

Ber. Int. Gewässerschutzkomm. Bodensee: 40,1989

ISSN 1011-1263

Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee

Bericht Nr. 40

Die Belastung des Bodensees  
mit Phosphor- und Stickstoffverbindungen,  
organisch gebundenem Kohlenstoff und Borat  
im Abflußjahr 1985/86

Bearbeiter: G. Wagner und H. Bühner

- 1989 -

Inhalt:	Seite
Vorwort	4
Grundsätzliche Bemerkungen	7
1. Einleitung	10
2. Erläuterungen und Begriffsdefinitionen, Abkürzungen	12
3. Methodik	14
3.1 Generelle Arbeitsaufteilung, Probengewinnung	14
3.2 Untersuchungsparameter	16
3.3 Berechnung der Stofffrachten	16
3.3.1 Niederschlagsflächen und Abflüsse	16
3.3.2 Einträge aus den Einzugsgebieten der Zuflüsse	17
3.3.3 Einträge aus seeanliegenden Abwasserreinigungsanlagen	19
3.3.4 Einträge aus Niederschlägen auf die Seeoberfläche	19
3.3.5 Restliche Einträge aus ufernahen Gebieten	19
3.3.6 Stoffausträge aus dem See	23
4. Ergebnisse (Ergebnistabellen)	25
Tab.1: Niederschlagsflächen und Jahresabflüsse, Jahresfrachten der Flußschwebstoffe sowie von Phosphor, Stickstoff, organischem Kohlenstoff und Bor jeweils ohne und in Flußschwebstoffen im Abflußjahr 1985/86.	26
Tab.2: Schätzung der Belastung in den Einzugsgebieten der Flüsse für Einträge aus dem ländlichen Areal und für Abwasser im Vergleich zu den Messungen an den Mündungen.	29
Tab.3: Monatsfrachtsummen der untersuchten Zuflüsse zum Bodensee-Obersee im Abflußjahr 1985/86	31
Tab.4: Jahrgänge der Stofffrachten und monatsmittlere Konzentrationen im Seerhein 1985/86.	31
Tab.5: Zusammenstellung der jährlichen Frachten (ohne Flußschwebstoffe) von Phosphor und Stickstoff sowie organischem Kohlenstoff; Gegenüberstellung der Ergebnisse von 1971/72, 1978/79 und 1985/86.	32
Tab.6: Gesamte jährliche Stofffrachten zum Bodensee-Obersee, Vergleich der bisherigen Ergebnisse.	32
5. Diskussion und Wertung der Ergebnisse	33
5.1 Wassermengenbilanz und Flußschwebstoffe	33
5.2 Phosphor	33
5.2.1 Grundsätzliche Feststellungen	33
5.2.2 Aktueller Stand der Phosphorzufuhr zum See, des Rückhaltes im See und des Austrags (Jahresbilanz)	36
5.2.3 Herkunft der Belastungen und noch bestehende Schwerpunkte	36
5.2.4 Vergleich der Ergebnisse mit früheren Untersuchungen und mit den Zielsetzungen des Bau- und Investitionsprogramms der IGKB bis 1985	37
5.2.5 Zu erwartende Entwicklung der Konzentrationen im See	39
5.3 Stickstoff	40
5.3.1 Allgemeine Bemerkungen	40
5.3.2 Aktueller Stand der Stickstoffzufuhr zum See, des Rückhaltes im See und des Austrags (Jahresbilanz) sowie Vergleich der Ergebnisse mit früheren Untersuchungen	40
5.3.3 Herkunft der Stickstoffbelastungen, noch bestehende Schwerpunkte und die zu erwartende Entwicklung der Konzentrationen im See	41
5.4 Organischer Kohlenstoff	42
5.5 Bor	43
6. Zusammenfassung	47
7. Literatur	48
8. Anhang (Sonderband mit Basisdaten)	50

## Vorwort

Anlässlich der 30. Tagung der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) am 29. und 30. Mai 1984 in Tegernsee wurde den Sachverständigen der Auftrag erteilt, im Abflußjahr 1985/86 an den wichtigsten Zuflüssen und seeanliegenden Abwasserreinigungsanlagen erneut Untersuchungen zur Messung der dem Bodensee zugeführten Stofffrachten durchzuführen. Zu diesem Zeitpunkt war ein wesentlicher Abschnitt im Bau- und Investitionsprogramm der IGKB abgelaufen und ein weiterer Rückgang der Abwasserbelastung seit der letzten Untersuchung zu erwarten.

Während der Untersuchungsperiode von Ende 1985 bis Anfang 1987 wurden an 19 Flüssen und Nebenflüssen Proben erhoben, an welchen etwa 10 000 Einzelanalysen durchgeführt wurden. Hierin sind die Sonderuntersuchungen des Kantons Thurgau, Analysen an Abwasserreinigungsanlagen, Analysen von Niederschlägen, Mehrfachbestimmungen, zusätzliches Datenmaterial für die Berechnung der Schwebstofffrachten, statistisch erarbeitete Werte und Abflußdaten nicht enthalten. Insgesamt waren etwa 40 Bearbeiter (ohne Personal der Kläranlagen) direkt an diesem Werk beteiligt. Die Gesamtkosten betragen (einschl. Überwachungsprogramme) nahezu 1 Mio. SFr. Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchung sind in diesem Bericht, der auf den Erfahrungen aus den früheren Untersuchungen aufbaut, zusammengestellt.

Die reibungslose Durchführung der Arbeiten war nur möglich dank dem konzertierten Einsatz der Untersuchungslaboratorien, der Wasserwirtschaftsämter aller betroffenen Staaten, Länder und Kantone sowie des Personals von Abwasserreinigungsanlagen.

An den Untersuchungen und Auswertungen waren folgende Personen und Stellen maßgeblich beteiligt:

Prof. Dr. H. Ambühl, Dübendorf  
Dr. H. Bühler, Dübendorf  
Ing. G. Deplazes, Chur  
Dipl. phil. nat. U. Engler, St. Gallen  
R. Grabher, Bregenz  
Dr. H. Grimm, Bregenz  
Ing. E. Hilbe, Vaduz  
Dipl.-Ing. Hoheisel, Ravensburg  
Ing. Th. Kindle, Vaduz  
Dipl.-Ing. W. Lukas, Konstanz  
Dipl.-Ing. C. Mathis, Bregenz  
Dr. Gertrud Osman-Sigg, Frauenfeld  
Dipl.-Chem. R. Ott, St. Gallen  
Dr. H. Roßknecht, Langenargen  
Dipl.-Ing. W. Rutz, Frauenfeld  
Dr. W. Sanzin, München  
Dipl.-Chem. W. Schnegg, Frauenfeld  
Dr. Laura Sigg, Dübendorf  
E. Stark, Bregenz  
Dr. J. Thöny, Bregenz  
Dr. B. Wagner, Bregenz  
Dr. G. Wagner, Langenargen

Baden-Württemberg:

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg mit den Abteilungen IV (Institut für Wasser- und Abfallwirtschaft, D-7500 Karlsruhe) und V (Institut für Seenforschung und Fischereiwesen, ISF, in D-7994 Langenargen sowie D-7752 Insel Reichenau),

Wasserwirtschaftsamt Konstanz, D-7750 Konstanz,

Wasserwirtschaftsamt Ravensburg, D-7980 Ravensburg

Bayern:

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, D-8000 München 19

Wasserwirtschaftsamt Kempten, D-8960 Kempten

Fürstentum Liechtenstein:

Amt für Gewässerschutz des Fürstentums Liechtenstein, FL-9490 Vaduz

Österreich/Vorarlberg:

Vorarlberger Umweltschutzanstalt (Abt. Biologie, Wasser) und

Landeswasserbauamt (Hydrographie, Abwasser), A-6901 Bregenz

Schweizerische Eidgenossenschaft:

Bundesamt für Umweltschutz, Landeshydrologie, CH-3001 Bern

Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) mit den Fachabteilungen Hydrobiologie-Limnologie und Chemie, CH-8600 Dübendorf

Schweizerische Kantone

Graubünden:

Amt für Umweltschutz des Kantons Graubünden, CH-7001 Chur

St. Gallen:

Amt für Umweltschutz des Kantons St.Gallen, CH-9001 St.Gallen

Thurgau:

Amt für Umweltschutz und Wasserwirtschaft des Kantons Thurgau, CH-8500 Frauenfeld

Vorbereitung und Durchführung des Programms oblag der IGKB-Arbeitsgruppe "Zuflußuntersuchungen" unter dem Vorsitz von Prof. Dr. H. Ambühl.

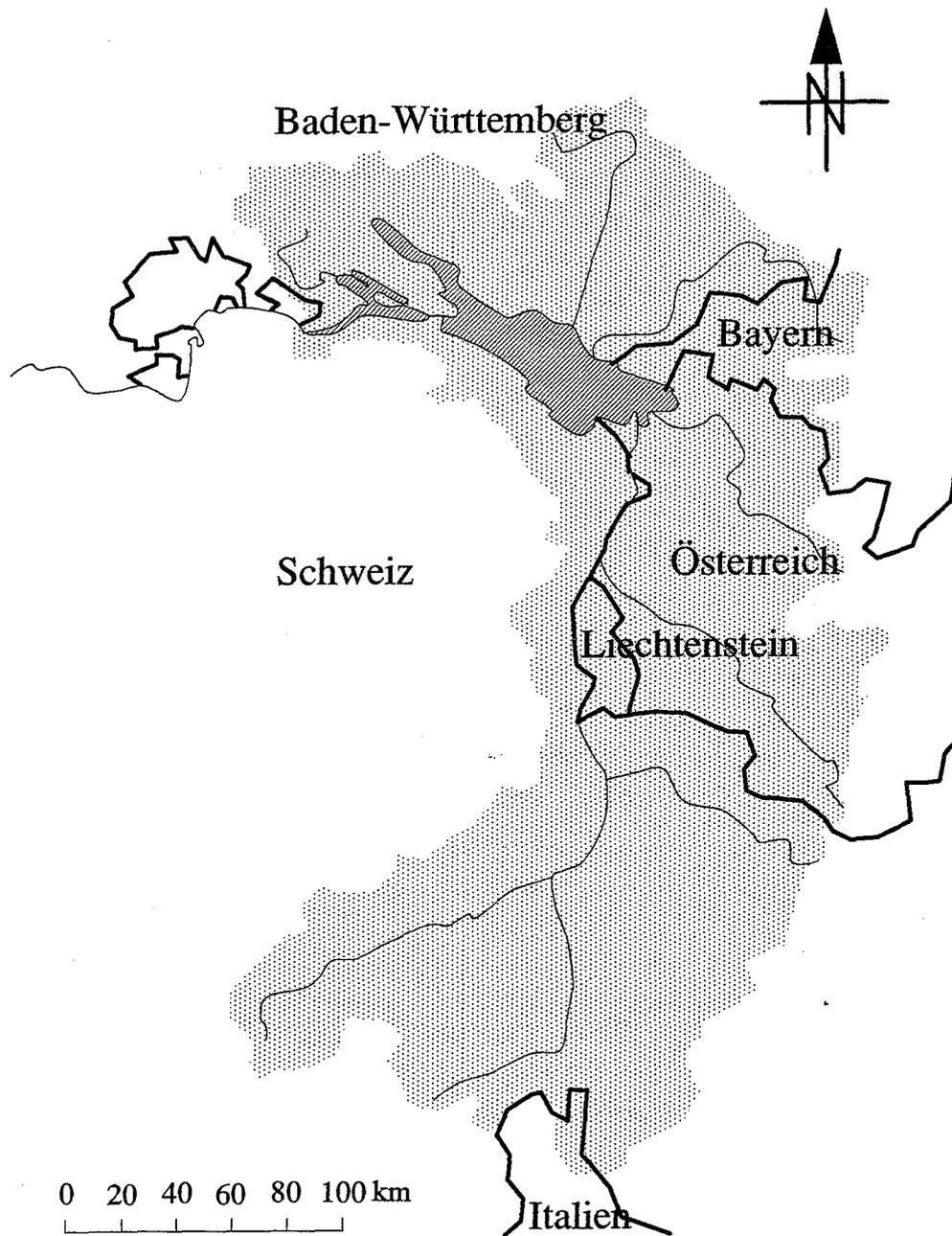


Abb. 1: Das Einzugsgebiet des Bodensees und Ländergrenzen

## Grundsätzliche Bemerkungen

Die Zuflußuntersuchungen 1985/86 belegen den erwarteten Rückgang der Phosphorbelastung des Bodensees, zeigen aber auch seit der letzten Untersuchung 1978/79 einen Anstieg der Stickstoffverbindungen. Zur Wertung der aktuellen Situation erscheint es unerlässlich, mit grundsätzlichen Betrachtungen wesentliche Zusammenhänge aufzuzeigen.

Aus Abwässern, oberflächlich abfließendem Niederschlagswasser, Drainagen, Grundwasser-austritten sowie Niederschlägen gelangen Stoffe in die Zuflüsse und direkt in den See. In den Zuflüssen ändern sich die Mengenverhältnisse gelöster und partikulärer Stoffkomponenten vom Ort des Eintrages bis zur Mündung beträchtlich. Gelöster Phosphor kann gebunden, d.h. "partikulär" werden. Spezielle Untersuchungen zeigten, daß Phosphate an Schwebstoffe adsorbiert, aber auch wieder freigesetzt werden.

Die Flußschwebstoffe stammen überwiegend aus Bodenabtrag und sind nur zu einem sehr geringen Teil abwasserbürtig. Große Anteile der Jahresfracht werden innerhalb kurzer Zeitabschnitte (Hochwässer) transportiert. Die dadurch erhöhte Dichte der Flußwässer bedingt für die Masse der Schwebstoffe eine tiefe Einschichtung in den See. Auch die Jahresfrachten schwanken abhängig von den hydrologischen Gegebenheiten in den Jahren stark. Extrem niedrige bzw. erhöhte Schwebstofffrachten entstehen in Trocken- bzw. Hochwasserjahren.

Ausgenommen in Niedrigwasserjahren (z.B. 1971/72) betragen die in den Bodensee-Obersee eingetragenen partikulären Phosphorfrachten bisher deutlich mehr als die Hälfte der Gesamt-Phosphorfracht. Der Anteil der partikulären Stickstofffrachten lag dagegen unter einem Drittel des gesamten Stickstoffeintrages in den See.

An den Belastungsquellen wurden rund 1100 Tonnen gelösten Phosphors ermittelt, wovon je etwa die Hälfte im Abwasser und in den ländlichen Arealen ihren Ursprung hat. Ein hoher Anteil an gelöstem Phosphor aus ländlichen Arealen ist oberflächlich und über Drainagen abfließendem Dünger anzulasten. Im tiefliegenden Grundwasser hingegen ist gelöster Phosphor wegen seiner starken Bodenhaftung nur in geringen Mengen vorhanden.

Von dem am Ursprung festgestellten gelösten Phosphor gelangen nur 620 Tonnen in gelöster Form in den See, der Rest oder rund 480 Tonnen wurden in partikulären Phosphor umgewandelt.

In den Kläranlagen wird ein großer Teil der im Abwasser enthaltenen Phosphorfracht zurückgehalten. Trotzdem sind an der gesamten Phosphorbelastung die Abwässer, namentlich die ungereinigten, noch in einem beachtlichen Ausmaß beteiligt.

In den Kläranlagen wird nur wenig Stickstoff zurückgehalten. Insgesamt ist die Beteiligung des Abwassers am gesamten Stickstoffumsatz gering. Die Stickstoffverbindungen stammen zum überwiegenden Anteil aus dem ländlichen Areal und aus Niederschlägen. Das geringe Rückhaltevermögen des Bodens gegenüber Nitrat bewirkt, daß diese Stickstoffverbindungen auch mit dem Grundwasser in die Gewässer transportiert wird. Abgesehen von der Ammoniumoxidation sind die Umsetzungen von Stickstoffverbindungen in den Fließgewässern gering.

Im Zusammenhang mit der Phosphorbelastung des Bodensees ist bedeutsam, daß gebundener Stickstoff ein Nährstoffpotential darstellt, das bei lokal höherer Phosphorkonzentration, wie im Einflußbereich von Seeleitungen, Flußmündungen und in der Flachwasserzone, für Produktionssteigerungen genutzt werden kann.

Organische Verbindungen belasten - soweit sie nicht direkte Wirkungen auf Organismen ausüben - vor allem den Sauerstoffhaushalt des Sees in ähnlicher Weise wie die bei der see-eigenen Produktion entstehenden organischen Stoffe. Ihr Rückgang ist daher sehr positiv zu bewerten. Allerdings darf nicht übersehen werden, daß die eigene Produktion des Sees an

organischen, größtenteils leicht abbaubaren und somit sauerstoffzehrenden Stoffen als Hauptbelastungsquelle stark im Vordergrund steht.

Der Erfolg der See-Sanierungsmaßnahmen wird zunächst aus dem erheblichen Rückgang der Phosphorzufuhr und seiner Konzentration im See ersichtlich, Für den Seezustand entscheidend ist jedoch nicht der Phosphor selbst, sondern die Menge der dadurch entstehenden und den See belastenden Algenbiomasse. An ihrer Verringerung muß der Sanierungserfolg bewertet werden.

Als Ergebnis der Untersuchung der langjährigen Phytoplanktonentwicklung im Bodensee steht fest, daß bis 1986, als die Frühjahreskonzentration des Gesamtphosphors im Seewasser  $63 \text{ mg/m}^3$  betrug und damit im Vergleich zum 1979 beobachteten Maximalwert ( $87 \text{ mg/m}^3$ ) um über 25% zurückgegangen war, keine signifikante Abnahme der Biomasse des Phytoplanktons als Folge der sinkenden Phosphorkonzentration statt fand. Allerdings wurde durch eine zeitlich und räumlich differenzierende Artenanalyse in den letzten Jahren eine deutliche Änderung im Artenspektrum und in der jahreszeitlichen Entwicklung des Phytoplanktons sichtbar.

Aus einer Analyse der Phase zunehmender Eutrophierung des Sees geht hervor, daß der Zusammenhang zwischen Phosphor und Algenbiomasse im See etwa einer Sättigungsfunktion folgte (Abb. 2), wobei der Phosphor bei zunehmender Eutrophierung im Mittel immer weniger zur Bildung von Algenbiomasse ausgenutzt wurde. Der Zusammenhang zwischen Phosphorkonzentration und Primärproduktion verläuft nach Untersuchungen an anderen Seen

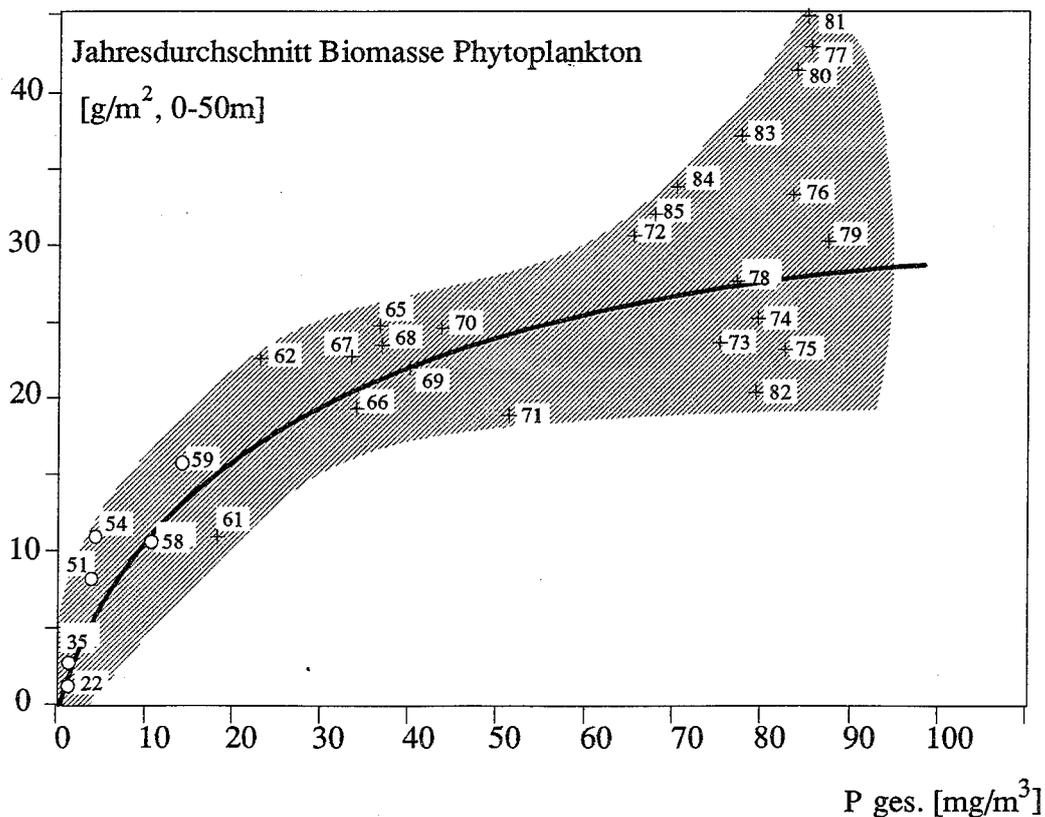


Abb.2: Phytoplankton-Biomasse (Jahresmittelwerte als Frischgewicht in  $\text{g/m}^2$ , 0-50 m Tiefe) in Bodensee-Obersee in Abhängigkeit von der Konzentration des Gesamtphosphors im Rohwasser bei Vollzirkulation  
+ : Zählungen IGKB ab 1961  
o : Werte früherer Untersuchungen

(OECD) in ähnlicher Weise. Die Schwankungen der Biomasse waren von Jahr zu Jahr teilweise hoch und wurden erheblich von der Witterung und von solchen Faktoren mitbestimmt, die sich nicht oder nur in geringerem Maße als der Phosphor änderten (z.B. Silikat, Nitrat).

Unter der Voraussetzung, daß der Zusammenhang zwischen Algenbiomasse und Phosphorgehalt im See bei rückläufigen Konzentrationswerten in ähnlicher Weise gegeben ist wie bei der Zunahme, war zwar eine kleinere Schwankungsbreite der Algenbiomasse wegen des gesunkenen Produktionspotentials und damit ein stabilisierender Effekt zu erwarten, jedoch noch kein wesentlicher Rückgang der Algenbiomasse.

Der Effekt der Phosphorverminderung wird mit abnehmender Konzentration im See zunehmend wirksamer. Eine stärkere Abhängigkeit der Algenbiomasse ergibt sich allerdings erst bei Phosphorkonzentrationen unter  $30 \text{ mg/m}^3$ .

