

Internationale Gewässerschutzkommission
für den
Bodensee

LIMNOLOGISCHER ZUSTAND DES BODENSEES

Nr. 9

Grundlagen (Stand 1985)

Internationale Gewässerschutzkommission
für den
Bodensee

LIMNOLOGISCHER ZUSTAND DES BODENSEES

Nr. 9

Grundlagen (Stand 1985)

1985

VORWORT

Der Bodensee ist in limnologischer Hinsicht einer der bestuntersuchten Seen. Seit 1961 informiert die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) über den limnologischen Zustand dieses Sees und zeigt damit gleichzeitig die Auswirkungen der Reinhaltemaßnahmen auf. Ab 1974 liegen Jahresberichte vor. Der vorliegende Bericht faßt die von der speziellen Charakteristik der einzelnen Seejahre unabhängigen Grundlagen zusammen und soll damit das Verständnis der limnologischen Vorgänge und die Interpretation der in den Abbildungen und Tabellen der einzelnen Jahresberichte enthaltenen Daten erleichtern. Beschrieben werden die geographischen und physikalischen Verhältnisse sowie die chemischen und biologischen Größen mit ihrer bisherigen Entwicklung.

Als kurze Einführung in die wichtigsten limnologischen Gegebenheiten des Sees kann der Bericht weder umfassend über die zahlreichen, am Bodensee erzielten Untersuchungsergebnisse berichten, noch eine erschöpfende Aufzählung der vielen einschlägigen Publikationen bieten. Weitergehende zusammenfassende Darstellungen aus neuerer Zeit wurden z.B. von Kiefer (1972), Grim (1968, 1980), Elster (1974, 1982) Tilzer et al. (1982) und IGKB (1961, 1975, 1982) vorgelegt. Weiterführende Publikationen zu Einzelthemen werden im Text zitiert und sind dem Literaturverzeichnis zu entnehmen.

INHALT	Seite
1. Geographische und physikalische Verhältnisse	2
1.1 Einzugsgebiet	2
1.2 Niederschläge	7
1.3 Zufluß	7
1.4 Pegel	7
1.5 Abfluß	8
1.6 Durchflußverhältnisse	8
1.7 Thermische Verhältnisse	9
1.8 Einschichtung der Bodenseezuflüsse	10
1.9 Strömungen	11
2. Chemische Größen	11
2.1 Sauerstoff	13
2.2 Pflanzennährstoffe	13
2.2.1 Phosphor	13
2.2.2 Stickstoff	14
2.2.3 Silikat	14
2.3 Chemische Indikatoren	15
3. Biologische Größen	15
3.1 Phytoplankton	15
3.2 Zooplankton (Crustaceenplankton)	17
3.3 Bakterienplankton	18
4. Wechselwirkungen zwischen chemischen und biologischen Größen	20
4.1 Phosphor - Plankton	20
4.2 Stickstoff - Plankton	21
4.3 Kohlenstoff - Plankton	23
4.4 Kieselsäure - Plankton	24
5. Seeboden	24
6. Literatur	26
7. Auskünfte	33

I. GEOGRAPHISCHE UND PHYSIKALISCHE VERHÄLTNISSE

Der Bodensee ist einer der großen, tiefen Alpenrandseen und stellt die nördliche Fortsetzung der Schweizer Mittellandseen dar. Über die Entstehung des Seebeckens informieren z.B. Schreiner (1969), Kiefer (1972) und Beran (1980). Wichtiges über Form und Gliederung des Sees und seine wesentlichen geographischen und hydrographischen Daten enthalten Abbildung 1 und Tabelle 1.

Unter "Bodensee" werden allgemein zwei hydrographisch und limnologisch stark voneinander abweichende Seen verstanden: Der große, tiefe Obersee mit dem Seeteil "Überlinger See" und der davon durch den Seerhein getrennte flachere Untersee mit den Teilen "Gnadensee", "Zellersee" und "Rheinsee".

Der Wasserkörper der Seebecken wird aufgrund der morphologischen Gegebenheiten in die Flachwasserzone und die Freiwasserzone (Pelagial), der Seeboden (Benthal) in das Litoral im Bereich der Flachwasserzone bis zu etwa 10 m Tiefe und das seewärts über den Haldenbereich anschließende Profundal gegliedert (Abb. 3). Der Freiwasserbereich und der zugehörige Seeboden ab ca. 10 m Wassertiefe sind Gegenstand der Jahresberichte über den limnologischen Zustand des Bodensees. Die Fläche der dort nicht behandelten Flachwasserzone beträgt bei mittlerem Wasserstand beim Obersee rund 57 km² (12 %) und beim Untersee 18 km² (28 %). Über die Entwicklungen in der Flachwasserzone geben u.a. Lang (1973, 1981) und Schröder (1981) in den blauen Berichten der IGKB Nr. 12, 26 und 27 (blaue Berichte) Auskunft.

1.1 Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet des Bodensees (Abb. 2) entspricht mit rund 11 000 km² etwa dem 20-fachen der Seeoberfläche. Etwa 5 400 km² (49 %) davon entfallen auf die Schweiz und Liechtenstein, ca. 2 400 km² (22 %) auf Österreich, ca. 3 100 km² (28 %) auf die Bundesrepublik Deutschland und ca. 43 km² (0,5 %) auf Italien (Schmidt, 1979). Den größten Anteil haben dabei die alpinen Einzugsgebiete von Alpenrhein und Bregenzerach. Etwa die Hälfte des Einzugsgebietes liegt daher über 1800 m Höhe.

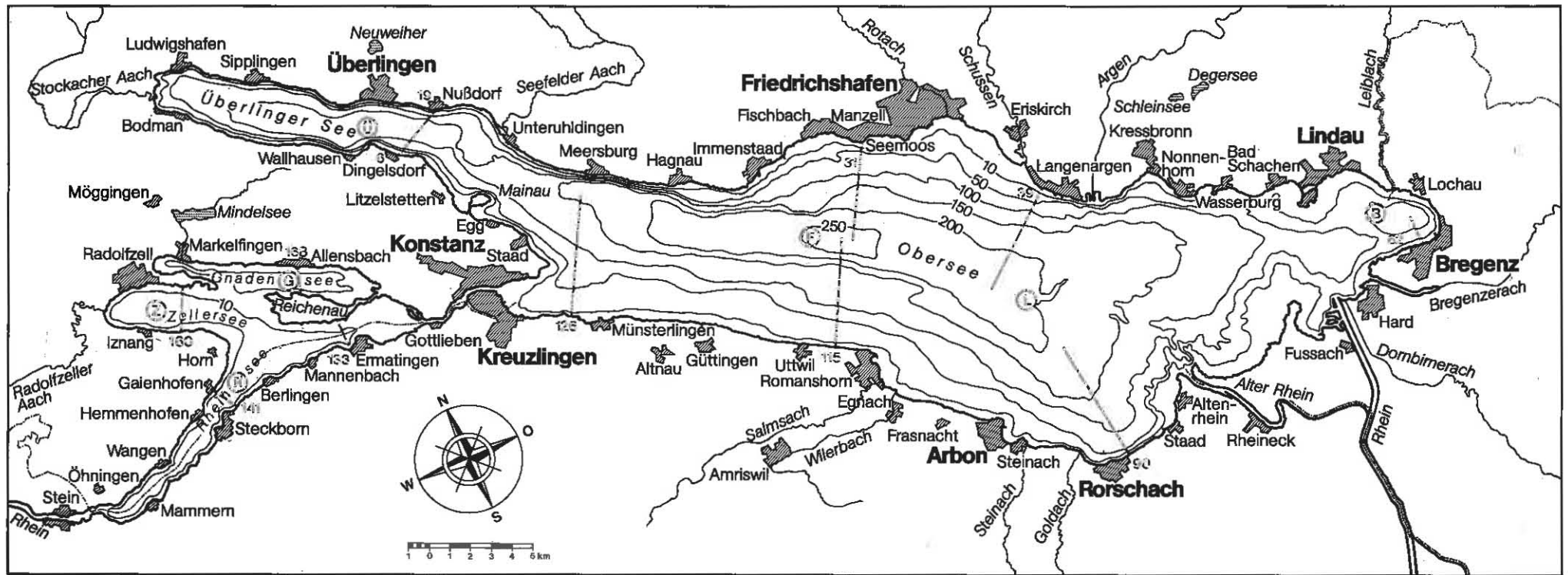


Abb.1: Der Bodensee mit Lage der Untersuchungsstellen

a) Freiwasser:

- Obersee: Fischbach-Uttwil (F)
- Langenargen-Arbon (L)
- Bregenzer Bucht (B)
- Überlinger See (Ü)
- Untersee: Gnadensee (G)
- Zellersee (Z)
- Rheinsee (R)

b) Seeboden:

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

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

Tab. 1: Wesentliche Daten des Bodensees

Geographischer Mittelpunkt des Bodensees ist der Schnittpunkt des Längengrades 9° 18' ö. v. Gr. mit dem Breitenkreis 47° 39' n. Br.

Mittelwasserstand (1930 - 1981)
(Hydrol. Jahrbuch der Schweiz 1981) +)
Obersee 395.63 m ü.M.
Untersee 395.42 m ü.M.

