

**Zeitschrift:** Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft  
**Herausgeber:** St. Gallische Naturwissenschaftliche Gesellschaft  
**Band:** 87 (1994)

**Artikel:** Trophische Wandlungen am Bodensee im Spiegel  
sedimentstratigraphischer Planktonfarbstoffe  
**Autor:** Züllig, Hans  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-832703>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 13.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## **Trophische Wandlungen am Bodensee im Spiegel sedimentstratigraphischer Planktonfarbstoffe**

Hans Züllig

### **Inhaltsverzeichnis**

1. Zur Eutrophierung des Bodensees. .	49
2. Rekonstruktion der trophischen Geschichte des Bodensees aus den Sedimenten . . . . .	53
Literaturverzeichnis . . . . .	57

### **1. Zur Eutrophierung des Bodensees**

Der Bodensee, beliebtes Urlaubsziel inmitten einer reizvollen Naturlandschaft, wurde seit Mitte dieses Jahrhunderts zunehmend für verschiedene Nutzungsziele beansprucht; Erholung, Wassersport, Verkehr, als zentraler internationaler Trinkwasserspeicher für angrenzende und hinterliegende Regionen, Gemeinden und Städte, z.B. des Grossverbrauchers Stadt Stuttgart und des süddeutschen Raumes.

Andererseits dient er als Vorfluter für inzwischen behandelte Abwässer aus dem Grossraum Bodensee, d.h. von Siedlungen, Industrie sowie ausgeschwemmter Anteile landwirtschaftlich genutzter Flächen. Dies hatte, wie in andern Mittel- und Alpenrandseen, eine zunehmende Düngung (Eutrophierung) des Seewassers, insbesondere mit Phosphor zur Folge (Abb. 1). Dank früherer limnologischer Einzelstudien der Forschungsinstitute Langenargen, Konstanz, der Kantone Thurgau und St.Gallen sowie der systematischen Untersuchungen durch die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee seit 1961 ist die neuere Entwicklung des Bodensees bekannt. Bis 1930 lagen die Phosphorwerte zum Zeitpunkt der Homothermie (infolge Umwälzung während der Wintermonate)

unter der Nachweisgrenze von 0,005–0,01 mg P/l. (In der Graphik wurde eine Spurenmenge von 0,005 mg P/l eingetragen). Um 1959 konnten rund 0,01 mg P bestimmt werden. In diesen drei Jahrzehnten ist der geschätzte jährliche Phosphoreintrag von 300 auf gut 500 t gestiegen (Abb. 1).

Der extrem kleine Phosphorgehalt des Seewassers soll Fischer damals bewogen haben, Mist von Schiffen aus ins Wasser auszutragen, um im Bereiche der Konstanzer-Bucht das Wasser zur Erzeugung von planktischem Fischfutter künstlich zu düngen! Gegen Ende der fünfziger Jahre wurde der Start einer beginnenden Eutrophierung vermutet; unter anderem gab auch dieses Phänomen Anlass zur Gründung der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) und zur systematischen Untersuchung des Seewassers.

Der Phosphorgehalt steigerte sich weiter und erreichte zwischen 1975 und 1982 die höchsten Werte von 0,08–0,09 mg P/l bei einem Phosphoreintrag von rund 2000 t P/Jahr. Nach dieser Phase maximaler Werte klang der Phosphorgehalt tendenz-

mässig ab und erreichte 1988 mit 0,043 mg P/l etwa die Hälfte der Maximalwerte. 1993 fiel er sogar auf 0,03 mg/l (MÜLLER, 1993). Als neues Ziel wurde deshalb die Unterschreitung von 0,02 mg/l anvisiert. Trotz dieser Abnahme liegt die Konzentration des Phosphors immer noch so, dass bei entsprechend günstiger Witterung sich eine belastende Algenbiomasse bildet.

Entsprechend der markanten trophischen Veränderung seit ca. 1960 hat sich das pflanzliche Plankton und entsprechend dem stark erhöhten Nahrungsangebot auch das Crustaceenplankton entwickelt (Abb. 2), (IGKB, 1990).

Lag die Produktion der planktischen Biomasse vor 1960 bei minimalen, von extrem nährstoffarmen Seen her bekannten Werten, so folgte dem eindrucklichen Anstieg des Phosphorgehaltes in der Zeitspanne 1960–1982 zuerst die Phytoplanktonentwicklung nicht proportional, sondern stufenweise, vermutlich mit einem ersten Entwicklungs-«Plateau» vor 1963, dem sich ein zweites, auf höherer Ebene gelegenes, von 1965 bis 1975 anschloss.

