

Ber. Int. Gewässerschutzkomm. Bodensee: 42, 1993

ISSN 1011-1263

Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee

Bericht Nr. 42

**Seenphysikalische und limnologische Dokumentation
zur Vorstreckung des Alpenrheins
in den Bodensee**

- eine Literaturstudie -

Bearbeiter: E. Bäuerle und E. Hollan

-1993-

Inhalt	Seite
Abstract	5
I. Einleitung	8
II. Historisches und allgemeine Betrachtungen. Grundsätzliche Darlegung der Vorgehensweise.	9
III. Randbedingungen	13
1. <u>Abfluß, Feststofffrachten des Alpenrheinwassers</u>	14
1.1 Wasserführung	14
1.2 Veränderungen durch Stauhaltung u. ä.	18
1.3 Gelöste Stoffe	21
1.4 Schwebstoffführung	22
1.5 Geschiebe	25
1.6 Temperatur	25
1.7 Einflüsse für die Dichte des Wassers	26
1.8 Veränderungen der Stofffrachten des Alpenrheins	28
1.8.1 jährlich	28
1.8.2 langfristig	28
2. <u>Das Deltawachstum und das Gefälle der letzten Rhein-Kilometer</u>	29
3. <u>Kurzfristige Änderungen und langfristige Entwicklung des Wasserstands im Obersee, aktueller Wasserstand als Bezugsniveau</u>	34
4. <u>Der jahreszeitliche Zyklus der Dichteschichtung im Obersee</u> ohne Berücksichtigung der Zuflüsse (mit Berücksichtigung der Zuflüsse: siehe IV. 5)	35
5. <u>Das windgetriebene Strömungssystem des Bodensees</u>	38
1) Die meteorologischen Gegebenheiten	38
2) Beobachtete windbedingte Strömungen	39
3) Numerische Modelle	41
(Implikationen für das Strömungsregime im Mündungs- bereich des Alpenrheins: siehe IV. 7)	
6. <u>Interne Schwingungen</u>	44

IV. Wechselwirkungen physikalischer Art	51
1. Einschichtung aufgrund der Dichte-Relationen	51
2. Dynamik des Einstroms, Einschichtung und Vermischung des Alpenrheins im Obersee	52
3. Zustrominduziertes Strömungssystem im Obersee	63
4. Abfluß des Mischwassers	68
5. Der jahreszeitliche Zyklus der Dichteschichtung bei Berücksichtigung des Rheinzufusses	69
6. Sedimentation	73
7. Die Folgen der windgetriebenen Strömungen für den Zustrom und die Einschichtung	78
8. Die Folgen der internen Schwingungen für den Zustrom und die Einschichtung	79
V. Wechselwirkungen chemischer und biologischer Art	81
1. Beobachtungsmaterial	81
2. Beobachtete Veränderungen im Bodensee und mögliche Zusammenhänge mit der Alpenrhein-Vorstreckung	86
2.1 Eutrophierung und Sanierung	86
2.2 Die einzige konkret geäußerte Hypothese	87
3. Der Ost-West-Gradient	89
4. Biologie des Seebodens - Oligochaetenbesiedlung	91
5. Einfluß auf den Trophiezustand (Phosphathaushalt)	91
VI. Problemstellung nach dem heutigen Wissensstand und Wertung der Untersuchungsergebnisse	95
VII. Zusammenfassung	97
VIII. Literaturverzeichnis	102

ABSTRACT

Um die Ausbreitung des Alpenrheinwassers im Bodensee-Obersee sowohl im Nahbereich der Mündung als auch in weiterer Entfernung davon, sei es oberflächennah oder in tieferen Schichten, erfassen zu können, werden zunächst die Randbedingungen eingehend beschrieben. Darunter sind - von Seiten des Zuflusses - die Wasserführung sowie die Fracht und die stoffliche Zusammensetzung derjenigen Flußwasserinhaltsstoffe zu verstehen, die an den steuernden Dichteänderungen im Einstrombereich maßgeblich beteiligt sind. Diese Einstromgrößen unterliegen beträchtlichen kurzfristigen und saisonalen Veränderungen und bedingen damit eine Vielfalt von unterschiedlichen Gegebenheiten, die darüberhinaus durch die Vorstreckungsmaßnahme eine langfristig erfolgende örtliche Verlagerung erfahren.

Die andere Mannigfaltigkeit an Randbedingungen ist gegeben durch den Zustand des Seewasserkörpers, der zu beschreiben ist durch den langsam veränderlichen saisonalen vertikalen Schichtungs Aufbau und durch die unterschiedlichen dynamischen Prozesse im Inneren des Sees. Deren enge Verknüpfung mit dem Windfeld über dem See wird aufgezeigt anhand von beobachteten und modellierten Situationen.

Vor dem Hintergrund dieser Rahmenbedingungen vollzieht sich der Zustrom- und allmähliche Vermischungsprozess des Flußwassers mit dem Seewasserkörper. Die Beschreibung der Einschichtung des Flußwassers im See aufgrund der Dichterelationen muß als nur grobe Näherung angesehen werden. Von der Dynamik der aufeinandertreffenden Wassermassen werden spezifische Vermischungsprozesse ausgelöst, die den Einschichtungsvorgang höchst komplex gestalten. Es wird außerdem herausgestellt, daß die windgetriebenen Strömungen, Auftriebsvorgänge und internen Schwingungen eine dominierende Rolle für die Ausbreitung des Flußwassers spielen. Das klassische Bild der relativ ortsfesten Strömungswalzen erweist sich als ein im allgemeinen unzutreffendes Erklärungsmuster.

Die Ergebnisse der im Abstand von jeweils ungefähr 10 Jahren vorgenommenen Seegrundvermessung lassen den Schluß zu, daß sich die mit Voranschreiten der Vorstreckungsmaßnahme beabsichtigte Verlagerung der Schwemmstoffablagerungen nach Nordwesten wie geplant vollzieht und die breite, tiefe Verbindung der Bregenzer Bucht mit dem zentralen Obersee erhalten bleibt.

Da einerseits gezielte Untersuchungen des Einflusses der Vorstreckungsmaßnahmen auf den limnologischen Zustand des Obersees bisher nicht vorgenommen wurden und andererseits die Änderungen von der Eutrophierungsentwicklung des Sees überlagert sind, ist eine eindeutige Identifizierung der Effekte aufgrund der insgesamt aus dem Freiwasserbereich des östlichen Seeteils vorliegenden limnologischen Untersuchungsergebnisse nicht möglich. Hingegen ist für die Zoobenthosverteilung vor der Rheinmündung ein enger Zusammenhang mit dem Zufluß nachgewiesen worden. Der hier festgestellte Bereich mit erhöhter Besiedlungsdichte der Schlammröhrenwürmer ist signifikant mit der Mündungslage korreliert.

ABSTRACT

Pour permettre de cerner la répartition de l'eau du Rhin alpin dans le lac supérieur de Constance, que ce soit au voisinage de l'embouchure ou à une plus grande distance, à la surface du lac ou dans ses couches profondes, le rapport décrit d'abord la situation générale dans le détail. En ce qui concerne le Rhin, il s'agit du débit de l'eau, du flux de matières transportées ainsi que de leur nature pour celles qui influencent la densité de l'eau là où les eaux du tributaire pénètrent dans le lac. Ces paramètres subissent de grandes modifications passagères et saisonnières et conditionnent ainsi les caractéristiques de la pénétration, influencées à plus long terme par les dépôts locaux de matériaux dus à l'endiguement de guidage du fleuve.

La complexité de la situation est soulignée par l'état de la masse d'eau lacustre, caractérisée par une stratification verticale qui varie lentement avec la saison, et par les processus dynamiques qui se déroulent au sein du lac. L'interrelation entre ces phénomènes et l'activité éolienne sur le lac est présentée à l'aide d'illustrations tirées d'observations directes et d'autres obtenues par des modèles.

La pénétration des eaux du fleuve et leur mélange graduel avec celles du lac sont donc conditionnés par la situation mentionnée ci-dessus. La description de la pénétration, basée sur les caractéristiques de densité, ne correspond qu'à une simple approximation. La dynamique des masses d'eau successives déclenche des processus spécifiques de mélange qui rendent extrêmement complexe le phénomène de pénétration. En outre, on constate que les courants provoqués par les vents, les courants ascendants et les oscillations internes jouent un rôle dominant dans la répartition de l'eau provenant du fleuve. L'image classique de courants de brassage quasi locaux s'avère être une explication plutôt inadéquate.

Les mensurations effectuées au fond du lac, en général toutes les décennies, permettent de conclure que le dépôt souhaité des matières en suspension se déplace comme prévu vers le nord-ouest, en raison de la progression de l'endiguement de guidage. Par conséquent, la profonde et large connexion entre la baie de Bregenz et le lac supérieur central reste préservée.