Oberfläche bei Mittelwasser:

Überlinger See	61 km ²
Konstanzer Bucht	5 km ²
übriger Obersee	410 km ²
Obersee insgesamt	476 km ²
Zeller See mit Ermatinger Becken	31,5 km ²
Gnadensee mit Markelfinger Winkel	13,5 km ²
Rheinsee	14 km ²
Insel Reichenau	4 km ²
Untersee insgesamt	63 km ²
Bodensee	539 km ²

Rauminhalt:	Bodensee-Obersee	0 - 252,5 m:	47700 x 10 ⁶ m ³
		0 - 10 m:	4360 x 10 ⁶ m ³
	Gnadensee	0 - 22,4 m:	137 x 10 ⁶ m ³
		0 - 10 m:	93 x 10 ⁶ m ³
	Rheinsee (Berlingen)	0 - 46,2 m:	10 x 10 ⁶ m ³
		0 - 10 m:	216 x 10 ⁶ m ³
	Zellersee	0 - 27,2 m:	187 x 10 ⁶ m ³
		0 - 10 m:	107 x 10 ⁶ m ³

Länge der Ufer:

Obersee mit Seerhein	173 km
Untersee mit Inseln Reichenau	90 km
Bodensee	263 km

Anteil der Anliegerstaaten:

Österreich	26,0 km (10 %)
Bayern	18,0 km (7 %)
Baden-Württemberg	150,0 km (57 %)
Schweiz	69,0 km (26 %)

Länge des Seerheins:

zwischen geschlossenen Ufern = 4 km
einschließlich sublakustrer Rinne = 7 km

Tiefe:

Obersee im engeren Sinne	252 m
Überlinger See	147 m
Konstanzer Bucht	50 m
Rheinsee	46 m
Zeller See	26 m
Gnadensee	22 m

Mittlere Tiefe:

Obersee insgesamt	100 m
Untersee insgesamt	28 m
Bodensee insgesamt	92 m

Bodenfläche unterhalb 250 m: rund	4 km ²
Bodenfläche unterhalb 200 m: rund	52 km ²

Inseln:

	Umfang	Fläche
Lindau	3 km	0,41 km ²
Mainau	3 km	0,44 km ²
Konstanzer Insel		0,018 km ²
Reichenau	12,5 km	4,02 km ²

Zuflüsse: Mittlere jährliche Wasserführung M
Alpenrhein (1969-1982, eidgenössischer Pegel,
Schmitter): 262 m³/s

Alter Rhein (1969-1982, eidgenössischer Pegel,
St. Margarethen) 12,1 m³/s

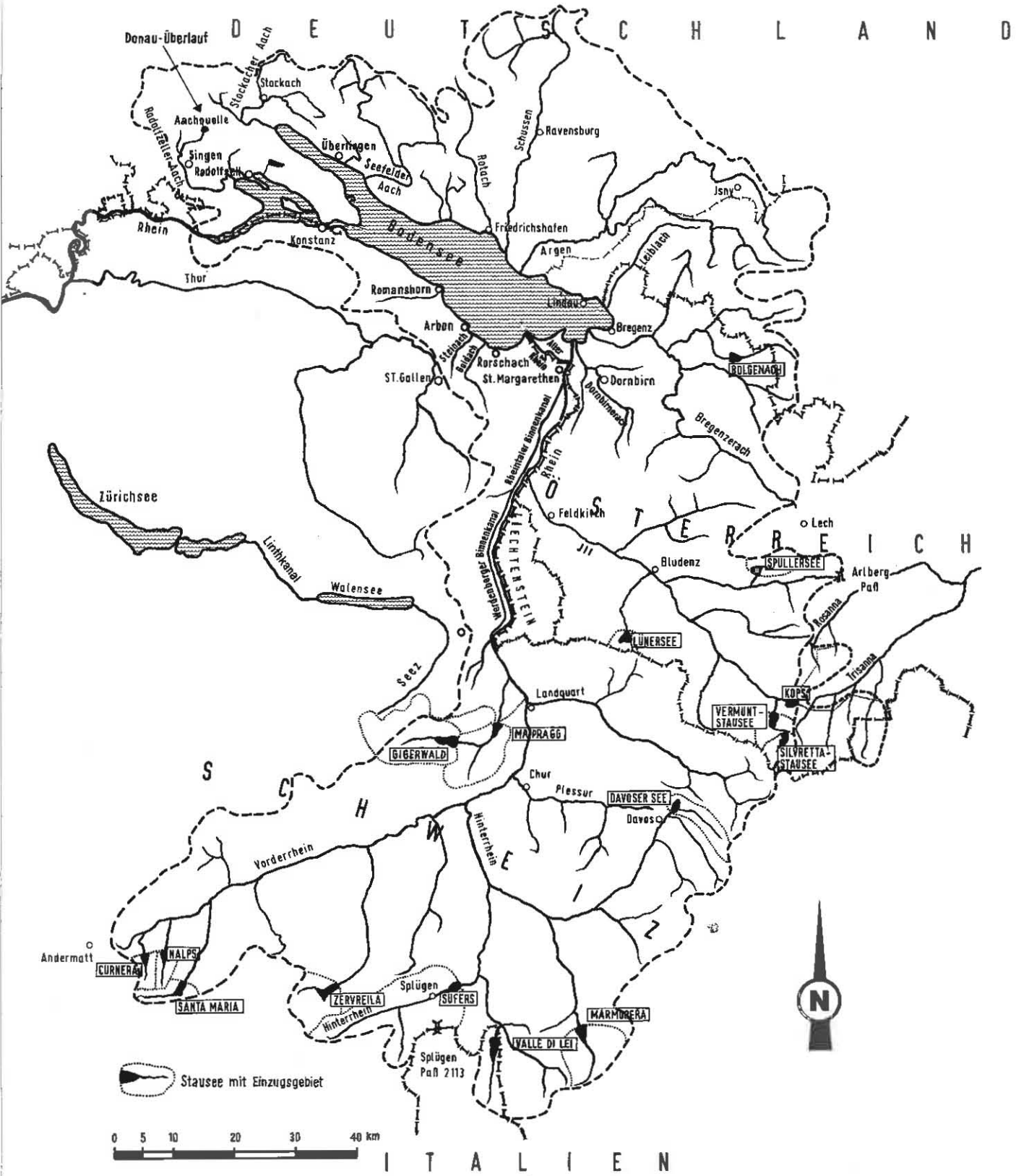
Dornbirnerach (1956-1980)	7,3 m ³ /s
Bregenzerach (1951-1980)	46,5 m ³ /s
Argen	17,5 m ³ /s
Schussen	9,0 m ³ /s
Rotach	1,6 m ³ /s
Seefelder Aach	2,9 m ³ /s
Stockacher Aach	1,8 m ³ /s
Radolfzeller Aach	9,8 m ³ /s

Einzugsgebiet:

Alpenrhein	6119 km ²
Alter Rhein	360 km ²
übrige Zuflüsse	4340 km ²

*) zum Pegel vgl. Abb. 4

Abb. 2: Einzugsgebiet des Bodensees



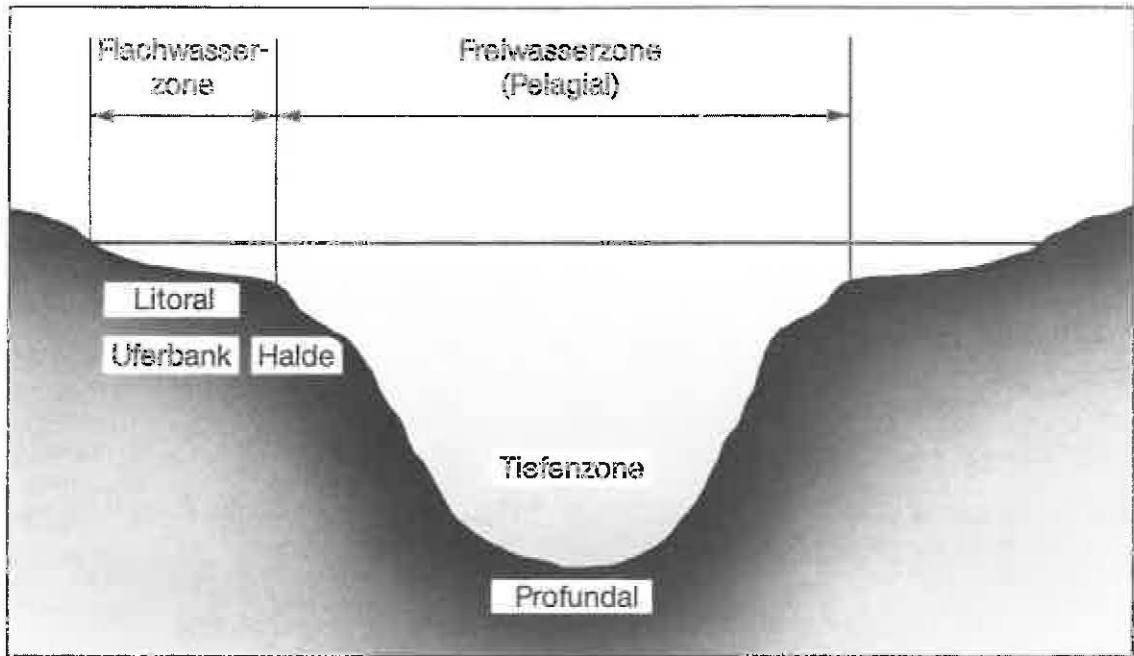


Abb. 3: Schematischer Querschnitt durch das Bodenseebecken

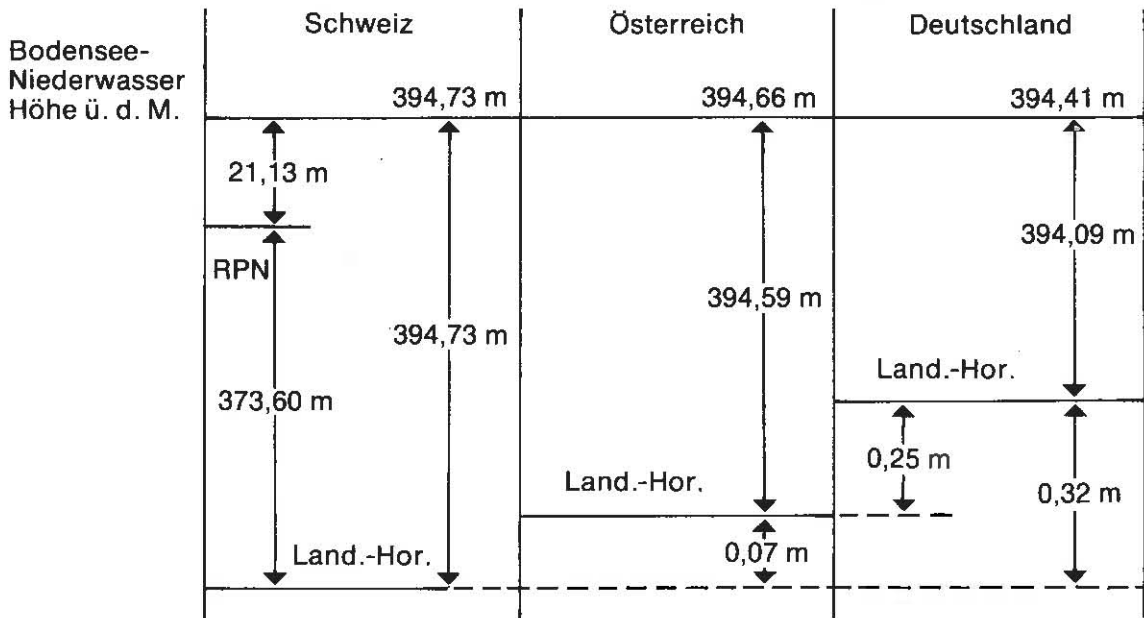


Abb. 4: Pegelverhältnisse in den verschiedenen Anliegerstaaten. Die Lage der Landeshorizonte orientiert sich in der Schweiz am Mittelwasserstand des Mittelmeeres in Marseille und dem um 373,6 m höher liegenden Fixpunkt am Genfer See (Repère Pierre du Niton, R.P.N.), in Österreich am Mittelwasserstand der Adria in Triest und in Deutschland nach dem Amsterdamer Pegel (Normal-Null, NN) (nach Mallaun und Lindner, 1983).