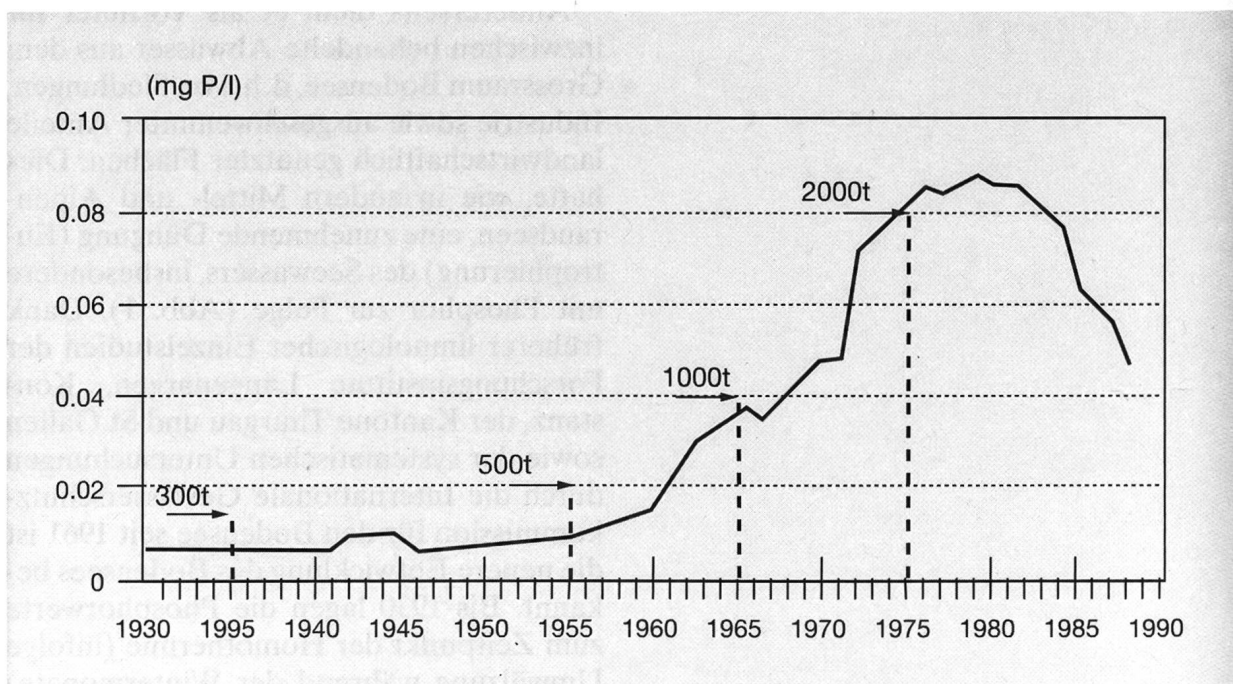


Abb. 1: Mittlere Gesamtphosphor-Konzentration im Bodensee-Obersee 1930–1988. Phosphoreintrag (Tonnen/Jahr) 1935–1975 (ZÄHNER, 1975).

In der Zeit höchsten Phosphorgehaltes, ca. 1974–1983, reagierte die pflanzliche Planktongemeinschaft nach 1–2 Jahren Verzögerung mit einer eindrucklichen Ma-

ximalentfaltung. Bei eindeutig fallendem Phosphorgehalt nach 1983 holte das 1982 auf Höhe des Entwicklungsniveau II von 1965–1967 abgesunkene Phytoplankton

