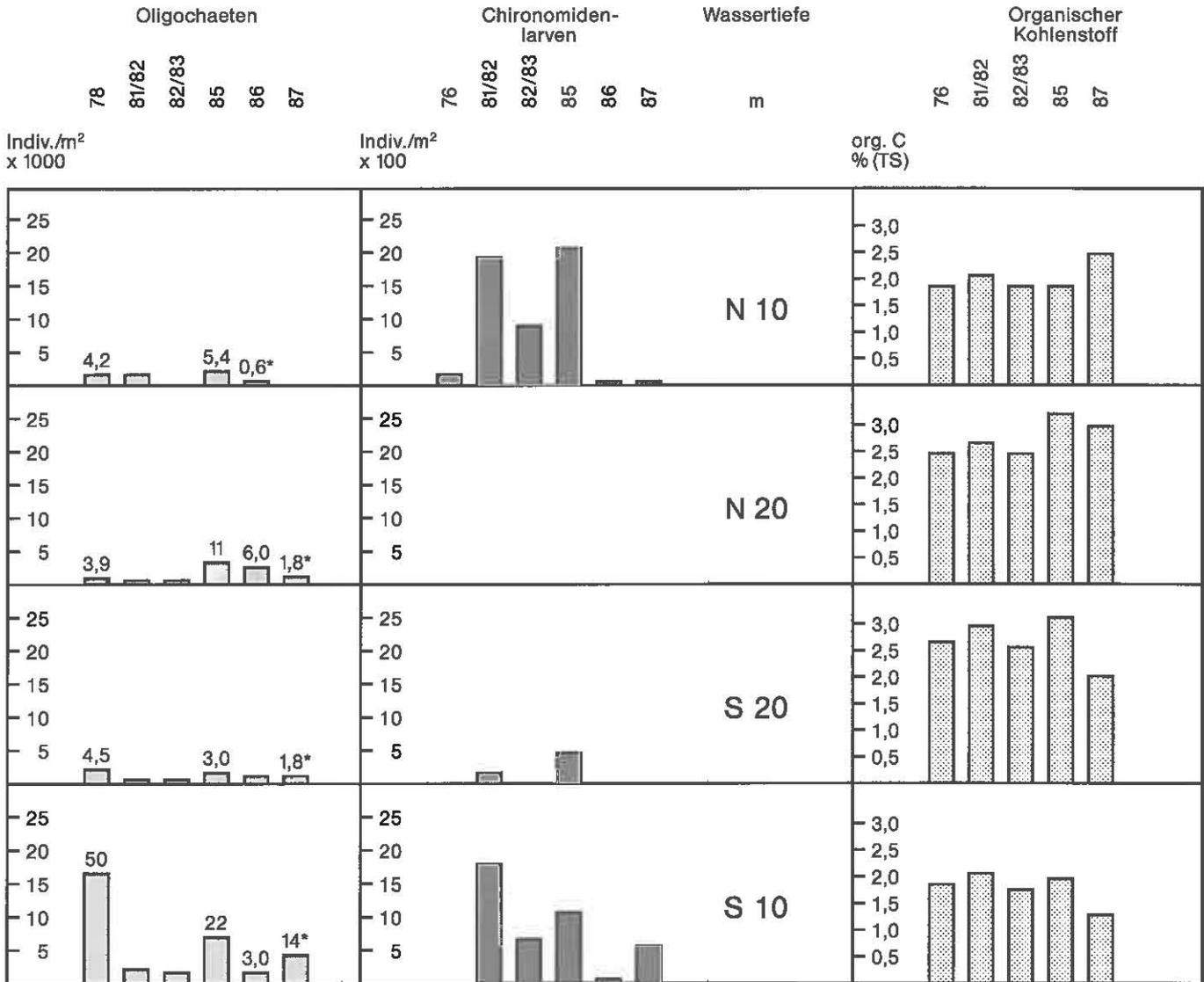
**Bodensee – Untersee (Zellersee), Seebodenprofil Iznang-Ost – Mettnau (Nr. 160):
Gehalt des Sediments an Oligochaeten, Chironomidenlarven,
organischem Kohlenstoff bei verschiedenen Wassertiefen**



* IPA-Index gemäß IGKB-Bericht Nr. 38 (1988) bis 0,8: geringe Belastung
IPA-Index 0,9 bis 10: mittlere Belastung / IPA-Index über 10: starke Belastung

Abb. 83

**Bodensee – Untersee (Gnadensee), Seebodenprofil Allensbach (Nr. 168):
Gehalt des Sediments an Oligochaeten, Chironomidenlarven,
organischem Kohlenstoff bei verschiedenen Wassertiefen**



* IPA-Index gemäß IGKB-Bericht Nr. 38 (1988) bis 0,8: geringe Belastung
IPA-Index 0,9 bis 10: mittlere Belastung / IPA-Index über 10: starke Belastung

Tabelle 1 (1)

Normal-Tiefenserien an den Stationen

Fischbach-Uttwil: 0, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100, 150, 200, 230, 250 m.

Langenargen-Arbon: 0, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100, 150, 190, 200 m.

Bregenzer Bucht: für chemische Untersuchungen:
0, 5, 10, 20, 30, 60 m.

Für Sauerstoff- und Temperaturmessungen:
0, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 60 m.

Überlinger See: 0, 5, 10, 20, 30, 60, 100, 140 m.

Zellersee: 0, 5, 10, 15, 20, 22 oder 23 oder 24⁺ m.

Rheinsee: 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 44 oder 45 oder 46⁺ m.