Eine Halbierung der mittleren Algenbiomasse, die zur Zeit der höchsten Phosphorbelastung zu beobachten war, könnte danach erst bei Phosphorkonzentrationen um ca.  $15 \text{ mg/m}^3$  eintreten.

Bei dieser Betrachtung ist außerdem zu berücksichtigen, daß die produktionswirksame Phosphor-Belastung des Sees sicher höher ist, als aus der alleinigen Berücksichtigung des gelösten Phosphors hervorgeht, denn der schwebstoffgebundene Phosphor steht zumindest zu gewissen Zeiten und regional (z.B. Flachwasserzone) der Algenproduktion teilweise zur Verfügung. Insbesondere trifft dies während der für die gesamte Jahresbilanz stark zu Buche schlagenden Frühjahrsentwicklung zu. Dann können sich einerseits Zuflüsse an der Seeoberfläche einschichten, andererseits kann Schwebstoffe führendes Wasser wegen der noch mangelhaften Schichtungsstabilität leicht von unten in die Produktionszone eingemischt werden. Während dieser Zeit sinken die Orthophosphatkonzentrationen in der Produktionszone rasch auf sehr niedrige Werte ab und begünstigen so eine Abgabe von partikelgebundenem Phosphor.

Eine Quantifizierung der Verfügbarkeit von partikulär gebundenem Phosphor für die Algenproduktion ist bei gegenwärtigen Kenntnisstand nicht möglich. Sie darf jedoch bei der Beurteilung der Gesamtbelastung nicht vernachlässigt werden.

Das aufgezeigte Produktionsverhalten des Sees läßt erkennen, daß die Maßnahmen zur weiteren Verminderung des Phosphor-Eintrages wie geplant mit Nachdruck weitergeführt werden müssen, sowohl im unmittelbaren als auch im ferneren Einzugsgebiet des Sees. Die Belastung der dem See zugeführten Schwebstoffe mit Phosphor muß weiter verringert werden, weil diese sonst bei der angestrebten niedrigen Phosphor Konzentration im See zu einer zunehmenden Belastungsquelle würden.

Die Verwirklichung von abwassertechnischen Maßnahmen auf der Grundlage der bisherigen Bau- und Investitionsprogramme hat zu der dargelegten Verminderung der Phosphorbelastung des Sees und der deutlichen Rückentwicklung der Phosphorkonzentration im Freiwasser geführt.

Auffallend an der Phosphorzufuhr ist allerdings der hohe Anteil aus ländlichen Arealen. Mit fortschreitendem Phosphorrückhalt auf der Abwasserseite fällt dieser immer mehr ins Gewicht.

Das Erreichen und langfristige Sichern eines Trophiezustandes im See auf einem niedrigen Niveau verlangt das konsequente Ausschöpfen aller Möglichkeiten einer Verringerung der Phosphorzufuhr. Dieses Ziel kann nur mit Maßnahmen auf abwassertechnischem Gebiet, zusammen mit solchen in den ländlichen Arealen erreicht werden. Die abwassertechnischen Maßnahmen sind daher auf der Grundlage des Bau- und Investitionsprogramms 1986-1995 sowie der "Richtlinien für die Reinhaltung des Bodensees vom 27. Mai 1987" fortzuführen. Ebenso sind die an die Landwirtschaft gerichteten Maßnahmenvorschläge der IGKB Denkschrift "Die Zukunft der Reinhaltung des Bodensees - Weitergehende und vorbeugende Maßnahmen" ohne zeitlichen Verzug zu verwirklichen.

## 1. Einleitung

Daß die Phosphate für die Eutrophierung des Bodensees von ausschlaggebender Bedeutung sind, wurde schon früh erkannt. Seit Gründung der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) im Jahre 1959 wurden entsprechende Maßnahmen gegen die Gewässerbelastung ergriffen (IGKB 1966). In größeren Zeitabständen wird auch die Feststellung der Frachten eutrophierender Stoffe veranlaßt. Diese Untersuchungen dienen nicht nur der Kontrolle des Erfolgs der Gewässerschutzmaßnahmen am See und in seinem Einzugsgebiet, sondern darüber hinaus auch wissenschaftlichen Zwecken, u. a. der Erstellung von dynamischen Stoffhaushaltsmodellen.

Sieben Jahre nach den letzten Zuflußuntersuchungen der IGKB 1978/79 (IGKB 1982b) wurde gemäß dem Kommissionsauftrag vom Mai 1984 erneut die Zufuhr der für die Eutrophierung verantwortlichen Stofffrachten zum Bodensee ermittelt. In der Zwischenzeit sind vor allem folgende Änderungen eingetreten:

- In der Abwasserreinigung wurden weitere Fortschritte erzielt (IGKB 1981);
- in der Bundesrepublik Deutschland trat die Verordnung zur Verringerung von Phosphaten in Waschmitteln in Kraft (BGBl. 1980, AKP 1988);
- in Österreich wurde gemäß Waschmittelgesetz der Phosphatgehalt von Haushaltswaschmitteln 1985 und 1987 in zwei Stufen reduziert (BGBl 300/1984);
- in der Schweiz wurde mit der Waschmittelverordnung 1980 eine Beschränkung der Phosphathöchstmengen in Wasch- und Reinigungsmitteln festgelegt; mit der Stoffverordnung 1986 trat das Verbot der Verwendung von Phosphaten in Textilwaschmitteln in Kraft (StoV 1986, SR 814013);
- durch Aufklärung der Bevölkerung wurde allgemein der Waschmittelverbrauch gesenkt;
- in großen Städten Baden-Württembergs im Einzugsgebiet des Sees ging der Phosphorumsatz besonders stark zurück (WAGNER 1986);
- ein ständiger Anstieg des Stickstoffaufkommens wurde registriert (WAGNER 1987b).

Die vorliegende Untersuchung der dem Bodensee 1985/86 zugeführten Stofffrachten beschreibt den aktuellen Stand der Stoffzufuhren zum See, den Stoffrückhalt und den Stoffaustrag aus dem See. Außerdem ergeben sich Erkenntnisse über die Herkunft und über noch bestehende Schwerpunkte der Belastung.

Darüber hinaus dienen die Detailergebnisse (unter Einbeziehung aller bisherigen Erkenntnisse) dem Vergleich des festgestellten Zustandes mit den Zielsetzungen der IGKB (Lagebericht IGKB 1982a, Denkschrift IGKB 1987) und der Prognose der künftig zu erwartenden Belastungen an relevanten Stoffen im See.

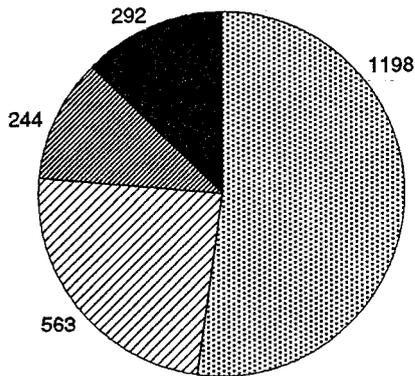
Wie bei den vorangegangenen Untersuchungen wurden die wichtigen Zu- und Abflüsse des Sees, die Abläufe der seeanliegenden Abwasserreinigungsanlagen und die Niederschläge analysiert und mengenmäßig erfaßt. Dabei wurde der Grundsatz verfolgt, daß möglichst alle Stoffquellen mit direkten Messungen erfaßt werden. Frachten aus den nicht über Probenahmen erfaßbaren, seenahen Einzugsgebieten wurden dagegen aus statistischen Angaben berechnet.

Wie genau die Stofffracht ermittelt werden kann, hängt von der Art der Probengewinnung, von der Probenahmedichte und vom apparativen Aufwand in den Labors ab. Hier wurden große Fortschritte erzielt. Insbesondere wurde die Zahl der automatischen Stationen für die tägliche Gewinnung von 24-Std.-Mischproben erhöht.

Um Anhaltspunkte für die Herkunft der Frachten in den Zuflüssen zum Bodensee-Obersee zu erhalten, wurden umfangreiche Frachterhebungen für gereinigte und ungereinigte Abwässer durchgeführt sowie die Belastungen durch den Austrag von Stoffen aus dem ländlichen Areal

### Phosphor

Summe 2297 t/Jahr P



#### Quellen der Belastung

ländliches Areal:

partikulär

gelöst

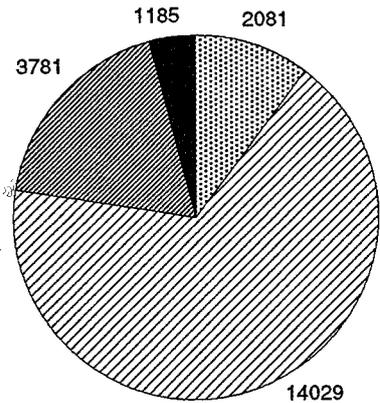
Abwasser:

gereinigt

ungereinigt

### Stickstoff

Summe 21056 t/Jahr N



#### davon biologisch aktiv

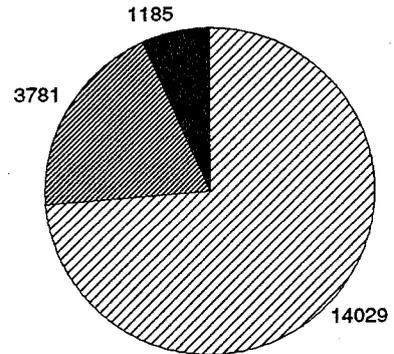
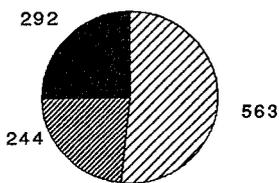
ländliches Areal:

gelöst

Abwasser:

gereinigt

ungereinigt



#### Frachten beim Eintritt in den See

partikulär in Flussschwebst.

übrige Frachten ohne Flussschwebstoffe:

abflussabhängig

konstant

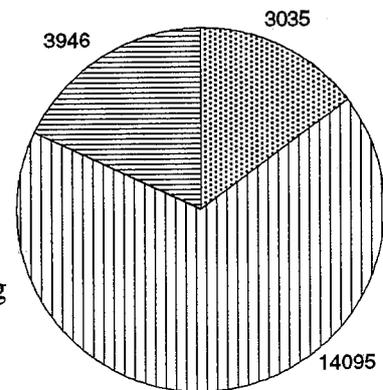
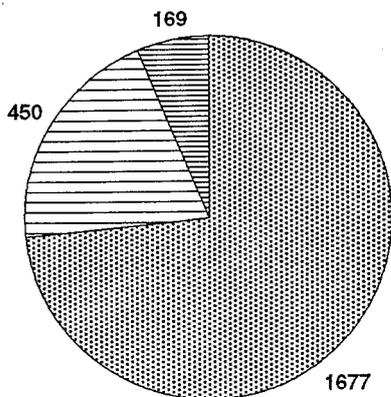


Abb. 3: Aufschlüsselung der Phosphor- und Stickstofffrachten zum Bodensee-Obersee nach ihren Quellen im Einzugsgebiet und nach ihrer Qualität beim Eintritt in den See (s. Tab.2)

der Einzugsgebiete neu geschätzt. Dabei ermöglichten genauere Kenntnisse über den Stoffaustrag aus ausgewählten Flächen im Bodenseegebiet (WAGNER 1983, WILKEN 1987), auch den analytisch nicht erfaßten "restlichen Austrag" aus dem ländlichen Areal besser als bisher abzuschätzen. Zusätzlich fallen auch die Frachten der "restlichen Abwässer" ins Gewicht (KORB et al. 1986), die insbesondere Regenentlastungen aus besiedelten Flächen einschließen. Letztere wurden bei den Untersuchungen 1978/79 unterschätzt. Dies ist beim Vergleich mit früheren Ergebnissen zu beachten.

Bereits im letzten Bericht über Zuflußuntersuchungen (IGKB 1982b) wurde ausführlich auf die Stoffumsätze während des Abflußvorganges, auf die Probenbehandlung und auf die mathematische Methodik der Frachtenberechnung eingegangen.

Auf die Wiedergabe der zahlreichen Daten von Tages- und Monatsfrachten der einzelnen Zuflüsse 1985/86 wird verzichtet. Das Basis-Datenmaterial ist in einem getrennten Anhang zusammengefaßt und steht in den Archiven der beteiligten Institutionen (s. Anhang) zur Verfügung.

Auf Grund der Messungen und der einheitlichen Auswerteverfahren stellen die in diesem Bericht zusammengefaßten Untersuchungsergebnisse eine wichtige Grundlage für weitere Gewässerschutzmaßnahmen im Einzugsgebiet des Bodensees dar.

## **2. Erläuterungen und Begriffsdefinitionen, Abkürzungen**

### Erläuterungen und Begriffsdefinitionen

Für die Wertung der Ergebnisse sind die dem See zufließenden Frachten aufzuschlüsseln (Abb. 3)

- nach ihren Quellen im Einzugsgebiet und
- nach ihrer Qualität beim Eintritt in den See.

Die Einteilung von geschätzten oder gemessenen Frachten nach ihren Quellen im Einzugsgebiet erfolgt in

- "ländliches Areal" = Einzugsgebiet mit Stoffumsätzen aus Niederschlag, naturbelassenen Böden und landwirtschaftlichen Aktivitäten (ohne Abwassereinfluß!)
- "Abwasser, gereinigt" = Frachten im Ablauf der Abwasserreinigungsanlagen, unfiltriert und
- "Abwasser, ungereinigt" = Frachten aus ungereinigtem Abwasser, unfiltriert.

Die Aufschlüsselung der Frachten nach ihrer Qualität beim Eintritt in den See geschieht auch unter dem Aspekt ihres Verhaltens und weiteren Verbleibs.

Unter "Flußschwebstoffen" werden

- über Membranfilter abtrennbare Stoffe (Trockensubstanz) und
- berechnete Anteile von den restlichen Feststoffausträgen aus unbesiedelten Arealen verstanden. Sie und die in ihnen "partikulär" gebundenen Stoffe werden stets getrennt von den übrigen Stoffen abgehandelt (s. auch 5.2.1). Geschiebe und grobes Treibzeug wurde nicht berücksichtigt.

Unter "ohne Flußschwebstoffe" werden hier Frachten folgender Qualität eingeordnet:

- "gelöst" im Membranfiltrat der Flußwässer,
- in der unfiltrierten Probe aus dem Ablauf von Abwasserreinigungsanlagen,
- in der unfiltrierten Niederschlagsprobe,
- berechnete Anteile der restlichen Austräge gelöster Stoffe aus unbesiedelten Arealen
- in der unfiltrierten Probe der Seeabflüsse.

"Konstante" Frachten beim Eintritt in den See sind

- der aus e-Funktion [1] (s. 3.3.2) berechnete, mindestens abfließende Anteil an der Gesamtfracht eines Flusses (ohne Flußschwebstoffe!),
- die untersuchte Gesamtfracht im Ablauf von seeanliegenden Abwasserreinigungsanlagen und
- die Summe der geschätzten Frachten aus Abläufen nicht untersuchter Abwasserreinigungsanlagen und aus restlichem Abwasser nicht angeschlossener Einwohner des ufernahen Areals.

"Abflußabhängige" Frachten beim Eintritt in den See sind

- die errechnete, bei zunehmender Wasserführung in den Flüssen zusätzlich zum "konstanten" Anteil auftretende Fracht (ohne Flußschwebstoffe),
- die geschätzten Regenentlastungsfrachten der Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationssysteme im Uferbereich und
- die Frachten aus Niederschlägen auf die Seeoberfläche.

"restl. Abwasser" als Abfluß umfaßt insbesondere den restlichen Abfluß aus besiedelten Flächen (vgl. 3.3.5)

Untersee = Rheinsee + Zeller See + Gnadensee

Thermokline: gedachte Fläche durch die Wendepunkte der Temperatur/Tiefen-Kurven zum gleichen Zeitpunkt im See

allochthon bzw. autochthon: von außen zugeführt bzw. im See selbst entstanden

Seston: Suspendiertes

Filtrat bzw. Membranfiltrat: Probe nach Filtration durch ein 0,45 µm-Membranfilter

Phosphor und Stickstoff: hier in ihren analytisch erfaßbaren Verbindungen

Kohlenstoff: hier in seinen analytisch erfaßbaren organischen Verbindungen

Bor: hier im gelösten Borat.

Trophiezustand: "Ernährungslage" für die Organismen im Gewässer

oligotroph: nährstoffarm

Destruenten: "Zerstörer" (organischer Substanz)

Denitrifikation: Freisetzen von Stickstoff durch biologisch-chemische Prozesse

### Abkürzungen

IGKB: Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee

BW : Baden-Württemberg

BY : Bayern

V : Vorarlberg/Österreich

FL : Fürstentum Liechtenstein

GR : Kanton Graubünden/Schweiz

SG : Kanton St.Gallen/Schweiz

TG : Kanton Thurgau/Schweiz

E : Einwohner (z. B. in g/E P)

Trinkw. : Trinkwasser

ger. : gereinigt

unger. : ungereinigt

Abw. : Abwasser  
ARA : Abwasserreinigungsanlage, Kläranlage  
AV : Abwasserverband

gel. : gelöst, nach Membranfiltration  
part. : partikulär, im Rückstand auf dem Membranfilter  
Schweb : Flußschwebstoffe, Rückstand auf dem Membranfilter  
org. : organisch  
geb. : gebunden  
restl. : restlich (neben dem direkt Erfassten)

Q : Abfluß [Wassermenge/Zeit]

P, N, C und B sind Kurzbezeichnungen für Phosphor, Stickstoff, organischer Kohlenstoff und Bor.

N "ohne Flußschwebstoffe" bedeutet: Summe aus Nitrat-N und Kjeldahl-N (bei Flüssen zusätzlich Nitrit-N).

TOC: gesamter organisch gebundener Kohlenstoff

DOC: organisch gebundener Kohlenstoff im Filtrat

### 3. Methodik

#### 3.1 Generelle Arbeitsaufteilung, Probengewinnung

Mit einem Arbeitsmanual (IGKB 1985) wurden die Arbeitsverteilung, die Probenahmestellen, die Termine für Einsätze, eine Minimalliste der Analysenparameter und die Labormethodik für alle beteiligten Labors als verbindlich erklärt, um vergleichbare Meßdaten zu gewährleisten. Die Auswertung der Daten erfolgte unter Berücksichtigung der bisherigen Erfahrungen.

Die gesamte analytische Untersuchung erstreckte sich über einen Zeitraum von November 1985 bis März 1987 (einschl. der Hochwassereinsätze und zusätzlicher Kontrollen). Die Probenentnahme war gegenüber der letzten Untersuchung stärker automatisiert. Analysen und Auswertung der Meßdaten wurden im wesentlichen von den wissenschaftlichen Instituten im Bodenseeraum durchgeführt.

Im einzelnen erfolgte die Probenahme in folgender Weise:

- Flüsse mit automatischer Probenentnahme (zeitproportionale 24-Std.-Mischproben) waren
  - Stockacher Aach (Wahlwies),
  - Seefelder Aach (Oberuhldingen),
  - Rotach (Friedrichshafen),
  - Schussen (Gerbertshaus),
  - Argen (Giessen),
  - Dornbirnerach (Lauterach-Lustenau),
  - Alpenrhein (Diepoldsau),
  - Alter Rhein (St. Margrethen),
  - Rheintalischer Binnenkanal (Oberriet),
  - Steinach (eidgen. Limnigraph) und
  - Radolfzeller Aach (Rielasingen).

Damit war hier auch die automatische Erfassung der Hochwässer sichergestellt.

An den Flüssen

Leiblach (Eisenbahnbrücke Bregenz-Lindau),  
Bregenzerach (Straßenbrücke Hard),  
Lustenauer Kanal (Hard),  
Ill (Feldkirch-Gisingen) und  
Goldach (eidgen. Limmigraph)

erfolgte die Entnahme von 24-Std.-Mischproben durch ausgelegte selbstfüllende Sammler in einem 17-tägigen Turnus zeitproportional. Im gleichen Turnus wurden zusätzlich von

Alpenrhein (Hard),  
Seerhein (Konstanz) und  
Hochrhein (Brücke Stein a. Rhein) sowie aus der  
Quelle der Radolfzeller Aach (Aach)

momentane Stichproben entnommen.

Stichproben wurden auch bei Ausfall der Sammler und bei zusätzlichen Hochwassereinsätzen entnommen. Mögliche Abweichungen des Konzentrationsmittels im Flußquerschnitt vom Meßwert wurden nicht untersucht. Sie verringern sich mit zunehmendem Abfluß. Bei Seerhein und Hochrhein wurde auf die Entnahme von Hochwasserproben verzichtet, da die Stoffkonzentrationen dort nicht vom Abfluß, sondern vom jahreszeitlichen Ablauf des Stoffumsatzes im See beeinflußt werden.

- Im Ablauf der seeanliegenden ARA wurden überwiegend Q-proportional (Z= zeitproportional) 24-Std.-Mischproben gewonnen. Folgende Anlagen wurden untersucht (AV = Abwasserverband):

Dingelsdorf,  
AV Stockacher Aach,  
AV Überlinger See,  
AV Lipbach-Bodensee,  
Friedrichshafen,  
AV Langenargen-Kressbronn,  
AV Unteres Schussental,  
Lindau,  
AV Leiblachtal,  
Bregenz (Z),  
AV Hofsteig (Z),  
AV Altenrhein.

AV Morgental,  
AV Region Romanshorn,  
AV Region Kesswil,  
AV Region Münsterlingen,  
Konstanz,  
Radolfzell,  
AV Untere Radolfzeller Aach,  
AV Tägerwilen-Gottlieben,  
AV Untersee,  
Steckborn,  
Gaienhofen,

- Niederschlag-Sammelstellen wurden auf der Insel Reichenau, in Langenargen und Hörbranz bei Bregenz betrieben.
- Die Analyse des baden-württembergischen und vorarlbergischen Materials und die Datenzusammenstellung erfolgten im ISF Langenargen, die des übrigen Materials in den kantonalen Umweltschutzämtern St.Gallen und Frauenfeld sowie in der EAWAG in Dübendorf/Schweiz.
- Die Weiterverarbeitung der Meßdaten erfolgte im wesentlichen im ISF Langenargen.
- Die Frachten aus den nicht über Probenahmen erfaßten, seenahen Einzugsgebieten wurden aus statistischen Angaben berechnet. Neben den Ansätzen für Abschwemmungen aus un bebauten Gebieten betrifft dies vor allem die Frachten, die den Regenentlastungen aus besiedelten Flächen sowie den nicht angeschlossenen Einwohnern zugewiesen werden. Die Auswertungen durch das Wasserwirtschaftsamt Konstanz erfolgten auf Grund der Angaben der Anrainerländer, und zwar gegenüber früheren Kalkulationen erstmals auf der Basis genauerer Erhebungen.