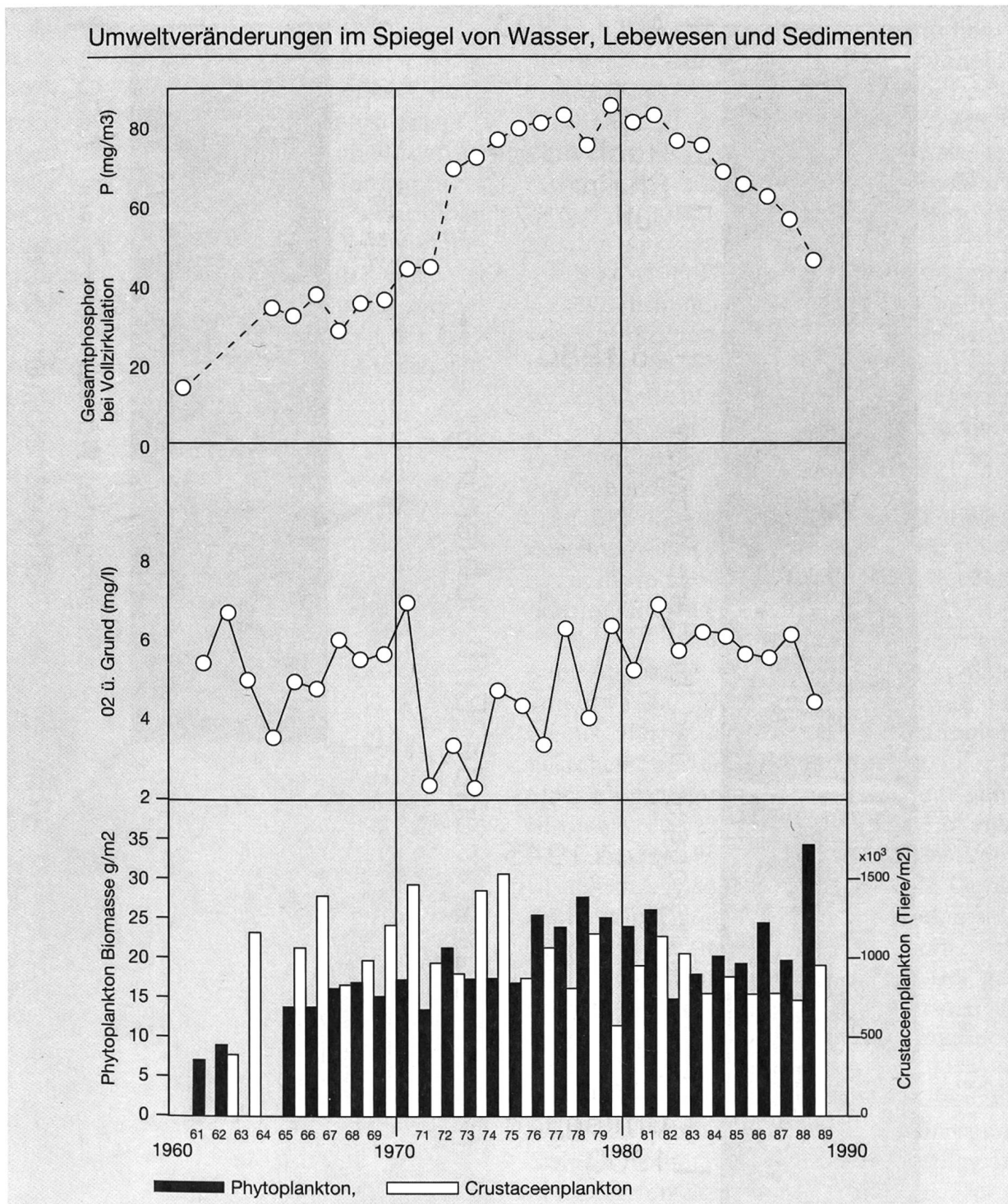


Abb. 2: Entwicklung des Gesamtphosphors, des Sauerstoffgehaltes (1 m über Grund) sowie des Phyto- und Crustaceenplanktons 1960 bis 1988. Graphik IGKB (IGKB 1990) ergänzt durch Planktonentwicklung von Züllig.