⁺ je nach Seewasserstand

Tabelle 1 (2)

Untersuchungstermine Januar 1988 bis April 1989 an den Stationen Fischbach-Uttwil (F), Langenargen-Arbon (L), Bregenzer Bucht (B) und von Januar 1988 bis Dezember 1988 an den Stationen Zellersee (Z) und Rheinsee bei Berlingen (R)

OBERSEE-STATIONEN

12.01.1988	F L
26.01.	B
09.02.	F L
15.02.	B
02.03.	F L
22.03.	B
12.04.	F L B
02.05.	F L
10.05.	B
06.06.	F L
08.06	B
04.07.	F L
06.07.	B
01.08.	F L B
06.09.	F L B
04.10.	F L
19.10.	B
07.11.	F L
08.11.	B
06.12.	F L
10.01.1989	F L
02.02.	F L
21.02.	B
07.03.	F L
29.03.	B
04.04.	F L
24.04.	B

UNTERSEE-STATIONEN

04.01.1988	Z
05.01.	R
19.01.	R
01.02.	Z
09.02.	R
29.02.	Z
02.03.	R
28.03.	R
05.04.	Z
25.04.	R
02.05.	Z
24.05.	R
30.05.	Z
21.06.	R
27.06.	Z
14.07.	R
25.07.	Z
15.08.	R
05.09.	Z
12.09.	R
03.10.	Z R
31.10.	Z
01.11.	R
28.11.	Z
29.11.	R
03.01.1989	Z R
30.01.	Z
31.01.	R

Tabelle 1 (3)

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

Temperatur	F L B	Z R
Leitfähigkeit bei 20°C	F L B	Z R
pH	F L B	Z R
Sauerstoff	F L B	Z R
Alkalinität	F L B	Z R
Gesamthärte	F L B	Z R
Calcium	F L	Z R
Magnesium	F L	
Silikat	F L	Z R
Orthophosphat	F L B	Z R
Phosphor gelöst (Im Filtrat nach Aufschluß)	F L B	Z R
Phosphor partikulär	F L	Z R
Phosphor total (im Rohwasser nach Aufschluß)	B	
Ammonium	F L B	Z R
Nitrit	F L B	Z R
Nitrat	F L B	Z R
Kjeldahl-Stickstoff im Filtrat	F L	R
partikulärer Stickstoff direkt	F L	
Chlorophyll (a+b+c) nach Goltermann	F	Z R
Phaeophytin nach Goltermann	F	Z R
Chlorid	F L G	Z R
Sulfat	F L	
Eisen total	F L	Z R
Mangan total	F L	
Natrium	F L	
Kalium	F L	
KMNO ₄ -Verbrauch	F L B	
UV-Extinktion (260 nm)	F L	Z R

Berechnete Inhaltsstoffe:

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

Tabelle 2: SEEKENNDATEN

Bodensee-Obersee (Fischbach-Uttwil), Seejahr 1988 (Meßdaten vom 12.04.88 bis 04.04.89)

IV bis XII: Monate 1988; I bis III, IV-89: Monate 1989

Parameter	Messwerte (a)				Stoffinhalt (b)								Stoffbilanz (b)		
	Epilimnion (0 - 10 m)		Seebodennähe (1 m über Grund)		See total Seejahr				Epilimnion (0 - 10 m)		Hypolimnion (200 - 252,5 m)		Beginn 12.4. - Ende bis Seejahr 6.9.	6.9. bis 4.4.89	
	Maximum Minimum	Zeit	Maximum Minimum	Zeit	Beginn 12.04.88	Ende 04.04.89	Maximum Minimum	Zeit	Maximum Minimum	Zeit	Maximum Minimum	Zeit			
Thermik (a) °C, (b) 10 ¹² Kcal	21,1 4,6	VIII III	4,5 4,0	III II,V	234	247	323 221	IX III	82,6 21,4	VIII II	6,5 5,8	III V	+ 13	+ 89	- 76
Sauerstoff (a) mg/l, (b) 10 ³ t	15,1 8,2	VI VII	7,3 4,6	IV,V X	514	470	527 433	XII X	58 396	V X	12,4 9,6	V II	- 44	- 77	+ 33
Orthophosphat -P (a) mg/m ³ , (b) t	31 <1	III XI	92 66	X VII	1762	1590	1762 1308	IV XII	132 <1	III XI	103 80	X III	- 172	- 249	+ 77
Phosphor hydrolysierb. (a) mg/m ³ , (b) t	14 1	V VIII	9 2	VIII II	310	299	416 149	V XII	57 9	V VIII	15 5	I XII	- 11	- 139	+ 118
Phosphor gelöst (a) mg/m ³ , (b) t	39 2	IV XI	97 72	X VII,III	2072	1892	2120 1457	V XII	165 10	IV XI	107 87	XII III	- 180	- 387	+ 207
Phosphor partikulär (a) mg/m ³ , (b) t	26 2	V XII,I,III	4 1	VI,VIII V,VII,XI,XII,I	239	244	306 63	V XI	100 9	V I	3,5 <1,0	V XI,I	+ 5	- 100	+ 105
Phosphor total (a) mg/m ³ , (b) t	53 6	IV XI	100 73	X VII	2311	2137	2426 1523	V XII	217 47	IV VIII	112 89	X III	- 147	- 487	+ 313
Nitrat-N (a) mg/m ³ , (b) t	970 440	IV,II IX	1040 790	IV,VII,X IV-89	47039	38879	47083 38879	V IV-89	4224 1928	III IX	1689 1199	X IV-89	-8160	-2506	+5654
Nitrit-N (a) mg/m ³ , (b) t	15 <1	VII II,III	2 <1	VI,IX,XI,XII,IV-89 IV,VII,II,III	16	69	138 3	IX III	61 1	VII II	2 <1	IX,XI IV,II,III	+ 53	+ 122	- 69
Ammonium-N (a) mg/m ³ , (b) t	50 <1	V,VI IV,XI,XII,I	20 10	V,XII,I,III IV,VI-XI,II,IV-89	228	744	1241 210	V XI	207 33	VI IV,XI	29 8	V IV,XI	+ 516	+ 596	- 80
Stickstoff partikulär (a) mg/m ³ , (b) t	130 10	IV-89 I,III	30 <1	VI,VIII IV,XI,I	462	1305	1798 462	VIII IV	427 55	V I	37 <1	VI IV,XI,I	+ 843	+1000	- 157
Silikat (SiO ₂) (a) mg/l, (b) 10 ³ t	2,7 0,3	III VII	5,4 3,9	X VII	115	125	129 93	III XII	11 1,9	III VIII	6,6 5,1	IV-89 IV	+ 10	- 5	+ 15
Kalium (a) mg/l, (b) 10 ³ t	1,4 1,0	I VII	1,4 1,1	VI,IX XI	61,8	57,8	61,8 55,2	IV XI	5,7 4,7	III VII	2,0 1,7	X XI	- 4	- 1,2	- 2,8
Natrium (a) mg/l, (b) 10 ³ t	4,6 3,4	IV X	4,9 4,2	IV I,III,IV-89	225	194	225 189	IV X	20 15	IV X	7,0 6,1	IV XI,I,III,IV-89	- 31	- 28	- 3