1.2 Niederschläge

Die Niederschläge werden in ihrer Höhe und Verteilung durch die Lage des Sees am nördlichen Alpenrand und damit im Stauraum der Westwinde bestimmt. Die Feuchtluftmassen steigen am Alpenrand auf und werden dadurch zum Teil zum Abregnen gezwungen. Bereits über dem Bodensee ist daher gegen Osten eine starke Zunahme des Niederschlags festzustellen. Der Jahresniederschlag beträgt im westlichen Bereich 750 bis 850 mm, im mittleren 900 bis 1000 mm und im östlichen 1150 bis 1500 mm. Im anschließenden alpinen Einzugsgebiet liegt er teilweise noch höher mit Spitzenwerten von 2800 mm und darüber (Schmidt, 1979). Die Niederschläge fallen zum größeren Teil im Sommerhalbjahr. Im Winterhalbjahr werden sie zum größten Teil als Schnee und Eis gespeichert und fließen dem See als Schmelzwasser daher ebenfalls in der warmen Jahreszeit zu.

1.3 Zufluß

Der Zufluß schwankt zwischen ca. 70 m³/s und ca. 4700 m³/s. Die Wasserführung des Alpenrheins als Hauptzufluß bewegte sich bei der Station Schmitter, in der Periode von 1970 bis 1982 zwischen 59,7 m³/s im Dezember 1978 und 1192 m³/s im Juli 1981 (Extremwerte der Tagesmittel).

1.4 Pegel

Für den Pegel des Sees sind in der Literatur wegen unterschiedlicher Bezugspunkte voneinander abweichende Mittelwasserstände zu finden (Abb. 4). Wegen der starken jahreszeitlichen Zuflußschwankungen zeigt er einen jahreszyklischen Verlauf mit einem Tiefstand Mitte Februar und einem Maximum im Juni/Juli. Der Wasserstand schwankt dabei im Mittel um 1,6 m, im Extrem über 3 m (Kiefer, 1978). Der Bodensee ist nicht durch ein Wehr reguliert. Durch die Erstellung zahlreicher Alpenspeicher und Überleitungen (13 Speicherbecken mit zusammen 719 Mio. m³ Nutzinhalt sowie die Überleitung von im Mittel 226 Mio. m³ Wasser/Jahr aus dem Einzugsgebiet des Inn zu dem der Ill und damit zum See) wurde jedoch ein Teil des Zuflusses aus dem Alpengebiet vom Sommer auf den Winter verlagert (Schmidt, 1979). Allein durch die Speicherbecken der

Vorarlberger Illwerke (ca. 171 Mio. m³) wird der mittlere Wasserspiegel gegenüber früher im Sommer um 16 bis 20 cm erniedrigt und im Winter um 18 bis 20 cm erhöht (Grim, 1980).

Der Höhenunterschied zwischen dem Wasserstand des Ober- und des Untersees, der durch das Gefälle des Seerheins von Konstanz bis Gottlieben entsteht, beträgt bei Niedrigwasser 18 cm, bei Mittelwasser 19 cm und bei Hochwasser 21 cm (Mallaun, 1983).

1.5 Abfluß

Der Abfluß aus dem Obersee schwankt wegen der Pufferwirkung des Sees im Jahreslauf im Mittel nur zwischen 70 und etwas über 1000 m³/s (Kiefer, 1972). Die Schwankungen der Abflüsse von Jahr zu Jahr können dennoch beträchtlich sein. Beispielsweise flossen im regenreichen Jahr 1970 30 %, im Trockenjahr 1976 nur 14 % des Obersee-Inhaltes ab. Der mittlere jährliche Abfluß beträgt 10,5 km³ (Lehn, 1978). Rein hydrographisch bedingt können Stoffkonzentrationen daher im See bei gleicher Stoffzufuhr in ähnlicher Größenordnung zu- oder abnehmen.

1.6 Durchflußverhältnisse

Die Durchflußverhältnisse im Bodensee-Obersee sind dadurch geprägt, daß 97 % des insgesamt zufließenden Wassers in den östlichen Seeteil (östlich der Linien Friedrichshafen-Romanshorn) gelangen. Die hier mündenden beiden Hauptzuflüsse Alpenrhein und Bregenzerach liefern zusammen mit der Dornbirnerach ca. 85 % davon.

Der Weg des Wassers aus dem Alpenrhein durch den Obersee führt am Nordufer entlang zur Konstanzer Bucht, mit einem Teilstrom in den Überlinger See und einer Rückströmung ostwärts in der Nähe des Südufers (Auerbach, 1939).

Die Durchströmung des Untersees ist sehr unterschiedlich. Der Rheinsee ist vom Durchfluß des Rheins geprägt und hat fast den Charakter eines langsam

fließenden Stromes. Ein Teil des Rheins strömt in den Zellersee, dort am Nordufer entlang in westlicher Richtung und entlang dem Südufer im Gegenstrom wieder in den Rheinsee. In diesen Strom gelangt auch das Wasser der Radolfzeller Aach. Der Gnadensee ist dagegen nicht durchflossen und hat kaum einen Wasseraustausch mit dem Zellersee (Schröder, 1974).

1.7 Thermische Verhältnisse

Die thermischen Verhältnisse des Bodensees zeigen entsprechend den klimatischen Bedingungen ebenfalls einen Jahresrhythmus, der den Stofftransport und die chemisch-biologischen Vorgänge entscheidend beeinflusst. Die klimatisch-meteorologischen Gegebenheiten des Bodenseeraumes mit ihren Besonderheiten, wie z.B. dem Föhn, sind u.a. bei Kiefer (1972), Beran (1980), Mallaun und Lindner (1983) erläutert.

Die Wassertemperaturen im Freiwasserbereich des Obersees liegen im Winter von der Oberfläche bis zur größten Seetiefe bei 4° C, dem Dichtemaximum des Wassers. Das ermöglicht die hauptsächlich windabhängige vertikale Zirkulation des Wassers, die in den Monaten Januar bis März auftritt und in günstigen, windreichen Wintern bis in die größte Seetiefe reicht. Dabei kommt es zu einem Konzentrationsausgleich der gelösten Stoffe und durch Sauerstoffeintrag aus der Atmosphäre zu einem Ausgleich des in der vorangegangenen Schichtungsperiode entstandenen Sauerstoffdefizits im Tiefenwasser. Mit zunehmender Einstrahlung im Frühjahr erwärmt sich das Oberflächenwasser und wird dadurch spezifisch leichter. Damit beginnt eine thermische Schichtung, die sich im weiteren Jahresverlauf zunehmend stabilisiert. Die Sommerschichtung zeigt eine warme Deckschicht (Epilimnion), die durch eine Temperaturschichtung (Metalimnion) mit rasch zur Tiefe hin abnehmender Temperatur von dem ganzjährig kalten Tiefenwasser (Hypolimnion) getrennt ist. Die in sich nicht durchmischte Sprungschicht wirkt als Barriere zwischen den im Epi- und Hypolimnion stattfindenden Teilzirkulationen und hindert somit auch den Stoffaustausch zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser. Die Temperaturschichtung ist die Grundvoraussetzung für das Wachstum von Phytoplankton im Freiwasserbereich, weil den Planktonalgen wegen der nach der Tiefe zu durch die Sprungschicht begrenzten Vertikalzirkulation ein längerer Aufenthalt in der obersten lichtreichen Wasserschicht

ermöglicht wird. Bei Abkühlung im Herbst wird die thermische Schichtung durch windbedingte Durchmischung von oben her allmählich abgebaut.

Die Thermokline - die Wassertiefe in der Sprungschicht mit dem größten Temperaturgradienten - liegt bei der Bildung der thermischen Schichtung im Frühjahr zunächst dicht unter der Wasseroberfläche, sinkt dann im Juli/August auf 10 - 15 m, im September/Oktobre auf 15 - 20 m und im November/Dezember auf 50 - 60 m ab, bis schließlich wieder eine winterliche Vollzirkulation stattfinden kann. Eisbildung tritt am Obersee nur in der Flachwasserzone regelmäßig, sehr selten während kalten langen Wintern auch in der Freiwasserzone, auf.

Im Untersee weicht die thermische Schichtung, bedingt durch die geringeren Seetiefen und Flächen der einzelnen Seeteile und die dadurch vergleichsweise geringere Wärmekapazität, von diesem Verlauf ab. Er zeigt jährlich zwei Zirkulationsperioden. Sie liegen im Gnadensee im Februar bis März bei einer Temperatur um 4° C und Ende Oktober, wo der thermische Ausgleich bei ca. 11° C stattfindet. Im Winter kommt es hier regelmäßig zu einer inversen Temperaturschichtung bis zu Eisbildung. Im Sommer zeigt die Wasseroberfläche Temperaturmaxima bis zu 28° C und das Wasser erwärmt sich auch bis zur größten Tiefe (21 m) erheblich.