### 3.2 Untersuchungsparameter

Die Untersuchungsparameter waren (vgl. Definitionen S.12):

- Flüsse
  - o-Phosphat ( $\text{mg/m}^3 \text{ P}$ )
  - gesamter Phosphor im Filtrat ( $\text{mg/m}^3 \text{ P}$ )
  - partikulärer Phosphor in Schwebstoffen ( $\text{mg/kg P}$ )
  - gesamter Phosphor in der Rohprobe ( $\text{mg/m}^3 \text{ P}$ ), wenn keine Schwebstoffuntersuchung durchgeführt wurde
  - Ammonium ( $\text{mg/m}^3 \text{ N}$ )
  - Nitrat ( $\text{mg/m}^3 \text{ N}$ )
  - Nitrit ( $\text{mg/m}^3 \text{ N}$ )
  - Kjeldahl-N im Filtrat ( $\text{mg/m}^3 \text{ N}$ )
  - partikulärer Stickstoff in Schwebstoffen ( $\text{mg/kg N}$ )
  - Kjeldahl-N in der Rohprobe ( $\text{mg/m}^3 \text{ N}$ ), wenn keine Schwebstoffuntersuchung durchgeführt wurde
  - gelöster organischer Kohlenstoff (DOC,  $\text{g/m}^3 \text{ C}$ )
  - partikulärer organischer Kohlenstoff in Schwebstoffen ( $\% \text{ C}$ )
  - Bor ( $\text{mg/m}^3 \text{ B}$ )
  - Flußschwebstoffe ( $\text{g/m}^3 \text{ Trockensubstanz}$ )
- ARA-Abläufe
  - gesamter Phosphor in der Rohprobe ( $\text{g/m}^3 \text{ P}$ )
  - Nitrat ( $\text{g/m}^3 \text{ N}$ )
  - Kjeldahl-N in der Rohprobe ( $\text{g/m}^3 \text{ N}$ )
  - gesamter organischer Kohlenstoff in der Rohprobe ( $\text{g/m}^3 \text{ C}$ )
  - Bor ( $\text{g/m}^3 \text{ B}$ )
- Niederschläge (außer Staub und Nebel)
  - gesamter Phosphor in der Rohprobe ( $\text{mg/m}^3 \text{ P}$ )
  - Nitrat ( $\text{mg/m}^3 \text{ N}$ )
  - Kjeldahl-N in der Rohprobe ( $\text{mg/m}^3 \text{ N}$ )
  - gesamter organischer Kohlenstoff in der Rohprobe ( $\text{g/m}^3 \text{ C}$ )
  - Bor ( $\text{mg/m}^3 \text{ B}$ )

Die Analysenmethodik für alle Bestimmungen wurde im erwähnten Manual (IGKB 1985) festgelegt.

### 3.3 Berechnungen der Stofffrachten

#### 3.3.1 Niederschlagsflächen und Abflüsse

Die Niederschlagsflächen (Abb. 1 und 8 bis 10) oberhalb der mündungsnahen Flußmeßstellen wurden überprüft und bei Veränderung (zum Beispiel durch Pegelneueinrichtung) entsprechend korrigiert. Die Abflußwerte wurden von den zuständigen Dienststellen der Länder erhoben.

Der Abfluß des Hochrheins bei Stein am Rhein wurde als bestmögliche Schätzung aus den Abflüssen bei Neuhausen abgeleitet (Multiplikationsfaktor = 0,9757).

Zur Frachtbestimmung wurde bei 24-Std.-Mischproben der Abfluß im entsprechenden Sammelzeitraum, bei Stichproben der aktuelle momentane Abfluß eingesetzt. In einigen Fällen standen erst vorläufige, noch nicht korrigierte Abflüsse und Jahresabflußtabelle zur Verfügung. Die damit verbundenen Unsicherheiten betragen dort, wo bis Redaktionsschluß ein Vergleich möglich war, maximal 0,2 % bei den Jahresabflußsummen.

### 3.3.2 Einträge aus den Einzugsgebieten der Zuflüsse

Seit den letzten Zuflußuntersuchungen 1978/79 wurden die Methoden der Probengewinnung, der Probenverarbeitung und der Auswertung der Meßdaten kritisch überprüft und verbessert (IGKB 1982b, WAGNER 1987b, WAGNER 1987c). Hier soll nur auf die wesentlichen Aspekte der einheitlich angewandten Auswertemethodik eingegangen werden. Sie beruht - wie bisher auch - auf der Berechnung der Beziehungen zwischen Abfluß und Konzentrationen gelöster Stoffe bzw. zwischen Schwebstoffkonzentration im Fluß und Stoffkonzentration im Schwebstoff, aus denen mit Hilfe der täglichen Abflüsse die wahrscheinlichen täglichen Konzentrationen und Frachten abgeleitet werden. Aus der Summe der Tagesfrachten ergeben sich die Monats- und Jahresfrachten.

Zur Berechnung der Konzentrations- und Frachtverhältnisse an den mündungsnahen Pegeln der Flüsse wurden die nachstehenden mathematischen Funktionen verwendet. Für die Abhängigkeit der Konzentration gelöster Stoffe vom Abfluß wurde folgende Funktion eingesetzt:

$$Y = K_1 \cdot \left[ \frac{1}{Q} + \frac{K_2 \cdot Q^{K_3}}{e^{(K_4 \cdot Q)}} \right] \quad [1]$$

- mit
- |  |  |
|--|--|
| Y  | = Funktionswert der Konzentrationen der Summe entweder des Phosphors, des Stickstoffs oder des organischen Kohlenstoffs im Filtrat |
| Q  | = Abfluß   |
| K <sub>1</sub>                                   | = Regressionskoeffizient, konstante Fracht   |
| K <sub>2</sub> , K <sub>3</sub> , K <sub>4</sub> | = Iterations-Regressionskoeffizienten  |

Diese Formulierung ermöglicht die Berechnung von konstanten Frachten in der Gesamtfracht (= K<sub>1</sub>). Sie stellt eine Verbesserung der zuletzt (IGKB 1982b) verwendeten Funktion dar. Die Aussagen aus dieser Berechnung beziehen sich allein auf den Zustand des Gewässers an der untersuchten Station. Je nachdem, ob der Abwassereinfluß oder der Austrag aus dem ländlichen Areal überwiegt, fällt oder steigt die Stoffkonzentration mit zunehmender Wasserführung in charakteristischer Weise.

Je kleiner der nach [1] berechnete konstante Anteil an der Belastung eines Flusses ist, desto größer ist auch sein relativer Fehler. Für die unsicheren Fälle (Rechenergebnis = 0) wurde die konstante Fracht aus den 10 niedrigsten täglichen Abflüssen über die e-Funktion abgeleitet: Stockacher Aach (P, N, C), Rotach (C), Schussen (C), Argen (P, N, C), Leiblach (N), Bregenzerach (N) und Alpenrhein (C).

Weiterhin erwies sich sowohl für die Abhängigkeit der Borkonzentration vom Abfluß als auch für die Abhängigkeit der Konzentration von Stoffen in der Schwebstofftrockensubstanz von der Schwebstoffkonzentration im Wasser folgende Funktion als geeignet:

$$Y = K_0 + \frac{K_1}{Q + K_2} \quad [2]$$

- mit
- |                |   |
|----------------|---|
| Y              | = Funktionswert der Konzentration von Borat |
| Q              | = Abfluß                                    |
| K <sub>0</sub> | = absolutes Glied                           |
| K <sub>1</sub> | = Regressionskoeffizient                    |
| K <sub>2</sub> | = Iterations-Regressionskoeffizient         |

bzw. mit  $Y$  = Funktionswert der Konzentration der Stoffe  
in der Trockensubstanz von Schwebstoffen  
 $S$  = Schwebstofftrockensubstanz (statt  $Q$  wie oben)  
 $K_0, K_1$  und  $K_2$  wie oben.

Schließlich wurde für die Abhängigkeit der Konzentration der Schwebstoffe vom Abfluß folgende Funktion eingesetzt:

$$Y = e^{(K_1 - K_2/Q^{K_3})} \quad [3]$$

mit  $Y$  = Funktionswert für die Schwebstofftrockensubstanz  
 $Q$  = Abfluß  
 $K_1$  = Regressionskoeffizient (logarithmiert)  
 $K_2, K_3$  = Iterations-Regressionskoeffizienten

Erfahrungsgemäß streuen die Schwebstoffkonzentrationen sehr stark um die Funktionswerte. Um die Datengrundlage vor allem im Hochwasserbereich zu verdichten, wurden für die Neuanpassung der Abfluß/Schwebstoffbeziehungen auch die bisher erhaltenen Daten aus den Jahren 1970-73 (spezielle Schwebstoffuntersuchungen) und 1978-80 (IGKB-Zuflußuntersuchungen) sowie von den badenwürttembergischen Zuflüssen die Information aus den letzten 10 Jahren mit einbezogen (WAGNER 1976b, IGKB 1982b, WAGNER 1987b/c). Dabei wurde davon ausgegangen, daß sich die hydrologischen Verhältnisse in den Flußeinzugsgebieten nicht gravierend geändert haben.

In die Berechnung der Funktionen [1] und [2] wurden jene Meßwerte nicht einbezogen, die um mehr als die doppelte Standardabweichung von einem vorläufig angepaßten Polynom-Ansatz abwichen. Die schließlich erhaltenen Resultate wurden durch eine unabhängige Berechnung mit Polynom- und Zeitausgleich-Ansätzen bei der EAWAG überprüft und dabei bestätigt.

Zur Berücksichtigung der nicht gemessenen Frachten im Leiblach-Kanal wurden alle Frachten der Leiblach mit 1,1 multipliziert.

Die konstanten Frachtanteile im Rheintalischen Binnenkanal (Schweiz) ergaben sich aus den entsprechenden Berechnungen über Funktion [1]. Alle übrigen Jahresfrachten dieses Flusses wurden aus den untersuchten und arithmetisch gemittelten Tagesfrachten hochgerechnet, da nicht während des gesamten Jahres täglich Abflüsse ermittelt wurden.

Bei der Steinach erwies sich die Datengrundlage für die Berechnung der Schwebstoffparameter als zu schwach. Wie beim Rheintalischen Binnenkanal wurden die partikulären Jahresfrachten aus der durchschnittlichen Tagesfracht ermittelt.

Die Schwebstoffkonzentrationen in der Radolfzeller Aach sind für Feststoffuntersuchungen in den üblichen Probenvolumina zu niedrig. Deshalb wurden die Frachten der partikulär gebundenen Stoffe auch hier aus der (mengengewichteten) durchschnittlichen Beschaffenheit aller Flußschwebstoffe geschätzt.

Um die Vergleichbarkeit mit den früheren IGKB-Untersuchungen zu gewährleisten bzw. die hier besonders kritischen Phosphoranalysen nicht durch schwebstoffbedingte Adsorptionsverluste zu gefährden, wurden am Alpenrhein (Hard) Stichproben gezogen, deren Analysendaten für die Frachtbestimmungen verwendet wurden. Die Untersuchungen des schweizerischen NADUF-Programms ergeben (außer bei den Phosphorkomponenten) ähnliche Werte (Hydrol. Jb. 1985 der Schweiz).

Die Ermittlung der Zuflußfrachten aus dem Kanton Thurgau geschah über ein Sonderprogramm an 32 Bächen (TG 1986).

Um die Phosphor- und Stickstofffrachten nach ihrer Herkunft aufschlüsseln zu können, wurde die Belastung aus den einzelnen Flußeinzugsgebieten auf der Grundlage vorhandener Daten bestmöglich geschätzt. Dies geschah zum Teil über eigene Erhebungen der beteiligten Behörden, zum Teil über Auftrennung nach Belastungen durch angeschlossene Einwohner mit guter oder mangelhafter Regenwasserbehandlung, durch nichtangeschlossene Einwohner und durch Einträge aus unbesiedelten Arealen wie bei der Ermittlung der Einträge aus restlichen ufernahen Gebieten (s. 3.3.5 und Tab. 2).

### 3.3.3 Einträge aus seeanliegenden Abwasserreinigungsanlagen

Die Berechnung der Frachten aus den seeanliegenden ARA erfolgte kantons- bzw. länderintern über einen dichten Probenentnahmeturnus, meist über arithmetisch mittlere Tagesfrachten und ihre Hochrechnung auf das Jahr.

Nitrit wurde in der Regel nicht analysiert. Es wird daher hier generell wegen Geringfügigkeit (ca 1% des gesamten gebundenen Stickstoffs) vernachlässigt.

### 3.3.4 Einträge aus Niederschlägen auf die Seeoberfläche

Bei den Niederschlagsuntersuchungen wurden nach Möglichkeit die täglichen Regen- bzw. Schneefälle erfaßt. Die Beziehungen zwischen täglicher Niederschlagsmenge und Stoffkonzentration wurden über Funktion [2] berechnet. Die sich daraus ergebenden täglichen Stofffrachten wurden zur vorläufigen Jahresfracht aufaddiert. Diese wurde nach Einholung der Niederschlagsdaten von den zuständigen Ämtern wassermengenproportional korrigiert. Zur Berechnung der seeflächenbezogenen Frachten wurde für den Bodensee-Obersee schließlich das Frachtmittel aus 2xLangenargen, 1xInsel Reichenau und 1xHörbranz, für den Untersee das Ergebnis von der Insel Reichenau eingesetzt. Lediglich bei Bor/Obersee wurden nur Ergebnisse von Langenargen verwendet.

### 3.3.5 Restliche Einträge aus ufernahen Gebieten

Der größte Teil der Einzugsgebietes wurde mit Untersuchungen an den mündungsnahen Stationen an den Flüssen erfaßt (s. 3.3.2). Die seeanliegenden ARA wurden gesondert untersucht (s. 3.3.3). Restliche, analytisch nicht untersuchte Frachten stammen aus besiedelten und unbesiedelten Arealen in dem Uferbereich unterhalb der Flußstationen.

Bei der Berechnung der restlichen Abwasserbelastung (einschließlich anteilige Industrie und Gewerbe) aus den besiedelten Arealen wurde für das zur Reinigung gelangende Abwasser nach dem derzeitigen Kenntnisstand (GUJER 1979, IGKB 1982b, WAGNER 1987a, WILKEN 1987) von Einwohner-Belastungswerten (1200 g/E P, 5000 g/E N, 24000 g/E org. C, 150 g/E B je Jahr) ausgegangen. Es wurde unterstellt, daß je nach Weg des übrigen (ungereinigten) Abwassers nur bestimmte Mengen den Vorfluter erreichen (vgl. Schema zur Schätzung S.21). Die betreffenden Flächen und Einwohnerzahlen wurden vom Wasserwirtschaftsamt Konstanz für das gesamte Untersuchungsgebiet eingeholt und ausgewertet.

Für die Schätzung weiterer Frachten aus unbesiedelten Arealen im Uferbereich wurden in Anlehnung an die Ergebnisse von eingehenden Untersuchungen in den Einzugsgebieten von Schussen und Argen für das gesamte unbesiedelte restliche Uferareal an Obersee und Untersee jährliche Austragsraten zugrunde gelegt (vgl. vereinfachende Postulate S.22). Dieser Ansatz trifft auf die Verhältnisse im engeren Einzugsgebiet des Sees zu.

Noch verbleibende Stoffeinträge (Stäube, Nebel, Pollen usw.) wurden nicht gemessen.

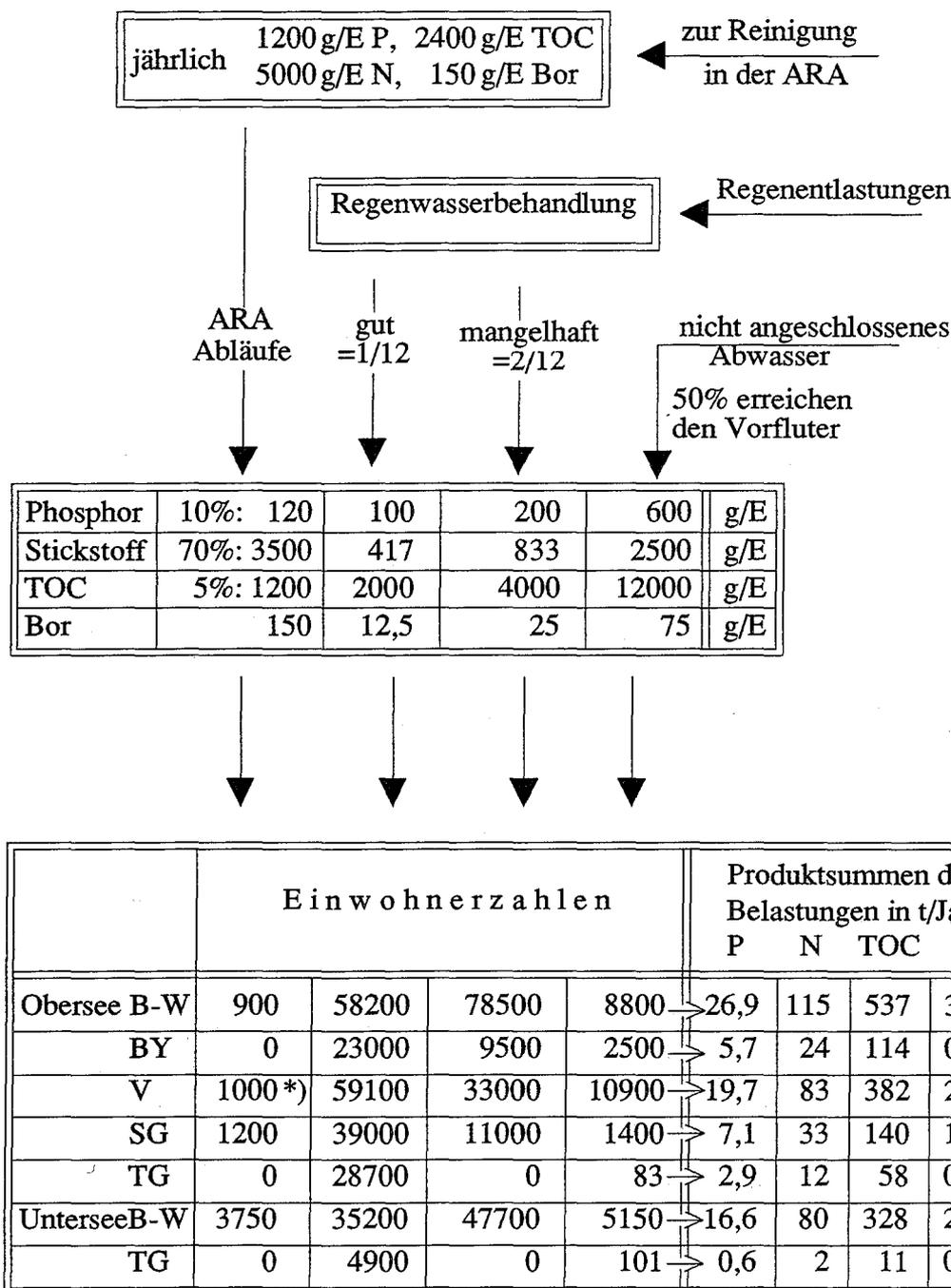
Erläuterungen zum Schema zur Schätzung der nicht untersuchten Abwasserbelastung auf S.21

Vereinfachende Postulate:

- Ausgehend von Untersuchungen an Kläranlagen im Bodenseeraum wurden für P, N, Corg und Bor bestimmte Belastungswerte für das zur Reinigung gelangende Abwasser angesetzt (z.B. 1200g/E,Jahr P).
- 90% des den Anlagen zugefügten Phosphors (Fällung!) und 30% des Stickstoffs sollen zurückgehalten werden.
- Die Belastungswerte für die Regentlastungen sollen 1/12 bzw. 2/12 der zur Reinigung eingesetzten Menge entsprechen. Das unterstellt zugleich, daß die Werte für das gesamte angeschlossene Abwasser zwischen 13/12 bis 14/12 der der Reinigung zugewiesenen Werte liegen.
- Es wird ferner angenommen, daß von den Belastungswerten für nicht angeschlossenes Abwasser nur die Hälfte von den der Reinigung zugewiesenen Werten auch den Vorfluter erreichen.

Zur Frachtberechnung müssen die einwohnerbezogenen Belastungswerte noch mit der Anzahl der betroffenen Einwohner multipliziert werden.

Schema zur Schätzung der restlichen, nicht untersuchten Abwasserbelastung aus dem Uferbereich (analysierte ARA-Abläufe s. Tab.1)



\*) Obersee Vorarlberg: mech.Biol.ARA mit 1000 E im Uferbereich mit nur 50% P-Rückhalt eingesetzt; alle übrigen ARA mit P-Fällung und 90% P-Rückhalt kalkuliert!

**Berechnungsbeispiel:**

Von der Stoffmenge im Abwasser je Einwohner (E) verbleiben nach unterschiedlichem Weg des Abwassers die Belastungszahlen (oberer Tabellenteil). Diese werden mit den Einwohnerzahlen zu den Produktsummen (im Tabellenteil unten rechts) verrechnet, z.B. Vorarlberg:

$$\begin{aligned}
 &1200 \text{ g/E} \cdot 10\% = 120 \text{ g/E}; & 1200 \text{ g/E} \cdot 1/12 = 100 \text{ g/E}; \\
 &1200 \text{ g/E} \cdot 2/12 = 200 \text{ g/E}; & 1200 \text{ g/E} \cdot 50\% = 600 \text{ g/E}; \\
 &120 \text{ g/E} \cdot 10000 \cdot 5(!) + 100 \text{ g/E} \cdot 59100 \text{E} + 200 \text{ g/E} \cdot 33000 \text{E} + 600 \text{ g/E} \cdot 10900 \text{E} = 19650000 \text{ g} = 19.7 \text{ t}
 \end{aligned}$$

Vereinfachende Postulate zur Bilanzierung von restlichen jährlichen Flächenausträgen aus dem Uferbereich des Bodensees, Zusammenstellung ufernaher Flächen und Frachten

Niederschlag Vorarlberg rund 1500 mm, übrige Areale 1000 mm;  
 Wasseraustrag aus besiedelten Flächen: 1/3 des Niederschlags;  
 Wasseraustrag aus unbesiedelten Flächen: 1/5 des Niederschlags.

Stoffausträge aus besiedelten Gebieten über restl. Abwasserbelastung (s. Schema S.21) kalkuliert, keine Flußschwebstoffe.