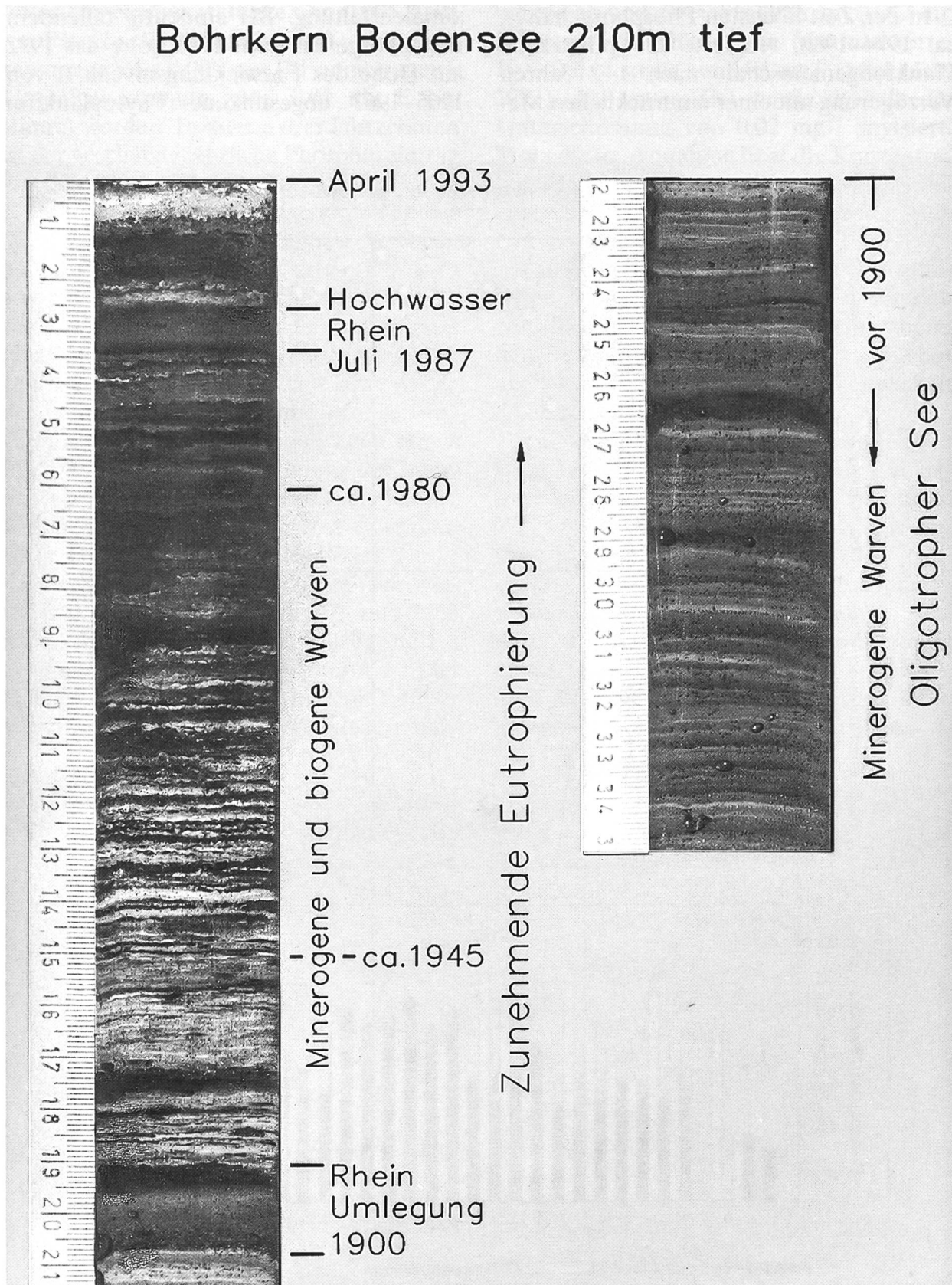


Abb. 3: Darstellung eines aufgeschnittenen Bohrkernes mit Sedimenten von ca. 1800 bis April 1993. Kernabschnitt links «rezente» Sedimente, biogene Warven überprägen die natürliche minerogene Warvenstruktur der Bodenseesedimente. Bohrkern entnommen durch ZÜLLIG 1993. Foto Duschletta.

stossweise zu neuen Entfaltungsmaxima aus, mit einem nie beobachteten «einsamen» Maximum im Jahre 1988.

Die Biomasse-Entfaltung führt beim Absinken wiederum zu einer entsprechenden Sauerstoffzehrung in der tiefer liegenden tropholytischen (Abbau)-Zone des Sees. Konsequenterweise müssten hohe Werte an Biomasse tiefen Sauerstoffgehalten über Grund und umgekehrt entsprechen. Es sind diesbezüglich im Bodensee zwar entsprechende Entwicklungen, aber keine eindeutige Relationen erkennbar. Dieses Phänomen begründen Sachverständige mit der unterschiedlichen Dauer der temperaturabhängigen Schichtung und des je nach Witterung und Heftigkeit der Umwälzung unterschiedlichen «Atemzuges» des Sees bei Homothermie.

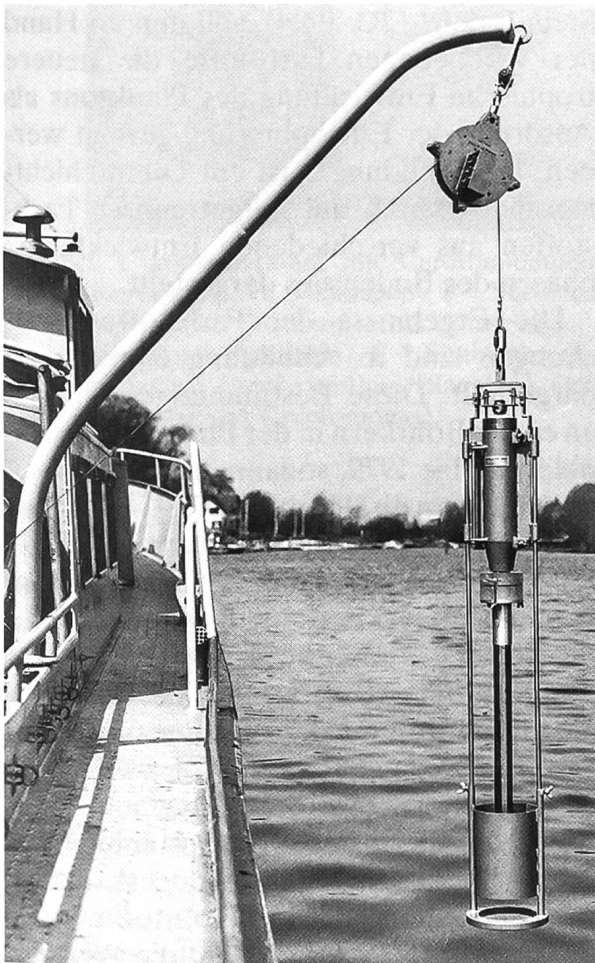


Abb. 4

## 2. Rekonstruktion der trophischen Geschichte des Bodensee aus den Sedimenten.

Gelöster Phosphor, Planktonentfaltung und Sauerstoffverhältnisse in einem See gehören zu den wichtigsten Kriterien, um den Ist-Zustand eines Gewässers zu beurteilen. Zusätzlich haben sich Sedimentkerne, welche die Ablagerungen vor heute Jahrhunderte oder Jahrtausende zurück enthalten, als Archive erwiesen, um die geschichtliche Entwicklung der Seen in bezug auf trophische Veränderungen erkunden zu können.