Etant donné, d'une part, qu'aucune étude systématique de l'effet de l'endiguement sur l'état limnologique du lac supérieur n'a été effectuée jusqu'ici, et, d'autre part, que les modifications sont masquées par l'évolution de l'état trophique du lac, il n'est guère possible d'identifier avec certitude les effets sur la base unique des résultats de recherches limnologiques, effectuées pour les eaux pélagiques de la partie orientale du lac. En revanche, on a pu démontrer une étroite relation avec l'affluent, avant l'embouchure du Rhin, dans le cas de la répartition de la faune benthique. Le domaine caractérisé par une densité supérieure de la population d'oligichètes est typiquement corrélée à une situation d'embouchure.

ABSTRACT

The document begins by describing the general conditions governing the spread of Rhine water originating in the Alps as it flows into the Upper Lake of the Lake of Constance, both in the catchment area surrounding the point of inflow and in lake areas downstream. It also attempts to define the extent to which such water remains near the surface or sinks to lower levels. This section includes information on water discharge and content, with special emphasis on those chemical substances which make a decisive contribution to vital changes in density at the point where the water flows into the lake. These large inflows are subject to substantial short-term and seasonal modifications giving rise to factors which may lead to long-term changes in water distribution when combined with the forward canalisation measures at present being undertaken.

Another diversity element is provided by the body of lake water itself, which is characterised by the gradual seasonal change in the vertical stratification structure and by the various dynamic processes which take place within the lake. The close relationship of these with wind conditions on the lake is demonstrated on the basis of models and observations.

The inflow and general blending process of the water entering the lake is substantially affected by the environment described. The section on the stratification of water entering the lake should be seen as very approximate. Specific blending processes are engendered by the dynamism resulting from the encounter of the various water masses, and these have an extremely complex effect on stratification. It is also shown that wind-driven currents, buoyancy processes and internal oscillation all play a substantial role in the spread of water entering the lake. The standard picture of relatively stable flow patterns is shown to be generally inapplicable.

Measurements of the lake bed are taken every ten years or so. Results suggest that the shift in alluvial deposits in a northwesterly direction which is the object of the forward canalisation measures is taking place. This means that both the breadth and depth of the channel linking the Bay of Bregenz with the Upper Lake are being maintained.

Carefully targeted examinations of the influence of the forward canalisation measures on the limnological condition of the Upper Lake have not so far been undertaken, while modifications in the eutrophication development of the lake tend to overlap. This means that a clear identification of the results of the measures is not yet possible since limnological examination data at present available mainly concern the water area away from the banks in the eastern part of the lake. In contrast, however, a close connection with the water inflow has been shown for zoobenthos distribution in the area where the Rhine enters the lake. The fact that this contains a higher density of tubificid populations is significant and correlates with the general water situation at this point.

I. EINLEITUNG

Die Vorstreckung der Mündung des Alpenrheins in den Bodensee durch Hochwasserdämme in westliche Richtung ist als Folge des Fußacher Rheindurchstichs notwendig geworden, um der drohenden Abschnürung der Bregenzer Bucht entgegenzuwirken. Die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee hatte sich bereits bei ihrer 19. Tagung im Jahr 1973 in Brunnen mit dieser Problematik befaßt und befürchtete als Folge der allmählichen Abtrennung eine zunehmende Eigenentwicklung der Bregenzer Bucht mit verstärkter Eutrophierung und negativen Auswirkungen auf den gesamten angrenzenden Obersee.

Inzwischen ist die Vorstreckung des Alpenrheins soweit fortgeschritten, daß die neue Richtung des Rheinlaufes in den See nunmehr in etwa bestimmt ist. Das Einschichtungsverhalten kann sich jedoch mit dem Fortschritt der Dammvorstreckung in den nächsten Jahren noch ändern. Für den See bedeutet dies wohl den größten direkten hydrologischen Eingriff seit dem Rheindurchstich. Daher sind außer den beabsichtigten Effekten auch erhebliche weitere Auswirkungen auf den gesamten See zu erwarten. In den vergangenen Jahren wurden sowohl bei chemischen als auch bei biologischen Größen Entwicklungstendenzen beobachtet, die möglicherweise mit der Rheinvorstreckung zusammenhängen.

Anläßlich ihrer 33. Tagung im Jahr 1987 in Stuttgart hat daher die IGKB ein Untersuchungsprogramm in Zusammenarbeit mit der Gemeinsamen Rheinkommission in Auftrag gegeben, das bei zeitlich gestaffeltem Vorgehen in einzelnen Teilschritten eine möglichst umfassende Beschreibung und Beurteilung der Gesamtwirkung der Alpenrheinvorstreckung auf den Bodensee zum Ziel hat.

In der vorliegenden seenphysikalischen und limnologischen Dokumentation zur Vorstreckung des Alpenrheins in den Bodensee als erstem Schritt des Vorhabens wurde das bis jetzt vorliegende Datenmaterial zusammengetragen und geordnet nach physikalischen, hydrographischen, chemischen und biologischen Gesichtspunkten ausgewertet. Dabei hat sich bald gezeigt, daß Untersuchungen zur limnologischen Auswirkung der Rheinvorstreckung auf den Bodensee-Obersee bisher kaum gezielt, sondern vielmehr nur in geringem Umfang und als "Nebenprodukt" bei Untersuchungsvorhaben mit anderen Zielsetzungen durchgeführt wurden. Damit erweist sich das in Angriff genommene Projekt umso mehr als notwendig.

Besonderer Wert wurde bei der vorliegenden Studie auf die Beschreibung der dynamischen Vorgänge im See gelegt, die den bestimmenden Hintergrund für die Zuströmung des Alpenrheins bilden. Mit der Einbeziehung dispersiver Vorgänge in die Betrachtung werden so die maßgeblichen Bedingungen und Prozesse im einzelnen

aufgezeigt, die der mathematischen Modellierung der durch den Zufluß des Alpenrheins induzierten physikalischen Zustandsänderungen des Bodensee-Obersees zugrunde zu legen sind. Die Durchführung dieses Vorhabens soll im Anschluß in Angriff genommen werden.

Die Dokumentation ist in Zusammenarbeit mit der gemeinsamen Rheinkommission und mit ihrer wesentlichen Unterstützung entstanden. Insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Uwe Bergmeister von der Internationalen Rheinregulierung sei für die Bereitstellung von Dokumenten, Daten und Diskussionsbeiträgen herzlich gedankt.

II. HISTORISCHES UND ALLGEMEINE BETRACHTUNGEN. GRUNDSÄTZLICHE DARLEGUNG DER VORGEHENSWEISE

Der Alpenrhein war bis vor weniger als 100 Jahren durch seine häufig auftretenden Hochwasser eine stete Gefahr für die Bewohner des Rheintals oberhalb des Bodensees. Durch die Schlamm- und Geschiebeablagerungen des ungestört mäandrierenden Flusses ergaben sich ständig Sohlhebungen, sodaß der Hochwasserschutz nie gewährleistet werden konnte, vor allem angesichts einer immer stärker werdenden Besiedlung.

Vom Beginn des 19. Jahrhunderts an wurden immer wieder Versuche unternommen, sich auf eine einvernehmliche Regelung zur Regulierung des Rheins zu verständigen. (Eine Schilderung hiervon findet sich bei BERGMESTER 1989). Schließlich kam im Jahr 1892 ein Staatsvertrag zwischen Österreich und der Schweiz über die Internationale Rheinregulierung unter der Leitung der Gemeinsamen Rheinkommission zustande. Die für unsere Betrachtungen wichtigsten Punkte dieses Vertragswerkes bestehen in

- der Verkürzung des Rheinlaufs um ca. 8 km durch den Fussacher und Dieboldsauer Durchstich (siehe Abb.1) zur Vermeidung weiterer Geschiebeablagerungen,
- der Verbauung der Wildbäche und anderer Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet mit der Absicht, die Zufuhr von Geschiebe zu verringern.

Da man bezüglich der Entwicklung der Schwebstoffablagerungen an der Mündung einer Fehleinschätzung unterlegen war und die Ablagerungen zu einer starken Verlandung der Harder und Fussacher Bucht führten, sah man sich zu Ergänzungsmaßnahmen gezwungen. Ein Staatsvertrag von 1924 sah deshalb unter anderem auch eine Vorstreckung der Regulierungsbauwerke auf dem Schuttkegel im Bodensee vor, um einer weiteren Verlandung der Harder, Fussacher und Bregenzer Bucht vorzubeugen.