Stoffausträge aus unbesiedelten Gebieten:

Flußschwebstoffe	=	100 g/m <sup>3</sup> Trockengewicht.		
gel. P	=	50 kg/km <sup>2</sup>	P	} in Anlehnung an WAGNER (1983), part. Austrag geringer angesetzt
part. P	=	30 kg/km <sup>2</sup>	P	
gel. N	=	2000 kg/km <sup>2</sup>	N	
part. N	=	200 kg/km <sup>2</sup>	N	
gel. org. C	=	2000 kg/km <sup>2</sup>	C	
part. org. C	=	11 x part. N (mengengewichtet abgeleitet aus den Flußschwebstoffuntersuchungen der untersuchten Flüsse)		
gel. B	=	12 kg/km B (nach WILKEN 1987).		

Resultate für die Frachten aus dem ufernahen Areal:

		Fläche	Q	Schweb	P		N		org.C		B
		km <sup>2</sup>	Mio m <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> t	gel	part	gel	part	gel	part	gel
					t	t	t	t	t	t	t
<b>Unbesiedelt</b>											
OBERSEE	B-W	347,1	69,4	6,94	17,4	10,4	694	69	694	763	4,2
	BY	45,2	9,0	0,90	2,3	1,3	90	9	90	100	0,5
	V	39,7	11,9	1,19	2,0	1,2	79	8	79	87	0,5
	SG	54,9	11,0	1,10	2,7	1,6	110	11	110	122	0,7
	TG	15,0	3,0	0,30	0,7	0,4	29	3	29	33	0,2
Summe		501,9	104,3	10,43	25,1	14,9	1002	100	1002	1105	6,1
UNTERSEE	B-W	189,9	38,0	3,80	9,5	5,7	380	38	380	420	2,3
	TG	11,6	2,3	0,23	0,6	0,3	23	2	23	22	0,1
Summe		201,5	40,3	4,03	10,1	6,0	403	40	403	442	2,4
<b>Besiedelt</b>											
OBERSEE	B-W	45,8	15,3								
	BY	6,0	2,0								
	V	29,0	14,5								
	SG	20,8	6,9								
	TG	6,6	2,2								
Summe		108,2	40,9								
UNTERSEE	B-W	25,7	8,6								
	TG	1,7	0,6								
Summe		27,4	9,2								

Die Ermittlung der Stofffrachten aus den besiedelten Flächen erfolgte nach 3.3.5

Fortsetzung des Textes von Seite 19.

### 3.3.6 Stoffausträge aus dem See

Die Konzentrationen in den Seeabflüssen wurden in Stichproben gemessen, welche in einem regelmäßigen Turnus erhoben wurden. Die Frachtberechnungen (Abb. 4) erfolgten über Sinusfunktionen [4] für den zeitabhängigen Konzentrationsgang nach

$$Y = K + \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin[ 2\pi \cdot (T - P_i) / 365 ] \quad [4]$$

mit

- Y = Funktionswert für die Stoffkonzentration
- T = Tag im Jahr
- K = Summe der Höhen der Wendepunkte der Teilfunktionen
- A = 1/2 Amplitude, Regressionskoeffizient
- P = Tage, zeitliche Verschiebung der Schwingung, Regressionskoeffizient
- i = Einzelfall

und Einsetzen der täglichen Abflüsse.

In die Berechnung der Funktion wurden jene Meßwerte nicht einbezogen, die um mehr als die doppelte Standardabweichung von einem vorläufig angepaßten Ansatz abwichen. Für die Erklärung und Begründung der hier verwendeten Formulierungen wird auf die Quelle (IGKB 1982b) verwiesen.

Aus dem Bodensee wird bei Sipplingen in 60 m Tiefe Wasser entnommen, welches als Trinkwasser aus dem Einzugsgebiet weggeleitet wird. Die Jahresfrachten errechneten sich aus den monatlichen Konzentrationen im Rohwasser und den Wassermengen. Die Daten stellte die Bodenseewasserversorgung Sipplingen/Stuttgart (BWV) zur Verfügung.

Inhaltsstoffe des Trinkwassers (außer von der in Tab. 1 ausgewiesenen BWV), welche im Einzugsgebiet verbleiben, sind nicht berücksichtigt. Hingegen sind sie teilweise in der Abwasserzufuhr enthalten. Daraus entsteht ein minimaler systematischer Fehler.

Die Menge der gefangenen Fische (STRUBELT 1986; Obersee = 1800 t, Untersee = 385 t) wurde mit den Faktoren 10 % für C, 2,5 % für N und 0,35 % für P des Frischgewichts multipliziert (BEARD 1926, BURGESS 1966, DTV 1965). Bor blieb unberücksichtigt.

Für die Entnahme von Wasserpflanzen werden hier mangels genauerer Untersuchungsergebnisse die gleichen Frachten wie für die Untersuchung 1978/79 (IGKB 1982b) eingesetzt und die für den stärker verkrauteten Untersee bekannten Mengen auch für den Obersee angenommen (Tab. 1).

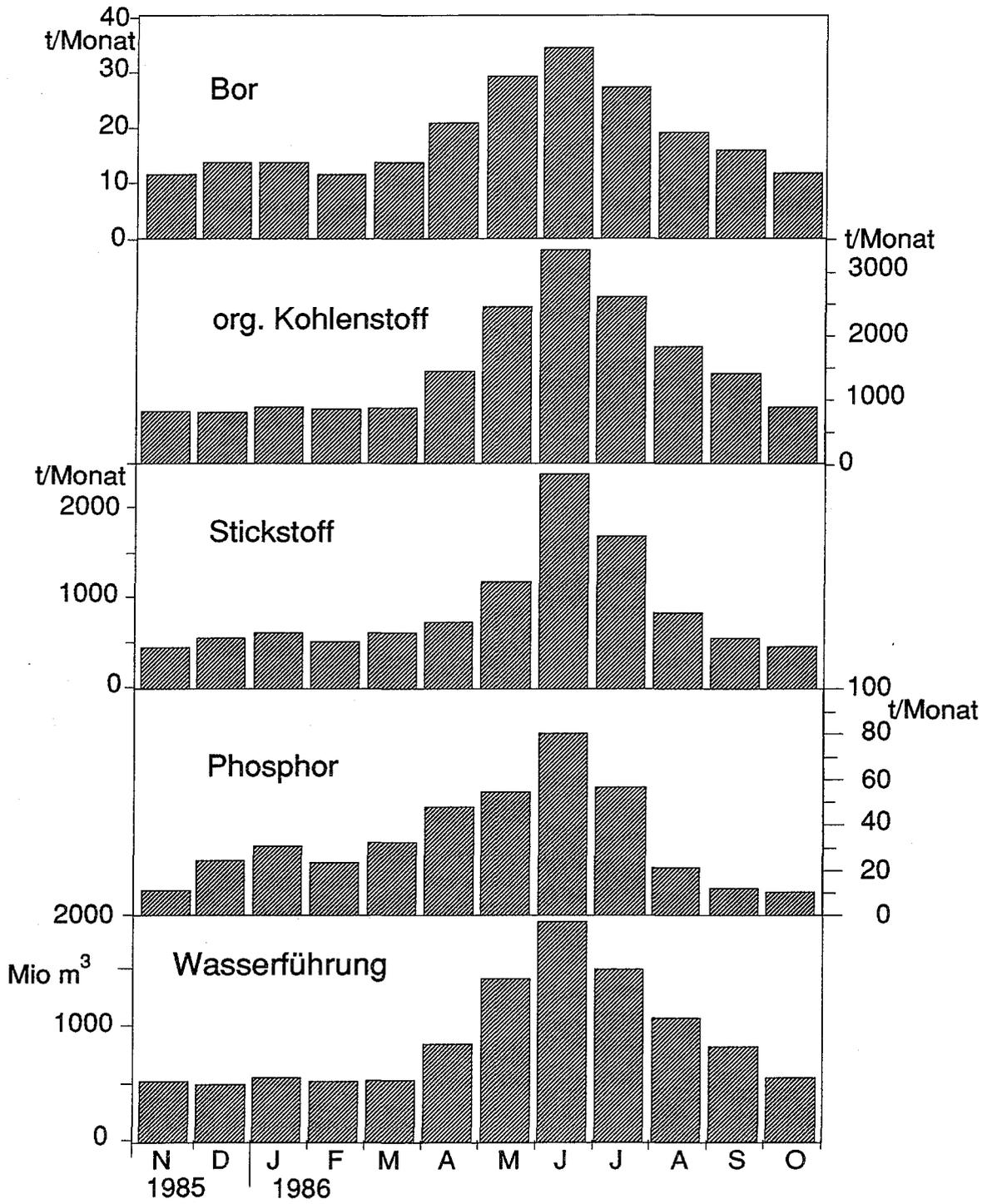


Abb.4: Monatliche Abflüsse im Seerhein bei Konstanz und monatliche Frachten von Phosphor, Stickstoff, organischem Kohlenstoff und Bor 1985/86

#### 4. Ergebnisse (Ergebnistabellen)

In den folgenden Tabellen und Zusammenstellungen wurden die Rechenergebnisse ohne Rundung wiedergegeben, um das Nachvollziehen zu erleichtern.

Tabelle 1: Niederschlagsflächen und Jahresabflüsse, Jahresfrachten der Flußschwebstoffe (Trockensubstanz) sowie von Phosphor, Stickstoff, organischem Kohlenstoff und Bor jeweils ohne und in Flußschwebstoffen im Abflußjahr 1985/86. Hier sind die dem Obersee und dem Untersee von Nov. 1985 bis Okt. 1986 aus den Flüssen zugeführten Wassermengen und Stofffrachten bilanziert. Dies geschah länderweise ohne Ausweisung der Teilfrachten bei den grenzüberschreitenden Flüssen

Argen: überwiegend BW, Teileinzugsgebiet BY

Leiblach: überwiegend BY, kleines Teileinzugsgebiet in V,  
Mündungsabschnitt = Grenze zwischen BY und V;  
Leiblach-Kanal V

Bregenzerrach: überwiegend V, kleines Teileinzugsgebiet BY

Alpenrhein: überwiegend GR, Teileinzugsgebiete FL, V und SG,  
Mündung V

Zuflüsse Thurgau: überwiegend TG, kleines Teileinzugsgebiet SG.

Tabelle 2: Schätzung der Belastung in den Einzugsgebieten der Flüsse zum Bodensee-Obersee für Einträge aus dem ländlichen Areal und für Abwasser im Vergleich zu den Messungen an den Mündungen. Die Angaben dienen der Aufschlüsselung nach Herkunft der Belastung (zwecks Unterstützung von Planungen und Entscheidungen bei Sanierungsmaßnahmen).

Tabelle 3: Monatsfrachtsummen der untersuchten Zuflüsse zum Bodensee-Obersee im Abflußjahr 1985/86.

Tabelle 4: Jahrgänge der Stofffrachten und monatsmittlere Konzentrationen im Seerhein 1985/86. In den Tabellen werden die saisonalen Schwankungen der Frachten im Obersee-Zufluß und -Abfluß dargestellt. Sie dienen der weitergehenden Stoffbilanzierung.

Tabelle 5: Zusammenstellung der jährlichen Frachten (ohne Flußschwebstoffe) von Phosphor und Stickstoff sowie organischem Kohlenstoff; Gegenüberstellung der Ergebnisse von 1971/72, 1978/79 und 1985/86. Die Ergebnisse dienen der Trendanalyse.

Tabelle 6: Gesamte jährliche Stofffrachten zum Bodensee-Obersee, Vergleich der bisherigen Ergebnisse. Die Daten zeigen die unterschiedlichen Verhaltensweisen der jährlichen partikulären Frachten gegenüber den restlichen Frachten in Abhängigkeit vom Jahresabfluß und Schwebstoffaufkommen.

Fortsetzung des Textes auf S.33

Tab. 1: Niederschlagsflächen und Jahresabflüsse, Jahresfrachten der Flußschwebstoffe (Trockensubstanz) sowie von Phosphor, Stickstoff, organischem Kohlenstoff und Bor jeweils ohne und in Flußschwebstoffen im Abflußjahr 1985/86

OBERSEE	Fläche km <sup>2</sup>	Abfluß Mio m <sup>3</sup>	Fluß- Schweb 10 <sup>3</sup> t	P ohne Schweb t P	P in Schweb t P	N ohne Schweb t N	N in Schweb t N	C ohne Schweb t C	C in Schweb t C	B ohne Schweb t B
<b>Baden-Württemberg</b>										
Zuflüsse										
Stockacher Aach	213	54,7	37	3,2	31,9	201	71	228	655	1,9
Seefelder Aach	270	118,6	19	9,8	25,8	559	66	457	769	4,8
Rotach	125	74,0	39	8,7	38,8	393	83	297	937	3,0
Schussen	791	398,1	52	80,0	100,8	2203	250	2580	2245	25,8
Argen	652	623,4	76	60,2	131,0	1603	388	2500	3259	22,6
ARA im Uferbereich										
Dingelsdorf		0,3		0,1		5		2		0,3
Stockacher Aach		2,3		1,1		50		14		2,1
Überlinger See		5,7		1,4		87		36		4,5
Lipbach		2,8		1,9		51		24		2,2
Friedrichshafen		9,3		8,9		133		65		8,8
Unteres Schussental		2,9		2,4		54		21		2,7
Kressbronn		1,7		1,2		37		14		1,7
restliches Abwasser (s. 3.3.5)	45,8	15,3		26,9		115		537		3,5
restlicher Austrag (s. 3.3.5)	347,1	69,4	7	17,4	10,4	694	69	694	763	4,2
<b>Bayern</b>										
Zufluß Leiblach (+ Kanal)	102,4	99,6	26	12,5	19,4	248	41	523	557	3,2
ARA Lindau		6,4		2,5		320		117		4,8
restliches Abwasser	6,0	2,0		5,7		24		114		0,7
restlicher Austrag	45,2	9,0	1	2,3	1,3	90	9	90	100	0,5
<b>Vorarlberg</b>										
Zuflüsse										
Bregenzrach	826,3	1316,8	270	50,0	170,6	1246	268	3134	3885	37,0
Dornbirnerach	195,6	212,4	112	30,9	117,0	722	227	940	2625	20,7
Lustenauer Kanal	27,2	67,0	3	11,9	16,9	136	23	441	223	4,4
ARA im Uferbereich										
Leiblachtal		1,7		0,9		20		20		1,1
Bregenz		3,6		2,1		101		57		3,6
Hofsteig		4,8		6,7		115		97		3,9
restliches Abwasser	29,0	14,5		19,7		83		382		2,5
restlicher Austrag	39,7	11,9	1	2,0	1,2	79	8	79	87	0,5
<b>Kanton St.Gallen</b>										
Zuflüsse										
Alpenrhein	6119	7134,6	1853	124,0	950,8	5653	1300	7894	16521	148,4
(davon Ill)	1268,7	1914,9	138	51,7	113,3	1650	197	3324	2447	33,9
Alter Rhein	<=360	366,1	25	19,1	39,7	832	158	1054	526	11,6
(davon Rheintalischer-Binnenkanal<=226)	242,4	242,4	3	15,9	7,4	432	25	449	115	5,0
Goldach	49,8	44,2	20	5,7	13,8	132	44	134	70	0,9
Steinach	24,2	28,0	2	8,3	5,3	225	16	135	15	4,8
ARA im Uferbereich										
Altenrhein		10,4		7,9		161		115		5,2
Morgental		8,0		6,7		106		92		2,8
restliches Abwasser	20,8	6,9		7,1		33		140		1,0
restlicher Austrag	54,8	11,0	1	2,7	1,6	110	11	110	122	0,7

Bemerkung: ganze Zeilen in runden Klammern: Zubringer der darüber aufgeführten Flüsse. Rheintalischer Binnenkanal: schwankende Bezugsfläche wegen Überleitungen. "ohne Schweb" umfaßt auch Seeplankton sowie Partikel in Niederschlägen und aus seeanliegenden ARA. "restliches Abwasser" umfaßt insbesondere den restlichen Abfluß aus besiedelten Flächen (s. 3.3.5)

Tab. 1, Fortsetzung

noch OBERSEE	Fläche km <sup>2</sup>	Abfluß Mio m <sup>3</sup>	Fluß- Schweb 10 <sup>3</sup> t	P ohne Schweb t P	P in Schweb t P	N ohne Schweb t N	N in Schweb t N	C ohne Schweb t C	C in Schweb t C	B ohne Schweb t B
Kanton Thurgau Zuflüsse (Summe)	153	78	-	12,4	-	563	-	307	-	15,0
ARA im Uferbereich										
Romanshorn		3,6		3,6		57		4		1,6
Kesswil		0,7		0,4		12		0		0,3
Münsterlingen		2,4		5,6		40		6		1,2
restliches Abwasser	6,6	2,2		2,9		12		58		0,4
restlicher Austrag	15,0	3,0	0	0,7	0,4	29	3	29	33	0,2
Niederschläge (Seeoberfläche)	476	511		42,0		707		1375		8,3
<b>Summe E I N T R A G</b>	<b>10994,5</b>	<b>11338,3</b>	<b>2544</b>	<b>619,5</b>	<b>1676,7</b>	<b>18041</b>	<b>3035</b>	<b>24916</b>	<b>33392</b>	<b>337,4</b>
Abfluß (Seerhein)	10919,3	10949		406,4		10571		17944		211,0
Trinkwasser Sipplingen		128		8,6		139		154		2,7
Fischfang				6,3		45		180		-
Makrophyten				0,5		4		12		-
<b>Summe A U S T R A G</b>	<b>10919,3</b>	<b>11077</b>	<b>0</b>	<b>421,8</b>	<b>0</b>	<b>10759</b>	<b>0</b>	<b>18290</b>	<b>0</b>	<b>213,7</b>
Differenz/Rückhalt im Obersee	75,2	261,3	2544	197,7	1677,0	7282	3037	6626	33416	123,7
<b>U N T E R S E E</b>										
Baden-Württemberg Zuflüsse										
Seerhein	10919,3	10949	0	406,4	0	10571	0	17944	0	211,0
Radolfzeller Aach	773	240,2	3	45,2	2,0	976	3	527	38	13,4
(davon Aach-Quelle)	530	206,1	0	42,7	0	774	0	419	0	12,8)
ARA im Uferbereich										
Radolfzell		3,3		1,0		94		24		2,9
U.Radolfzeller Aach		1,1		1,0		43		12		1,3
Konstanz		13,7		19,7		335		126		10,9
Gaienhofen		0,4		0,3		9		2		0,4
restliches Abwasser	25,7	8,6		16,6		80		328		2,6
restlicher Austrag	189,9	38,0	4	9,5	5,7	380	38	380	420	2,3
Kanton Thurgau Zuflüsse (Summe)	60	33,5	-	2,7	-	171	-	113	-	5,0
ARA im Uferbereich										
Tägerwilen		0,5		0,4		7		5		0,6
Berlingen		0,7		0,6		16		9		0,6
Steckborn		0,8		0,4		14		6		0,6
restliches Abwasser	1,7	0,6		0,6		2		11		0,1
restlicher Austrag	11,6	2,3	0	0,6	0,3	23	2	23	22	0,1
Niederschläge (Seeoberfläche)	63	66		9,3		113		175		1,1
<b>Summe E I N T R A G</b>	<b>12119,9</b>	<b>11358,7</b>	<b>7</b>	<b>514,3</b>	<b>8,0</b>	<b>12834</b>	<b>43</b>	<b>19685</b>	<b>480</b>	<b>252,9</b>
Abfluß (Hochrhein)	12047	11024	0	369,6	0	10589	0	17676	0	-
Fischfang				1,3		10		39		-
Makrophyten				0,5		4		12		-
<b>Summe A U S T R A G</b>	<b>12047</b>	<b>11024</b>	<b>0</b>	<b>371,4</b>	<b>0</b>	<b>10603</b>	<b>0</b>	<b>17727</b>	<b>0</b>	<b>-</b>
Differenz/Rückhalt im Untersee	73	334,7	7	142,9	8,0	2231	43	1958	480	-

Bem.: Radolfzeller Aach, Summe Ein- und Austrag Untersee: einschließlich anteiligem Donaueinzugsgebiet der Aach-Quelle. Bor Fischfang, Makrophyten und Abfluß Untersee unbekannt, da Datengrundlage nicht ausreichend. Bor Thurgau: Schätzung durch Vergleich

## Erläuterungen zu Tabelle 2

---

Hier werden die an den Mündungen der Zuflüsse festgestellten Frachten auf ihre Herkunft im Einzugsgebiet aufgeschlüsselt. Dies wird möglich mit den von den zuständigen Ämtern gelieferten Unterlagen über die Belastungen aus gereinigtem (überwiegend Messungen) und ungereinigtem Abwasser (überwiegend Schätzung) sowie mit Hilfe der Daten von Flächenausträgen (s. 3.3.5).

Bei part. Phosphor und gel. Stickstoff erwiesen sich die Daten von Flächenausträgen aus dem ufernahen Areal (3.3.5) als nicht auf das Gesamteinzugsgebiet des Sees übertragbar: besonders bei den alpinen und voralpinen Arealen hätten die Rechnungen

- zu einer starken Unterschätzung von part. P (hauptsächlich beeinflusst durch Niederschlags- und Erosionscharakteristik)
- und zu einer starken Überschätzung von gel. N (hauptsächlich beeinflusst durch Niederschlagscharakteristik und Flächennutzung)

geführt. Die übrigen Austragsdaten wurden für die Erstellung von Tabelle 2 übernommen, obwohl auch sie noch Unsicherheiten enthalten. Die fehlenden Daten für part. P und gel. N ergaben sich dann aus der Differenz von der Summe der Frachten im Einzugsgebiet zur Summe der Frachten an den Mündungen.

Bei der Steinach wurde eine sich ergebende negative Tonnage für part. P nicht zugelassen und = 0 gesetzt (mit Korrektur bei restl. P aus Abwasser von 9,1 auf 6,6 t P).

Für N aus gereinigtem Abwasser bei Alpenrhein/GR und -/SG, Altem Rhein, Goldach und Steinach mußten die Frachten geschätzt werden aus dem Verhältnis von  $N : P = 1575 : 123,2 = 12,8$ .