NIPKOW (1920) entdeckte zu Beginn dieses Jahrhunderts in oberen Abschnitten von Bohrkernen aus dem Zürich- und Baldeggersee Wechselfolgen von schwarz und weiss geschichteten Sedimenten und wies nach, dass diese Art Repetitionsschichten eine Umgestaltung des oligotrophen zum eutrophen See manifestieren.

In Bohrkernen aus grösseren Seetiefen des Bodensees fand ZÜLLIG (1956, 1994) ebenfalls in neuerer Zeit diese Art der Repetitionsfolgen (Abb. 3).

Zur Entnahme von Bohrkernen aus dem Bodensee, welche die Ablagerungen von etwa 200 Jahren enthielten, diente ein eigens hierfür konstruiertes Schlammlot, bestehend aus einem metallenen Kopf mit einer eingespannten, oben mit einem Ventil versehenen Plexiglasröhre. Das Lot enthält eine Tastvorrichtung, welche das Ventil selbsttätig schliesst, sobald das Gerät durch sein Eigengewicht in den Boden eingesunken ist und einen Bohrkern von 40–50 cm Länge gestochen hat. Bei geschlossenem Ventil wird das Gerät hochgezogen und die Röhre herausgenommen (Abb. 4).

Zur Probenahme ungestörter Sedimentschichten führt man von oben her einen Kolben in die Röhre, um das Zerfliessen der obersten Schicht zu verhindern. Dann entfernt man ein Mantelstück, schneidet den Bohrkern durch und entnimmt Proben, wobei einzelne Schichten durch Plätt-

chen gegeneinander abgegrenzt werden. Abbildung 3 zeigt einen auf diese Weise aufgeschnittenen Bohrkern aus dem Bodensee.

Dadurch gelingt es, mittels einer stratigraphischen Untersuchung der Ablagerungen aus einem Sedimentkern die Eutrophierung und eine allfällige Re-Oligotrophierung, also die Auswirkungen der Seensanierung (Restaurierung), zu verfolgen.

Am aufgeschnittenen Bohrkern in Abbildung 3, hier in zwei Teile zerlegt, erkennt man in der aus dem letzten Jahrhundert stammenden unteren Hälfte eine mineralische Feinschichtung des Sedimentes, welche eine mineralische Warvenstruktur darstellt. Durch eine dunkle Ton/Silt/Sandlage, welche beim Rheindurchstich um 1900 entstand, beginnt sich im Kern langsam eine neue Phase durch schwarze, schwefeleisenhaltige «Linsen» und feine schwarze Schichten enthaltende Ablagerungen abzuzeichnen, die in zunehmendem Masse das Bild einer biogenen Warvenbildung, ähnlich Zürichsee, ergibt.

Eine vom Verfasser entwickelte Methode ermöglichte es, über Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende in Sedimenten erhalten gebliebene Pflanzenfarbstoffe früherer Planktonvegetationen durch Extraktion der Sedimente zu gewinnen. Durch Dünnschichtchromatographie liessen sich aus den Extrakten einzelne Farbstoffe isolieren und daraus die trophische Geschichte rekonstruieren (ZÜLLIG, 1982).

Bei den extrahierten Farbstoffen handelt es sich um Chlorophylle und deren Derivate, insbesondere aber um Polyfarbstoffe vom Typus des aus Rüben und Tomaten bekannten roten Carotins. Diese werden in der pflanzlichen Zelle auf biochemischem Wege durch Einführung von Hydroxy-, Keto-, Epoxy-, Allen- und Azetylggruppen aufs mannigfachste verändert. Es entstehen Carotinoide, die purpurn, braun, gelb und orange erscheinen.

Diese Farbstoffe sind in Algen und pflanzlichen Planktonzellen in einer be-

sonders reichhaltigen Palette verbreitet. Gewisse Farbstoffe oder deren Kombinationen sind für die einzelnen Algenfamilien charakteristisch. Die Carotinoide sind zwar luft- und lichtempfindlich, in den absterbenden und auf den Seegrund absinkenden Zellen aber offenbar weitgehend geschützt. Während die Zellformen von Phytoplankter ausser Kieselalgen am Seeboden bereits halbzersetzt ankommen, ist ein Anteil ihrer Farbstoffe selbst in 10 000 Jahre alten Ablagerungen chemisch erhalten geblieben und gibt uns Auskunft über das Vorkommen bestimmter Algenklassen im Plankton früherer Zeiten. Pigmente dienen den Algen als energieabsorbierende Elemente.