Tabelle 3

Vergleich von Meßwerten der verschiedenen Teile des Bodensee-Obersees
Seejahr 1988/89 an den Stationen
Fischbach-Uttwil (F) und Langenargen-Arbon (L)

Meßwerte in "0" m	F	L
Temperatur in °C		
Maximum	21,1	21
Minimum	4,6	4,9
Sauerstoff in mg O ₂ /l		
Maximum	15,1	12,1
Minimum	8,2	7,8
Leitfähigkeit bei 20° in µS cm ⁻¹		
Maximum	316	318
Minimum	233	235
pH in pH-Einheiten		
Maximum	8,89	8,92
Minimum	7,92	7,90
Orthophosphat in mg PO ₄ -P/m ³		
Maximum	31	45
Minimum	<1	<1
Phosphor gelöst in mg P/m ³		
Maximum	39	34
Minimum	2	<1
Phosphor total in mg P/m ³		
Maximum	53	44
Minimum	6	6
Nitrat in mg NO ₃ -N/m ³		
Maximum	970	1030
Minimum	440	490
Ammonium in mg NH ₄ -N/m ³		
Maximum	50	70
Minimum	<1	<1
Eisen total in mg.Fe/m ³		
Maximum	29	32
Minimum	6	6
Kohlenstoff anorg. in mmol C/l		
Maximum	2,44	2,46
Minimum	1,87	1,86
Phosphor partik. in mg P/m ³		
Maximum	26	21
Minimum	2	1
Stickstoff partik. in mg N/m ³		
Maximum	130	110
Minimum	10	<1

Meßwerte in Seebodennähe	F	L
	250 m	200 m
Temperatur in °C		
Maximum	4,5	4,6
Minimum	4,0	4,0
Sauerstoff in mg O ₂ /l		
Maximum	7,3	8,8
Minimum	4,6	5,1
pH in pH-Einheiten		
Maximum	8,21	8,17
Minimum	7,65	7,46
Orthophosphat in mg PO ₄ -P/m ³		
Maximum	92	92
Minimum	66	55
Nitrat in mg NO ₃ -N/m ³		
Maximum	1040	1060
Minimum	790	790
Ammonium in mg NH ₄ -N/m ³		
Maximum	20	30
Minimum	10	10
Eisen total in mg Fe/m ³		
Maximum	30	76
Minimum	9	9
Kohlenstoff anorganisch in mmol C/l		
Maximum	2,68	2,75
Minimum	2,46	2,40
Phosphor total in mg P/m ³		
Maximum	100	102
Minimum	73	63

Tabelle 4: SEEKENNDATEN

Bodensee-Untersee (Zellersee), Seejahr 1988 (Meßwerte vom 04.01.88 - 03.01.89)

I - XII: Monate 1988; I - 89: Januar 1989

Parameter	Messwerte (a)				Stoffinhalt (b)						Stoffbilanz (b)		
	Epilimnion (0 - 10 m)		Seebodennähe (1 m über Grund)		See total Seejahr			Epilimnion (0 - 10 m)			Beginn - Ende Seejahr	4.1. 25.7. bis bis 25.7. 3.1.89	
	Maximum Minimum	Zeit	Maximum Minimum	Zeit	Beginn 4.1.88	Ende 3.1.89	Maximum Minimum	Zeit	Maximum Minimum	Zeit			
Thermik (a) °C, (b) 10 ⁹ kcal	21,4 3,4	VII III	11,3 3,4	XI III	1302	917	3339 917	VIII II,I-89	2108 363	VIII III	-385	+2037	-2422
Sauerstoff (a) mg/l, (b) t	15,4 9,2	V XII	12,2 <1	III VII-XI	2054	1970	2519 1385	V X	1575 943	V X	- 84	- 439	+ 355
Orthophosphat-P (a) mg/m ³ , (b) t	51 <1	XII IV,V,VII-IX	708 17	XI IV	6,5	8,4	11,7 0,3	X V	5,4 < 0,1	XII V,VII-IX	+ 1,9	- 3,0	+ 4,9
Phosphor hydrolysiert (a) mg/m ³ , (b) t	14 5	IV IX	50 8	XI III	2,2	1,9	2,5 1,3	IV V	1,4 0,6	IV IX	- 0,3	- 0,3	+ 0
Phosphor gelöst (a) mg/m ³ , (b) t	64 5	XII IX	758 30	XI IV	8,7	10,2	13,9 1,7	X V	6,8 0,6	XII IX	+ 1,5	- 3,4	+ 4,9
Phosphor partikul. (a) mg/m ³ , (b) t	29 5	V VI	424 13	VII II	2,7	1,4	5,1 1,1	IV VI	2,9 0,6	V VI	- 1,3	+ 1,0	- 2,3
Phosphor total (a) mg/m ³ , (b) t	71 19	XII IX	810 57	IX II	11,4	11,6	16,5 5,5	X VI	7,6 2,1	XII IX	+ 0,2	- 2,4	- 2,6
Nitrat-N (a) mg/m ³ , (b) t	1490 520	IV IX	2120 <1	IV VII-XI	220	242	277 97	IV IX	150 57	III IX	+ 22	- 103	- 125
Nitrit-N (a) mg/m ³ , (b) t	27 7	XI I	37 <1	V VII-XI	1,3	3,0	5,0 1,3	XI I	2,9 0,8	XI I	+ 1,7	+ 1,3	+ 0,4
Ammonium-N (a) mg/m ³ , (b) t	10 10	I-I-89 I-I-89	1760 10	XI II,III	1,9	1,9	28,2 1,9	X I-IV,VII,I-89	1,1 1,1	I-I-89 I-I-89	+ 0	+ 15,5	- 15,5
Silikat (SiO₂) (a) mg/l, (b) t	2,7 0,2	I-89 IV	6,7 1,5	XI III	471	498	498 62	I-89 IV	280 21	I-89 IV,V	+ 27	- 287	+ 314
Calcium (a) mg/l, (b) t	57,3 42,9	IV VIII	65,3 48,5	IV XII	9730	9780	10840 8420	IV IX	6070 4690	IV IX	+ 50	-1050	+1100
Magnesium (a) mg/l, (b) t	7,3 5,1	II IX	7,8 6,8	XI	1270	1190	1370 1030	II IX	780 560	II IX	- 80	- 180	+ 100
Chlorid (a) mg/l, (b) t	10,1 5,4	XII VIII	22,3 8,5	V I	1540	1650	1940 1130	IV VIII	1080 580	XII VIII	+110	- 410	+ 520