1.8 Einschichtung der Bodensee-Zuflüsse

Die Einschichtung der Bodensee-Zuflüsse mit ihrer Fracht wird maßgeblich von der jeweils vorhandenen thermischen Schichtung bestimmt. Das zufließende Wasser schichtet sich entsprechend seiner von der Temperatur und seinem Gehalt an gelösten Stoffen und Schwebstoffen bestimmten Dichte ein. Nach einer von vielen Beobachtungen gestützten Berechnung von Wagner & Wagner (1978) gelangt der größte Teil des Zuflußwassers von April bis November unter die Thermokline, die sich während dieser Zeit von ca. 2 m hinunter bis auf 30 m Tiefe verlagert. Je nach Witterungsverlauf gelangen dabei mindestens 25 bis 40 % des Zuflußwassers in Tiefen von mehr als 50 m. Neben den Stofffrachten gelangen dabei auch erhebliche Wärmefrachten ins Tiefenwasser. Im Winter schichten sich die Zuflüsse - insbesondere der Alpenrhein - überwiegend über Grund, im frühen Frühjahr dagegen nahe der Oberfläche ein.

1.9 Strömungen

Weitere Strömungen treten neben der von den Zuflüssen verursachten Durchströmung des Seebeckens in vielfältiger Weise auf. Sie sind für die Stoffverteilung im See von wesentlicher Bedeutung. Der Motor für diese seeinternen Wasserbewegungen und Austauschvorgänge ist vor allem der Wind. Bei der während der längsten Zeit des Jahres vorhandenen thermischen Schichtung treibt er das Wasser der warmen Deckschicht zum windexponierten Ufer. Dort staut es sich und weicht seitlich und zur Tiefe hin aus. Diese Verlagerung hat einen kompensierenden Rückstrom und Auftrieb von kaltem Wasser zum windabgewandten Ufer zur Folge und bewirkt, daß die Isothermen (Tiefen gleicher Temperatur) im See schräg verlaufen (Elster, 1939; Lehn, 1965; Hollan, 1974 a). Auftriebszonen von kaltem Tiefenwasser sind insbesondere am Nordufer im Bereich Friedrichshafen-Meersburg bekannt (Peppler 1937, Hollan u. Simons 1978, Elster 1982). Bei abflauendem Wind setzt eine von starken Schwingungen begleitete Rückverlagerung ein. Die Schwingungen zeigen sich als Schaukelbewegung des Seespiegels mit Pegelschwankungen bis zu 11 cm und Perioden von ca. 55 Minuten Dauer in Richtung der See-Längsachse (Oberflächen-Seiches) und als interne Wellen im Wasserkörper (interne Seiches) mit Perioden von etwa 2 bis 16 Stunden Dauer und Amplituden bis zu etwa 40 m. Diese Schwingungen der einzelnen Wasserschichten haben starke, bis zur größten Seetiefe nachweisbare Kompensationsströmungen und damit eine teilweise Durchmischung und Anreicherung der Oberflächenschicht mit Nährstoffen aus dem Tiefenwasser zur Folge (Forel und Zeppelin 1893, Elster 1939, Lehn 1965, Hollan 1974 a, b).

2. CHEMISCHE GRÖSSEN

Die chemische Zusammensetzung des Bodenseewasser ist geprägt von der geochemischen Struktur des Einzugsgebietes, von vielfältigen biologischen Auf- und Abbauprodukten und von Stoffen, die aus anthropogenen Quellen in den See gelangen. Quantitativ vorherrschend sind gelöste anorganische Salze, obwohl, durch ein überwiegend kalkarmes Einzugsgebiet bedingt, Bodenseewasser mit einer durchschnittlichen Härte von etwa 9°d bzw. 16 frz. H° (entspricht ca. 1,6 mM) relativ weich ist. Elemente, die in diesen Salzen enthalten sind, bilden zugleich die Nährstoffbasis für eine artenreiche Flora im See. Eine pflanzliche

Produktion von einigen hunderttausend Tonnen Frischgewicht im Jahr und ihre Folgeproduktion sind die Quellen für weitere, meist organische gelöste Verbindungen.

Noch vor rund 50 Jahren war der Bodensee-Obersee ein nährstoffarmer, oligotropher Voralpensee. Die natürlicherweise in den See eingetragenen Nährstofffrachten reichten nur für eine Produktion, die den Sauerstoffhaushalt des Sees wenig beeinflusste. Geringe Sauerstoffverluste, verursacht durch biologische Abbauvorgänge in den Tiefenbereichen des Sees, konnten im Zuge der winterlichen Zirkulation problemlos ausgeglichen werden. Im Frühjahr waren alle Schichten des Sees mit Sauerstoff weitgehend gesättigt.

Mit wachsender Besiedlungsdichte im Bodenseeraum und gesteigertem Einsatz chemischer Produkte in Industrie, Landwirtschaft und Haushalten wurde dieses Gleichgewicht etwa ab den 50er Jahren zunehmend gestört. Der zusätzliche Eintrag von Nährstoffen bewirkte nunmehr ein Algenwachstum, das zu einer steigenden Belastung des Sauerstoffhaushaltes führte. Verstärkt wurde dieser Effekt noch durch die direkte Zuführung sauerstoffzehrender Substanzen. Im Obersee wuchs damit vor allem in Seebodennähe die Gefahr anaerober Prozesse (Faulung). Beispiele hierfür sind die Bildung giftiger Gase, wie Ammoniak und Schwefelwasserstoff, oder aber die Freisetzung von Nährstoffen aus dem Sediment, wodurch diese erneut in den Stoffkreislauf eingebracht werden. Diese Vorgänge werden im flachen, von jeher eutrophenen Untersee regelmäßig beobachtet.

Entsprechend den geschilderten Prozessen konzentrieren sich die chemischen Untersuchungen am Bodensee auf die Messung des Sauerstoffgehaltes und die Erfassung wichtiger Pflanzennährstoffe. Außerdem gilt das Interesse solchen chemischen Parametern, die als Indikatoren für die Auf- und Abbaudynamik biologischer Prozesse besonders bedeutsam sind. Weitere zur Charakterisierung des Wassers wichtige Parameter vervollständigen das Programm. Wegen ihrer großen Aussagekraft für den Zustand des Bodensees werden im folgenden einige Parameter einzeln beschrieben.

2.1 Sauerstoff

Der Sauerstoff genießt wegen seiner großen Bedeutung für das Leben eine Sonderstellung in limnologischen Untersuchungen. Sauerstoffmessungen haben daher am Bodensee eine lange Tradition. Bereits 1891 wurden erste Untersuchungen vorgenommen (Hoppe-Seyler 1896). Sie wurden fortgeführt in den 20er und 30er Jahren (Auerbach, Maerker und Schmalz 1926; Elster und Einsele 1937). Die Befunde waren typisch für den oligotrophen Zustand des Bodensee-Obersees zu dieser Zeit. Infolge der sommerlichen Algenproduktion traten in den oberflächennahen Schichten leichte Übersättigungen und in den großen Tiefen geringe Untersättigungen auf, die aber im Durchschnitt der Jahre 1920 - 1925 auf den Bereich von 84 bis 108 % Sauerstoffsättigung beschränkt waren (Auerbach, Maerker und Schmalz 1926). Damals bereits wurde dagegen im Untersee - Seeteil Gnadensee - zeitweise völliger Sauerstoffschwund in der Tiefe festgestellt (Elster und Einsele 1938).

In den 50er- und 60er-Jahren vollzog sich dann im Obersee die schon beschriebene Entwicklung in Richtung zum eutrophen Gewässer. Sauerstoffspitzenwerte von 200 % Sättigung und darüber in der Oberflächenschicht und Minima um 20 % in bodennahen Zonen markieren die bisherigen Extrempunkte dieser Entwicklung.

2.2 Pflanzennährstoffe

2.2.1 Phosphor

Der Phosphorgehalt des Seewassers ist wegen der Rolle des Phosphors als wichtigstem wachstumslimitierendem Nährstoff für die Phytoplankton-Produktion mit ausschlaggebend. Die entscheidende Änderung des Oberseewassers lag ohne Zweifel im enormen Anstieg der Phosphorkonzentrationen in den letzten 30 Jahren. Innerhalb dieser Zeit stieg der Gehalt von wenigen Milligramm auf über 80 mg/m³ Phosphor an (Wagner 1976). Damit war die bis dahin entscheidende Bremse der Primärproduktion im Obersee soweit gelockert, daß die mittlere jährliche Algendichte in der Produktionszone in 50 Jahren auf das 25-fache zunehmen konnte (Lehn 1981/82). Parallel hierzu gewannen andere wachstumsbegrenzende Faktoren an Gewicht. Dazu zählen in erster Linie Lichtmangel durch

Eigenbeschattung, zeitweise aber auch das Fehlen anderer Nährstoffe und Spurenelemente. Obwohl im Untersee durch Rücklösung aus dem Sediment schon immer höhere Phosphormengen für die Produktion verfügbar waren, stiegen auch hier die Konzentrationen auf ein Mehrfaches der ursprünglichen Werte an. Dank der Sanierungsmaßnahmen konnte der Anstieg der Phosphorkonzentrationen im Ober- und Untersee nicht nur gestoppt, sondern der Phosphorgehalt sogar wieder leicht vermindert werden.

2.2.2 Stickstoff

Der Stickstoffgehalt im Ober- und Untersee veränderte sich in den letzten Jahrzehnten bei weitem nicht so stark wie der Phosphorgehalt. In beiden Seeteilen erhöhte sich der Stickstoffgehalt etwa auf das 1 1/2-fache. Stets war jedoch das Niveau so hoch, daß die Stickstoffverbindungen für die Begrenzung der Primärproduktion praktisch keine Rolle spielten. Die wichtigste Stickstoffkomponente im Obersee ist das Nitrat; Nitrit und Ammonium treten lediglich im Zuge erhöhter Abbauintensitäten in geringen Konzentrationen auf (vergl. S.21). Im Untersee sind dagegen, gekoppelt an zeitliche und örtliche Schwankungen des Sauerstoffgehalts, abwechselnd Nitrat und Ammonium die dominierenden Stickstoffverbindungen.

2.2.3 Silikat

Der Silikatgehalt des Sees ist seit der Jahrhundertwende sehr konstant geblieben (Ledergerber 1982). In früheren Jahren, als der Phosphor der am stärksten wachstumsbegrenzende Nährstoff war, konnte nie Silikatmangel beobachtet werden. Im Zuge der Produktionszunahme stieg jedoch auch die Silikataufnahme durch Kieselalgen spürbar an. In den vergangenen Jahren trat deshalb immer wieder für kürzere Perioden Silikatmangel auf, der mit einem zeitweisen Verschwinden der Kieselalgen aus der produzierenden Schicht des Sees korreliert war (Mohammed und Müller 1981, Sommer und Stabel 1983).