Tab. 2: Schätzung der Belastung in den Einzugsgebieten der Flüsse zum Bodensee-Obersee für Einträge aus dem ländlichen Areal und für Abwasser im Vergleich zu den Messungen an den Mündungen

	Fläche km <sup>2</sup>	----- P -----						----- N -----					
		----- Einzugsgebiet -----				an Mündung		----- Einzugsgebiet -----				an Mündung	
		ländl.Areal gel. t P	part. t P	Abwasser ger. t P	unger. t P	gemessen gel. t P	part. t P	ländl.Areal gel. t N	part. t N	Abwasser ger. t N	unger. t N	gemessen gel. t N	part. t N
Stockacher Aach	213	10,7	16,7	2,4	5,3	3,2	31,9	194	43	13	22	201	71
SeefeldlerAach	270	13,5	14,0	2,4	5,7	9,8	25,8	519	54	28	24	559	66
Rotach	125	6,3	33,9	2,5	4,8	8,7	38,8	412	25	19	20	393	83
Schussen	791	39,6	59,5	51,6	30,1	80,0	100,8	1686	158	481	128	2203	250
Argen	652	32,6	108,1	24,1	26,4	60,2	131,0	1592	130	159	110	1603	388
Leiblach	102	5,1	21,8	1,4	3,6	12,5	19,4	228	20	25	16	248	41
Bregenzerach	826	41,3	153,1	6,0	20,2	50,0	170,6	1177	165	88	84	1246	268
Dornbirnerach	196	9,8	96,7	13,1	28,3	30,9	117,0	496	39	327	87	722	227
Lustenauer Kanal	27	1,4	19,2	0,0	8,2	11,9	16,9	120	5	0	34	136	23
Alpenrhein	6119	306,0	623,1	64,2	81,5	124,0	950,8	4437	1224	969	323	5653	1300
Alter Rhein	360	18,0	22,0	11,0	7,8	19,1	39,7	744	72	141	33	832	158
Goldach	50	2,5	14,5	2,0	0,5	5,7	13,8	137	10	26	3	132	44
Steinach	24	1,2	0,0	5,8	6,6	8,3	5,3	124	5	74	38	225	16
Thurgau	153	7,7	0,3	2,8	1,6	12,4	-	454	31	71	7	563	-
Zuflüsse	9908	495,7	1182,9	189,3	230,6	436,7	1661,8	12320	1981	2421	929	14716	2935
Rest *)	1086	67,1	14,9	54,3	61,4	182,8	14,9	1709	100	1360	256	3325	100
Insgesamt	10994	562,8	1197,8	243,6	292,0	619,5	1676,7	14029	2081	3781	1185	18041	3035
Anteile in % der Gesamtfrachten		24,5	52,2	10,6	12,7	27,0	73,0	66,6	9,9	17,9	5,6	85,6	14,4
		┌──────────────────┐				┌──┐		┌──────────────────┐				┌──────────────────┐	
		100				100		100				100	

\*) "Rest" = Summe aus den analytisch nicht erfaßten Einträgen aus dem ufernahen Areal, den untersuchten Einträgen aus den seeanliegenden ARA und den Niederschlägen auf die Seeoberfläche

Zusammenstellung von Jahresfrachten 1985/86 aus Abwasser in den Einzugsgebieten oberhalb der mündungsnächsten Gütemeßstellen in den Zuflüssen zum Bodensee-Obersee für Tab. 2

Flußgebiet	Herkunft	t P	t N	CSB TOC		t B
				t O2	t C	
Stock.Aach/B-W	ARA	2,4	13			
	restl. Abw.	5,3	22		106	0,7
Seefeld.Aach/B-W	ARA	2,4	28			1,7
	restl. Abw.	5,7	24		113	0,7
Rotach/B-W	ARA	2,5	19			0,8
	restl. Abw.	4,8	20		97	0,6
Schussen/B-W	ARA	51,6	481			19,9
	restl. Abw.	30,1	128		613	3,8
Argen/B-W	ARA	19,8	146			7,2
	restl. Abw.	16,4	69		328	2,0
Argen/BY	ARA	4,3	13	63		
	restl. Abw.	10,0	41	200		
Leiblach/BY	ARA	1,4	25	15		
	restl. Abw.	3,0	13	60		
Leiblach/V	restl. Abw.	0,6	3		12	0,1
Bregenzrach/B	ARA	4,5	81	8		
	restl. Abw.	3,8	16	76		
Bregenzrach/V	ARA	1,5	7	14		
	restl. Abw.	16,4	68		328	
Dornbirnerach/V	ARA	13,1	327	984		
	restl. Abw.	28,3	87		412	
Lusten.Kanal/V	restl. Abw.	8,2	34		164	1,0
Alpenrhein/GR	ARA	40,0	512			
	restl. Abw.	27,3	114		545	3,4
Alpenrhein/SG	ARA	7,3	93		32	
	restl. Abw.	3,4	15		67	
Alpenrhein/FL	ARA	6,8	119		45	
	restl. Abw.	4,4	18		88	0,5
Alpenrh./Ill/V	ARA	5,5	120	152		4,2
	restl. Abw.	28,5	101		484	3,0
Alpenrhein/V	ARA	4,6	125	329		
	restl. Abw.	17,9	75		358	2,2
Alter Rhein/SG	ARA	11,0	141		153	
	restl. Abw.	7,8	33			
Goldach/SG	ARA	2,0	26		31	
	restl. Abw.	0,5	3		16	
Steinach/SG	ARA	5,8	74		62	
	restl. Abw.	9,1	38		180	
Thurgau/TG	ARA	2,8	71		38	2,3
	aus TG	restl. Abw.	1,3	6		
	aus SG	restl. Abw.	0,3	1		6

Schätzwerte für ARA-N Alpenrhein/GR und -/SG, Altenrhein, Goldach und Steinach  
aus N/P = 1575/123,2 = 12,8

Tab. 3: Monatsfrachtsummen der untersuchten Zuflüsse zum Bodensee-Obersee im Abflußjahr 1985/86 (außer Zuflüsse Thurgau)

	Q Mio m <sup>3</sup>	gelöst				Schweb 10 <sup>3</sup> t	in Schweb		
		P t	N t	C t	B t		P t	N t	C t
Nov	451	21	663	848	16	17	19	50	493
Dez	418	22	712	885	16	15	19	50	467
Jan	636	44	1362	1854	21	91	107	281	2617
Febr	414	18	598	721	15	9	12	37	345
März	610	33	1029	1431	20	53	60	156	1456
Apr	1018	53	1667	2509	28	185	167	391	3808
Mai	1959	52	1978	3087	42	1071	554	631	9128
Juni	1745	61	2096	3219	39	624	390	649	7185
Juli	1264	42	1437	1262	31	304	193	343	3592
Aug	952	36	1164	1714	26	107	86	205	1858
Sept	598	21	731	964	19	34	30	80	705
Okt	463	21	691	878	17	22	22	57	580
Summe	10528	423	14126	20272	289	2530	1660	2930	32234

Tab. 4: Jahresgänge der Stofffrachten und monatsmittlere Konzentrationen im Seerhein 1985/86 (vgl. Abb. 4)

Monat	Abfluß Mio m <sup>3</sup>	Gesamt-Phosphor		Gesamt-Stickstoff		gesamter org. C		gel. Bor	
		t	mg/m <sup>3</sup>	t	mg/m <sup>3</sup>	t	mg/m <sup>3</sup>	t	mg/m <sup>3</sup>
Nov	518	11	22	459	886	803	1550	11	20
Dez	506	25	50	566	1119	778	1538	13	25
Jan	560	30	53	611	1090	873	1559	13	23
Febr	533	23	44	520	976	835	1568	11	20
März	545	32	59	611	1120	849	1558	13	24
Apr	867	48	55	724	835	1416	1633	20	23
Mai	1442	55	38	1173	813	2422	1680	28	19
Juni	1948	81	42	2381	1222	3314	1701	33	17
Juli	1533	57	37	1695	1105	2594	1692	26	17
Aug	1093	21	20	816	746	1810	1656	18	17
Sept	846	12	15	554	655	1379	1630	15	17
Okt	558	10	17	462	828	871	1745	11	19
Summe	10949	406	37	10571	965	17944	1639	211	19

Tab. 5: Zusammenstellung der jährlichen Frachten (ohne Flußschwebstoffe) von Phosphor und Stickstoff sowie organischem Kohlenstoff in Bodensee-Flüssen, von untersuchten seeanliegenden ARA sowie restlichen Abwasserbelastungen und Austrägen aus Uferbereich und Atmosphäre; Gegenüberstellung der Ergebnisse von 1971/72, 78/79 und 85/86

	-----P [t]-----			-----N [t]-----			--C [t]--	
	1971/72	78/79	85/86	71/72	78/79	85/86	78/79	85/86
<b>OBERSEE</b>								
untersuchte Flüsse	605	853	437	7083	11861	14716	27521	20624
untersuchte ARA	231	112	53	679	1179	1349	728	684
restliches Abwasser	380	81	63	1223	268	267	151	1231
restlicher Austrag	55	20	25	540	424	1002	976	1002
Niederschläge	70	42	42	840	739	707	1296	1375
<b>Summe</b>	<b>1341</b>	<b>1108</b>	<b>620</b>	<b>10365</b>	<b>14471</b>	<b>18041</b>	<b>30672</b>	<b>24916</b>
<b>UNTERSEE</b>								
Seerhein	289	504	406	5741	8650	10571	27093	17944
Radolfzeller Aach	100	75	45	1064	700	976	1186	527
übrige Flüsse	-	-	3	-	-	171	-	113
untersuchte ARA	41	25	23	204	535	518	288	184
restliches Abwasser	104	40	18	330	164	82	83	339
restlicher Austrag	8	11	10	94	253	403	479	403
Niederschläge	9	3	9	111	159	113	428	175
<b>Summe</b>	<b>551</b>	<b>658</b>	<b>514</b>	<b>7544</b>	<b>10461</b>	<b>12834</b>	<b>29557</b>	<b>19685</b>
<b>HOCHRHEIN</b> (Abfluß Untersee)	<b>496</b>	<b>608</b>	<b>370</b>	<b>7008</b>	<b>10170</b>	<b>10589</b>	<b>26188</b>	<b>17727</b>

Bem.: Auf Grund der jüngsten Überarbeitung der Ergebnisse für 1971/72 ergeben sich geringe Abweichungen zu Tab. 9 im Bericht über die Untersuchungen 1978/79 (IGKB 1982b).

Tab. 6: Gesamte jährliche Stofffrachten zum Bodensee-Obersee; Vergleich der bisherigen Ergebnisse (gerundet)

		1965/66	67/68	71/72	78/79	85/86
Abfluß	km <sup>3</sup>	14,7	12,5	7,4	11,0	11,5
Flußschwebstoffe	Mio t	-	4,7	1,1	2,6	2,6
P	/ ohne Schweb	t	ca 1100	1300	1100	600
	\ in Schweb	t	ca 3100	2800	800	1700
N	/ ohne Schweb	t	ca 13000	10400	14500	18000
	\ in Schweb	t	-	3600	1600	4700
C	/ ohne Schweb	t	-	-	30700	24900
	\ in Schweb	t	-	60900	17200	ca 80000

Kommentar: 1965/66 Hochwasserjahr,  
1967/68 überdurchschnittliches Abflußjahr,  
1971/72 extremes Niedrigwasserjahr,  
1978/79 durchschnittliches Abflußjahr,  
1985/86 durchschnittliches Abflußjahr.

"Schweb" = Flußschwebstoffe

Fortsetzung des Textes von Seite 25.

## 5. Diskussion und Wertung der Ergebnisse

### 5.1 Wassermengenbilanz und Flußschwebstoffe

Hinsichtlich der Abflüsse und der Schwebstoffzufuhr zum See war das Abflußjahr 1985/86 ein durchschnittliches hydrologisches Jahr. Die Wassermengenbilanz war bei  $11 \text{ km}^3$  annähernd ausgeglichen. Dies entspricht einer mittleren Abflußspende aus dem Einzugsgebiet des Obersees von rund 1000 mm (Tab. 1).

Große Abflüsse führen zu großen Stofffrachten. Dies gilt nicht nur für Feststoffe, sondern auch für gelöste Stoffe. Neben den Stoffumsätzen im See beeinflußt der Wechsel von sommerlichen Hochwasser- und winterlichen Niedrigwasserperioden der Flüsse den Stoffinhalt des Sees entscheidend.

Die Konzentration der Schwebstoffe in den Flüssen steigt mit der Wasserführung in charakteristischer Weise an (s. Methodik). Sie kann innerhalb von Tagen zwischen 5 und  $5000 \text{ g/m}^3$  schwanken. Dies führt im Zuflußwasser zu Dichteänderungen, welche die Einschichtungstiefe im See maßgeblich mitbestimmen (WAGNER & WAGNER 1978, LAMBERT 1982). Da die Abflüsse bei Hochwasser (schwebstoffreich) etwa 50mal höher liegen können als bei Niedrigwasser (schwebstoffarm), ergeben sich maximale Frachten bis zum 50000fachen der kleinsten Schwebstofffracht (vgl. auch Tab. 3). Beispielsweise brachte das extreme Julihochwasser 1987 im Alpenrhein mehr Schwebstoffe als die Jahresfracht sämtlicher Oberseezuflüsse im extremen Niedrigwasserjahr 1971/72.

In der Regel werden große Anteile der Jahresschwebstofffracht innerhalb kurzer Zeitabschnitte (Hochwässer) transportiert, z. B. im Durchschnitt der Bodenseezuflüsse 1985/86

- 90 % an rund 90 Tagen mit etwa 50% des Jahresabflusses oder
- 50 % an weniger als 30 Tagen mit weniger als 20 % des Jahresabflusses.

Die Hauptmenge der Flußschwebstoffe erreicht den Seeboden innerhalb eines Monats nach dem Eintrag (STURM 1987). Auch Partikel aus seeeigener Produktion sedimentieren rascher als früher angenommen (STABEL 1987).

Im Abflußjahr 1985/86 gelangten 2,6 Mio t Flußschwebstoffe in den Obersee. Die Zufuhr zum Untersee betrug nur 0,014 Mio t. Das im Seerhein mitgeführte Plankton aus dem Obersee ist kein Flußschwebstoff und daher in diesen Zahlen nicht enthalten. Abhängig von den hydrologischen Gegebenheiten in den bisherigen Untersuchungsjahren schwanken die Jahresschwebstofffrachten stark (Tab. 6). Dies gilt auch für die mit den Flußschwebstoffen mitgeführten Inhaltsstoffe.

### 5.2 PHOSPHOR

#### 5.2.1 Grundsätzliche Feststellungen

Die Teilfrachten der aus dem Einzugsgebiet zufließenden Phosphorkomponenten verändern sich während des Transportes im Fluß durch Adsorption, Fällung, Bindung in organischer Substanz und Mineralisation. Gelöste Verbindungen nehmen in der Regel ab (PEINEMANN & SCHLICHTING 1974, WAGNER 1983). Die Verhältnisse an der Mündung lassen deshalb nicht ohne weiteres Schlüsse auf das Verhältnis zwischen ungelösten und gelösten Anteilen unterschiedlicher Herkunft am Ort des Eintrags zu und umgekehrt. Weil Phosphate nicht im Stoffaustausch mit der Atmosphäre stehen, gelangen die in einen Flußlauf eingetragenen Gesamtfrachten in der Regel auch bis zur Mündung.

Die Belastung mit Phosphorverbindungen ist entscheidend für den Trophiezustand des Bodensees. Zur Frage der Verfügbarkeit partikulärer Phosphorkomponenten sei aus einer Zusammenstellung von STEINBERG (1988) zitiert: "Von den Phosphor-Verbindungen im kommunalen Abwasser können sicherlich, ohne einen großen Fehler zu begehen, 100 % als algenverfügbar angesehen werden. Für die partikulären P-Verbindungen in den Gewässern kann allerdings kein einheitlicher Prozentsatz angegeben werden. Der bioverfügbare Anteil ist in jedem Fall experimentell zu erheben und konnte bislang nur in Einzelfällen mit der einen oder anderen chemischen Fraktion gleichgesetzt werden."

Es ist offensichtlich - und war nicht anders zu erwarten -, daß die Bioverfügbarkeit an den verschiedenen untersuchten Stellen in Abhängigkeit von der geochemischen Beschaffenheit des anorganischen Sestons sehr stark schwankt. Sie reicht von 0 bis 90 % des gesamten Phosphors und wird zusätzlich durch eine Saisonalität in der Bioverfügbarkeit der Schwebstoffe an denselben Meßstellen überlagert."

Die Nutzbarkeit des Phosphors in allen Bindungsformen für den Bio-Umsatz ist am Bodensee saisonal eingeschränkt, weil die Zufuhr jährlich zu etwa 90 % unter die Thermokline und zu mindestens 50 % unter 10 m Wassertiefe geschieht. Alpenrhein und Bregenzerach zusammen bringen etwa 2/3 der gesamten partikulären Jahres-P-Fracht in den See. Die Schwebstoffe dieser beiden Flüsse adsorbieren zusätzlich Phosphat aus dem hypolimnischen Seewasser (Rhein: nach STABEL & GEIGER 1985 schätzungsweise zwischen 18 und 25 t/Jahr P). Die Schwebstoffe der anderen Zuflüsse geben jedoch Phosphat ab (PEINEMANN 1975, WAGNER 1976b). Der Effekt aus beiden Prozessen zusammen ist, gemessen am Gesamtumsatz, sehr klein und bisher nicht exakt bestimmt. Eine Phosphorentlastung der Flußläufe führt zu größerer Wirksamkeit der Bindungskapazität ihrer Feststoffe für Phosphate im Unterlauf und im See.

Am Ende der Zirkulationsperiode (Ende März/Anfang April) ist der größtmögliche Ausgleich der Stoffkonzentrationen im Bodensee-Obersee erreicht (KLIFFMÜLLER 1969). Dann kann auch sein Stoffinhalt, ausgehend von den Konzentrationen über der tiefsten Stelle zwischen Fischbach und Uttwil, verlässlich angegeben werden. Alle Prognosen für die Nährstoffentwicklung beziehen sich deshalb auch immer auf diesen Seezustand (= Beginn des "Seejahres"). Die regionalen Prozesse, z.B. Stoffumsätze auf der Uferbank, in Buchten und vor bestimmten Flußmündungen, oder kurzlebiger Phänomene, z. B. ein Stoffschub bei extremem Hochwasser und Schwankungen der Abwasserbelastung wegen Urlauberverkehrs, können dagegen mit den hier abgehandelten Untersuchungen nicht beschrieben werden. Die Abfolge der zugeführten Jahresfrachten partikulär gebundenen Phosphors ließ bisher keinen Einfluß auf die Seekonzentration erkennen. Diese wird vielmehr von der Summe der übrigen Frachten in Abhängigkeit vom schwankenden Wasserdurchsatz geprägt (vgl. Tab. 6 und Abb. 7). Bei langfristig steigender Phosphorbelastung wird in Niedrigwasserjahren (fehlende Verdünnung, wenig Schwebstoffe) die Phosphorakkumulation im Seewasser beschleunigt (1964, 1971/72). In Hochwasserjahren (große Verdünnung, großer Schwebstoffeintrag) wird sie dagegen verlangsamt (1965/66/67). Bei langfristig abnehmender Phosphorbelastung wird die Konzentrationsabnahme im Seewasser in Niedrigwasserjahren gehemmt (1988/89), in Hochwasserjahren gefördert (1987).

Die P-Sedimentationsrate im See setzt sich zusammen aus

- einem Betrag, der dem partikulär zugeführten Anteil entspricht,
- einem Teil des Vorrats im Seewasserkörper und
- einem übrigen, während des Jahres gelöst zugeführten Anteil.

Für die Entfernung von gelösten Phosphorverbindungen aus dem Wasserkörper des Sees sind folgende Mechanismen wirksam:

- Einbau von Phosphor in Biomasse mit späterer Sedimentation der Organismenreste,
- chemische Fällung (u. a. mit Kalzit),
- Adsorption an absinkenden Flußschwebstoffen und
- Ausschwemmung aus dem See.

Auf diese Weise werden durch Sedimentation zwischen 50 und 70 % und durch Ausschwemmung zwischen 20 und 70 % der Zufuhr (ohne Flußschwebstoffe) entfernt. Je nachdem, ob die Summe dieser beiden Werte über oder unter 100 liegt, tritt im Wasserkörper Verarmung oder Akkumulation ein. Eine Netto-P-Freisetzung aus dem Sediment ist bisher nicht nachgewiesen worden; die saisonale Belastung aus dem Sediment muß als gering angesehen werden (FREVERT 1980).