Tabelle 5: SEEKENNDATEN

Bodensee-Untersee (Rheinsee, Berlingen), Seejahr 1988 (Meßdaten vom 05.01.88 - 03.01.89)

I - XII: Monate 1988; I - 89: Januar 1989

Parameter	Messwerte (a)				Stoffinhalt (b)						Stoffbilanz (b)		
	Epilimnion (0 - 10 m)		Seebodennähe (1 m über Grund)		See total Seejahr				Epilimnion (0 - 10 m)		Beginn 5.1. 14.7. - Ende bis bis Seejahr 14.7. 3.1.89		
	Maximum Minimum	Zeit	Maximum Minimum	Zeit	Beginn 05.01.88	Ende 03.01.89	Maximum Minimum	Zeit	Maximum Minimum	Zeit			
Thermik (a) °C, (b) 10 ⁹ kcal	23,3 3,7	VII III	7,8 3,6	XI III	2980	2560	8630 1890	VII III	4800 800	VIII III	-420	+4910	-5330
Sauerstoff (a) mg/l, (b) t	13,5 8,5	IV VIII	12 0,2	III X	5480	5370	6510 3390	IV IX	2900 2010	IV X	-110	-1760	+1650
Orthophosphat-P (a) mg/m ³ , (b) t	35 1	I-89 VII	420 21	XI XI	13,0	17,8	22,7 5,3	IX IV	7,2 <1	I-89 V-X	+ 4,8	+ 2,1	+ 1,7
Phosphor hydrolysierb. (a) mg/m ³ , (b) t	13 <1	V VII	6 2	XI IX	2,7	1,1	3,9 0,7	V VII	2,1 0,2	V VII	- 1,6	- 2,5	+ 0,9
Phosphor gelöst (a) mg/m ³ , (b) t	37 2	III VII	426 26	XI XII	15,7	19,0	25 7	IX IV	7,8 0,4	III VII	+ 3,3	+ 0,1	- 3,2
Phosphor partikul. (a) mg/m ³ , (b) t	23 1	V I-89	28 3	VIII I-89	3,1	1,1	9,1 1,1	IV I-89	4,5 0,4	IV I-89	- 2,0	+ 1,0	- 3,0
Phosphor total (a) mg/m ³ , (b) t	46 10	III VII	439 31	XI XII	18,8	20,1	29,2 14,4	X XII	9,6 2,2	III VII	+ 1,3	+ 1,1	+ 0,2
Nitrat-N (a) mg/m ³ , (b) t	980 380	III, I-89 VIII	1390 170	I-89 XI	460	500	500 290	III, I-89 X	211 90	I-89 VIII	+ 40	- 130	+ 170
Nitrit-N (a) mg/m ³ , (b) t	17 3	IX, X III	97 4	XI III	2,9	7,7	10,0 1,8	VI, XI III	3,4 0,8	X III	+ 4,8	+ 2,0	+ 2,8
Ammonium-N (a) mg/m ³ , (b) t	102 3	XII VIII	600 14	XI III	20,0	17,0	50,2 4,1	XII VIII	21,5 1,8	XII VIII	- 3,0	- 12,4	+ 9,4
Silikat (SiO ₂) (a) mg/l, (b) t	3,1 0,6	I-89 VIII, XII	7,6 1,5	XI XII	1160	1440	1210 709	VI IV	636 54	I-89 VII	+280	- 280	+ 560
Calcium (a) mg/l, (b) t	52,1 34,7	I-89 VIII	55,9 45,5	I-89 XII	24,1	26,4	26,4 21,3	I-89 VIII, IX	11,3 7,8	I-89 I-89	+ 2,3	- 1,4	+ 3,7
Magnesium (a) mg/l, (b) t	9,4 7,5	III IX, X	8,6 7,8	III, IX XII, I-89	4,2	4,0	4,5 4,0	III VII-XI, I-89	1,9 1,7	III V-I-89	- 0,2	- 0,2	+ 0
Chlorid (a) mg/l, (b) t	6,2 4,2	III, I-89 XI	9,7 5,1	I-89 XII	2770	3180	3180 2470	I-89 XI	1340 970	III, I-89 IX	+410	+ 150	+ 260