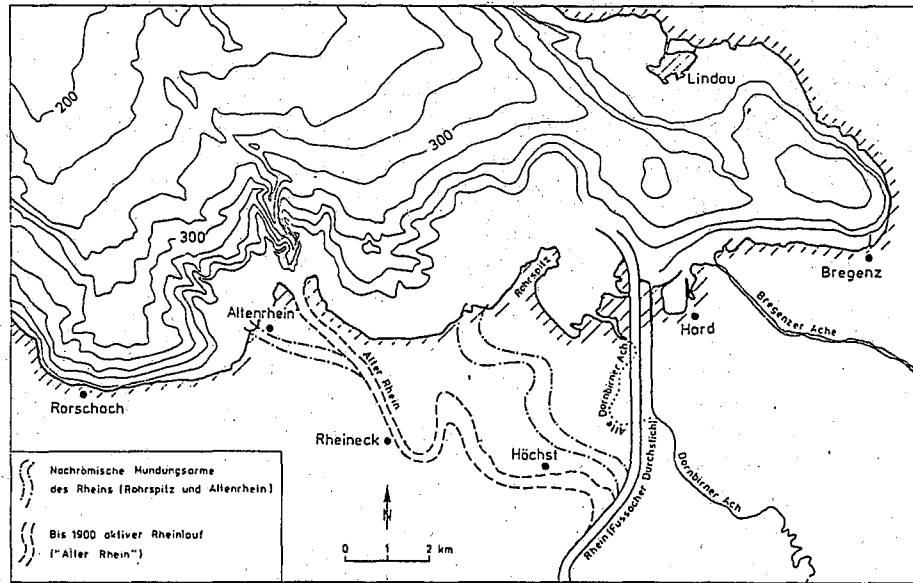


Abb.1: Unterwasser-Topographie im östlichen Teil des Bodensees, verschiedene (historische) Mündungsarme des Rheins (nach HANTKE, 1980) und das Vorstreckungsbauwerk (aus LAMBERT, 1989).

Wegen der zu groß gewählten Breite des Mittelgerinnes kam es zu weiteren Geschiebeablagerungen, die die Kapazität des Mittelgerinnes um mehr als die Hälfte reduzierten, sodaß - basierend auf Untersuchungsergebnissen der ETH Zürich - 1954 durch einen weiteren Staatsvertrag die Erhöhung der Mittelgerinnewühre und die Erhöhung, Verstärkung und Zurücksetzung der Hochwasserdämme beschlossen wurde.

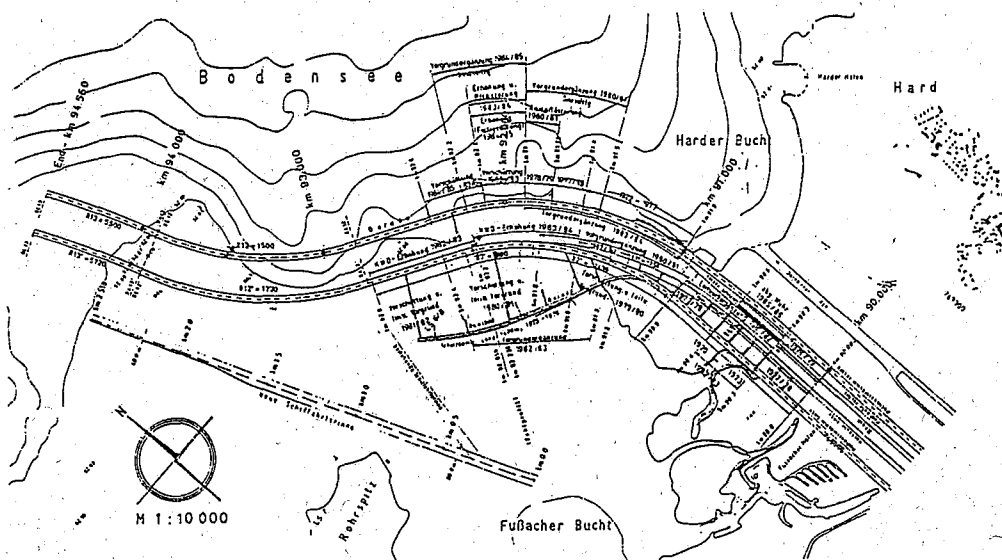


Abb.2: Neue Rheinmündung mit dem Vorstreckungsprojekt 1972/1979 (aus BERGMEISTER, 1989).

Der Verlandung der an die Mündung angrenzenden Buchten durch Ablagerungen von Feststoffen des Alpenrheins sollte durch ein Projekt entgegengewirkt werden, das den Bau eines 180 m breiten Kanals vorsah, durch welchen der Lauf des Rheins seewärts verlängert werden sollte. Darüber entstand 1972 ein neuer Staatsvertrag zwischen der Schweiz und Österreich.

Im Verlauf der Arbeiten an der Vorstreckungsmaßnahme zeigte sich, daß die Fortführung der geplanten Vorstreckung des rechten Hochwasserdamms wegen zu großer Schütthöhen unwirtschaftlich gewesen wäre, sodaß man sich 1979 entschloß, die Trassenführung unter Beibehaltung des Endpunktes der Vorstreckung durch Einbau zweier Gegenkurven zu ändern (siehe Abb.2).

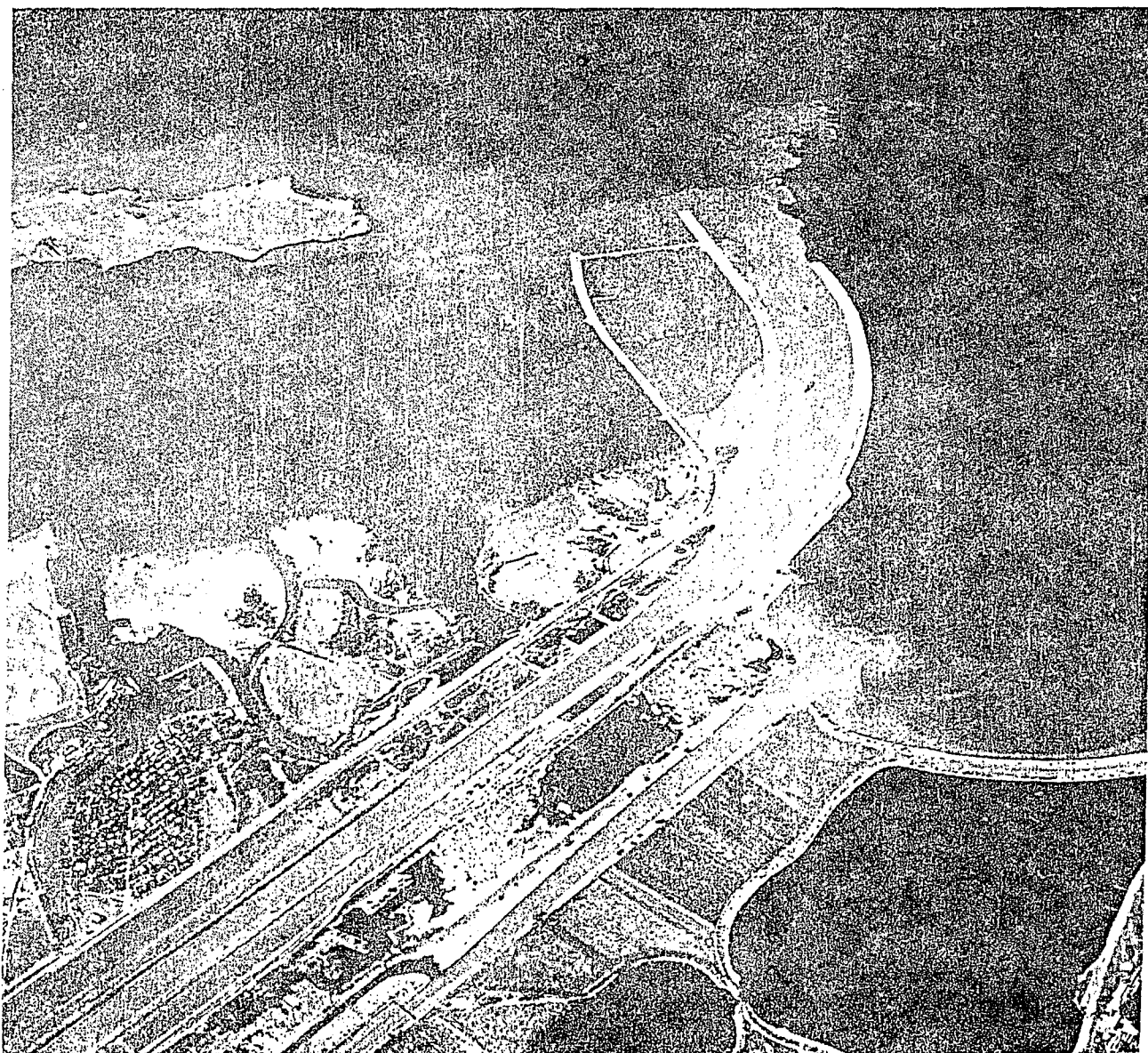


Abb. 3: Stand der Vorstreckungsmaßnahme im Oktober 1986
(Foto: Thorbecke; aus BERGMEISTER, 1989).

Die seit 1973 durch die Gemeinsame Rhein-Kommission betriebene Vorstreckung der Mündungsbauwerke des Rheins in den Bodensee-Obersee geschieht also in der Absicht, die Feststofffracht des Rheins von den östlichen Seeteilen fernzuhalten, um damit Verlandungsvorgängen in der Bregenzer Bucht entgegenzuwirken.