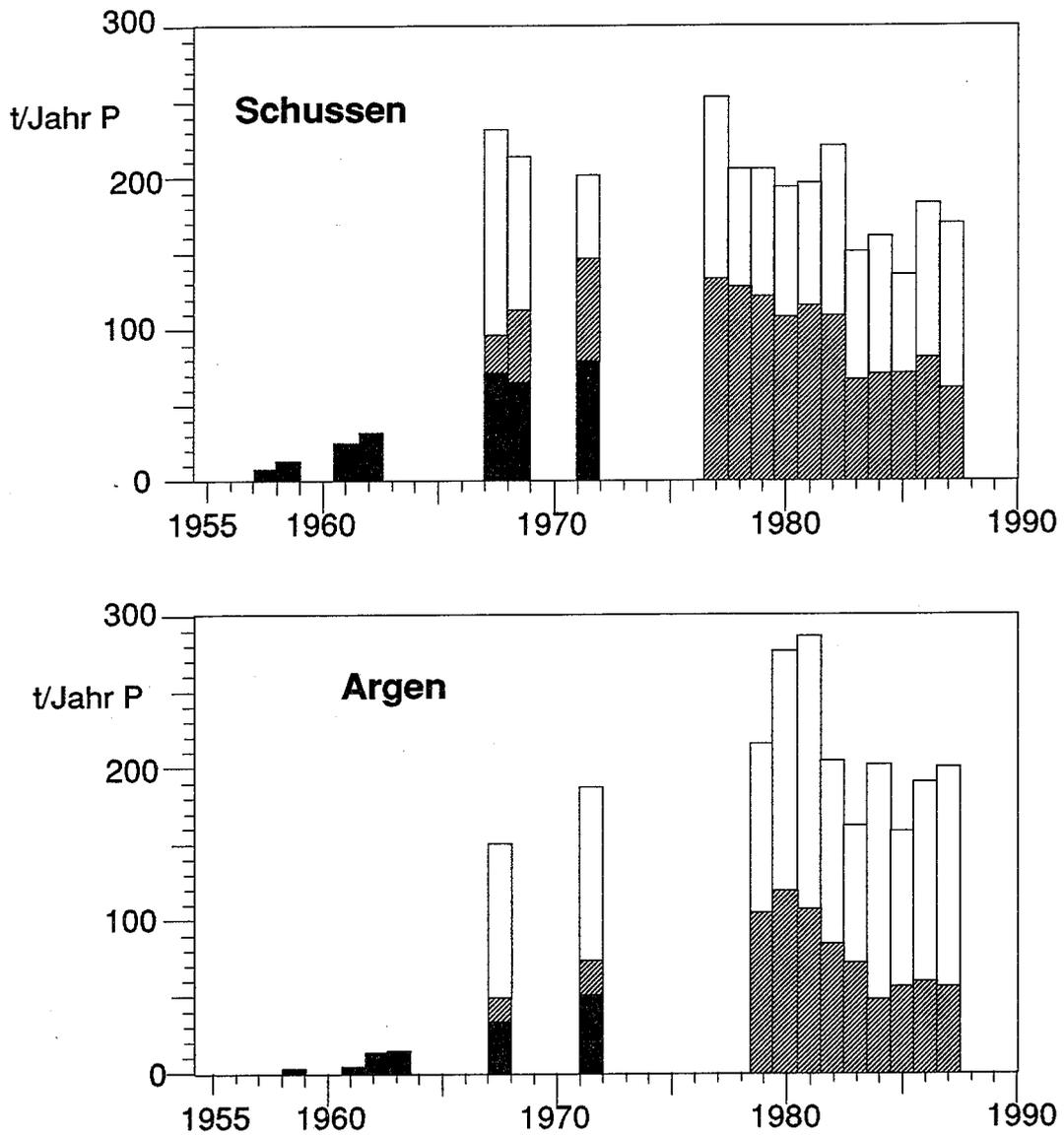


Abb.5: Jährlicher Phosphorfrachten in Argen und Schussen

- in Flussschwebstoffen
- +  Summe gelöster Verbindungen
- o-Phosphat bis 1972, vor 1967 allein o-Phosphat

### 5.2.2 Aktueller Stand der Phosphorzufuhr zum See, des Rückhaltes im See und des Austrags (Jahresbilanz)

Die Phosphorjahresbilanz (Tab. 1) für das Abflußjahr 1985/86 läßt sich zusammenfassen in

	Obersee	Untersee	
Vorrat im See am 1. 11. 1985	2835	62	t P
Zufuhr durch Flußschwebstoffe	1677	8	t P
Zufuhr ohne Flußschwebstoffe	620	514	t P
Entzug durch Sedimentation (errechnet)	2086	159	t P
Entzug durch Abfluß (Seerhein, Hochrhein)	406	370	t P
Entzug durch Trinkw., Fischerei, Mähen von Makrophyten	15	2	t P
Vorrat im See am 1. 11. 1986	2625	53	t P
Abnahme im See	210	9	t P

Im Sediment des Obersees wurden 1985/86 total 2086 t P deponiert, davon 210 t P aus dem Vorrat im See. Im Seerhein liegt während der Vegetationsperiode ein großer Teil der Fracht aus dem Obersee organisch gebunden in Plankton vor, das nicht als Flußschwebstoff ausgewiesen wird. Im Sediment des Untersees wurden insgesamt 159 t P deponiert, davon 9 t P aus dem Vorrat im See.

Bei den gelösten Komponenten im Flußwasser treten

- während der sommerlichen Hochwasserperiode große Frachten bei verringerten Konzentrationen,
- während der winterlichen Niedrigwasserperiode geringe Frachten bei erhöhten Konzentrationen auf (Tab. 3). Dies führt zusätzlich zu den umsatzbedingten Fällungen während des Sommers zur Verringerung, im Winter dagegen zur Auffüllung des Phosphorvorrats im See.

### 5.2.3 Herkunft der Belastungen und noch bestehende Schwerpunkte

Die seeanliegenden ARA arbeiten mit einem P-Eliminationseffekt von etwa 90 % sehr wirksam. Lediglich die ARA Konstanz hatte im Untersuchungszeitraum längere Ausfälle. In der starken Abnahme der Frachten im Ablauf der Anlagen in den vergangenen Jahren spiegelt sich auch der Rückgang des P-Umsatzes im kommunalen Bereich wider (WAGNER 1986/1987a).

Neben Phosphor aus direkt in den See eingeleiteten Abwässern aus dem Uferbereich wird der Phosphorinhalt des Sees entscheidend durch die gelösten Phosphorkomponenten aus den Zuflüssen geprägt. Hieran beteiligen sich Abwässer und Austräge aus ländlichem Areal (Düngung, naturbelassener Boden, Niederschlag). Zu diesen Frachten der Flüsse trugen am meisten bei: Alpenrhein, Bregenzerach, Argen, Schussen, Alter Rhein, Dornbirnerach und Radolfzeller Aach (Untersee). Davon fielen bei Schussen mit 201, bei Dornbirnerach mit 145 und bei Radolfzeller Aach mit 188 mg/m<sup>3</sup> P große mittlere Konzentrationen auf. Zu der großen P-Fracht des Alpenrheins trägt die Belastung aus dem Ill-Einzugsgebiet bei. Die Fracht der Radolfzeller Aach stammt nahezu ausschließlich aus ihrer Quelle bei Aach (Donaueinfluß). In den Einzugsgebieten dieser belasteten Flüsse war die Abwasserentsorgung zum Zeitpunkt dieser Untersuchung noch nicht auf dem bestmöglichen technischen Stand (z. B. fehlende P-Fällung).

Die partikulären P-Frachten stammen zu 2/3 aus Alpenrhein und Bregenzerach (Tab. 1). In dieser Komponente ist ein analytisch nicht zu bestimmender Anteil aus Abwasserbelastungen enthalten.

Zur Abschätzung der stofflichen Umsätze in den Zuflüssen zum Bodensee-Obersee wurden die Informationen über Abwassereintrag und Eintrag aus ländlichem Areal den dem Obersee unmittelbar zufließenden Frachten gegenübergestellt. Die Ergebnisse bestätigen,

- daß neben den abwasserbürtigen Frachten auch Frachten aus dem ländlichen Areal in erheblichem Umfang an der P-Fracht (außer Flußschwebstoffe) beteiligt sind (s. Abb. 3),
- daß der partikuläre Anteil (überwiegend Bodenmaterial) gegenüber der gelösten Fraktion verhältnismässig groß ist und
- daß ein erheblicher Teil der ursprünglich gelöst eingetragenen Phosphorverbindungen bis zur Mündung der Flüsse zusätzlich in die partikuläre Phase übergeht.

1985/86 stammten von der Summe aller Phosphorfrachten zum Obersee (= 2296 t P, davon 73 % in Flußschwebstoffen!)

- 189 t (8 %) aus gereinigtem Abwasser des Hinterlandes,
- 231 t (10 %) aus ungereinigtem Abwasser des Hinterlandes,
- 54 t (2 %) aus gereinigtem Abwasser der Seeanlieger,
- 61 t (3 %) aus ungereinigtem Abwasser der Seeanlieger,
- 42 t (2 %) aus Niederschlägen auf die Seeoberfläche,
- 521 t (23 %) aus dem gesamten gelösten Austrag aus dem ländlichen Areal und
- 1198 t (52 %) aus dem gesamten partikulären Austrag aus dem ländlichen Areal.

Die Austräge aus dem ländlichen Areal entstehen insbesondere auch als Folge landwirtschaftlicher Aktivitäten. Von der Teilzufuhr zum See von 620 t P "ohne Flußschwebstoffe" stammten rund 50 % aus dem ländlichen Areal, die andere Hälfte aus gereinigtem und ungereinigtem Abwasser (Tab. 2, Abb. 3). Aus dem Vergleich wird ersichtlich, daß davon ein erheblicher Teil mit Frachten aus Regenentlastungen (abflußabhängig) in den See gelangen muß. Dem muß mit dem Ausbau der Abwassererfassung und -reinigung zunehmend Rechnung getragen werden.

Größere Quellen der Abwasserbelastung waren

- im Hinterland dichtbesiedelte Gegenden mit ungenügendem Abwasseranschluß und mit Abläufen großer ARA ohne ausreichende P-Fällung, vor allem in den Einzugsgebieten von Flüssen mit großen Frachten und zugleich großen Konzentrationen (Schussen, Dornbirnerach, Ill, Quelle der Radolfzeller Aach) und
- Rohabwasser aus Entlastungen der Kanalisationssysteme und ARA (KORB et al. 1986).

Hier sind die zusätzlichen Sanierungsmaßnahmen des Bau- und Investitionsprogramms notwendig (s. IGKB 1985). Mit der weiteren Reduzierung der Abwasserbelastung tritt die Belastung durch Einträge aus dem ländlichen Areal (mit der dortigen Landwirtschaft) zunehmend in den Vordergrund.

#### 5.2.4 Vergleich der Ergebnisse mit früheren Untersuchungen und mit den Zielsetzungen des Bau- und Investitionsprogramms der IGKB bis 1985

Ausgenommen in Niedrigwasserjahren (z. B. 1971/72) lagen die partikulär eingetragenen P-Frachten bisher stets deutlich über 50 % der Gesamtfracht. Bei den Phosphoreinträgen über Flußschwebstoffe fällt die oben genannte sehr große Schwankung in Abhängigkeit vom Gesamtabfluß auf. Ein Einfluß der Sanierungsmaßnahmen auf die partikuläre Phosphorfracht läßt sich deshalb bisher nicht erkennen (Tab. 6). Auch die jährlichen Untersuchungen an den Zuflüssen Schussen und Argen zeigen keinen Rückgang (Abb. 5).

Im Gegensatz zu den partikulären sind die übrigen Phosphorfrachten zum Obersee nach starkem Anstieg bis in die 70er Jahre seit 1978/79 von 1108 auf 620 t/Jahr P deutlich zurückgegangen (Tab. 5). Dies ist ein Erfolg der Sanierungsmaßnahmen, aber auch Folge des allgemein gesunkenen Phosphorumsatzes im Einzugsgebiet.

Die Verhältnisse im Obersee beeinflussen den Untersee stark. Die Summe der zugeführten Frachten ohne Flußschwebstoffe fiel dort seit 1978/79 von 658 auf 514 t/Jahr P.

Um den seeinternen Phosphorumsatz zu klären und Kenntnislücken aufzudecken (und nach Möglichkeit zu schließen), war Anfang der 70er Jahre auf der Grundlage der dargelegten Erkenntnisse ein dynamisches P-Bilanzmodell entwickelt worden (WAGNER 1976a). Es berücksichtigt neben den Sedimentationsraten besonders das zeitliche Puffervermögen des Wasserkörpers beim Einstellen neuer Fließgleichgewichte zwischen Zufuhr, Verbleib im See und Abfluß von Phosphor. Das Modell ermöglichte die Berechnung von Gleichgewichtszuständen auf verschiedenen Belastungsniveaus. Ein wichtiges, damals prognostiziertes Ergebnis war die relativ rasche Abnahme der P-Konzentration im See bei konsequenter P-Fällung in ARA (WAGNER 1980). Aus der Anpassung des Modells an die Untersuchungsergebnisse bis 1978/79 (Abb. 6) leitete sich als Ergebnis ab, daß zur geforderten Unterschreitung von 30 mg/m<sup>3</sup> P im Obersee die Gesamtbelastung (ohne Flußschwebstoffe) auf etwa 500 t/Jahr P abgesenkt werden muß (IGKB 1982a).

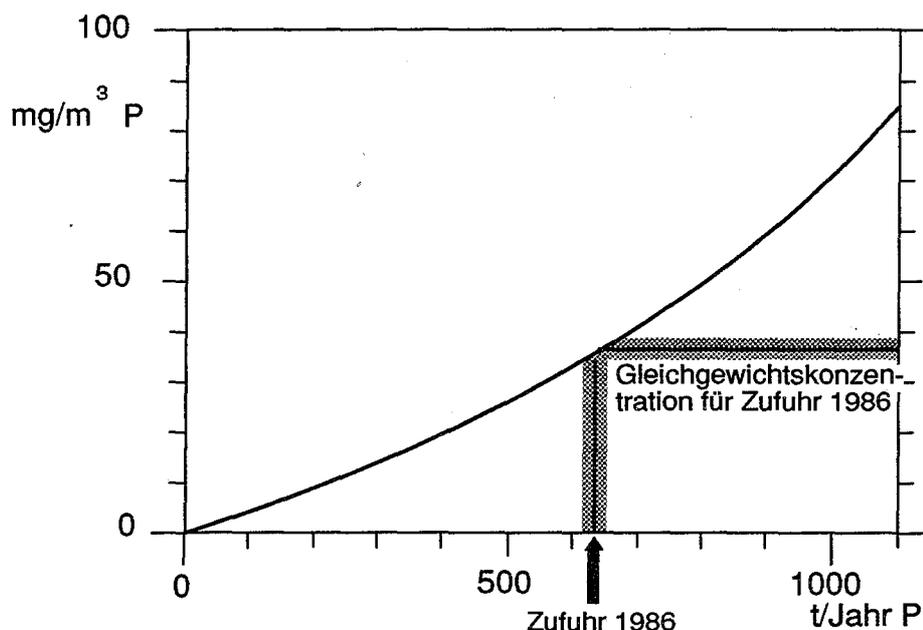


Abb. 6 Die mittlere Phosphorkonzentration (mg/m<sup>3</sup> P) im Bodensee-Obersee am Ende der Zirkulationsperiode in Abhängigkeit von der Phosphorzufuhr (t/Jahr P, ohne Flußschwebstoffe) nach Einstellung des Gleichgewichtszustandes (Version 1981 nach WAGNER 1976a) mit Markierung der P-Zufuhr im Untersuchungsjahr 1985/86 und dem zugehörigen Gleichgewichtszustand.

Eine Arbeitshypothese aus dem Jahre 1981 beinhaltet folgende vorsichtige Prognose der Auswirkungen von geplanten Maßnahmen zur Begrenzung des P-Eintrags aus anschließbarem Abwasser in den Bodensee-Obersee (t/Jahr P; "gefunden" umfaßt auch nichtanschließbares Abwasser; vgl. auch Lagebericht IGKB 1982a):

	1978/79 gefunden	—1985/86— Prognose gefunden		nach 1985 Prognose
P-Eintrag aus Abwasser im gesamten Einzugsgebiet	1267	500	536	315
Summe aller P-Belastungen des Sees (ohne Schweb)	1108	627	620	511

Unter Berücksichtigung der Tatsachen,

- daß 1978/79 die Regenentlastungsfrachten aus den ARA und Kanalisationssystemen im Uferbereich unterschätzt wurden
- daß die 1985/86 erhobenen 536 t P für den Eintrag von Abwasserphosphor nichtanschließbares Abwasser mit enthalten,

wurde das Ziel des Bau- und Investitionsprogramms (IGKB 1981 und 1982a) erreicht. Auch der für die Eutrophierung maßgebliche Phosphoreintrag in den Obersee (ohne Flußschwebstoffe) lag mit 620 t P an der angestrebten Marke.

### 5.2.5 Zu erwartende Entwicklung der Konzentrationen im See

Im hier zu beurteilenden Zeitraum haben sich, gemessen am Ende der Zirkulationsperiode, die Konzentrationen

- im Obersee von 87 (1979) auf 63 mg/m<sup>3</sup> P (1986),
- im Untersee von 83 auf ebenfalls 63 mg/m<sup>3</sup> P

vermindert. Inzwischen ist im Obersee bis zum Frühjahr 1989 eine weitere deutliche Absenkung auf 43 mg/m<sup>3</sup> P eingetreten (IGKB 1989). Die beobachteten Verläufe stehen im Einklang mit den Prognosen aus dem erwähnten Modell. Gemessen an der Zufuhr zum See und der Konzentration im See ereignete sich der gesamte P-Umsatz im Abflußjahr 1985/86 auf einem Niveau, das etwa demjenigen der Mitte der 60er Jahre entspricht. Ohne Maßnahmen und bei gleichbleibendem P-Umsatz wäre die Frühjahrskonzentration im See auf deutlich über 100 mg/m<sup>3</sup> P angestiegen (Abb. 7).

Das Gleichgewicht im P-Haushalt des Obersees hat sich bisher nicht einstellen können, weil die Zufuhren noch gesunken sind und das System relativ träge reagiert. Nach dem Stand der Maßnahmen (und Kenntnisse) würde bei gleichbleibender Zufuhr von 620 t/Jahr P (ohne Flußschwebstoffe) innerhalb weniger Jahre eine Konzentration um 40 mg/m<sup>3</sup> P im See resultieren (Abb. 6 und Abb. 7).

Die Forderungen

- weniger als 30 mg/m<sup>3</sup> P im See als Folge einer Zufuhr von
- weniger als 500 t/Jahr P (ohne Flußschwebstoffe)

sind nur mit zusätzlichen Sanierungsmaßnahmen zu erfüllen (siehe IGKB 1982a).

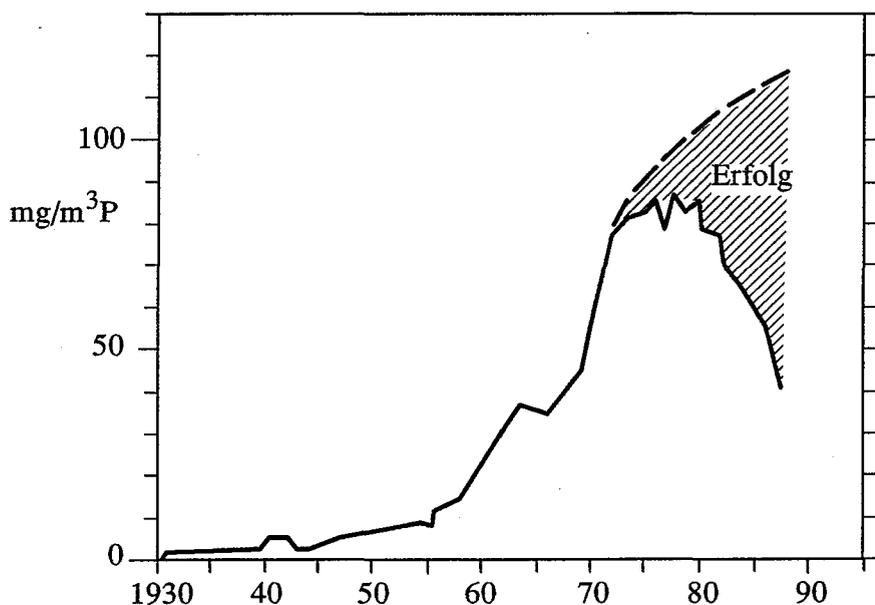


Abb. 7: Die Entwicklung der Gesamt-P-Konzentration im Bodensee-Obersee (jährlich vor Beginn der Stagnationsperiode; vor 1975 durch Modellrechnung gestützt).

## 5.3 STICKSTOFF

### 5.3.1 Allgemeine Bemerkungen

Die Gewässer werden zunehmend mit Stickstoffverbindungen belastet. In ARA wird bisher nur wenig zurückgehalten. Insgesamt ist aber die Beteiligung des Abwassers am Gesamtumsatz gering.

Teilweise werden die im Abwasser enthaltenen Frachten reduzierter Stickstoffverbindungen in hohen Konzentrationen in den Vorfluter eingebracht und dort unter Sauerstoffverbrauch bis zum Nitrat oxidiert. Organische Verbindungen werden mineralisiert.

Während des Abfluvorganges nehmen die Stickstoffverbindungen - gemessen an den Gesamtfrachten - nur in geringem Umfang am Austausch mit der Luft teil. Da in den relativ rasch fließenden Gewässern im Bodenseegebiet das für die Denitrifikation erforderliche Sauerstoffdefizit nur kurzfristig und auf kurzen Strecken erreicht wird, gelangen die dort in die Flüsse eingebrachten Frachten praktisch auch bis zu deren Mündungen (vgl. RHEINHEIMER et al. 1988, GUJER et al. 1979).

Der Stickstoffinhalt des Bodensees wird entscheidend durch die gelösten Komponenten aus den Zuflüssen geprägt.

Anders als die Phosphate steht Stickstoff für die Primärproduktion im Obersee stets im Überschuß zur Verfügung. Die Zufuhr von Stickstoff hat sich bisher nur so langsam verändert, daß sich der Stickstoffhaushalt im See angleichen konnte. Im Vergleich zu Phosphor wird nur ein geringer Anteil des zugeführten Stickstoffs im Sediment deponiert. Die Sedimentation erfolgt im wesentlichen als organische Substanz.

### 5.3.2 Aktueller Stand der Stickstoffzufuhr zum See, des Rückhaltes im See und des Austrags (Jahresbilanz) sowie Vergleich der Ergebnisse mit früheren Untersuchungen

Die Jahresbilanz (Tab. 1) für das Abflußjahr 1985/86 läßt sich zusammenfassen in

	Obersee	Untersee *)	
Vorrat im See am 1. 11. 1985	49931	490	t N
Zufuhr durch Flußschwebstoffe	3035	43	t N
Zufuhr ohne Flußschwebstoffe	18041	12834	t N
Verlust (errechnet)	2353	2090	t N
Entzug durch Abfluß (Seerhein, Hoahrhein)	10571	10589	t N
Entzug durch Trinkw., Fischerei, Mähen von Makrophyten	188	14	t N
Vorrat im See am 1. 11. 1986	57895	674	t N
Zunahme im See	7964	184	t N

Der errechnete Verlust resultiert aus der Sedimentation und der (nicht ermittelten) Denitrifikation. Er betrug im Obersees 1985/86 total 2353 t N. Der Vorrat im See stieg dabei um 7964 t N an. Im Seerhein liegt während der Vegetationsperiode ein großer Teil der Fracht aus dem Obersee organisch gebunden in Plankton vor, das nicht als Flußschwebstoff ausgewiesen wird. Der Verlust des Untersees betrug insgesamt 2090 t N. Der Vorrat stieg auch hier an und zwar um 184 t N.

Kurzfristige oder jahreszeitlich bedingte Schwankungen der Konzentrationen im Zuflußwasser sind wesentlich geringer ausgeprägt als bei den Phosphorkomponenten.

\*) Vorrat Untersee: Hier waren lediglich Daten des gesamten anorganischen N verfügbar. Sie wurden unter der Annahme eingesetzt, daß organischer N im Vergleich zum anorganischen N wenig ausmacht und dadurch Fluktuationen von organischem N für die Mengenbilanz unerheblich sind.

Bisher lag der Anteil der partikulär eingetragenen N-Frachten stets unter 30 % der Gesamtfracht. Auch hier fällt die oben erwähnte große Schwankung in Abhängigkeit vom Gesamtabfluß auf. Bei den (organischen) Flußschwebstoffen deutet sich eine Verringerung an (Tab. 6).

Im Gegensatz zu den partikulären sind die übrigen N-Frachten zum Obersee von 14471 (1978/79) auf 18041 t/Jahr N angestiegen. Die Frachten zum Untersee ohne Flußschwebstoffe stiegen von 10461 auf 12834 t/Jahr N (Tab. 5).