2.3 Chemische Indikatoren

Als Indikatoren für die Beurteilung physikalischer, chemischer und biologischer Vorgänge im See besitzen zahlreiche chemische Parameter einen hohen Aussagewert. Insbesondere biologische Prozesse hinterlassen häufig chemische "Spuren", die eine Abschätzung wichtiger Umsatzgrößen erlauben. Bekannte Beispiele hierfür sind Änderungen im Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt die Verarmung der trophogenen Zone an Nähr- und Spurenstoffen und die Ausfällung von Calcit in Zeiten mit hohem pflanzlichem Wachstum (Roßknecht 1980).

Indikatoren übermitteln aber auch wichtige Zustandsbilder aus Bereichen, die einer direkten Messung nur schwer zugänglich sind, wie beispielsweise der Wasser-Sediment-Grenzschicht. Dort sind Reaktionen zur Stoff-Fixierung und -Freisetzung unter anderem von der Sauerstoffversorgung dünner Schichten abhängig. Ablagerungen organischer Substanzen an der Sedimentoberfläche führen zu Sauerstoffschwund und ermöglichen die Rücklösung von Eisen und Mangan. Auf diese Weise werden aus den Konzentrationsänderungen dieser Metalle in den großen Seetiefen Belastungen des Seebodens rasch und zuverlässig erkennbar (Roßknecht 1983).

3. BIOLOGISCHE GRÖSSEN

3.1 Phytoplankton

Erste Bestandsaufnahmen des Phytoplanktons des Bodensees erfolgten durch Schröter und Kirchner (1896), Kolkwitz (1912) und Lauterborn (1925). Längere Beobachtungsreihen mit qualitativer und quantitativer Bestimmung des Phytoplanktons wurden durch Auerbach, Maerker und Schmalz (1924, 1926) durchgeführt. Die damals noch unvollkommene Methodik, bei der die Schöpfproben zur Anreicherung zentrifugiert wurden, brachte es mit sich, daß viele Arten nicht beobachtet bzw. beim Anreichern zerstört wurden. Netzfänge, wie sie z.B. von Schröter und Kirchner (1896) durchgeführt wurden, erlauben ohnehin nur eine qualitative Aussage; zudem wird dabei das Nanno- und Ultraplankton nicht erfaßt, da es durch die Netzmaschen hindurch geht. Die Einführung der Plankton-Absetzkammern (Utermöhl 1936, 1958) brachte hier einen bedeutenden Fortschritt.

Während Grim (1939) noch keine Veränderungen der Artenzusammensetzung feststellte, finden sich in späteren Arbeiten des gleichen Autors (Grim 1951, 1955, 1967) und bei Müller (1967) Angaben über die qualitative und quantitative Veränderung des Phytoplanktons, als Folge der zunehmenden Eutrophierung. Diese Zusammenhänge wurden auch mehrfach von Lehn beschrieben (z.B. Lehn 1969, 1973).

Regelmäßige Phytoplanktonzählungen wurden ab 1957 in den Limnologischen Monatsberichten publiziert. Nach Gründung der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee wurde ab 1961 das Phytoplankton regelmäßig untersucht (Bürgi 1976, 1977; Bürgi und Lehn 1979).

Über einen längeren Zeitraum betrachtet, hat sich die Artenzusammensetzung entscheidend verändert. Arten, die früher noch sehr häufig waren und einen großen Teil der Phytoplankton-Biomasse stellten, wie z.B. einige *Cyclotella*-Arten, sind ganz oder nahezu verschwunden und haben nahe verwandten Arten (z.B. *Stephanodiscus* sp.) mit anderen ökologischen Ansprüchen Platz gemacht. Andere Arten (z.B. bei den Pennaten-Kieselalgen *Synedra acus* und *Diatoma elongatum* oder einige Vertreter der *Dynophyceen*) sind wesentlich seltener geworden.

Das Auftreten neuer Arten ist kritisch zu betrachten; einerseits ist die Algensystematik noch voll im Fluß und es kommt recht häufig zu Neudefinitionen von Arten und auch Gattungen, zu Änderungen der Abgrenzung zu nahe verwandten Formen oder zu Zusammenfassungen von Arten. Andererseits werden neu auftauchende Arten oft lange nicht als solche erkannt und zu anderen, bereits vorkommenden Arten gerechnet (Bürgi und Lehn 1979).

Im Untersee manifestierte sich die Eutrophierung durch höhere Plankton-Biomassen, längere Ausdehnung der Populationsmaxima und durch das frühere Einsetzen des Wachstums im Frühjahr gegenüber dem Obersee. Die Artenzusammensetzung ist ebenfalls anders als im Obersee.

3.2 Zooplankton (Crustaceenplankton)

Von der Systematik her gesehen kann man die planktischen Crustaceen in die beiden Ordnungen Cladocera (Wasserflöhe) und Copepoda (Hüpfertinge), von der Ernährungsweise her in herbivor (pflanzenfressend) und carnivor (räuberisch, fleischfressend), teilweise omnivor (allesfressend) lebende Arten aufteilen.

Unter den Filtrierern leben die Gattungen *Daphnia*, *Bosmina* und *Eudiaptomus* rein herbivor. Dazu kommen von den Copepoden die Nauplien sowie die jüngeren der fünf Copepodid-(Larven-)Stadien. Die älteren Copepodide sowie die Adulten der Gattung *Mesocyclops* und der Art *Cyclops abyssorum* leben omnivor bis carnivor, die der Art *Cyclops vicinus* rein carnivor. Räuberisch leben auch die großen Cladoceren *Bythotrephes* und *Leptodora*.

Die meisten Crustaceen zeichnen sich durch endogen festgelegte Jahreszyklen ihrer Entwicklung aus, die durch Außenbedingungen gesteuert und durch gegenseitige Konkurrenz stark beeinflusst werden (Lampert 1978, Lampert und Schober 1978).

Im Obersee war die artliche Zusammensetzung des Crustaceenplanktons seit Beginn der Bodensee-Untersuchungen bis in die Mitte der 50er Jahre konstant geblieben. Von diesem Zeitraum an wanderten *Daphnia galeata* und *Cyclops vicinus* in das Pelagial ein, was anfangs der 60er Jahre zu markanten Verschiebungen in der Zusammensetzung der Biozönose führte. So wurde die vorher starke Population von *Heterocope borealis* innerhalb weniger Jahre durch *Cyclops vicinus* ausgerottet. Bei den Daphnien konnte man erhebliche Bastardisierungsvorgänge beobachten, die zu völlig neuen, derzeit taxonomisch nicht definierten Phänotypen führten. Hierbei änderten sich mit der Körpergröße der Daphnien auch die Größenklassen der filtrierte Phytoplankter.

Neben diesen artmäßigen Verschiebungen veränderten sich auch die Bestandsdichten. Bei den meisten Arten ließ sich ein deutlicher Anstieg der Mittelwerte feststellen. Noch stärker erhöhten sich die kurzfristigen Jahresmaxima einzelner Arten.

Diese Entwicklungen fanden in den Jahren 1972 bis 1975 einen Höhepunkt in einer Biozönose, die qualitativ und quantitativ den Verhältnissen in einem eutrophen See nahe kommt. In den nachfolgenden Jahren blieb das Artenspektrum weitgehend erhalten, doch fielen bei einigen wichtigen Arten die absoluten Bestände wieder etwas ab. Die Ausbreitung von *Acanthocyclops robustus* seit etwa 1972, vor allem im östlichen Seeteil, brachte eine neuerliche Störung der Biozönose, deren Auswirkungen noch abzuwarten sind (Einsle 1977, 1983 a, b).

Der Untersee - Seeteil Gnadensee - wies schon in den 20er Jahren eine Crustaceengesellschaft auf, die sowohl artenmäßig als auch in der Bestandsdichte einem eutrophen See entsprach. Wie im Obersee brachte auch hier die Einwanderung von *Cyclops vicinus* eine erhebliche Veränderung des Gleichgewichtes, da dieser Cyclopide als effizienter Räuber sehr stark in die Populationsdynamik anderer Arten eingreift. In den letzten Jahren entwickelte sich auch in diesem Seeteil eine zahlenmäßig beachtliche Population von *Acanthocyclops*. Im weiteren wurde die Assoziation der filtrierenden Cladoceren durch die Einwanderung von *Daphnia pulex* und das Verschwinden von *Diaphanosoma* und - zeitweise - *Ceriodaphnia* erheblich verändert (Einsle 1977, 1978).

3.3 Bakterienplankton

Aus der Primärproduktion entsteht durch verschiedene Prozesse (z.B. bei Verwertung durch das Zooplankton, durch Exkretion, "Autolyse") stets eine große Menge an totem partikulärem und gelöstem organischem Material. Dieses als Detritus bezeichnete Material ist weitgehend nur für Bakterien als Nahrung verfügbar. Nur diese können partikuläre Substanzen wie etwa Zellulose mit hydrolytischen Enzymen spalten und gelöste organische Substanzen bei den gegebenen niedrigen Konzentrationen effizient aufnehmen.

Hierbei wird der Detritus teils unter Nährstoff-Freisetzung mineralisiert und teils in neue Bakterienbiomasse überführt. Die Bakterien stehen dann wieder dem Zooplankton (insbesondere den Zooflagellaten) als Nahrung zur Verfügung. Auf diese Weise kommen kurzgeschlossene Nährstoffkreisläufe in der Produktionszone zustande.

Zur jahreszeitlichen Verteilung der Bakterien im Bodensee-Obersee liegt aus früheren Zeiten nur eine Einzeluntersuchung vor (Deufel 1967, 1969). Deswegen läßt sich keine Aussage über die langfristige Entwicklung der Bakterienpopulationen im Bodensee während der letzten Jahrzehnte machen. Im Bodensee-Untersee sind bislang noch keine Untersuchungen über die Verteilung der Bakterien gemacht worden.