Nachdem sich schon vor ca. 10 Jahren die Wirksamkeit der Maßnahme vom wasserbaulichen Standpunkt bestätigen ließ, stellte sich neuerdings die Frage, ob sich darüberhinaus aus den in den letzten Jahrzehnten gemachten wissenschaftlichen Untersuchungen Hinweise auf Auswirkungen der Vorstreckung des Alpenrheins ergeben haben. Nachdem am 16.7.1990 am Institut für Seenforschung Langenargen (ISF) ein erstes Gespräch zwischen den Herren Dr. H. Müller, Dr. E. Hollan sowie, als Vertreter des Instituts zur Erforschung und zum Schutz der Gewässer Ottendorf (IESGO), Dr. E. Bäuerle stattgefunden hatte, erhielt das IESGO aufgrund eines Angebots vom 22.3.1990 den Auftrag zur Durchführung einer Dokumentation zu dieser Frage. Diese Dokumentation ist in dem vorliegenden Bericht niedergelegt.

Der biologische Teil des Berichts wurde von Frau Dr. B. Babenerd bearbeitet, wobei die von den Herren Dr. H. Güde und Dr. H. Müller (ISF) vorgeschlagenen Ergänzungen mit berücksichtigt wurden, und Dr. H. Müller verfaßte darüberhinaus die Einleitung. Im Abschnitt über Sedimentation wurden ein maßgeblicher Beitrag von Herrn Dr. H. G. Schröder (ISF) und substantielle Ergänzungen von Herrn Dr. G. Wagner (ISF) aufgenommen.

Es zeigte sich schon früh, daß gezielte Untersuchungen zur Frage der Auswirkungen der Alpenrhinvorstreckung in den Bodensee-Obersee nur in geringem Umfang durchgeführt worden sind. So mußte ein besonderes Gewicht auf die Sichtung von in Veröffentlichungen dargelegten Zusammenhängen gelegt werden, die quasi als Nebenprodukt von mit anderer Zielsetzung vorgenommenen Forschungs- und Überwachungsarbeiten ermittelt wurden. Dazu mußte natürlich zunächst geklärt werden, welche Untersuchungen von ihrer Thematik her mit unserem Untersuchungsobjekt Berührungspunkte aufweisen könnten. Wie sich zeigen sollte, wurde von vielen Autoren die Problematik der Rhinvorstreckung nicht berücksichtigt. Oder aber es wurden Feststellungen gemacht, deren Plausibilität einer genaueren Prüfung nicht immer standhalten konnten. Es wurde als vernünftige Vorgehensweise angesehen, zunächst eine Zusammenstellung von bekannten Tatsachen bezüglich der Rahmenbedingungen vorzunehmen, wie sie durch Messungen oder theoretische Überlegungen als gültig betrachtet werden können.

III. RANDBEDINGUNGEN

Unter "Randbedingungen" im Zusammenhang mit dem Zustrom des Alpenrheins in den Bodensee-Obersee sollen zwei sehr unterschiedliche Aspekte des Vorgangs verstanden werden: Zum Einen ist es der Alpenrhein, wie er sich darstellt, kurz bevor er in den Bodensee mündet, und der bestimmte physikalische und chemische Eigenschaften aufweist, durch die er sich in der Regel deutlich von den Charakteristika des Seewassers unterscheidet. Ein wesentlicher Gesichtspunkt hierbei ist die Impulsstärke des zuströmenden Wassers, die wiederum durch die Wasserführung des Flusses bestimmt wird.

Auf der anderen Seite haben wir die Wassermassen des Bodensees - nicht vorliegen, wie man geneigt sein könnte zu formulieren, sondern auf vielfältigen Zeitskalen in Bewegung befindlich. Dabei werden, wie im Weiteren dargelegt wird, manche dieser Vorgänge durch den zuströmenden Alpenrhein beeinflusst und es kommt zu teilweise komplizierten Wechselwirkungen. Einige dieser Vorgänge (wie beispielsweise die windinduzierte Zirkulation im Obersee) nehmen allerdings praktisch unabhängig vom Zufluß ihren Verlauf, werden manchmal lediglich durch ihn markiert.

Damit ergibt sich folgende Situation: Zwar verdankt das Wasser des Bodensees zu einem großen Teil seine Herkunft dem ständig zufließenden Alpenrheinwasser, doch durch dessen Übergang vom Fluß- zum Seewasser gelangt es in ein völlig anderes Regime und erfährt durch vielfältige Umwandlungsprozesse physikalischer, chemischer oder biologischer Art eine tiefgreifende Umwandlung.

Die Prioritätenverteilung bei der Aufgabenstellung, die sich hieraus für die wissenschaftliche Untersuchung der mit dem Zustrom verbundenen Problematiken herleiten läßt, ist zuallererst gegeben durch eine profunde Kenntnis der see-eigenen Prozesse, um darauf aufbauend die zuflußbedingten Modifikationen abschätzen zu können.

III.1. Abfluß, Feststofffrachten des Alpenrheinwassers

Bevor die Auswirkungen der Alpenrhein-Vorstreckung, auf die Einbringung des Rheinwassers in den Wasserkörper des Bodensees untersucht werden, soll die Frage geklärt werden, inwieweit die Beschaffenheit des Rheinwassers sich in den vergangenen Jahrzehnten verändert hat und ob das Abflußverhalten das gleiche geblieben ist. In diesem Zusammenhang sind offenkundig die Stauhaltungen im Einzugsgebiet des Alpenrheins von Bedeutung. Inwiefern sich veränderte Erosionstätigkeit im Einzugsgebiet des Rheins auf die Stoffzusammensetzung des Alpenrheins auswirkt, ist gegenwärtig nicht abschätzbar.

III.1.1. Wasserführung

Zwei Drittel des Wasserzuflusses des Bodensees wird vom Rhein geliefert. Die mittlere Wasserführung lag nach WAIBEL (1962) zwischen 1942 und 1960 bei $219 \text{ m}^3/\text{s}$. In LUFT et al. (1990) wird für 1919-1987 ein Mittelwert von $230 \text{ m}^3/\text{s}$ angegeben.

Die Abflußraten des Alpenrheins unterliegen großen Schwankungen, die von Jahr zu Jahr im natürlichen Abflußgeschehen auftreten. Die Extremwerte liegen zwischen $43 \text{ m}^3/\text{s}$ und $3100 \text{ m}^3/\text{s}$ (100jähriges Hochwasser). Der Hochwasserabfluß bei Diepoldsau ist in Abb.4 ersichtlich (aus BERGMEISTER, 1989).

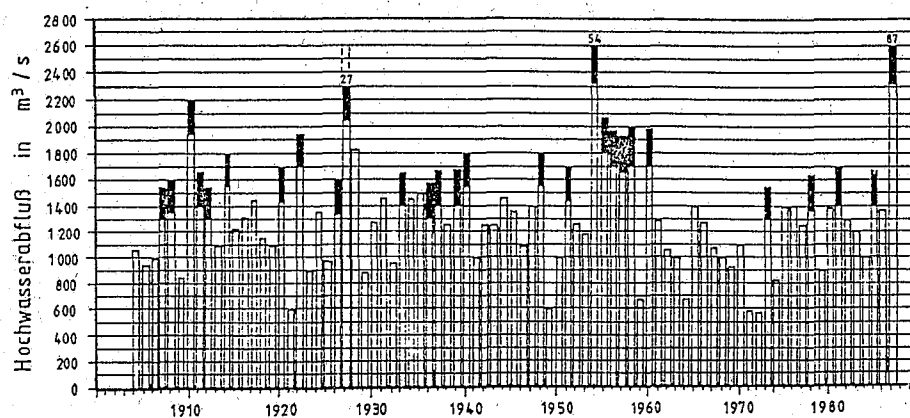


Abb. 4: Hochwasserabfluß des Rheins bei Diepoldsau von 1904 bis 1987
(aus BERGMEISTER, 1989).

Natürlich ist die Wasserführung auch stark von der Jahreszeit abhängig. Bedingt durch die Gliederung des Einzugsgebiets (siehe Abb.5) in die höheren Regionen mit glazialen Abflußregimen, in die nivalen und in die mittelländischen, pluvial dominierten Regime-typen (ASCHWANDEN, 1985) zeigt sich beim Rheinzufuß ein ausgeprägtes Maximum im Juni/Juli (siehe Abb.6).