Am Beispiel zweier Kerne des Bodensees von jüngeren und jüngsten Sedimenten, (letzterer von ZÜLLIG 1993 gezogen und analysiert im Bereich der tiefsten Stelle), (ZÜLLIG, 1994), soll nun an Hand der verbliebenen Farbstoffe die neuere trophische Entwicklung des Planktons als Ausdruck der Eutrophierung gezeigt werden. In Abbildung 5 ist ein Dünnschichtchromatogramm mit aufgetrennten Farbstoffen aus verschiedenen Entwicklungsphasen des Bodensees dargestellt.

Die Ergebnisse der Farbstoffuntersuchungen sind in Abbildung 6 graphisch dargestellt. Diese Bestimmungen wurden an *einem* Bohrkern in der Phase der Eutrophierung bis 1979, sodann an einem *zweiten* Bohrkern ab 1979 bis 1992/93 in der beginnenden Phase der Erholung, durchgeführt. Letztere zeigen die neuesten Daten der Seenentwicklung.

Rechts des Bohrkernes sind zunächst die Werte der «Rohcarotine» als Mass für die Gesamtsumme der *Carotine* und *Carotinoide* dargestellt. Dann folgen Kurven ausgewählter einzelner Carotinoid-Farbstoffe, die für einzelne Algenstämme charakteristischen Pigmente anzeigen. Um die jährlich sedimentierten Farbstoffmengen vergleichbar zu machen, sind die Werte in mutmassliche Jahresraten ( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{Jahr}$ )