Im Obersee werden seit 1980 die Bakterienzahlen für die Station Seemitte Langenargen-Arbon regelmäßig erfaßt (Güde et al. 1985). Dabei konnten - abgesehen von den natürlich vorhandenen Unterschieden zwischen den einzelnen Jahren (z.B. Beginn des Anstiegs im Frühjahr und des Abfalls im Herbst, Anzahl und absolute Höhe der Spitzen) - eine Reihe von Gemeinsamkeiten für die Untersuchungsjahre gefunden werden:

- Die Größenordnung der Minima (10^6 /ml) und Maxima (10^7 /ml) bleibt konstant.
- Die Bakterien sind zur Zeit des ungeschichteten Sees weitgehend homogen im Bereich der Minimumkonzentration verteilt.
- Zur Zeit des geschichteten Sees (Vegetationsperiode) sind die höchsten Werte stets in den obersten 10 m zu finden, während die Zahl in der Schicht 10 - 30 m schnell abnimmt. Die Zone unterhalb 30 m bleibt ganzjährig mit gering ausgeprägter Dynamik im Minimumbereich der Bakterienkonzentrationen.
- Die Spitzen der Bakterienzahlen findet man fast immer gleichzeitig oder mit geringer zeitlicher Versetzung zu den Spitzen der Algenbiomasse.
- Die mikroskopisch differenzierbare Zusammensetzung des Bakterienplanktons zeigt wenig jahreszeitliche Schwankungen: In der Regel sind 90 % der Gesamtzahl kleiner als $1,5 \mu$ und 40 bis 50 % kleiner als $0,6 \mu$. Der Anteil festsitzender Bakterien bewegt sich im Bereich von 5 bis 10 %.

Nahrungsquelle für die Bakterien im Freiwasser des Bodensees ist somit hauptsächlich die autochthone Primärproduktion. Weiterhin verdeutlichen diese Ergebnisse die schon aus anderen Untersuchungen sichtbar gewordene Tatsache, daß sich der größte Teil der Mineralisierung schon in den oberen Wasserschichten vollzieht.

4. WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN CHEMISCHEN UND BIOLOGISCHEN GRÖßEN

Die chemisch-biologischen Wechselwirkungen führen zu vertikalen und zeitlichen Veränderungen der Konzentration der einzelnen Komponenten. Daraus ergeben sich charakteristische Jahresganglinien im Epi- und Hypolimnion, welche über diese Veränderungen summarisch informieren. Die in wesentlichen Zügen ähnlich verlaufenden Ganglinien der Nährstoffe kennzeichnen deren Transport vom Epi- ins Hypolimnion während der Hauptvegetationszeit. Dieser Stofffluß kommt durch die Inkorporation der Aufbaustoffe in die Biomasse in den durchlichteten Oberflächenschichten und die Sedimentation der Plankter (insbesondere größere Algen) zustande. In Abhängigkeit vom Angebot an organischem Substrat (Algen, Detritus) laufen mikrobielle Prozesse ab, deren Produkte je nach Sauerstoffangebot reduziert oder oxidiert sind.

4.1 Phosphor-Plankton:

Die zeitlichen Veränderungen der Phosphorkonzentration in der Wassersäule des Bodensees zeigen, daß neben dem bevorzugt aufgenommenen Orthophosphat (bzw. dem Phosphat, das mit der Molybdänblau-Methode erfaßt wird) vom Plankton auch andere gelöste P-Verbindungen genutzt werden können. Die Zehrung reicht im Obersee bis in eine Tiefe von ca. 30 m. Das bedeutet, daß Algen auf ihrem Sedimentationsweg noch längere Zeit Nährstoffe aufnehmen, obschon kein Licht mehr zur Verfügung steht. Der Transport der Nährstoffe ins Hypolimnion (Sedimentation) ist in den Sommermonaten anhand der Verteilung des partikulären Phosphors oder des partikulären Stickstoffs besonders auffällig zu erkennen; er korreliert dabei mit dem Auftreten großer schwerer Kieselalgen im Plankton. Diese, durch Sedimentation hervorgerufenen Verteilungsmuster,

sind nicht mit den passiven Verdriftungen im Winterhalbjahr zu verwechseln. Bei jenen spielen vertikale Strömungen eine Rolle.

Wie rasch im Frühjahr die Nährstoffreserven aufgezehrt werden, hängt vom jeweiligen Gehalt ab: Innerhalb von zwei Monaten sinkt zunächst der PO_4 -Gehalt im Oberflächenwasser von 70 mg/m^3 auf 5 mg/m^3 . Etwas verzögert setzt sodann die Nutzung des übrigen gelösten P ein. Im August bis Oktober sind seine minimalen Werte erreicht.

Die großen Phytoplanktonmassen zehren die Nährstoffe weitgehend auf (PO_4 -P-Gehalte unter 1 mg/m^3 im Oberflächenwasser). Unter solchen Bedingungen erhalten die Wechselwirkungen zwischen den Planktonkompartimenten (Zooplankton, Phytoplankton, Bakterien) und Fischen eine besondere Bedeutung. Mit einer Rezirkulation der Nährstoffe und bester Ausnützung der Reserven durch sparsame Algenarten wird trotz der niederen Konzentrationen eine hohe Planktonbiomasse aufrecht erhalten. Die thermische Schichtung verhindert die Nachlieferung von Nährstoffen aus dem Hypolimnion weitgehend und verstärkt im Spätsommer die Wachstumslimitierung durch Phosphor. Mit der Abnahme der Algendichte verteilt sich die Produktion allmählich auch auf eine dickere Schicht und zeigt - je nach dem jeweiligen Witterungsverlauf - mit der einsetzenden Herbstzirkulation und der damit verbundenen Nährstoffzufuhr aus tieferen Wasserschichten nochmals einen kurzen Wachstumsschub. Die zunehmende vertikale Verdriftung der Algen führt durch den damit verbundenen Lichtmangel schließlich zu minimalen Biomassewerten.

4.2 Stickstoff-Plankton

Die räumlich-zeitliche Verteilung der Stickstoff-Komponenten folgt den gleichen Regeln wie beim Phosphor (Zehrung im Epilimnion, Transport durch absinkende Plankter und Anreicherung im Hypolimnion), wird aber überlagert von mikrobiellen Umwandlungsprozessen, welche je nach Belastung und Sauerstoffvorrat zu reduzierten Fäulnisprodukten, z.B. Ammoniak, führen (vergl. die Situation im Untersee). Für die Bilanz des Stickstoffs ist neben Zu- und Abfluß auch der Austausch mit der Atmosphäre bestimmend: In der Zeit von Juli bis Oktober bilden Blaualgen größere Anteile an der pflanzlichen Biomasse. Durch die

Fähigkeit einzelner Arten zur Fixierung von elementarem Stickstoff können die Blaualgen Stickstoff-Mangelsituationen, welche eine Wachstumsbegrenzung zur Folge hätten, ausweichen. Um die - speziell im Untersee zu beobachtenden - Veränderungen der Zustandsformen des Stickstoffs besser interpretieren zu können, soll auf diese Umwandlungen näher eingegangen werden:

Neben der erwähnten Stickstoff-Fixierung ist der umgekehrte Prozeß (insbesondere im Bodensediment), nämlich die bakterielle Denitrifikation von Bedeutung. Anstelle von Sauerstoff wird dabei Nitrat veratmet und als Distickstoffoxid (N_2O) oder elementarer Stickstoff freigesetzt.

Bei der Mineralisation der organischen Substanz (mit und ohne Sauerstoff) wird Ammonium freigesetzt. Unter aeroben Bedingungen kann daraus der Vorgang der Nitrifikation unterhalten werden. Dabei wird das Ammonium über Nitrit zum Nitrat umgeformt. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß Nitrit auch bei der Reduktion des Nitrats entsteht. Da die einzelnen Stickstoffkomponenten verschieden giftig sind (Nitrit ist schon in Konzentrationen unter $0,2 \text{ mg/l}$ toxisch, Ammonium ist je nach pH-Situation ein Fischgift, selbst in Konzentrationen unter 1 mg/l ; Nitrat ist in den vorliegenden Mengen untoxisch), sind diese Redox-Reaktionen für den Zustand der einzelnen Seebecken wichtig. Weil die Algen unter den möglichen Stickstoffquellen das Ammonium bevorzugen, wird dieses entsprechend intensiv gezehrt und liegt dadurch in den oberen Wasserschichten nur in sehr kleinen Konzentrationen vor. Eine geringe, aber regelmäßig auftretende Erhöhung fällt in die Zeit der stürmischen Zooplankton-Entwicklung, durch welche im Mai bis Juni mehr Algen abgeweidet werden als nachwachsen können, mit der Folge, daß die Abbauprodukte nicht mehr weiter verarbeitet werden. Beim Nitrifikationsprozeß wird Energie freigesetzt, welche von den beteiligten Bakterien genutzt werden kann. Deshalb ist zu erwarten (und auch zu beobachten), daß im Bodensee-Obersee bei genügend Sauerstoff in der Tiefenzone kein Ammonium angereichert wird; im Gegensatz dazu finden wir in den bodennahen Wasserschichten der Unterseebecken im Lauf der Stagnationsperiode höhere Ammoniumgehalte.

Das Verteilungsmuster des Nitrits ist durch den Umstand gekennzeichnet, daß es als kurzlebiges Zwischenprodukt bei der Nitrifikation (bzw. bei der Nitratatumung) vom steten Nachschub aus der jeweiligen N-Quelle abhängt. Erhöhte

Konzentrationen liegen im Epi- und Metalimnion als Resultat besonders intensiver Abbauvorgänge und an der Grenzschicht des anaeroben Bereichs des Tiefenwassers (Untersee) vor, wo abwechselnd Ammonium oxidiert und Nitrat reduziert wird.

4.3 Kohlenstoff-Plankton

Obwohl die Menge des anorganischen Kohlenstoffs im Seewasser gegenüber dem Bedarf überaus groß ist und Kohlenstoff zudem aus der Atmosphäre in den See gelangt, ist regelmäßig ein Einbruch in der C-Bilanz des Epilimnions zu erkennen. Diese Abnahme entspricht freilich nicht der biologischen Zehrung; diese ist etwa im Frühjahr bei der ersten Entfaltung der Algen kaum wahrzunehmen. Eine Abnahme setzt erst im April/Mai ein. Die Tatsache, daß gleichzeitig mit dem anorganischen Kohlenstoff auch das Calcium zurückgeht, und dies in der gleichen Wasserschicht, macht diesen Vorgang verständlich: Durch Entzug von CO_2 und HCO_3^- durch die Algen wird das Gleichgewicht unter den Erscheinungsformen des Kohlenstoffs verschoben, wodurch es zunächst zur Calcit-Übersättigung und anschließend zur Ausfällung von Kalk ("biogene Entkalkung") kommt. Im Juni/Juli wird dieser Effekt verstärkt durch Verdünnung infolge der hohen Wasserführung des Alpenrheins. Größere Kalkkristalle sedimentieren rasch aus. Auf ihrem Sinkweg können sie unter anderem Phosphat adsorbieren und aus dem Epilimnion entfernen.