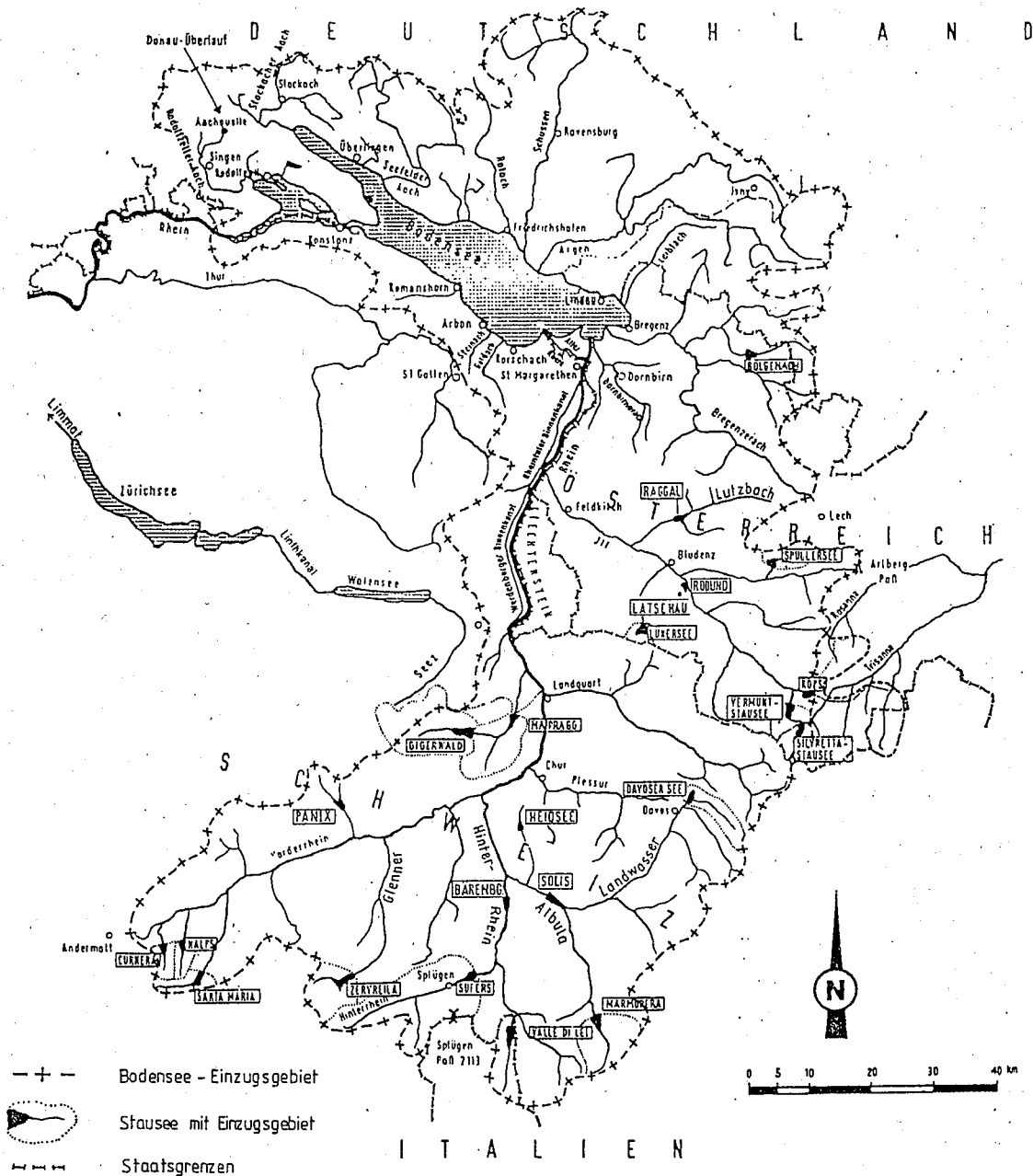
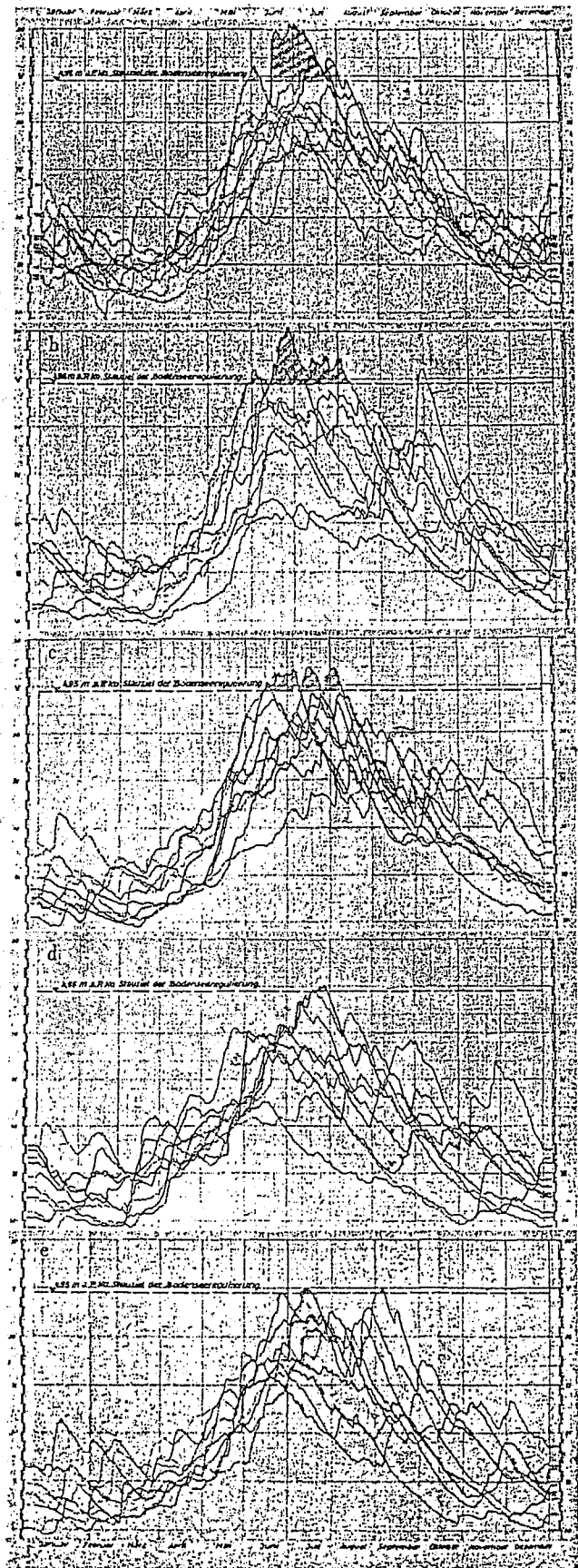


Abb. 5: Das Einzugsgebiet des Bodensees mit Stauseen und deren Einzugsgebieten (aus IGKB-Ber. 9, grün, 1985).

Abb. 6: Bodenseewasserstände
in den Jahren 1910 bis 1960
(Konstanzer Pegel
391.766 m ü. NN.)

- a) Jahre 1910 bis 1920
 - b) Jahre 1920 bis 1930
 - c) Jahre 1930 bis 1940
 - d) Jahre 1940 bis 1950
 - e) Jahre 1950 bis 1960
- (aus DAUNER, 1964)



In der Winterperiode (Dezember-Mai) liegt die Wasserführung bei 50-70 m³/s, nach der Schneeschmelze und heftigen Niederschlägen kann sie in extremen Fällen (meist im Juni/Juli) bis über 2700 m³/s ansteigen. Dieser Anstieg erfolgt oft innerhalb weniger Stunden. Bezüglich der damit einhergehenden Erhöhung des Wasserstands ist zu bedenken, daß, um den Seespiegel um 1 Zentimeter anzuheben, 5.4 Millionen m³ Wasser zufließen müssen. Im Juni dieses Jahres (1991) wurde der extreme Wert eines Anstiegs um 43 cm innerhalb eines Tages beobachtet (JANSEN, pers. Mitt.).

Eine Erhöhung des Wasserstands um 1 cm führt zu einer Zunahme des Abflusses um lediglich 3 m³/s. Daraus folgt eine ausgleichende Wirkung des Sees, wie dies für die Hochwasserwelle vom Juli 1987 in Abb.7 dargestellt ist (aus NAEF, 1989).

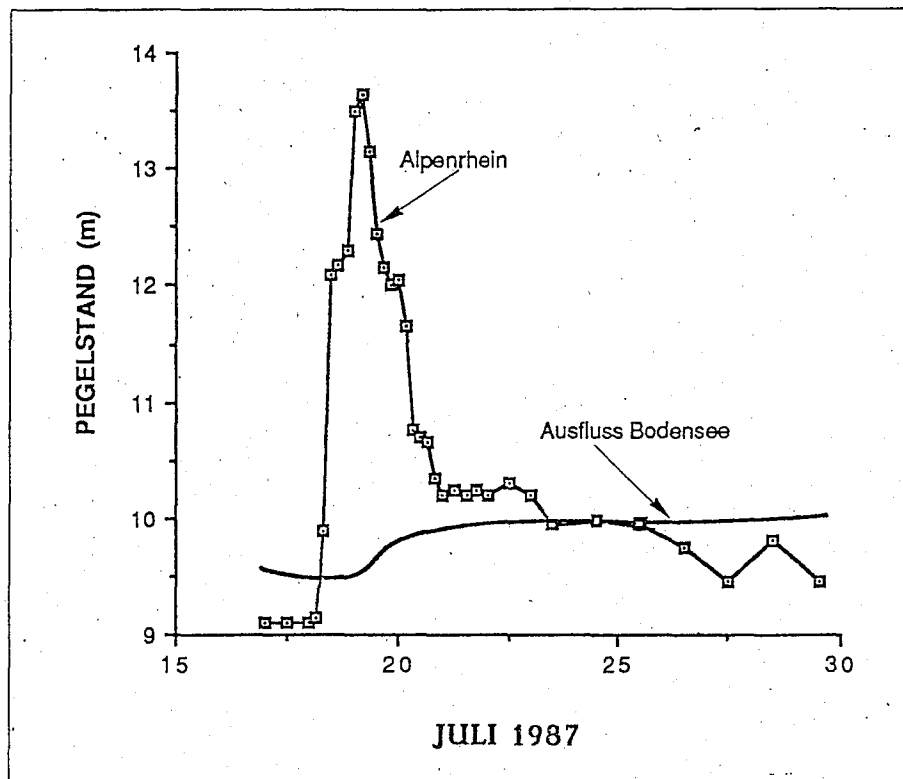


Abb.7: Verformung der Hochwasserwelle vom Juli 1987 durch die Rückhaltewirkung des Bodensees (aus NAEF(korrigiert),1989).