Tabelle 6

Vergleich von Meßwerten der verschiedenen Teile des Bodensee-Untersees
 Seejahr 1988/89 an den Stationen Zellersee (Z), Rheinsee Station Berlingen (R)

Meßwerte in "0" m	Z	R
Temperatur in °C		
Maximum	21,4	23,3
Minimum	3,4	3,7
Sauerstoff in mg O ₂ /l		
Maximum	15,4	13,5
Minimum	9,2	8,5
pH in pH-Einheiten		
Maximum	8,84	8,39
Minimum	8,01	7,60
Orthophosphat in mg PO ₄ -P/m ³		
Maximum	51	35
Minimum	<1	1
Phosphor partikulär in mg P/m ³		
Maximum	29	23
Minimum	5	1
Nitrat in mg NO ₃ -N/m ³		
Maximum	1490	980
Minimum	520	380
Ammonium in mg NH ₄ -N/m ³		
Maximum	10	102
Minimum	10	3
Eisen total in mg Fe/m ³		
Maximum	40	17
Minimum	23	4

Tabelle 6

Meßwerte in Seebodennähe	Z 22-24 m⁺)	R 44-46 m⁺)
Temperatur in °C		
Maximum	11,3	7,8
Minimum	3,4	3,6
Sauerstoff in mg O ₂ /l		
Maximum	12,2	12,0
Minimum	< 1	0,2
pH in pH-Einheiten		
Maximum	8,20	8,17
Minimum	7,45	7,28
Orthophosphat in mg PO ₄ -P/m ³		
Maximum	708	420
Minimum	17	21
Nitrat in mg NO ₃ -N/m ³		
Maximum	2120	1390
Minimum	< 1	170
Ammonium in mg NH ₄ -N/m ³		
Maximum	1760	600
Minimum	10	14
Eisen total in mg Fe/m ³		
Maximum	2000	38
Minimum	42	4

⁺ je nach Seewasserstand

ANHANG

Abschätzung möglicher Auswirkungen der zunehmenden Stickstoffbelastung auf den Bodensee

1. Einleitung:

Während der Phosphorgehalt im Bodensee seit Anfang der 80-er Jahre im See abgenommen hat, nimmt der Stickstoffgehalt allmählich zu (siehe grüne Berichte der IGKB). Auf ihrer Sitzung am 10./11. Mai 1988 in Ittingen hat die Gewässerschutzkommission die Sachverständigen beauftragt, sich mit den möglichen Auswirkungen der zunehmenden Stickstoffbelastung auf den See zu befassen und der Kommission darüber Bericht zu erstatten. Im vorliegenden Bericht wird versucht mögliche Auswirkungen dieser Entwicklung anhand der Kenntnisse über die Verhältnisse im Bodensee sowie anhand von Literaturstudien zu beurteilen.

2. Allgemeine Zusammenhänge beim Stickstoffhaushalt

Unter den zahlreichen Verbindungen, in denen Stickstoff vorliegen kann, sind in Seen besonders folgende von Bedeutung:

- gelöster elementarer Stickstoff (N_2)
- Nitrat -Stickstoff (NO_3-N)
- Nitrit-Stickstoff (NO_2-N)
- Ammonium-Stickstoff (NH_4-N)
- gelöste organische Stickstoff-Verbindungen (DON)
- partikuläre organische Stickstoff-Verbindungen (PON)

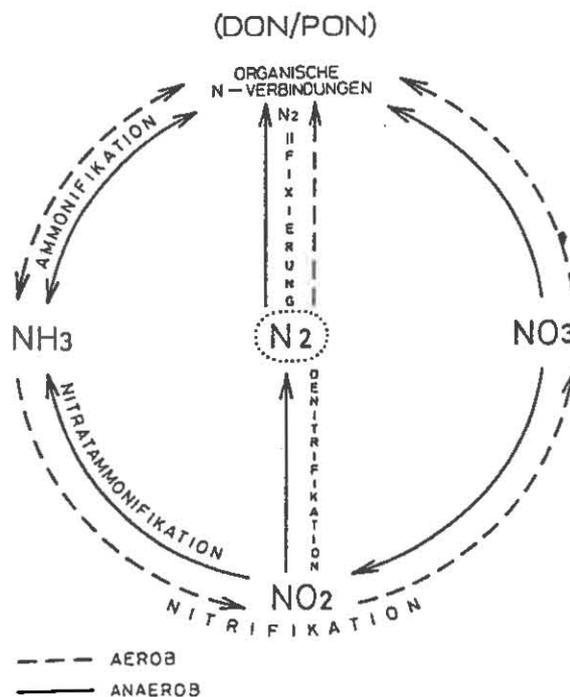


Abb. 1: Schematische Darstellung des Stickstoffkreislaufs (aus RHEINHEIMER et al. 1988)

Für das Verständnis der Zusammenhänge ist bedeutsam, daß alle Stickstoffverbindungen über biologisch katalysierte Stoffkreisläufe miteinander in Verbindung stehen (Abb. 1). Dabei erfolgen - je nach gegebenen Umweltbedingungen unterschiedlich gewichtig - vor allem folgende Stoffumsetzungen:

Stickstoff-Fixierung: Bindung von elementarem Stickstoff durch Blaualgen und heterotrophe Bakterien. Sie erfolgt unter sauerstofffreien (anaeroben) und sauerstoffhaltigen (aeroben) Umweltbedingungen.

Nitrifikation: Oxidation von Ammonium-Stickstoff und Nitrit-Stickstoff zu Nitrat durch Bakterien. Ist strikt an aerobe Bedingungen gebunden.

Dissimilatorische Nitratreduktion: Dabei wird Nitrat über Nitrit zu elementarem Stickstoff (Denitrifikation) oder zu Ammonium-Stickstoff (Nitratammonifikation) reduziert. Dieser Prozess ist an anaerobe Verhältnisse gebunden.