Ferner umwachsen die Kalkkristalle mitunter ganze Algen, welche dadurch ebenfalls beschleunigt aus dem Lebensraum eliminiert werden. Unter dem Einfluß der Kohlensäure, welche sich beim Abbau der organischen Partikel im Hypolimnion anreichert, wird ein Teil des sedimentierten Kalkes wieder aufgelöst. Der Kohlenstoff-Inhalt der gesamten Wassersäule variiert daher im Laufe des Jahres verhältnismäßig wenig. Da sich daraus aber die Jahresproduktion der Planktonbiomasse abschätzen läßt, ist die Kenntnis dieser Variation sehr wichtig.

Der gelöste organische Kohlenstoff ändert sich nur geringfügig. Im Bodensee liegt seine Konzentration bei rund 1 mg/l. Nur bei erhöhter Primärproduktion steigt er etwas an, doch hält diese Erhöhung nicht lange an, da die algenartigen organischen Stoffe verhältnismäßig rasch abgebaut werden. Der nicht abgebaute

Rest (z.B. Fulvo-Säuren des "Wasserhumus") ist biologisch weitgehend inert, was jedoch nicht bedeutet, daß er auf die biologischen und chemischen Reaktionen ohne Einfluß bleibt. So ist bekannt, daß gewisse organische Stoffe, darunter die oben erwähnte, durch Komplexbildung die Verfügbarkeit und Giftigkeit z.B. von Metallen für die Plankter verändern. Durch Komplexierung von Eiweißen und Kohlehydraten wird auch die Verfügbarkeit dieser Substrate herabgesetzt. Da die organischen Stoffe im Routine-Untersuchungsprogramm der IGKB lediglich in Form unspezifischer Summenparameter erfaßt werden, ist eine direkte Aussage über Wechselwirkungen mit der Biologie nicht möglich.

4.4 Kieselensäure-Plankton

Die Frühjahrsentwicklung des Planktons basiert im Bodensee zu einem großen Teil auf zentrischen Kieselalgen; nach dem Einbruch der Algenbiomasse infolge Zooplanktonfraß dominieren im Juli dann eher die pennatenschiffchenförmigen Kieselalgen. In dieser Zeit ist eine starke Zehrung des Silikates festzustellen, welches zu Konzentrationswerten (ca. 0,5 mg/l) führt, die in dieser Algengruppe das Wachstum begrenzen. Im Hypolimnion kommt es gegen Ende der Stagnationsperiode zu einer schwachen Anreicherung der gelösten Kieselensäure. Obwohl die Auflösung von Kieselensäurepartikeln im Wasser nur langsam erfolgt, ist sie dank der überaus großen, porösen Oberfläche der Kieselshalen doch merklich.

5. SEEBODEN

Das limnologische Geschehen in einem See und besonders auch seine allochthon bedingte Belastung dokumentiert sich weitgehend im physikalischen, chemischen und biologischen Zustand des Seebodens. Auch periodische und zum Teil sehr kurzfristige Vorgänge im Freiwasser oder in Zuflüssen werden im Seeboden als Gesamtwirkung über längere Zeit hinweg - gleichsam summiert - besser erkennbar. Nach bisherigen Ergebnissen wirkten sich allerdings Veränderungen sowohl durch Eutrophierungsvorgänge als auch durch Sanierungsmaßnahmen mit einer zeitlichen Verzögerung (z.B. durch Akkumulation und Bioturbation), d.h. die Durchmischung von Sedimentschichten durch Organismen, aus.

Fundierte Kenntnisse über den Zustand des Seebodens stellen aufgrund der Funktionszusammenhänge zwischen Sediment und Freiwasser (Ausfällung, Sedimentierung und Rücklösung von Stoffen in einer Zone intensiven Abbaus und erhöhtem Sauerstoffverbrauch) neben den Ergebnissen der Freiwasseruntersuchungen eine wichtige Grundlage für die Beurteilung der Belastung eines Sees dar.

Im Vergleich mit dem Freiwasser herrschen am Seeboden wegen der vielfältigen Einflußfaktoren (z.B. Exposition zur Einmündung belasteter Zuflüsse und Einleitungen, verschiedene Strömungsverhältnisse, Uferentfernung, Seetiefe sowie sonstige morphologische Gestaltung des Seebodens), heterogenere Verhältnisse vor. Bei den Untersuchungen und der Interpretation der Ergebnisse ist daher die Beurteilung mehrerer Profile notwendig.

Im Rahmen der Überwachung des Bodensees wurde versucht, möglichst genaue Informationen über den Zustand des Seebodens zu erhalten. Die Belastung konnte, besonders anhand des Gehaltes an abbaubarem, organischem Kohlenstoff der Sedimente sowie der Individuendichte von Indikatororganismen beschrieben werden (Zahner 1964). Als Indikatororganismen eignen sich beim gegenwärtigen trophischen Zustand des Bodensees - wie Untersuchungen im Bodensee-Obersee (IGKB-Bericht Nr. 2, 1964 und Nr. 25, 1981), im Genfer See (Lang et al. 1981), oder in einigen schwedischen Seen (Milbrink 1980) zeigen - besonders die Vertreter der Oligochaeten (Würmer mit wenig Borsten). Ihre Besiedlungsdichte nimmt mit steigender Zufuhr an abbaubaren organischen Stoffen in der Regel zu. Ferner wurden zur Beschreibung des Seebodenzustandes noch der Wassergehalt und die Korngrößenzusammensetzung der Sedimente sowie die Häufigkeit einiger weiterer Vertreter der sedimentbewohnenden Makrofauna (z.B. Gastropoden, Lamellibranchiaten und Insektenlarven) bestimmt.

Die Kenntnis der Belastung des Seebodens und deren Entwicklungstendenzen im Zuge der Eutrophierung des Bodensees ist sowohl für die Erfassung von Belastungsschwerpunkten als auch für die Feststellung der Wirksamkeit von Sanierungsmaßnahmen oder anderer Eingriffe im Seebereich ein wertvolles Arbeitsmittel.

6. LITERATUR

Auerbach, M. (1939): Die Oberflächen- und Tiefenströme im Bodensee.-Deutsche Wasserwirtschaft Bd. 34: 193-202 und 358-366.

Auerbach, M., Maerker, W. & Schmalz, J. (1924): Hydrographisch-biologische Bodenseeuntersuchungen. II. Ergebnisse der Jahre 1923 und 1924 und Zusammenfassung 1920 bis 1924. Verh. naturw. Ver. Karlsruhe **30**: 1-128.

Auerbach, M., Maerker, W. & Schmalz, J. (1926): Hydrographisch-biologische Bodenseeuntersuchungen II.- Verh. Naturwiss. Ver. Karlsruhe **30**: 1-128.

Beran, F. (1980): Landschaft und Natur - Die Landschaft.- In: Wiedmann, B., Hrsg.: Der Bodenseekreis, K. Theiss Verl. Stuttgart: 29-57.

Bürgi, H.R. (1976): Die Phytoplanktonentwicklung im Bodensee in den Jahren 1961 bis 1963.- Ber. Int. Gewässerschutzkomm. Bodensee **18**: 1-87.

Bürgi, H.R. (1977): Die langjährige Entwicklung des Phytoplanktons im Bodensee (1963-1973), Teil 1, Untersee.- Ber. Int. Gewässerschutzkomm. Bodensee **21**: 1-42.

Bürgi, H.R., Lehn, H. (1979): Die langjährige Entwicklung des Phytoplanktons im Bodensee (1965-1975), Teil 2, Obersee.- Ber. Int. Gewässerschutzkomm. Bodensee **23**: 1-86.

Deufel, J. (1967): Hydrobakteriologische Untersuchungen im Bodensee I. Über die Vertikalverteilung der Bakterien im Pelagial.- Int. Rev. ges. Hydrobiol. **52**(4): 617-626.

Deufel, J. (1969): Hydrobakteriologische Untersuchungen am Bodensee II. Über die Horizontalverbreitung der Bakterien.- Int. Rev. ges. Hydrobiol. **54**(2): 303-308.

Einsle, U. (1977): Die Entwicklung des Crustaceenplanktons im Bodensee. Obersee (1962-1974) und Rheinsee (1963-1973).- Ber. Int. Gewässerschutzkomm. Bodensee **20**: 1-63 und Abb.

Einsle, U. (1978): Das Crustaceenplankton im Gnadensee (Bodensee-Untersee).- Schr. VG Bodensee **96**: 217-240.

Einsle, U. (1983 a): Long-term changes in planktonic associations of crustaceans in Lake Constance and adjacent waters and their effects on competitive situations.- Hydrobiologia **106**: 127-134.

Einsle, U. (1983 b): Die Entwicklung und Männchenbildung der Daphnia-Population im Bodensee-Obersee 1956-1980.- Schweiz.

Elster, H.-J. (1939): Beobachtungen über das Verhalten der Schichtgrenzen nebst einigen Bemerkungen über die Austauschverhältnisse im Bodensee (Obersee).- Arch. Hydrobiol. **35**: 286-346

Elster, H.-J. (1960): Der Bodensee als Organismus und die Veränderung seines Stoffwechsels in den letzten Jahrzehnten.- gwf-wasser/abwasser **101**: 171-180.

Elster, H.-J. (1974): Das Ökosystem Bodensee in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft.- Schr. VG Bodensee **92**: 233-250.

Elster, H.-J. (1982): Neuere Untersuchungen über die Eutrophierung und Sanierung des Bodensees.- gwf-wasser/abwasser **123**: 277-287.

Elster, H.-J. & Einsele, W. (1937): Beiträge zur Hydrographie des Obersees.- Int. Revue ges. Hydrobiol. u. Hydrogr. **35**: 525-585.

Elster, H.-J. & Einsele, W. (1937): Beiträge zur Hydrographie des Bodensees (Obersee).- Int. Rev. ges. Hydrobiol. **35**: 525-585.