III.1.2. Veränderung durch Stauhaltung u. ä.

Mögliche Ursachen für Änderungen der Wasserführung des Alpenrheins könnten gegeben sein durch folgende Veränderungen im Einzugsgebiet: Veränderung der Gebietsniederschläge, Veränderung der Verdunstung, Reserveänderungen durch Schnee und Gletscher, durch wasserwirtschaftliche Regelungen, insbesondere Bewirtschaftung von Kraftwerkspeichern, durch Wasser-Überleitungen in das Alpenrhein-Einzugsgebiet und durch Verdunstungszunahme durch größere Speichersee-Wasserflächen und durch Intensivierung der Landwirtschaft.

Zunächst soll am Beispiel des Pegels St. Margrethen-Diepoldsau demonstriert werden, daß die monatlichen mittleren Abflüsse des Alpenrheins im Winterhalbjahr zugenommen haben. Die Abb. 8 (aus LUFT et al., 1990) zeigt die mittleren Abflüsse MQ für die Mittlungsperioden 1919-49, 1937-87 und 1919-87. Man erkennt für die Monate Dezember bis April eine Zunahme (mit signifikantem Trend). Die geringfügigen Veränderungen von MQ für den Rest des Jahres sind nicht signifikant.

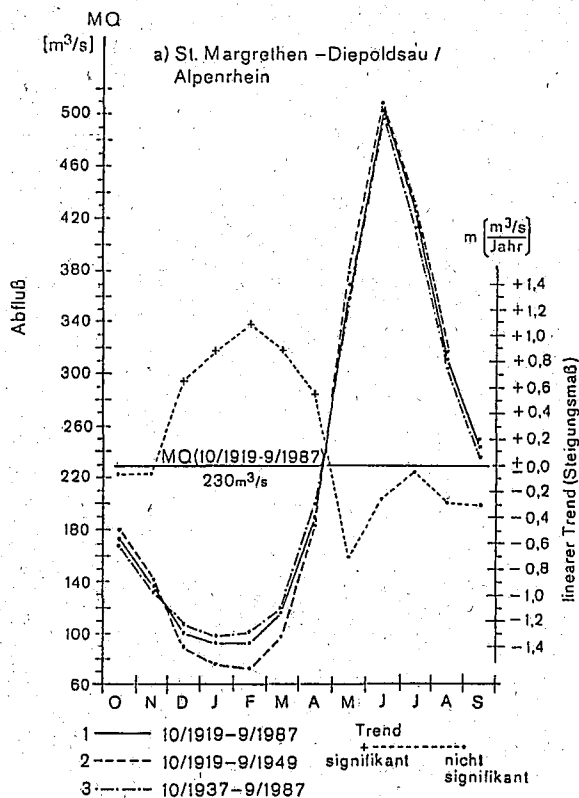


Abb. 8: Pegel St. Margrethen-Diepoldsau. Jahresgang der mittleren monatlichen Abflüsse und monatliche Trends. Vergleich dreier Zeitspannen (aus LUFT et al., 1990).

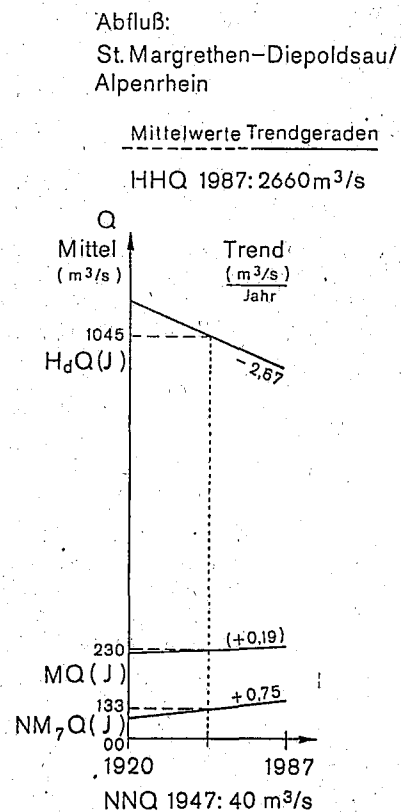


Abb. 9: Trends und Mittelwerte der Zeitreihen für Hoch-, Mittel- und Niedrigstwasserabflüsse am Alpenrhein. (aus LUFT et al., 1990).

Eine weitere Veränderung im Abflußverhalten des Alpenrheins zeigt sich auch in den höchsten mittleren täglichen Abflüssen H_dQ , deren Trendgeraden für die Jahre 1920 bis 1987 in Abb.9 (aus LUFT et al., 1990) zusammen mit denen des mittleren Abflusses MQ und des niedrigsten 7tägigen Abfluß-Mittelwertes pro Jahr dargestellt sind.

Die Abnahme der höchsten mittleren täglichen Abflüsse und die Zunahme des niedrigsten 7tägigen Abfluß-Mittelwertes sind signifikant. Um daraus allerdings auf ein geändertes Speichungsverhalten im Einzugsgebiet des Alpenrheins folgern zu können, müssen wir einen Blick auf die Gebietsniederschläge werfen. Bei dem in der Zeitreihe von 1901-1984 vorliegenden Gebietsniederschlag zeigt sich keine signifikante Änderung (siehe Abb.10; aus LUFT et al., 1990), sodaß die Veränderungen im jährlichen Regime des Alpenrheinzufusses durch den Ausbau von Kraftwerkspeichern und durch Überleitungen vor allem aus dem Inn-Gebiet durch die Vorarlberger III-Kraftwerke verändert worden sein müssen.

Gebietsniederschlag
Bodensee-Einzugsgebiet (P. Stein)

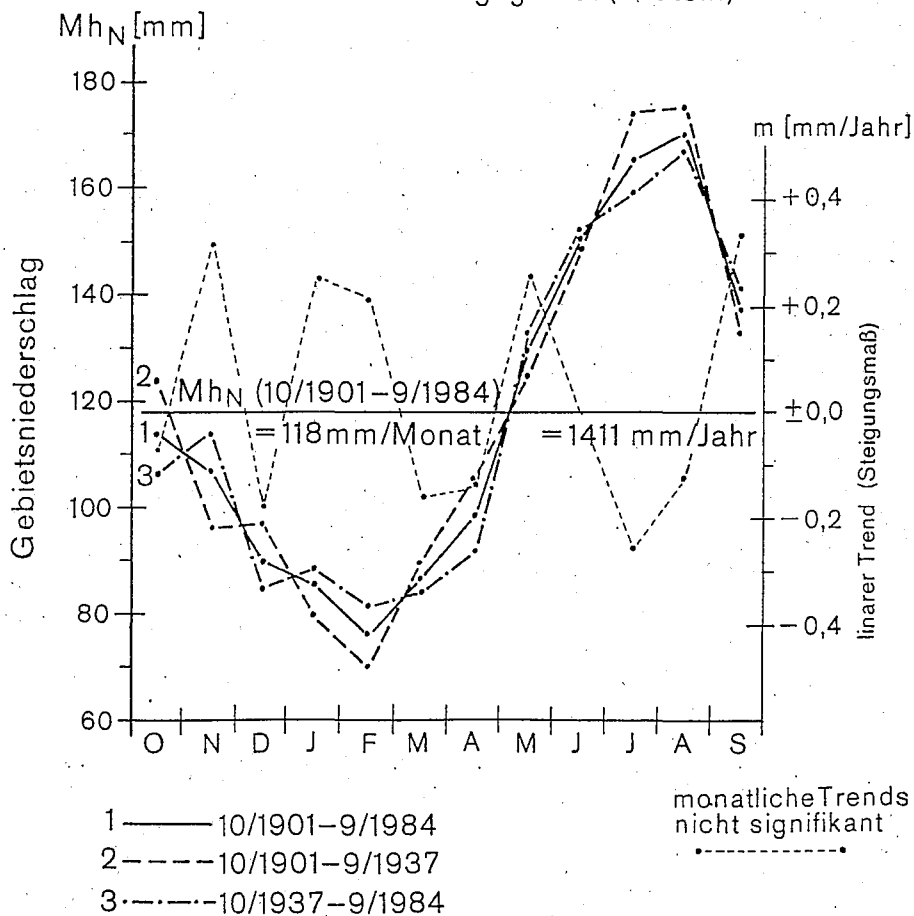


Abb.10: Jahresgang der mittleren monatlichen Gebietsniederschläge über drei Zeitspannen und monatliche Trends (Niederschläge für den schweizerischen Staatsgebietsanteil, bezogen auf den Pegel Stein/Hochrhein; aus LUFT et al., 1990).