Stickstoff-Assimilation: Aufnahme von gelösten Stickstoffverbindungen durch Organismen, meist als Ammonium- oder Nitrat-Stickstoff. Bei Nitrat mit assimilatorischer Nitratreduktion verbunden. Er folgt unter aeroben und anaeroben Bedingungen.

Eiweißabbau: Abspaltung von Ammonium-Stickstoff aus organischen Stickstoffverbindungen (v. a. Eiweiß), vorwiegend unter anaeroben Bedingungen (Ammonifikation).

Exkretion: Ausscheidung von gelösten Stickstoffverbindungen durch tierische Organismen, vorwiegend als Ammonium-Stickstoff.

3. Die aktuelle Situation am Bodensee

Gegenwärtig gelangen jährlich ca. 20.000 t Stickstoff (ohne elementaren Stickstoff) über die Zuflüsse in den See. Davon sind über 80 % gelöst, zum größten Teil als Nitrat-Stickstoff. (WAGNER und BÜHRER 1989).

Der Gehalt an molekularem Stickstoff bewegt sich im Bodensee meist im Sättigungsbereich um ca. 16 - 20 mg/l (MAIER und STABEL 1988). Wie Tab. 1 mit den Konzentrationen der gebundenen Stickstoffverbindungen zeigt, überwiegt die Konzentration des elementaren Stickstoffs somit in der Menge bei weitem alle übrigen Verbindungen. Wegen des relativ inerten Verhaltens des elementaren Stickstoffs werden für die Bilanzbetrachtungen aber nur die gebundenen Stickstoffkomponenten berücksichtigt.

Tabelle 1: Mittelwerte der Konzentrationen unterschiedlicher gebundenen Stickstoffs für den Bodensee-Obersee, berechnet aus den IGKB-Daten der Station Fischbach-Uttwil für die Monate Februar-April 1988

	mg/l	%
$\text{NO}_3\text{-N}$	1,026	89,8
$\text{NO}_2\text{-N}$	0,001	0,1
$\text{NH}_4\text{-N}$	0,002	0,2
DON	0,089	7,8
<u>PON</u>	<u>0,025</u>	<u>2,2</u>
Summe	1,143	100

Es zeigt sich also, daß Nitrat von den derzeit etwa 1,1 mg/l gebundenem Stickstoff mit beinahe 90 % den weitaus größten Anteil hat. Daneben erreichen nur noch der organisch gebundene Anteil (gelöst und partikulär) des Stickstoffs ins Gewicht fallende Konzentrationen. Dieser kann während der Vegetationsperiode im Epilimnion sogar bis zu einem Drittel des Gesamtstickstoffs ausmachen. Ammonium-Stickstoff und Nitrit-Stickstoff fallen dagegen mengenmäßig kaum ins Gewicht. Beide zeigen allerdings starke saisonale (z. B. Klarwasserstadium) und lokale (z. B. Hypolimnion Gnadensee) Unterschiede. Die Konzentrationen anderer hier nicht aufgeführter Stickstoffverbindungen (z. B. Distickstoffoxid, oder Hydroxylamin) sind bis jetzt nicht untersucht worden. Es gibt jedoch keinen Anhaltspunkt dafür, daß sie in der Stickstoffbilanz wesentlich zu Buche schlagen.

Über die Quantität der biologischen Stickstoffumsetzungen im Bodensee liegen bis jetzt praktisch nur sehr wenige Untersuchungen vor. Die beobachteten raumzeitlichen Konzentrationsgänge der Stickstoffverbindungen weisen jedoch darauf hin, daß der jeweils vorhandene Stickstoff nur zum geringeren Teil biologisch umgesetzt wird und daß dabei die Assimilation von Nitrat-N bzw. Ammonium-N sowie Exkretion, Eiweißzersetzung und Nitrifikation die dominierenden Prozesse sind.

Die Bindung von molekularem Stickstoff durch N-Fixierer (insbesondere Blaualgen) ist in der Summe zumindest für den Bodensee-Obersee sicher von untergeordneter Bedeutung. Das wird auch durch Untersuchungen der Nitrogenase-Aktivität im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 248 ("Stoffhaushalt des Bodensees" der Universität Konstanz (BÖGER 1988) bestätigt, bei denen nur im Gnadensee höhere Werte festgestellt wurden. Möglicherweise war die N-Fixierung auch im Obersee kurzfristig während früher beobachteter Blaualgenblüten von größerer Bedeutung.

Da die dissimilatorische Nitratreduktion an sauerstoffarme Bedingungen gebun-

den ist, darf angenommen werden, daß sie zumindest für den Freiwasserraum des Obersees nur eine geringe Rolle spielt. Somit gewinnt sie allenfalls im Tiefenwasser des Zeller- und Gnadensees und im Seeboden (PFENNIG 1988) zeitweise an Bedeutung.

4. Mögliche Auswirkungen der Stickstoffzunahme

4.1 Toxische Wirkungen

Unter den Stickstoffverbindungen kann vor allem von Ammonium-Stickstoff, Nitrit-Stickstoff und von einigen organischen Stickstoffverbindungen (insbesondere von Aminen) eine toxische Wirkung ausgehen. So ist bekannt, daß Fischsterben in vielen Fällen durch erhöhte Konzentrationen an freiem Ammoniak verursacht werden, die bei hohen Ammonium-Konzentrationen verbunden mit erhöhten pH-Werten entstehen können. Zumindest für den Freiwasserraum des Obersees sind solche toxischen Wirkungen aber bis jetzt praktisch auszuschließen, da die Konzentrationen der in Frage kommenden Verbindungen immer weit unter den kritischen Werten liegen und im Fall des Ammoniums auch nie die zur nennenswerten Freisetzung von Ammoniak nötigen hohen pH-Werte beobachtet werden. Somit beschränkt sich das verstärkte Auftreten dieser Verbindungen auf einige Tiefenwasserbereiche im Untersee (insbesondere im Gnadensee), wo zeitweise sauerstoffarme Bedingungen herrschen. Insgesamt kann man also davon ausgehen, daß das Toxizitätsrisiko selbst bei anhaltender Stickstoffbelastung so lange gering bleibt, solange im See das Auftreten sauerstoffarmer Situationen verhindert wird.