### 5.3.3 Herkunft der Stickstoffbelastungen, noch bestehende Schwerpunkte und die zu erwartende Entwicklung der Konzentrationen im See

An den Stickstofffrachten der Flüsse beteiligten sich am stärksten Alpenrhein, Schussen, Argen, Bregenzerach, Radolfzeller Aach (Untersee), Alter Rhein und Dornbirnerach. Davon fielen wiederum bei Schussen mit 5,5, bei Radolfzeller Aach mit 4,1 und bei Dornbirnerach mit 3,4 g/m<sup>3</sup> N große mittlere Konzentrationen auf. In der großen N-Fracht des Alpenrheins ist keine überdurchschnittliche Belastung aus dem Ill-Einzugsgebiet erkennbar. Die Fracht der Radolfzeller Aach stammt überwiegend aus ihrer Quelle bei Aach (Donaueinfluß).

Etwa die Hälfte der partikulären N-Frachten stammt aus Alpenrhein und Bregenzerach (Tab. 3).

Die aus dem Einzugsgebiet zufließenden Stoffe haben sich während des Transportes im Fluß zwar verändert, doch die Umsetzungen zwischen "gelöst" und "partikulär" fallen mengenmäßig weniger ins Gewicht als bei den Phosphorkomponenten. Nitrat stellt stets den größten Anteil.

Der Vergleich der Frachten aus den Einzugsgebieten mit denen an den Flußmündungen bestätigen (Tab. 2),

- daß abwasserbürtige Frachten gegenüber Frachten aus dem ländlichen Areal nur in geringem Umfang an der N-Fracht (ohne Flußschwebstoffe) beteiligt sind und
- daß der partikuläre Anteil gegenüber der gelösten Fraktion verhältnismäßig klein ist.

1985/86 stammten von der Summe aller Frachten an Gesamt-Stickstoff zum Obersee (= 21076 t N, davon 14 % in Flußschwebstoffen!)

- |   |         |        |   |
|---|---------|--------|---|
| - | 2420 t  | (11 %) | aus gereinigtem Abwasser des Hinterlandes,                      |
| - | 929 t   | (4 %)  | aus ungereinigtem Abwasser des Hinterlandes,                    |
| - | 1360 t  | (6 %)  | aus gereinigtem Abwasser der Seeanlieger,                       |
| - | 256 t   | (1 %)  | aus ungereinigtem Abwasser der Seeanlieger,                     |
| - | 707 t   | (3 %)  | aus Niederschlägen auf die Seeoberfläche,                       |
| - | 13322 t | (63 %) | aus dem gesamten gelösten Austrag aus dem ländlichen Areal und  |
| - | 2081 t  | (10 %) | aus dem gesamten partikulären Austrag aus dem ländlichen Areal. |

Die Austräge aus dem ländlichen Areal (73 %) entstehen insbesondere als Folge landwirtschaftlicher Aktivitäten. In der Teilzufuhr zum Obersee von 18041 t N "ohne Flußschwebstoffe" stammte rund 1/4 aus gereinigtem und ungereinigtem Abwasser, wobei der Bodensee durch Zubringer mit großen Frachten und zugleich großen Konzentrationen (Schussen, Quelle der Radolfzeller Aach, Dornbirnerach) besonders belastet wurde.

Die Belastung durch Einträge aus dem ländlichen Areal (Düngung landwirtschaftlicher Nutzflächen, naturbelassener Boden, Niederschlag) steht mit etwa 2/3 der Gesamtfracht im Vordergrund. Zwar ergeben sich daraus für den See zur Zeit keine Probleme, doch sollte im Einzugsgebiet auf die Eindämmung des Stickstoffumsatzes hingearbeitet werden. Falls keine konsequenten einschränkenden Maßnahmen erfolgen, muß ein weiterer Anstieg des Stickstoffumsatzes und damit der Zufuhr zum Bodensee erwartet werden. Mögliche Konsequenzen daraus für den See werden derzeit geprüft.

## 5.4 ORGANISCHER KOHLENSTOFF

Allochthone organische Substanz stammt überwiegend aus dem ländlichen Areal. Dies zeigt auch der mit der Wasserführung der Flüsse steigende Konzentrationsgang. Die organische Substanz unterliegt während des Abfluvorganges einem starken Abbau ("biologische Selbstreinigung"). Das entstehende Kohlendioxid steht im Austausch mit der Atmosphäre. Die Beteiligung des Abwassers am Gesamtumsatz ist gering. Zwischen den frisch aus den Zuflüssen stammenden Substanzen (Pflanzenmaterial, natürliche Huminstoffe, abwasserbürtige Stoffe) und den bereits im See verarbeiteten Stoffen (Organismen und deren Stoffwechselprodukte, Reste der allochthonen Substanzen) besteht ein erheblicher Unterschied in Zusammensetzung und Abbauverhalten.

Allochthone organische Stoffe sind Nährstoffe für Destruenten im See. Ihr Abbau belastet dessen Sauerstoffhaushalt. Das entstehende Kohlendioxid wird von Primärproduzenten wieder als Nährstoff genutzt.

Die Hauptzahlen (Tab. 1) für das Abflußjahr 1985/86 sind:

	Obersee	Untersee
Zufuhr durch Flußschwebstoffe	33392	480 t C
Zufuhr ohne Flußschwebstoffe	24916	19685 t C
Entzug durch Abfluß (Seerhein, Hochrhein)	17944	17676 t C
Entzug durch Trinkw., Fischerei, Mähen von Makrophyten	346	51 t C

Eine Bilanzierung läßt sich mit diesen Ergebnissen allein nicht durchführen, weil die Umsätze im Seewasserkörper (Aufbau und Abbau organischer Substanz) um ein Mehrfaches höher liegen. Während der Vegetationsperiode liegt im Seerhein ein großer Teil der Fracht aus dem Obersee organisch gebunden als Plankton vor, das nicht als Flußschwebstoff ausgewiesen wird.

Die Konzentrationen in den Zuflüssen nehmen mit der Wasserführung zu. Die dem See zufließenden Frachten (Tab. 3) sind deshalb starken Schwankungen unterworfen.

Die mit Flußschwebstoffen eingetragene C-Fracht zum Obersee betrug 57 % der Gesamtfracht. Dies entspricht der Regel (mögliche Ausnahme: extreme Niedrigwasserjahre). Eine Verringerung dieser Frachten deutet sich an (Tab. 6). Die übrigen C-Frachten sind - auf Grund weitreichender Sanierungsmaßnahmen und der dadurch wirksameren Selbstreinigungsleistung in den Zuflüssen - von 30672 (1978/79) auf 24916 t/Jahr C gesunken. Die Frachten zum Untersee ohne Flußschwebstoffe fielen von 29557 auf 19685 t/Jahr C (Rückgang der Bioproduktion im Obersee? Tab.5).

Die partikuläre organische Substanz stammt etwa zur Hälfte aus dem Alpenrhein. Zu den Frachten an gelöster organischer Substanz trugen am meisten bei: Alpenrhein, Bregenzerach, Schussen, Argen, Alter Rhein und Dornbirnerach. Davon fielen wiederum bei Schussen mit 6,5, Dornbirnerach mit 4,4 und Argen mit 4,0 g/m<sup>3</sup> C große mittlere Konzentrationen auf.

Insgesamt stammten nur 3 % der allochthonen Gesamtbelastung des Obersees mit organischer Substanz aus Abwasser aus dem Uferbereich.

Die Konzentrationen im Obersee selbst haben sich nicht eindeutig verändert. Die Erholung der Sauerstoffverhältnisse im Hypolimnion des Bodensees in den letzten Jahren (IGKB 1988) und der starke Rückgang der Frachten im Seerhein lassen jedoch auf eine erhebliche Verminderung auch der Zufuhr von autochthoner organischer Substanz aus dem Epilimnion schließen.

Die Sanierungsmaßnahmen werden den Eintrag von außen und (wegen Nährstoffrückhaltes) auch die Produktion im See selbst noch absenken und damit den Sauerstoffhaushalt weiter stabilisieren.

## 5.5 B O R

Bor ist als Spurenelement für pflanzliches Wachstum unverzichtbar, doch gemessen am Vorkommen im Oberflächenwasser ist sein Bio-Umsatz sehr gering. Auch die Physiologie des Menschen selbst ist mit etwa 1,3 mg/Tag Borausscheidung wenig beteiligt (SCHRÖDER & NASON 1971). Wegen seiner Beständigkeit ist Bor als Leitparameter für Stoffbilanzierungen geeignet. Entgegen der ursprünglichen Annahme, Borat sei weit überwiegend abwasserbürtig (als Bleichmittelzusatz in Waschmitteln), muß heute davon ausgegangen werden, daß der Anteil aus dem ländlichen Areal rund die Hälfte des gesamten Eintrags ausmacht (WILKEN 1987) und daher bedeutend ist.

Untersucht wurde nur gelöstes Borat. Die Menge des im Plankton der Seeabflüsse enthaltenen Bors wurde nicht festgestellt. Der Entzug durch Fischerei und Makrophytenernte ist ebenfalls unbekannt, muß aber als sehr gering eingestuft werden. Die verfügbaren Hauptzahlen (Tab. 1) für das Abflußjahr 1985/86 sind

	Obersee	
Vorrat im See am 1. 11. 1985	1343	t B
Zufuhr ohne Flußschwebstoffe	337	t B
Fehlbetrag (errechnet)	373	t B
Entzug durch Abfluß (Seerhein, Hochrhein)	211	t B
Entzug durch Trinkwasser	3	t B
Vorrat im See am 1. 11. 1986	1093	t B
Abnahme im See	250	t B

Der errechnete Fehlbetrag im Obersee von 373 t B ist bedeutend. Ihm sollte durch weitere Untersuchungen nachgegangen werden.

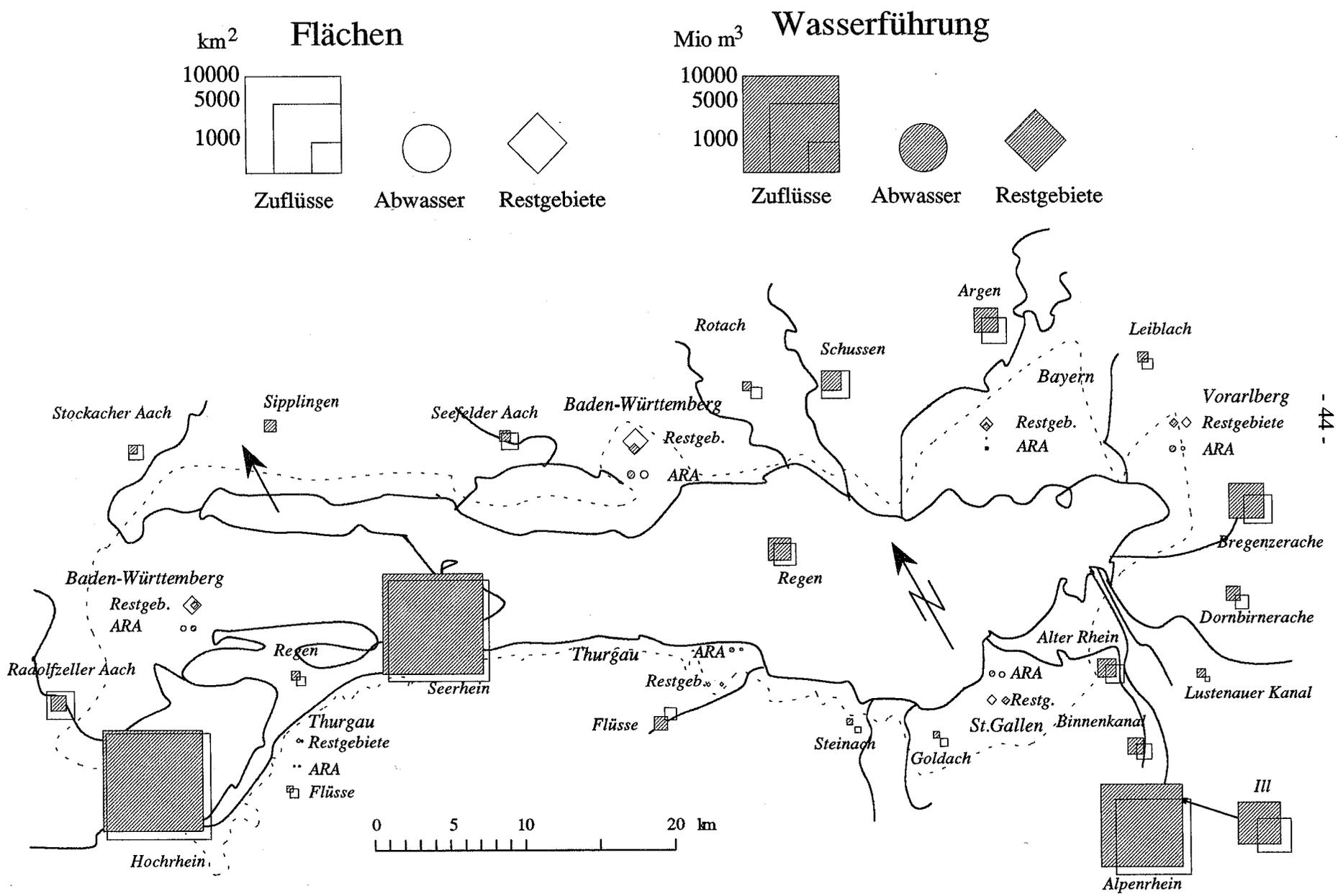
Die Konzentrationen in den Zuflüssen nehmen mit der Wasserführung ab. Deshalb treten abflußabhängige Schwankungen der Konzentrationen im Zufluß auf.

Zu den Frachten trugen am meisten bei: Alpenrhein, Bregenzerach, Schussen, Argen, Dornbirner Ach, Radolfzeller Ach (Untersee) und Alter Rhein. Davon fielen, neben den Einleitungen gereinigten Abwassers aus seeanliegenden ARA, bei Dornbirnerach mit 97, Schussen mit 65 und Radolfzeller Ach mit 56 mg/m<sup>3</sup> B große mittlere Konzentrationen auf. Die Fracht der Radolfzeller Ach stammt zu mehr als 90 % aus ihrer Quelle bei Ach.

Insgesamt stammten 16 % der gesamten Boratfracht zum Obersee aus Abwasser aus dem Uferbereich.

Zu Vergleichen mit früheren Ergebnissen fehlt das Datenmaterial. Die Boratumsätze auf dem Waschmittelsektor haben sich in den letzten Jahren bis zum Berichtsjahr kaum geändert (AKP 1988). Deshalb muß sich der Stoffhaushalt im See zwischen Zufuhr und Verlusten annähernd im Gleichgewicht befinden. Die bisher getroffenen Maßnahmen haben keinen Einfluß auf den derzeitigen Umsatz im See.

Abb. 8: Darstellung der Teilflächen des Einzugsgebietes (leere Signaturen) und der Wasserfrachten (schraffiert); im ufernahen Bereich innerhalb der Punktierung wurden nur die Kläranlagen untersucht, alle übrigen Einträge anhand von Statistiken geschätzt.



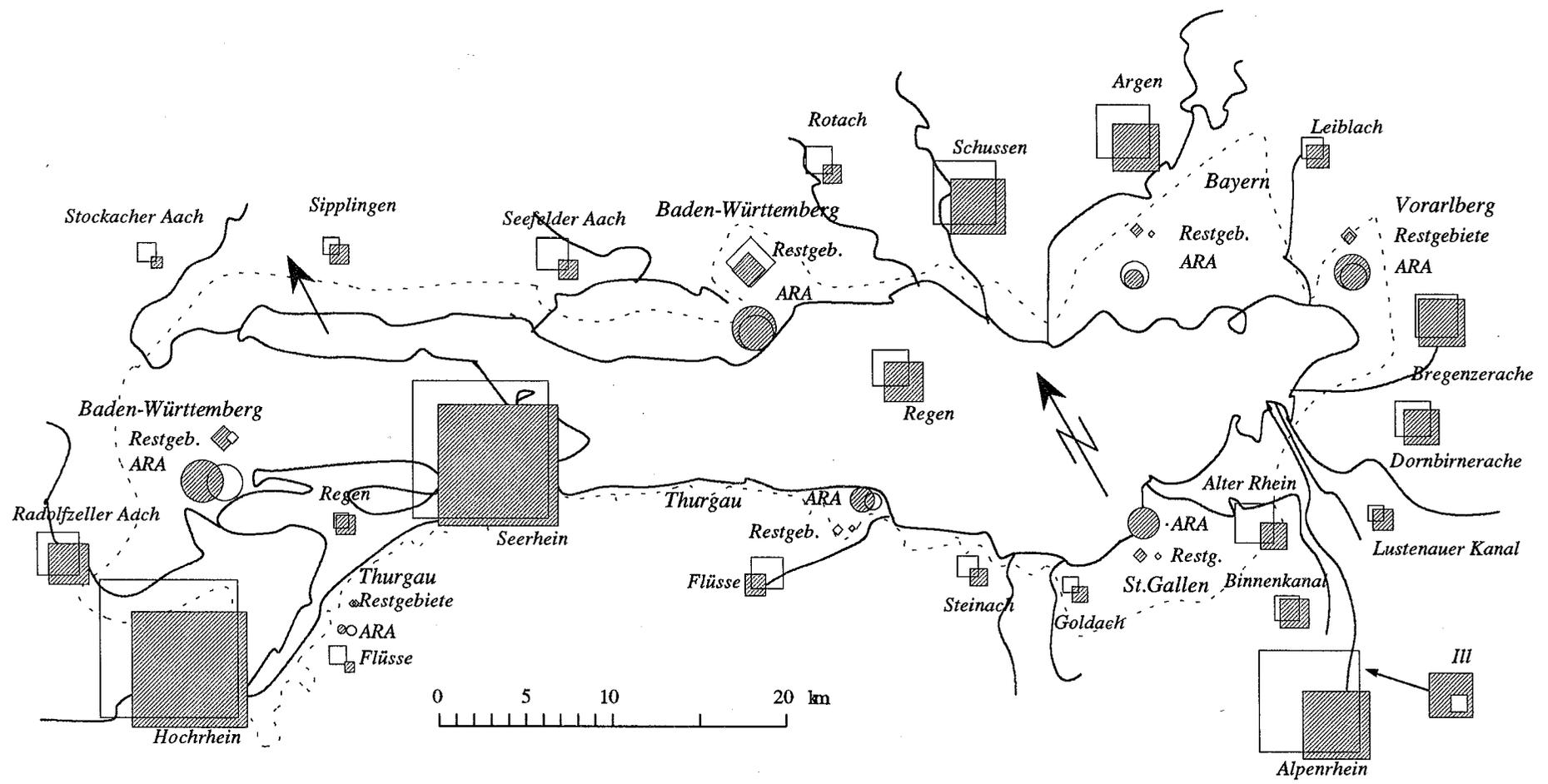
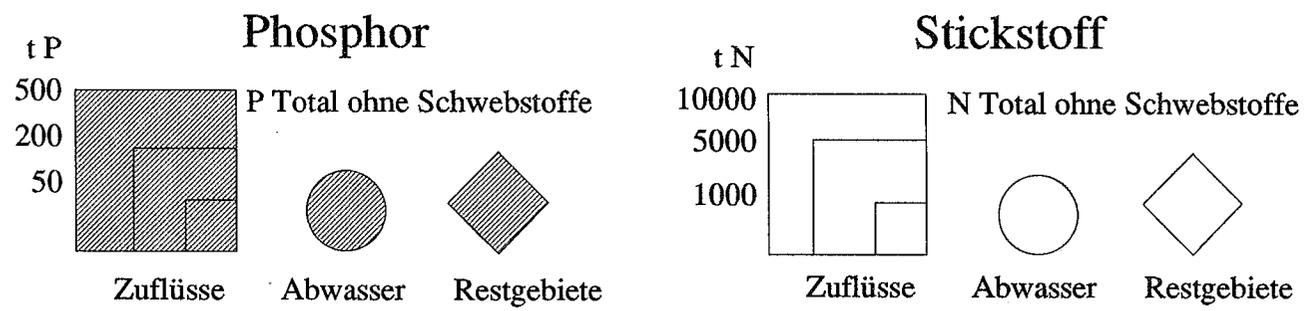
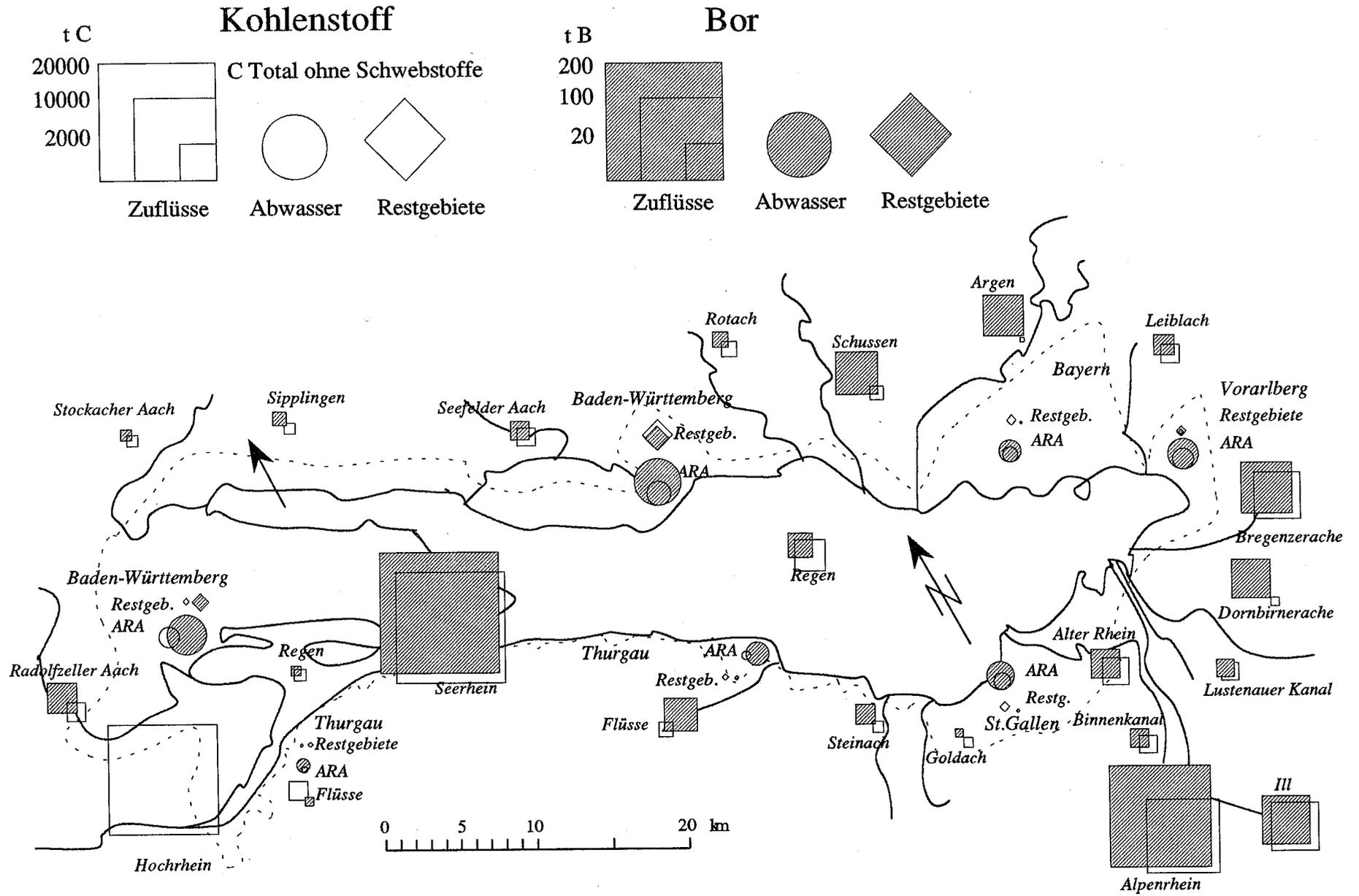


Abb. 9: Darstellung der Frachten von Gesamtphosphor (schraffiert) und Gesamtstickstoff (leere Signatur) in den Anliegerländern und -kantonen (vgl. Bemerkungen zu Abb. 8).