Zur Zeit bestehen im Einzugsgebiet des Bodensees rd. 780 Mio. m³ nutzbarer Speicherraum. Bis einschließlich 1976 waren im Alpenrhein-Einzugsgebiet rd. 765 Mio. m³ Nutzraum ausgebaut (siehe Abb.11). Die dadurch bewirkte Veränderung des Zuflußregimes wird nach SCHMIDT (1979) und nach LUFT et al.(1990) ab 1960 deutlich wirksam durch Aufhöhung der Niedrigwasserzuflüsse und Fallen der Hochwasserzuflüsse im Alpenrhein.

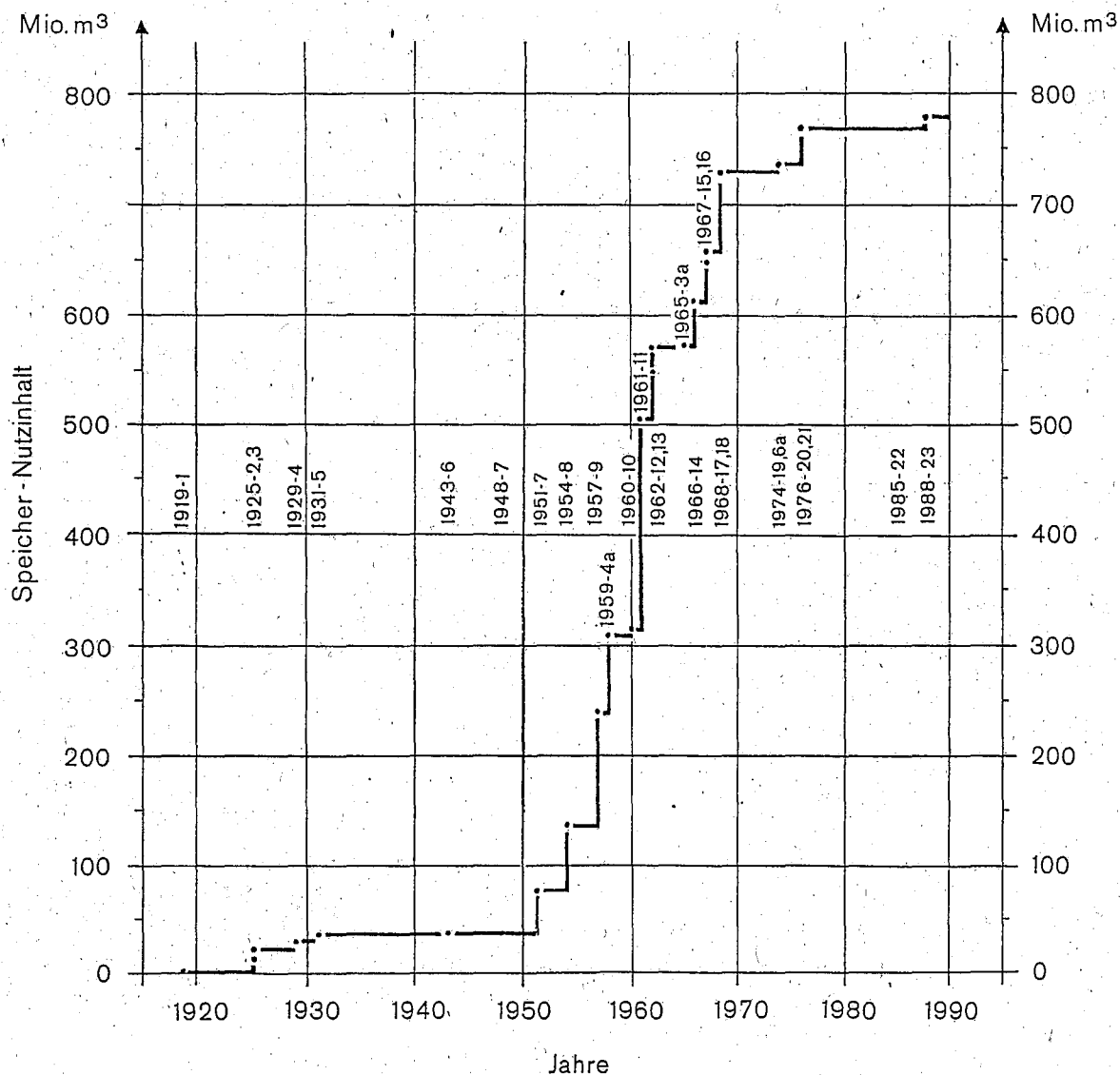


Abb.11: Entwicklung des Baus von Kraftwerk-Speicherbecken im Einzugsgebiet des Alpenrheins (aus LUFT et al., 1990).

III.1.3. Gelöste Stoffe

Beim Wasser des Alpenrheins handelt es sich um bikarbonat-, sulfat- und erdalkalireiches, jedoch chlorid- und alkaliarmes Wasser (MÜLLER, 1964). Die jahreszeitlichen Schwankungen im Chemismus des Alpenrheins sind beträchtlich und die Höhe der einzelnen Ionen-Anteile sind stark von der Wasserführung abhängig. Dies zeigt sich insbesondere beim Sulfatgehalt, der mit zunehmender Wasserführung stark abnimmt (siehe Abb.12; aus MÜLLER, 1964).

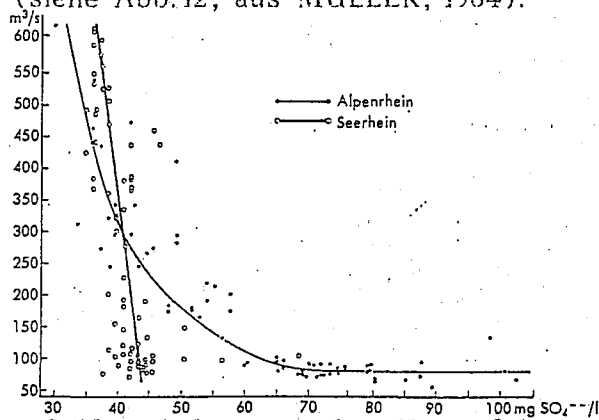


Abb.12: Abhängigkeit des Sulfatgehaltes von der Wasserführung (aus MÜLLER, 1964).

Nun ist allerdings zu bedenken, daß die mittlere jährliche Wasserführung des Alpenrheins 1962/63 (dem Zeitraum der einjährigen Untersuchungen) mit $186,8 \text{ m}^3/\text{s}$ wesentlich niedriger als im langjährigen Mittel lag. Die maximale (!) Wasserzufuhr wurde am 29. Juli 1963 mit $810 \text{ m}^3/\text{s}$ registriert.

Auf dieses Datenmaterial (erweitert um SiO_2 und K^+) stützen sich auch die Betrachtungen von WAGNER und WAGNER, 1978, wenn sie einen funktionalen Zusammenhang zwischen mittlerer täglicher Wasserführung und Konzentration gelöster Salze herleiten gemäß

$$G = a + b/Q, \quad (1)$$

wobei G der Gehalt an gelösten Salzen (g/l) ist, Q die tagesmittlere Wasserführung (m^3/s) und a, b positive Konstanten ($a = 0,212$; $b = 3,363$).

Bezüglich der im Alpenrheinwasser gelösten Gase kann man aufgrund des turbulent durchmischten Flußwassers davon ausgehen, daß ein gasgesättigtes System vorliegt (WAGNER, pers. Mitt.). Die durch gelöste Gase bewirkte Dichtedifferenz ist gegenüber den anderen gelösten Stoffen als unbedeutend anzusehen.

Angeichts der beträchtlichen Kenntnis-Lücken bezüglich des Konzentrationsgangs der Summe der gelösten Stoffe in Abhängigkeit von der Wasserführung ist nicht zu erwarten, daß sich hierüber Einblicke in irgendwelche Veränderungen aufgrund der Alpenrhein-vorstreckung ergeben könnten.

III.1.4. Schwebstoffführung

Um den Zusammenhang zwischen der Wasserführung und der mitgeführten Sedimentmenge zu ermitteln, wurden durch die Rheinbau-
leitung Bregenz in den Jahren 1936-1939 bei der seinerzeitigen Ge-
schiebemeßstelle Brugg Schwemmstoffmessungen durchgeführt und
daraus eine "Linie des mittleren Schlammgehalts" in Abhängigkeit
von der Wassermenge abgeleitet, die seither (und bis heute) den
meisten Bilanzierungen zugrunde gelegt wird. Abb.13 (aus INTER-
NAT. RHEINREG., 1980) zeigt diese Linien, zusammen mit einer
Eintragung der Mittelwerte der einzelnen Jahre. Man erkennt un-
schwer die extreme Schwankungsbreite dieser Messungen, und da-
mit ist auch schon aufgezeigt, vor welchem Hintergrund die Verän-
derungen der Schwebstoffführung aufgrund von Stauhaltungen u.a.
zu betrachten sind.