Im Hinblick auf die Nutzung von Bodenseewasser für Trinkwasserzwecke ist natürlich auch die Entwicklung der Konzentration des primär kaum toxischen Nitrats von Bedeutung. Hierzu ist festzuhalten, daß auch die gegenwärtigen Nitratkonzentrationen (1 mg/l Nitrat-N entsprechen 4,4 mg/l Nitrat) erheblich unterhalb der für Trinkwasserqualitätsrichtlinien als kritisch angesehenen Grenzkonzentrationen liegt.

4.2 Produktivitätsänderungen

Stickstoff ist wie Phosphor ein wichtiger Pflanzennährstoff. Primär liegt er wie Phosphor in natürlichen Gewässern in der Regel nur in geringen Mengen in Form gelöster Verbindungen vor. Damit kann er in vielen Fällen zum wachstumsbegrenzenden Faktor für die Primärproduzenten werden, wie z. B. im Meer oder in extrem nährstoffarmen Seen. Stickstoff kann jedoch auch sekundär zum begrenzenden Faktor werden, wenn nämlich in stark eutrophierten Gewässern die

Phosphorzunahme nicht mit einer entsprechenden Stickstoffzunahme einhergeht, das N:P-Verhältnis also sinkt. Sowohl bei der primären als auch bei der sekundären N-Limitierung ist also eine erhöhte pflanzliche Produktion bei zunehmender N-Zufuhr zu erwarten. Das wird durch Beobachtungen und experimentelle Untersuchungen bestätigt (Übersicht bei SCHINDLER 1988), wobei allerdings die Steigerungen 10 % nicht überschreiten.

Im Freiwasserraum des Bodensees hat eine primäre N-Limitierung des pflanzlichen Wachstums in dem durch limnologische Untersuchungen abgedeckten Zeitraum wohl nie vorgelegen. Hingegen ist sicher, daß das Algenwachstum im Lauf der Eutrophierung zumindest im Untersee regelmäßig im Spätsommer durch mangelnde Verfügbarkeit von Stickstoff sekundär begrenzt war (vgl. z. B. IGKB-Jahresbericht Nr. 3, 1978). Insgesamt stieg zunächst die P-Konzentration bedeutend schneller als die N-Konzentration an, so daß das N:P-Verhältnis abnahm. Die daraus resultierende N-Verknappung für die Algen zeigte sich dann z. B. an niedrigen epilimnischen N-Konzentrationen im Sommer. Im Untersee sanken sie zeitweise unter die Nachweisgrenze. Das vermehrte Aufkommen von N-fixierenden fädigen Blaualgen wird durch N-Knappheit begünstigt. Der verstärkte Anteil dieser Algen während der Hochphase der Eutrophierung zeigt ebenfalls die zeitweilige N-Limitierung an (KÜMMERLIN und BÜRGI, IGKB-Bericht Nr. 39, 1989).

Mit der gegenwärtig im Bodensee beobachteten Abnahme der P-Konzentrationen bei anhaltender allmählicher N-Zunahme hat sich das N:P-Verhältnis in den letzten Jahren wieder erhöht. Damit ist die Wahrscheinlichkeit einer N-Limitierung nunmehr deutlich gesunken. Das wird auch an jetzt wieder höheren epilimnischen sommerlichen N-Konzentrationen und am starken Rückgang des Anteils der potentiell Stickstoff fixierenden Blaualgen in allen Seeteilen deutlich. Bei der gegenwärtigen P-Situation kann zusätzlicher Stickstoff also kaum produktionssteigernd wirken. Er stellt aber dennoch ein Potential dar, das zumindest lokal bei höheren P-Konzentrationen (wie z. B. in der Flachwasserzone) für Produktionssteigerungen genutzt werden kann.

4.3 Änderung des Wasserchemismus

Bei Konzentrationsänderungen eines Wasserinhaltsstoffes können durch chemische Wechselbeziehungen auch die Konzentration und Qualität der anderen Wasserinhaltsstoffe und somit indirekt auch die biologischen und chemischen Stoffflüsse im See beeinflusst werden. Als solche Wechselwirkungen kämen vor allem Ausfällungsreaktionen, Komplexbildungen, Adsorptionen und Redoxreaktionen in Betracht.

Beschränkt man diesbezügliche Überlegungen auf das Nitrat (wegen seiner Dominanz unter den N-Verbindungen, Tab. 1), so ergeben sich infolge des hohen Oxidationspotentials dieses Ions lediglich hinsichtlich seiner oxidierenden Wirkungen Möglichkeiten, an Stoffumsetzungen im See in nennenswertem Umfang teilzunehmen. Wegen der guten Löslichkeit der Nitratsalze und der geringen Neigung des Nitrations zur Komplexbildung sowie zur Adsorption ist der Einfluß des Nitrats auf solche Wechselwirkungen dagegen praktisch vernachlässigbar.

4.4 Verschiebungen im Stickstoffkreislauf

Wie schon erwähnt, gibt es über die oben kurz aufgeführten biologischen Stickstoff-Umsetzungen im Bodensee bisher kaum spezielle Untersuchungen, weshalb auch diese Frage nur mit grundsätzlichen Überlegungen angegangen werden kann. Danach muß man annehmen, daß die erhöhte Stickstoff-Zufuhr vor allem die Intensität der Fixierung von elementarem Stickstoff verringert hat, da diese durch hohe Stickstoff-Konzentrationen unterdrückt wird (SCHLEGEL 1985). Damit im Einklang steht auch der in den letzten Jahren beobachtete Rückgang der N-fixierenden fädigen Blaualgen (KÜMMERLIN und BÜRGI, in Vorbereitung).