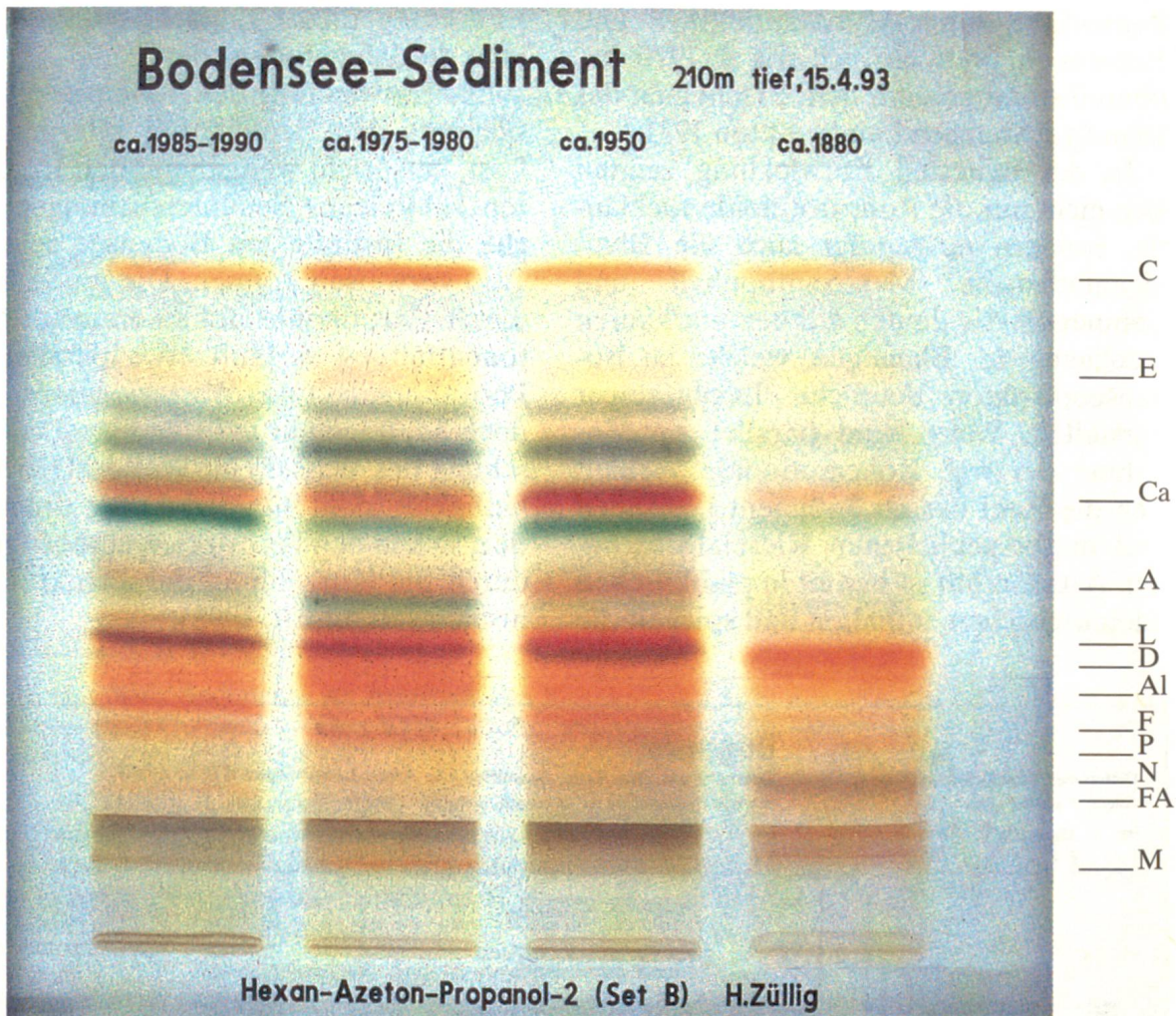


Abb. 5: Chromatogramm mit Carotinoidanteilen aus einzelnen Zeitabschnitten. Darin bedeuten: M = Myxoxanthophyll (Blaualgen), F = Fucoxanthin (Kieselalgen), FA = Fucoxanthin-Abbauprodukte (Kieselalgen), D = Diadinoxanthin (Kieselalgen), L = Lutein (Grünalgen), A = Astaxanthin (betont in Kleinkrebsen des Planktons), E = Echinenon (betont in Blaualgen), C = Carotine (in Algen allgemein verbreitet), Ca = Canthaxanthin (Blaualgen, Grünalgen), N = Neoxanthin (Grünalgen), Al = Alloxanthin (Nannoplankter *Cryptomonas*).

umgerechnet worden und als solche in der Graphik dargestellt. In Ablagerungen vor 1940, als das Plankton des sehr oligotrophen Sees noch minimal entwickelt war, lassen sich praktisch keine Carotinoide *quantitativ* erfassen. Es scheint jedoch, dass alle zur Zeit der Eutrophierung in «grösseren» Mengen bestimmten Algenfarbstoffe in der oligotrophen Phase spurenweise vorhanden waren, jedoch nur in aussergewöhnlich hohen Extraktmengen nachgewiesen werden konnten. Von den Spuren des Farbstoffes Fucoxanthin, charakteristisch für das damalige (spärliche) Vor-

kommen der Kieselalgen und Lutein (charakteristisch für grüne Pflanzen, hier Grünalgen) sind am deutlichsten erkennbar. An Hand der Rohcarotinoide ist eine erste Zunahme der Farbstoffe ab 1949 feststellbar, fünf Jahre vor einer deutlichen Jahresschichtenbildung.

Diese Zunahme ging weiter und gipfelte 1976, dann folgte generell eine rückläufige Tendenz, also ein Schritt zur Genesung. Zu den Hauptanteilen der Farbstoffe gehören Fucoxanthin (Kieselalgen), Peridinin (Panzergeisselalgen), Lutein und Neoxanthin (Grünalgen). Die Blaualgen, do-



kumentiert durch Myxoxanthophyll und Echinenon, breiteten sich erst ab 1970 aus, übereinstimmend mit dem Erscheinen der Blaualge *Anabaena* im Plankton 1971.

In der neuesten Entwicklung zeigten sich nicht nur die Rohcarotinoide rückläufig, sondern ausgeprägt auch die Blaualgenfarbstoffe Myxoxanthophyll und Echinenon. Sie deuten auf den markanten Rückgang der Blaualgen, welche im Bodenseeplankton deutliche Trophiezeiger darstellen. Weitgehend parallel zur Zunahme der sog. Rohcarotinoide verhielt sich die Zahl der im Sediment lagernden und intakt gebliebenen Kieselalgenschalen. Astaxanthin ist betont in planktischen Kleinkrebschen enthalten und spiegelt die

Entfaltung dieser tierischen Organismen über die Jahrzehnte wider.

Die Entwicklung des Bodensees, wie sie sich aus den Sedimenten interpretieren lässt, entspricht weitgehend den Ergebnissen zahlreicher Seeuntersuchungen, welche die Institute am Bodensee seit etwa 1930 vorweisen können. Die im Sediment durch Carotinoide dokumentierte Planktonentfaltung verläuft etwa parallel zum Phosphorgehalt des Wassers, gemessen jedoch bei ungefähr vollständiger Durchmischung des Wassers im Winter. Die Rückläufigkeit der Bioproduktion dokumentiert sich in den Farbstoffen eindeutiger als durch die Auszählung der Planktonorganismen (MÜLLER, 1993).