Abb. 10: Darstellung der Frachten des gesamten organischen Kohlenstoffs (leere Signatur) und des Bors (schraffiert) in den Anliegerländern und -kantonen (vgl. Bemerkungen zu Abb. 8).



## 6. Zusammenfassung (s. Abb. 8 bis 10)

1. Zur Ermittlung der dem Bodensee vom Nov. 1985 bis Okt. 1986 zugeführten Stofffrachten wurden umfangreiche Erhebungen durchgeführt. Sie umfaßten:

- Abflüsse und chemische Untersuchungen gezielt entnommener Proben an mündungsnahen Stationen der wichtigen Zu- und Abflüsse von Obersee und Untersee, Hochrechnung der Meß- und Abflußdaten auf Monats- und Jahresfrachten,
- chemische Untersuchungen oder entsprechende Erhebungen an den Abwasserreinigungsanlagen in den Einzugsgebieten der Bodenseezuflüsse,
- chemische Untersuchungen von direkt in den See gelangenden ARA-Abläufen mit Hochrechnung auf Jahresfrachten,
- bestmögliche Schätzung der restlichen Belastungen im Uferbereich (Anlieger, Industrie, restliche Flächen) und im Hinterland anhand von Statistiken,
- chemische Untersuchung von täglichen Niederschlägen,
- Schätzung des restlichen Austrags durch Trinkwasserentzug, Fischfang etc.

Bei der Wertung der Ergebnisse ist der derzeitige Stand der Kenntnisse und Möglichkeiten mit zu berücksichtigen.

2. Für die chemischen Untersuchungen wurden Tagesmischproben und Stichproben erhoben. Dauerprobeentnahme mit automatischen Stationen liefen an den Flüssen Argen, Schussen, Rotach, Seefelder Aach, Stockacher Aach, Dornbirnerach, Alpenrhein, Alter Rhein, Steinach und Radolfzeller Aach. An den übrigen Zuflüssen und den Seeabflüssen wurden die Proben entweder als Tagesmischproben mit selbstfüllenden Sammlern oder als Einzelschöpfproben entnommen.

3. Für die Beziehungen zwischen Abfluß und Konzentrationen in den Zuflüssen wurden überwiegend spezielle e-Funktionen verwendet und mit deren Hilfe die täglichen Frachten ermittelt. Unter Einsatz spezieller Fourier-Ansätze wurde mit den Seeabflüssen gleich verfahren. Die Teilfrachten in den Zu- und Abflüssen wurden zu Monats- und zu Jahresfrachten zusammengestellt und mit den Frachten aus den übrigen Quellen in Jahresbilanzen zusammengefaßt.

4. Die größten Flüsse brachten auch die größten Frachten. In kleineren Flüssen traten höhere Konzentrationen auf. Die größten Stoffeinträge fielen im allgemeinen in die wasserreichen Monate, die größten Stoffkonzentrationen gelöster Verbindungen in die wasserarmen Wintermonate. Als mit gelösten Pflanzennährstoffen noch besonders belastet sind Zuflüsse mit großen Stofffrachten und zugleich großen Konzentrationen anzusehen: Schussen, Dornbirnerach und Radolfzeller Aach (Donaeinfluß).

5. Dem Obersee wurden aus seinen Zuflüssen 2,5 Mio t Schwebstoffe zugeführt. In diesen waren nach stofflichem Umsatz während des Abflusses 1677 t P (= 73 % der Gesamtfracht), 3035 t N (= 14 %) und 33392 t org.C (= 57 %) partikulär gebunden. Der größte Teil der jährlichen Schwebstofffracht wird durch die relativ kurzzeitigen Hochwasserabflüsse abgeführt. Da die Hochwässer in ihrer Stärke und in ihrer zeitlichen Verteilung von Jahr zu Jahr erheblich variieren, ergeben sich auch bei den schwebstoffgebundenen Phosphorfrachten (u. a.) entsprechend große Schwankungen.

6. Die Belastung des Bodensees aus sämtlichen Quellen lag bei

Obersee:	2296 t P	21000 t N	58000 t C	337 t B
Untersee:	522 t P	13000 t N	20000 t C	253 t B

mit einem errechneten Anteil des gereinigten und ungereinigten Abwassers am Obersee von 26 % P und 24 % N. Der verbleibende größere Teil (rund 3/4) stammte aus dem ländlichen Areal. Während hier Phosphor überwiegend an Flußschwebstoffe aus Bodenmaterial gebunden war, trat Stickstoff überwiegend in gelösten Verbindungen (Nitrat) auf.

7. 1985/86 war ein Jahr mit mittleren Abflüssen. Dadurch ergibt sich eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denjenigen von 1978/79. Als Folge der Sanierungsmaßnahmen ist die Belastung mit Phosphor (ohne Berücksichtigung der Flußschwebstoffe) von 1108 auf 620 t P am Obersee und von 658 auf 514 t P am Untersee abgesunken. Damit ist auch die allochthone Belastung mit organischer Substanz zurückgegangen. Die Belastung mit Stickstoff dagegen ist wegen des großen Umsatzes im ländlichen Areal von rund 14500 auf 18000 t N am Obersee und von rund 10500 auf knapp 13000 am Untersee angestiegen.

8. Die Sedimentationsrate schließt stets die den Schwebstoffen entsprechenden Beträge mit ein. Sie betrug im Abflußjahr 1985/86 insgesamt bei Phosphor 2086 t P im Obersee und 159 t P im Untersee. Die Stickstoffbilanz ergab Verlustraten von 2353 t N im Obersee und 2090 t N im Untersee bei gleichzeitigem Anstieg der Seevorräte.

9. Die P-Belastung des Obersees aus dem Abwasser seines gesamten Einzugsgebietes betrug 536 t P. Dies erfüllte annähernd die Vorgaben der IGKB (500 t P) bis 1985. Auch die aus diesem Wert und den zusätzlichen Beiträgen aus dem ländlichen Areal nach Stoffumsatz bis zum Eintrag in den Obersee resultierende Belastung ohne Flußschwebstoffe von 620 t P entsprach dem Planungsziel.

10. Modellrechnungen zufolge würde die 1985/86 festgestellte P-Belastung des Bodensee-Obersees langfristig zu einer Gleichgewichtskonzentration um  $40 \text{ mg/m}^3$  P gegen Ende der Zirkulationsperiode führen. Das angestrebte Ziel, nämlich weniger als  $30 \text{ mg/m}^3$  P, erfordert eine konsequente Fortsetzung der Sanierungsanstrengungen gemäß dem gültigen Bau- und Investitionsprogramm auf der Grundlage der neuen Richtlinien für die Reinhaltung des Bodensees.

## 7. Literatur

AKP, Arbeitskreis "Auswirkungen PHöchstMengV" im Hauptausschuß "Phosphate und Wasser" der Fachgruppe Wasserchemie in der Gesellschaft Deutscher Chemiker, Obmann A. HAMM (1988): Auswirkungen der Phosphat-Höchstmengenverordnung für Waschmittel auf Kläranlagen und in Gewässern.- Verlag Hans Richarz, Sankt Augustin (402 S.).

BEARD, H. R. (1926): Nutritive value of fish and shellfish.-Report of the U.S. Commission of Fisheries for 1925.

BGBI., Bundesgesetzblatt der Bundesrepublik Deutschland (1980): Verordnung über Höchst-mengen für Phosphate in Wasch- und Reinigungsmitteln (Phosphat-Höchstmengen-Verord-nung) vom 4. Juni 1980.- BGBI. 28, Teil I: 664 - 666.

BGBI. 300/1984, Bundesgesetzblatt der Republik Österreich (1984): Waschmittelgesetz.

BURGESS, J. W. (1966): Some effects of cultural practices on aquatic environmental and native fish populations.- In: Proc. a. Conf. SEast Ass. Game Fish Comn. 19: 225 - 235.

DTV, Deutscher Taschenbuch Verlag (1965): Atlas zur Biologie, Band I

FREVERT, T. (1980): Dissolved Oxygen dependent phosphorus release from profundal sediments of Lake Constance (Obersee).- Hydrobiologia 74: 17 - 28.

GUJER, W. et al. (1979): Gewässerschutz 2000, Glattalstudie, 234 S. (Selbstverlag EAWAG Dübendorf/Schweiz)

Hydrol. Jb., Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 1985.- Landeshydrologie (Herausg.)

IGKB (1966): Gewässerschutzvorschriften der Bodensee- Anliegerstaaten.- Ber. 4 der IGKB, 59 S. (Selbstverlag).

IGKB (1981): Bau- und Investitionsprogramm, Stand der Abwasserbeseitigung im Einzugsgebiet des Bodensee-Obersees und des Untersees, Planungszeitraum 1978 - 1985.- Ber. 24 der IGKB, 33 S. (Selbstverlag).

IGKB (1982a): Die Auswirkungen der Reinhaltmaßnahmen auf die Limnologische Entwicklung des Bodensees (Lagebericht).- Ber. 30 der IGKB, 33 S. (Selbstverlag).

- IGKB (1982b): Die Belastung des Bodensees mit Phosphor- und Stickstoffverbindungen und organischem Kohlenstoff im Abflußjahr 1978/79.- Ber. 28 der IGKB, 68 S. (Selbstverlag).
- IGKB (1985): Bau- und Investitionsprogramm, Stand der Abwasserbeseitigung im Einzugsgebiet des Bodensee-Obersees und des Untersees, Planungszeitraum 1986 - 1995.- Ber. 33 der IGKB, 24 S. (Selbstverlag).
- IGKB (1985): Arbeitsmanual für die Untersuchung der dem Bodensee zugeführten Stofffrachten im Abflußjahr 1986 (1.11.1985 - 31.10.1986).- Selbstverlag, 11 S.
- IGKB (1987): Die Zukunft der Reinhaltung des Bodensees - Weitergehende und vorbeugende Maßnahmen - Denkschrift.- Ber. 34 der IGKB, 28 S. (Selbstverlag)
- IGKB (1989): Limnologischer Zustand des Bodensees.- Jber. Int. Gewässerschutzkomm. Bodensee 15 (im Druck).
- KLIFFMÜLLER, R. (1969): Beiträge zum Stoffhaushalt des Bodensees (Obersee) II - Stickstoff- und Phosphor-Haushalt.- Arch. Hydrobiol./Suppl. XXXV: 309 - 371.
- KORB, I., P. LÄNGLE & W. LUKAS (1986): Zum Austrag von Phosphat aus einem überwiegend im Mischverfahren entwässerten Gebiet.- Korrespondenz Abwasser 33: 208 - 213.
- LAMBERT, A. (1982): Trübeströme des Rheins am Grund des Bodensees.- Wasserwirtschaft 72: 1 - 4.
- PEINEMANN, N. (1975): Phosphat-Verteilung in Landschaften Südwestdeutschlands.- Diss. Uni Hohenheim, 123 S. (Selbstverlag)
- PEINEMANN, N. & E. SCHLICHTING (1974): The Importance of Erosion Materials for the Eutrophication of Waters.- Sem. d'étude agric. environ. Gembloux: 127 - 133.
- RHEINHEIMER, G., W. HEGEMANN, J. RAFF & I.SEKOULOV (1988): Stickstoffkreislauf im Wasser - Stickstoffumsetzungen in natürlichen Gewässern, in der Abwasserreinigung und Wasserversorgung.- R. Oldenburg Verlag München Wien, ...S.
- SCHRÖDER & NASON (1971), Clin. Chem. 17: 461 (zit. nach Wiss. Tab. GEIGY (1977)).
- STABEL, H.-H. (1987): Settling velocity and residence time of particles in Lake Constance.- Schweiz. Z. Hydrol. 49: 284 - 293.
- STABEL, H.-H., & M. GEIGER (1985): Phosphorus Adsorption to Riverine Suspended Matter.- Water Res. 19: 1347 - 1352.
- STEINBERG, CHR. (1988): Phosphor im Gewässer: Neue Aspekte zum Phosphorkreislauf.- zitiert nach AKP 1988 (s.dort).
- STURM, M. (1987): mdl. Mitt.
- STRUBELT, T. (1986): Die Fischerei am Bodensee-Obersee im Jahr 1985.- TS für die Internationale Bevollmächtigten-Kommission (IBK), 12 S.
- SR Systematische Sammlung des Bundesrechts (Schweiz)
- StoV, Stoffverordnung der Schweiz (1986) SR 814013
- TG, Amt für Umweltschutz und Wasserwirtschaft des Kantons Thurgau (1986): Zuflußuntersuchungen 1985/86 im Kanton Thurgau.- nicht publiziert.
- WAGNER, G. (1976a): Simulationsmodelle der Seeneutrophierung, dargestellt am Beispiel des Bodensee-Obersees, Teil 2: Simulation des Phosphorhaushalts des Bodensee-Obersees.- Arch. Hydrobiol. 78: 1 - 41.
- WAGNER, G. (1976b): Die Untersuchung von Sinkstoffen aus Bodenseezuflüssen.- Schweiz. Z. Hydrol. 32: 191 - 204.
- WAGNER, G. (1980): Phosphorus Balance and Predictions: Lake Constance, Obersee.- Proc. Int. EPA/OECD Symposium on Inland Waters and Lake Restoration, Portland/Maine 1980: 316 - 319.

- WAGNER, G. (1983): Untersuchungen über den boden- und düngedingten Anteil an der Gewässereutrophierung unter besonderer Berücksichtigung des Bodensees, Teil 3.- Wasserwirtschaftliches Untersuchungsprogramm im Auftrag des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Baden-Württemberg, Manuskript, 19 S.
- WAGNER, G. (1986): Stofffrachten aus Kläranlagen im baden-württembergischen Einzugsgebiet des Bodensees.- Ber. der Landesanstalt für Umweltschutz B-W, Manuskript, 29 S.
- WAGNER, G. (1987a): IGKB-Zuflußuntersuchungen 1985/86: Untersuchungen der Kläranlagen am baden-württembergischen Bodenseeufer.- Ber. der Landesanstalt für Umweltschutz B-W, Manuskript, 13 S.
- WAGNER, G. (1987b): Zur Untersuchung von Stofffrachten in Bodenseezuflüssen bis zum Abflußjahr 1985.- Ber. der Landesanstalt für Umweltschutz B-W, Manuskript, 37 S.
- WAGNER, G. (1987c): Untersuchung der Stofffrachten von Bodenseezuflüssen Baden-Württembergs im Abflußjahr 1986.- Ber. der Landesanstalt für Umweltschutz B-W, Manuskript, 8 S.
- WAGNER, G. und B. WAGNER (1978): Zur Einschichtung von Flußwasser in den Bodensee-Obersee.- Schweiz. Z. Hydrol. 40: 231 - 248.
- WILKEN, Heike (1987): Zur Bilanzierung von Phosphor- und Stickstofffrachten in den Einzugsgebieten von Schussen und Argen mit Bor als Leitelement.- Diplomarbeit Fachhochschule Isny/Allgäu, Manuskript, 52 S.
- WMV 1980 der Schweiz: Änderung vom 8. 12. 1980

## 8. Anhang

Sonderband mit Basis-Daten bei:

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Abteilungen V (Institut für Seenforschung und Fischereiwesen, ISF, in D-7994 Langenargen.

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, D-8000 München 19

Vorarlberger Umweltschutzanstalt (Abt. Biologie, Wasser), A-6901 Bregenz

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), CH-3001 Bern

Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), CH-8600 Dübendorf

Amt für Umweltschutz des Kantons St.Gallen, CH-9001 St.Gallen

Amt für Umweltschutz und Wasserwirtschaft des Kantons Thurgau, CH-8500 Frauenfeld

Amt für Umweltschutz des Kantons Graubünden, CH-7001 Chur

## Veröffentlichungen der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee

- Richtlinien für die Reinhaltung des Bodensees  
vom 1. Juni 1967,  
überarbeitete Fassung vom 9. Mai 1972 und  
Neufassung vom 27 Mai 1987.
  
  - Schutz dem Bodensee  
Jubiläumsschrift: 15 Jahre Internationale Gewässerschutzkommission für den  
Bodensee 1974
  
  - Jahresberichte über den limnologischen Zustand des Bodensees, seit 1976
  
  - Schutz dem Bodensee Faltblatt:  
25 Jahre Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee 1984
- Berichte:
- Nr. 1 Zustand und neuere Entwicklung des Bodensees 1963
  - Nr. 2 Die Abwasserbelastung der Uferzone des Bodensees 1964
  - Nr. 3 Die Sauerstoffschichtung im tiefen Hypolimnion des Bodensee-Obersees 1963/64  
mit Berücksichtigung einiger Untersuchungsergebnisse aus früheren Jahren 1964
  - Nr. 4 Gewässerschutzvorschriften der Bodensee-Anliegerstaaten 1966
  - Nr. 5 Die Temperatur- und Sauerstoffverhältnisse des Bodensees in den Jahren 1961  
bis 1963 1967
  - Nr. 6 Untersuchungen zur Feststellung der Ursache für die Verschmutzung des  
Bodensees 1967
  - Nr. 7 Stellungnahme der Sachverständigen zur Frage einer Bodensee-Ringleitung 1967
  - Nr. 8 Die Sauerstoffbilanz des Bodensee-Obersees 1967
  - Nr. 9 Bodensee-Sedimente 1971
  - Nr. 10 Bericht über den Bodensee 1971
  - Nr. 11 Die Berechnung von Frachten gelöster Phosphor- und Stickstoffverbindungen aus  
Konzentrationsmessungen in den Bodenseezuflüssen 1973
  - Nr. 12 Die Makrophytenvegetation in der Uferzone des Bodensees 1973
  - Nr. 13 Bau- und Investitionsprogramm - Stand der Abwasserbeseitigung 1973
  - Nr. 14 Regentlastungsanlagen - Bemessung und Gestaltung 1973
  - Nr. 15 Strömungsverhältnisse im Bodensee-Untersee und der Wasseraustausch zwischen  
den einzelnen Seebecken 1974
  - Nr. 16 Zustand und neuere Entwicklung des Bodensees 1975
  - Nr. 17 Die Belastung des Bodensees mit Phosphor-, Stickstoff- und organischen  
Verbindungen im Seejahr 1971/72 1976
  - Nr. 18 Die Phytoplanktonentwicklung im Bodensee in den Jahren 1961 bis 1963 1976
  - Nr. 19 Stand der technischen Möglichkeiten der Phosphorelimination aus kommunalen  
Abwässern 1977

- Nr. 20 Die Entwicklung des Crustaceenplanktons im Bodensee-Obersee (1962-1974) und Rheinsee (1963-1973) 1977
- Nr. 21 Die langjährige Entwicklung des Phytoplanktons im Bodensee (1963-1973). Teil I: Untersee 1977
- Nr. 22 Chemismus des Freiwassers des Bodensee-Obersees in den Jahren 1961 bis 1974 1979
- Nr. 23 Die langjährige Entwicklung des Phytoplanktons im Bodensee (1965-1975). Teil 2: Obersee 1979
- Nr. 24 Bau- und Investitionsprogramm, Stand der Abwasserbeseitigung im Einzugsgebiet des Bodensee-Obersees und des Untersees Planungszeitraum 1978-1985 1981
- Nr. 25 Zum biologischen Zustand des Seebodens des Bodensees in den Jahren 1972 bis 1978 1981
- Nr. 26 Die submersen Makrophyten des Bodensees - 1978 im Vergleich mit 1967 - 1981
- Nr. 27 Die Veränderungen der submersen Vegetation des Bodensees in ausgewählten Testflächen in den Jahren 1967 bis 1978 1981
- Nr. 28 Die Belastung des Bodensees mit Phosphor- und Stickstoffverbindungen und organischem Kohlenstoff im Abflußjahr 1978/79 1982
- Nr. 29 Limnologische Auswirkungen der Schifffahrt auf den Bodensee 1982
- Nr. 30 Die Auswirkungen der Reinhaltmassnahmen auf die limnologische Entwicklung des Bodensees (Lagebericht) 1982
- Nr. 31 Schadstoffe in Bodensee-Sedimenten 1984
- Nr. 32 Quantitative Mikroanalyse flüchtiger, organischer Verbindungen im Bodenseewasser 1985
- Nr. 33 Bau- und Investitionsprogramm, Stand der Abwasser- beseitigung im Einzugsgebiet des Bodensee-Obersees und des Untersees Planungszeitraum 1986-1995 1985
- Nr. 34 Die Zukunft der Reinhaltung des Bodensees Weitergehende und vorbeugende Massnahmen - Denkschrift - 1987
- Nr. 35 Zur Bedeutung der Flachwasserzone des Bodensees 1987
- Nr. 36 Die Entwicklung der Radioaktivität im Bodensee nach dem Unfall Tschernobyl 1987
- Nr. 37 Die Entwicklung des Crustaceen-Planktons im Bodensee-Obersee (1972-1985) und Untersee-Gnadensee und Rheinsee (1974-1985) 1987
- Nr. 38 Die Oligochaeten im Bodensee als Indikatoren für die Belastung des Seebodens (1972 bis 1978) 1988
- Nr. 39 Die langjährige Entwicklung des Phytoplanktons im Bodensee (1961 bis 1986) 1989