Forel, F.A., Graf Zeppelin, E. (1983): Die Schwankungen des Bodensees.-Schr. VG Bodensee **22**: 49-77.

Grim, J. (1939): Beobachtungen am Phytoplankton des Bodensees (Obersee) sowie deren rechnerische Auswertung.- *Int. Revue ges. Hydrobiol. u. Hydrogr.* **39**: 193-315.

Grim, J. (1951): Ein Vergleich der Produktionsleistung des Bodensee-Untersees, des Obersees und des Schleinsees.- *Abhand. a. d. Fischerei* **4**: 787-841.

Grim, J. (1955): Die chemischen und planktologischen Veränderungen des Bodensee-Obersees in den letzten 30 Jahren.- *Arch. Hydrobiol. Suppl.* **22**: 310-322.

Grim, J. (1967): Der Phosphor und die pflanzliche Produktion im Bodensee.- *GWF* **108**: 1261-1271.

Grim, J. (1968): Ein Beitrag zur Geschichte der naturkundlichen Erforschung des Bodensees.- *Schrr. VG Bodensee* **86**: 247-282.

Grim, J. (1980): Der Bodenseekreis und der Bodensee.- In: Wiedmann, B., Hrsg.: *Der Bodenseekreis*, K. Theiss Verl. Stuttgart: 58-85.

Güde, H., Haibel, B., Müller, H. (1985): Development of planktonic bacterial populations in a water column of Lake Constance (Bodensee-Obersee).- *Arch. Hydrobiol.* (im Druck).

Hollan, E. (1974 a): Strömungsmessungen im Bodensee.- *AWBR-Bericht Nr. 6*: 111-187.

Hollan, E. (1974 b): Wenn der Bodensee aufgewühlt wird.- *Umschau* **74**: 152-154.

Hollan, E., Simons, T.J. (1978): Windinduced changes of temperature and currents in Lake Constance.- *Arch. f. Meteorol. Geophys. u. Bioklimatologie Ser. A.* **27**: 333-373.

Hoppe-Seyler, F. (1982): Über die Verteilung absorbierter Gase im Wasser des Bodensees und ihre Beziehungen zu den in ihm lebenden Tieren und Pflanzen.- *Schrr. VG Bodensee* **24**: 29-48.

IGKB (1961): Zustand und neuere Entwicklung des Bodensees.- Bericht Nr. 1 der IGKB, Selbstverlag, 20 S. und Beilagen.

IGKB (1964): Die Abwasserbelastung der Uferzone des Bodensees.- Bericht Nr. 2 der IGKB, Selbstverlag, 53 S., 35 Abb.

IGKB (1975): Zustand und neuere Entwicklung des Bodensees Stand 1974.-Bericht Nr. 16 der IGKB, Selbstverlag, 33 S.

IGKB (1981): Zum biologischen Zustand des Seebodens des Bodensees in den Jahren 1972 bis 1978.- Bericht Nr. 25 der IGKB, Selbstverlag, 289 S.

IGKB (1982): Die Auswirkung der Reinhaltmaßnahmen auf die limnologische Entwicklung des Bodensees (Lagebericht).- Bericht Nr. 30 der IGKB, Selbstverlag, 33 S.

Kiefer, F. (1972): Naturkunde des Bodensees.- Thorbecke Verl. Lindau u. Konstanz, 2. Aufl.

Kiefer, F. (1978): 100 Jahre metrische Wasserstandsmessung am Bodensee.-Schr. VG Bodensee **96**: 203-216.

Kolkwitz, R. (1912): Quantitative Studien über das Plankton des Rheinstroms von seinen Quellen bis zur Mündung.- Ber. D. bot. Gesell. **30**

Lampert, W. (1978): A field study on the dependence of the fecundity of *Daphnia* sp. on food concentration.- *Oecologia* **36**: 363-369.

Lampert, W., Schober, U. (1978): Das regelmäßige Auftreten von Frühjahrsmaximum und "Klarwasserstadium" im Bodensee als Folge von klimatischen Faktoren und Wechselwirkungen zwischen Phyto- und Zooplankton.-Arch. Hydrobiol. **82**: 364-386.

Lang, C., Hutter, P. (1981): Structure, diversity and stability of two oligochaete communities according to sedimentary inputs in Lake Geneva (Switzerland).- Schweiz. Z. Hydrol. **43**: 265-276.

Lang, G. (1973): Die Makrophytenvegetation in der Uferzone des Bodensees.- Bericht Nr. 12 der IGKB, Selbstverlag, 67 S.

Lang, G. (1981): Die submergen Makrophyten des Bodensees - 1978 im Vergleich mit 1967 -, Bericht Nr. 26 der IGKB, Selbstverlag, 64 S.

Lauterborn, R. (1925): Zur Kenntnis des Planktons des Bodensees und der benachbarten Kleinseen.- Mitt. Bad. Landesv. Naturkde. N.F. 1: 421-430.

Ledergerber, H.P. (1982): Entwicklung der Trinkwasseraufbereitung am Bodensee, Beispiel St. Gallen.- AWBR Jahresbericht 1982: 267-292.

Lehn, H. (1965): Isothermenschwankungen im Bodensee.- Umschau 65: 644-648.

Lehn, H. (1969): Die Veränderungen des Phytoplanktonbestandes im Bodensee: I. Fluktuationen von *Tabellaria fenestrata* 1890-1967.- Int. Rev. ges. Hydrobiol. 54: 367-411.

Lehn, H. (1973): Phytoplanktonänderungen im Bodensee und einige Folgeprobleme.- Verh. Ges. f. Ökologie 2: 225-235.

Lehn, H. (1978): Vom Abfluß des Bodensee-Obersees.- Verh. Gesellschaft f. Ökologie, Kiel 1977 (1978): 163-172.

Lehn, H. (1981/82): Der Bodensee - ein Ökosystem im Wandel.- Schr. VG Bodensee 99./100.: 69-98.

Limnologische Monatsberichte - Überlinger See (1957-1963): Jg. 1-6.-Hrsg. v. d. Anstalt f. Bodenseeforschung d. Stadt Konstanz, Konstanz-Staad.

Mallaun, O., Linder, T.R. (1983): Bodensee-Handbuch.- Rosgarten Verl. GmbH, Konstanz, 11. Aufl.

Milbrink, G. (1980): Oligochaete communities in pollution biology: the european situation with special reference to lakes in Scandinavia. In: Aquatic oligochaete biology, Eds. Brinkhurst R.O. and Cook D. G., Plenum Press. New York and London. 529 p.

Mohammed, A.A.-A., Müller, H. (1981): Zur Nährstofflimitierung des Phytoplanktons im Bodensee. I. Der Zustand im Seeteil "Überlinger See" 1974-1975.- Arch. Hydrobiol. Suppl. **59**: 151-191.

Müller, H. (1967): Eine neue qualitative Bestandsaufnahme des Phytoplanktons des Bodensee-Obersees mit besonderer Berücksichtigung der tychoplanktischen Diatomeen.- Arch. Hydrobiol./Suppl. **XXXIII**(2): 206-236.

Peppler, W. (1937): Temperaturen des Wassers und der Luft auf dem Bodensee.- Wiss. Abhandl. d. Reichsamts f. Wetterdienst III, Nr. **7**: 1-38.

Roßknecht, H. (1980): Phosphatelimination durch autochthone Calcitfällung im Bodensee-Obersee.- Arch. Hydrobiol. **88**: 328-344.

Rosknecht, H. (1983): Die Auswirkungen von Sanierungsmaßnahmen auf den Manganhaushalt des Bodensees (Obersee und Untersee-Gandensee).- Arch. Hydrobiol. **92**: 346-355.

Schmidt, F. (1980): 25 Jahre Bodensee-Wasserversorgung, Entstehung, Bau und Betrieb.- afk Stuttgart, 297 S.

Schreiner, A. (1969): Zur Geschichte des Überlinger Sees.- gwf-wasser/abwasser **110**: 811-814.

Schröder, R. (1974): Strömungsverhältnisse im Bodensee-Untersee und der Wasseraustausch zwischen den einzelnen Sebecken.- Bericht Nr. 15 der IGKB, Selbstverlag, 24 S.

Schröder, R. (1981): Die Veränderung der submersen Vegetation des Bodensees in ausgewählten Testflächen in den Jahren 1967 bis 1978.- Bericht Nr. 27 der IGKB, Selbstverlag, 116 S.

Schroeter, C. & Kirchner, O. (1896): Die Vegetation des Bodensees (Bodenseeforschung) Teil I.- Schrr. VG Bodensee **25**: 1-122.

Sommer, U., Stabel, H.-H. (1983): Silicon consumption and population density changes of dominant planktonic diatoms in lake Constance.- Journ. Ecol. **71**: 119-130.

Tilzer, M.M., Geller, W., Sommer, U., Stabel, H.-H. (1982): Kohlenstoffkreislauf und Nahrungsketten in der Freiwasserzone des Bodensees.- Konstanzer Blätter für Hochschulfragen **73**: 51-76.

Utermöhl, H. (1936): Quantitative Methoden zur Untersuchung des Nannoplanktons.- Abderhaldens Handb. biol. Arbeitsmethoden Abt. IX. **2/II**: 1879-1937.

Utermöhl, H. (1958): Zur Vervollkommung der quantitativen Phytoplankton-Methodik.- Mitt. Int. Ver. theor. u. angew. Limnologie **9**: 1-38.

Wagner, G., Wagner, B. (1978): Zur Einschichtung von Flußwasser in den Bodensee-Obersee.- Schweiz. Z. Hydrol. **40**: 231-248.

Zahner, R. (1964): Beziehungen zwischen dem Auftreten von Tubificiden und der Zufuhr organischer Stoffe im Bodensee.- Int. Rev. ges. Hydrobiol. **49**: 417-454.

7. AUSKÜNFTE

Baden-Württemberg: Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft,
Umwelt und Forsten
Postfach 491

D - 7000 Stuttgart I

Bayern: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft
Abhofach

D - 8000 München I

Österreich: Amt der Vorarlberger Landesregierung
Landhaus

A - 6901 Bregenz

Schweiz: Bundesamt für Umweltschutz
Monbijoustr. 8

CH - 3003 Bern