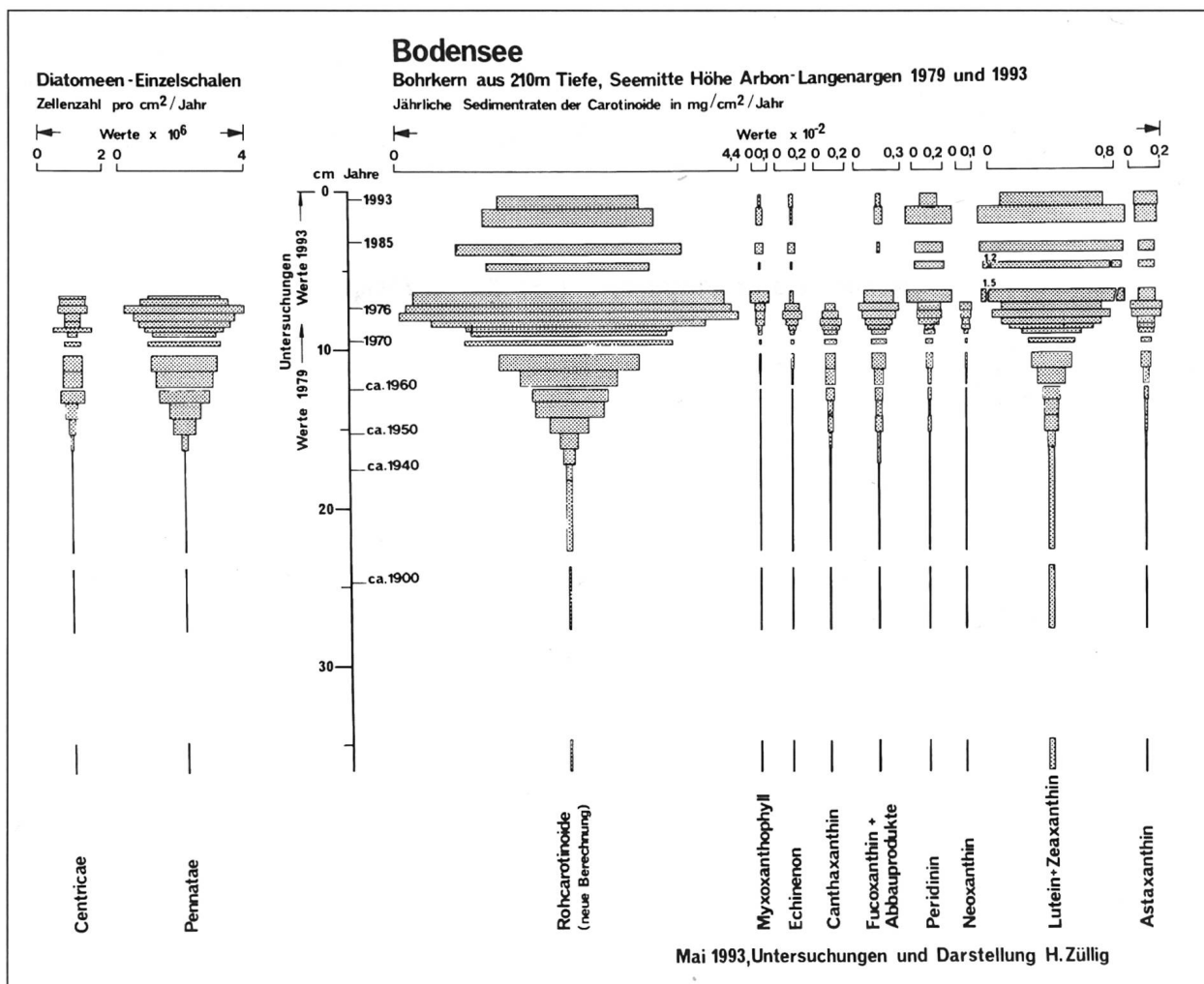


Abb. 6: Graphische Darstellung der am Seeboden abgelagerten, aus dem Plankton stammenden Farbstoffe und Kieselalgenschalen von zwei Bohrkernen.

## Literaturverzeichnis

Amt für Umweltschutz: Schutz dem Bodensee:  
Graphik aus Faltprospekt «25 Jahre Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee». Bearbeitet und ergänzt Broschüre SG 3/88.

Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (Berichte) (1990): Limnologischer Zustand des Bodensees. – Jahresbericht Nr. 16, S. 1011–1271.

MÜLLER, H. (1993): Berichterstattung an den Verein der Freunde des Instituts für Seenforschung und Fischereiwesen 1992/1993.

NIPKOW, F. (1920): Vorläufige Mitteilungen über Untersuchungen des Schlammabsatzes im Zürichsee. – In: Schweiz. Z. Hydrobiol., 1, 100–122.

ZAHNER, R. (1975): Persönliche Mitteilungen.

ZÜLLIG, H. (1956): Sedimente als Ausdruck des Zustandes eines Gewässers. – Diss. ETH Zürich, Nr. 2488. Schweiz. Z. Hydrol. 18/1, 5–143.

ZÜLLIG, H. (1982): Untersuchungen über die Stratigraphie von Carotinoiden im geschichteten Sediment von 10 Schweizer Seen zur Erkundung früherer Phytoplankton-Entfaltungen. – In: Schweiz. Z. Hydrol., 44/1, 1–98.

ZÜLLIG, H. (1994): Umweltwandel des Bodensees 1994. – Hrsg. Hans Maurer, UVK, Fachverlag für Wissenschaft und Studium GmbH, St. Gallen.