Eine direkte Beeinflussung der übrigen Prozesse durch die Stickstoff-Zunahme ist derzeit nicht erkennbar. Im Zusammenhang mit der P-Abnahme können sich die Stickstoff-Umsätze allerdings quantitativ und qualitativ ändern. Mit sinkender Produktion wird sowohl der organismisch gebundene Stickstoff als auch dessen Umsetzung zu gelöstem organischem Stickstoff bzw. Ammonium-N abnehmen. Darüber hinaus ist zu erwarten, daß mit der einhergehenden Sauerstoffanreicherung des Tiefenwassers die dissimilatorische Nitratreduktion weiter zurückgedrängt wird.

4.5 Beeinflussung der Lebensgemeinschaften

Die nach Literaturangaben am ehesten zu erwartende Änderung der Lebensgemeinschaft infolge erhöhter Stickstoffzufuhr ist der Rückgang von fädigen N-fixierenden Blaualgen. Unter den zahlreichen in den letzten Jahren beobachteten Änderungen der Planktonbiozönose des Bodensees ist sie aber auch die einzige, die bis jetzt unmittelbar in Zusammenhang mit der Stickstoff-Zunahme gebracht werden kann.

Zur Abschätzung möglicher Verschiebungen innerhalb der Lebensgemeinschaften muß aber auch berücksichtigt werden, daß die derzeit vorliegenden N:P-Verhältnisse im See ohne anthropogene Belastung nicht vorkämen. Damit besteht die

Möglichkeit, daß einseitig an diese N:P-Verhältnisse angepaßte Lebensgemeinschaften selektiert werden. Hinweise dafür geben Kulturversuche mit Phyto- und Zooplanktonorganismen (WALZ, mündl. Mitteilungen). Die jetzige Stickstoffsituation bedeutet also für den See ein planktonökologisches "Experiment", dessen Ausgang ungewiß ist. Darin liegt zweifellos ein Risiko für die Zukunft.

5. Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht werden die möglichen Auswirkungen einer weiteren Stickstoffzunahme für den Bodensee auf der Basis vorhandener Daten und zusätzlicher Literaturhinweise abgeschätzt. Negative Auswirkungen - insbesondere des Nitrats - auf die Trinkwasserqualität werden derzeit nicht gesehen. Unmittelbar toxische Wirkungen auf Wasserorganismen sind bei den heutigen Konzentrationen und den aktuellen Sauerstoffverhältnissen im See unwahrscheinlich. Eine allgemeine Zunahme des Algenwachstums ist zur Zeit nicht zu befürchten, aber lokal und temporär nicht auszuschließen. Für wesentliche Änderungen des Wasserchemismus gibt es keinen Anhaltspunkt. Für die Stickstoff-Fixierung ist ein Rückgang zu erwarten. In diesem Zusammenhang wird eine Abnahme Stickstoff fixierender Blaualgen beobachtet. Darüber hinaus sind Verschiebungen in der Biozönose durch das gegenüber früher gestiegene N:P-Verhältnis während der Vegetationszeit wahrscheinlich. Diese Entwicklung birgt ein gewisses Risiko und muß deshalb weiter verfolgt werden.

6. Literatur

Böger, P: Nitrogenaseaktivitäten in Blaualgen.

Sonderforschungsbereich "Stoffhaushalt des Bodensees". Bericht für den Bewilligungszeitraum 1986 - 1988. S. 199 - 218 (1988).

IGKB (1978): Jahresbericht über den limnologischen Zustand des Bodensees Nr. 3.

Kümmerlin, R. und Bürgi, H. R.: Die langjährige Entwicklung des Phytoplanktons im Bodensee. IGKB-Bericht Nr. 39, 1989).

Maier, D. und Stabel, H. H.: Verhalten gelöster Gase unter in situ-Bedingungen. Sonderforschungsbereich "Stoffhaushalt des Bodensees". Bericht für den Bewilligungszeitraum 1986 - 1988. S. 95 - 108 (1988).

Pfennig, N.: Bakterielle Abbauaktivitäten in Litoral- und Profundalsedimenten des Überlinger Sees. Sonderforschungsbereich "Stoffhaushalt des Bodensees". Bericht für den Bewilligungszeitraum 1986 - 1988. S. 303 - 326 (1988).

Rheinheimer, G., Hegemann, W., Raff, J., Sekoulov, I.:

Stickstoffkreislauf im Wasser. Oldenbourg Verlag München, Wien (1988).

Schlegel, H. G.: Allgemeine Mikrobiologie. Thieme Verlag Stuttgart 5. Auflage (1985).

Schindler, D.: Experimental studies of chemical stressors on whole lake ecosystems. Verh. int. Ver. Limnol. 23, 11 - 41 (1988).

Wagner, G. und Bühner, H.: Die Belastung des Bodensees mit Phosphor- und Stickstoffverbindungen, Bor sowie organischem Kohlenstoff im Abflußjahr 1985/1986. Blauer Bericht Nr. 40 der IGKB (1989).

AUSKÜNFTE

- Baden-Württemberg: Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg
Postfach 10 34 39
Kernerplatz 9
D-7000 Stuttgart 10
- Bayern: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft
Lazarettstraße 67
D-8000 München 19
- Österreich: Amt der Vorarlberger Landesregierung
Römerstraße 15
A-6901 Bregenz
- Schweiz: Bundesamt für Umwelt, Wald und
Landschaft (BUWAL)
CH-3003 Bern

Technische Herstellung, Grafik und Druck:
Siegl-Druck GmbH · 7990 Friedrichshafen · Adelheidstraße 28 · Telefon (07541) 71061