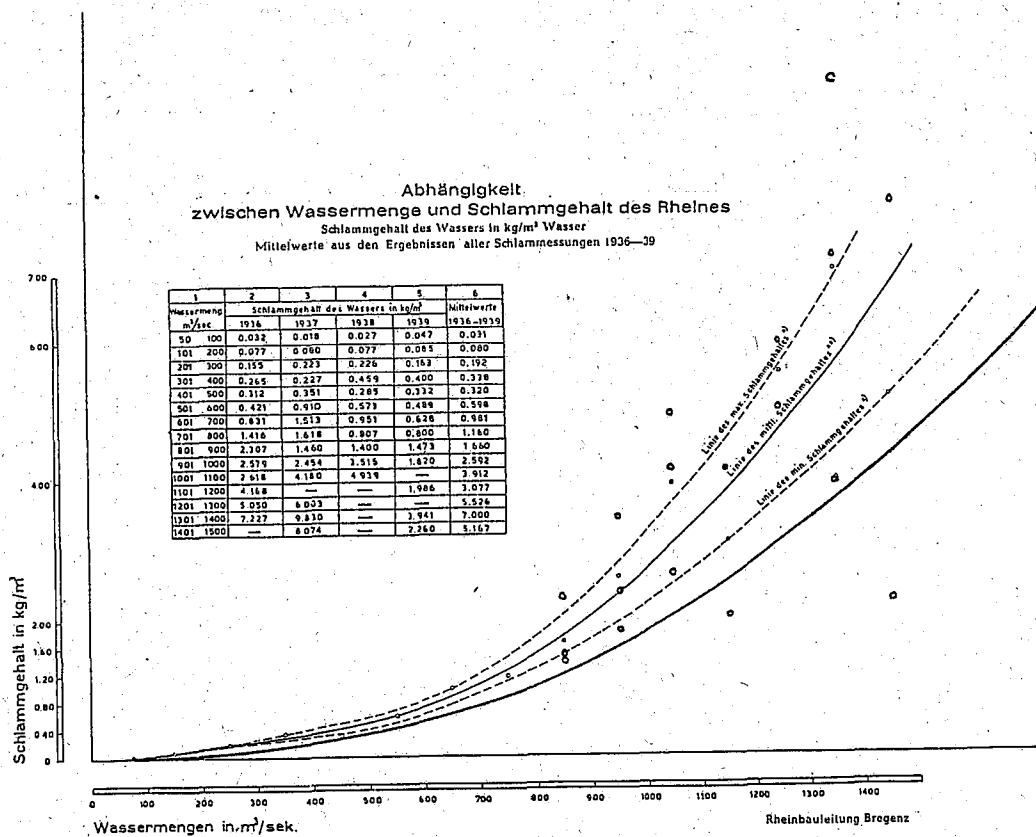


Abb.13: Abhängigkeit zwischen Wassermenge und Schlammgehalt des Rheins (aus INTERNAT. RHEINREG., 1980).

Neuere Messungen bei Lustenau (MÜLLER, 1965; MÜLLER und FÖRSTNER, 1968a, 1968b) werden von FÖRSTNER et al. 1968, als Bestätigung dieses Zusammenhangs angesehen. Die graphische Darstellung der Beziehung zwischen Schwebgutkonzentration und Wasserdurchfluß bzw. Fließgeschwindigkeit (in doppellogarithmischem Maßstab!) ist in Abb.14 zu sehen (nach MÜLLER und FÖRSTNER, 1968a).

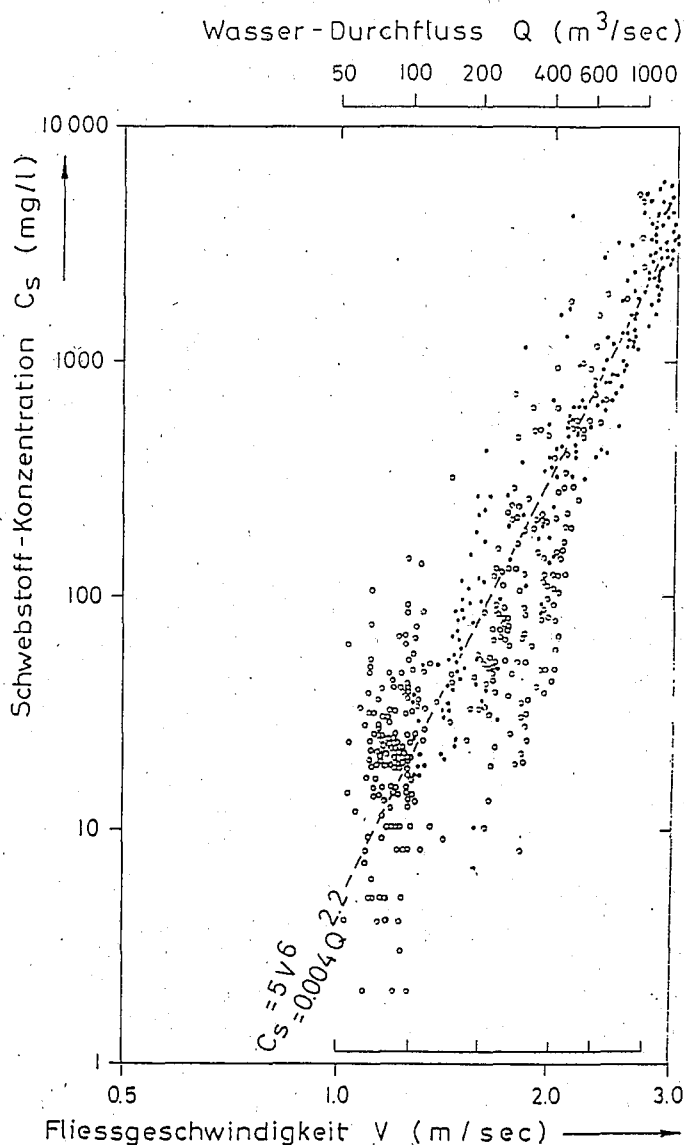


Abb.14: Beziehungen zwischen Schwebstoffkonzentration und Wasserdurchfluß (bzw. Fließgeschwindigkeit) im Rhein bei Lustenau (nach MÜLLER und FÖRSTNER, 1968).

Zwischen der Schwebstoff-Konzentration C_s (mg/l) und der Durchflußmenge Q (m³/s) bzw. Fließgeschwindigkeit V (m/s) besteht demnach der Zusammenhang

$$C_s = 0,004 Q^{2.2} \quad (2)$$

oder, bezogen auf die Fließgeschwindigkeit,

$$C_s = 5 V^6 \quad (3)$$

Bevor weiter auf diese funktionalen Zusammenhänge eingegangen wird, seien zur Veranschaulichung der beträchtlichen Variationen der transportierten Sedimentmengen folgende Extremsituationen zitiert (nach FÖRSTNER et al., 1968): 1949, in einem Jahr ohne extreme Hochwässer, wurden ca. 0,723 Mio. t Sediment in den Bodensee geliefert, im Gegensatz zu 1935, wo fast zehnmal so viel Sedimentmaterial, nämlich über 6,590 Mio. t in den See gelangten. Nach WAIBEL (1962) wurden allein innerhalb weniger Stunden am 22. und 23. August 1954 2,6 Mio. t Sediment bei einem einzigen Hochwasser (2500-2700 m³/s) in den See transportiert! Dies entspricht nahezu dem Jahresdurchschnitt der Jahre 1931-1960, der sich nach WAIBEL (1962) auf 3,341 Mio. t berechnet.

Betrachtet man Abb.13 und Abb.14, so fällt auf, daß die Skala der Durchflußmessungen bei ca. 1500 m³/s abbricht. Wie eben beschrieben, geschehen aber die wesentlichen Schwebstoffzufuhren bei den Hochwassern mit weit darüber hinausgehenden Abflüssen.

In jüngeren Untersuchungen über die Zufuhr von Flußwasser zum Bodensee-Obersee (WAGNER und WAGNER, 1978; WAGNER und BÜHRER, 1989) wird der Zusammenhang zwischen Schwebstoffkonzentration und tagesmittlerer Wasserführung durch die Formel

$$P = e^{(a - b/Q^c)} \quad (4)$$

beschrieben, wobei P die Schwebstoffkonzentration, Q die tagesmittlere Wasserführung und a , b , c positive Koeffizienten sind, deren Werte sich in einer letzten Anpassung nach dem Abflußjahr 1986 (WAGNER und BÜHRER, 1989) auf $a=3858.687526185$, $b=3866.8850409$, $c=5.90008303e-4$ ergeben haben. Diese Beziehung hat sich seit den Untersuchungen von Flußschwebstoffen 1970 (WAGNER 1976) bewährt (WAGNER, pers. Mitt.).

Eventuell muß für zukünftige Bilanzierungen eine Formel benutzt werden, die die veränderliche Vorgeschichte des in Betracht stehenden Zuflusses berücksichtigt. Das würde - den beschriebenen Verlauf als angemessen vorausgesetzt - zeitlich variable Koeffizienten

a, b, c in obenstehender Formel erfordern. Allerdings ist zu bedenken, daß die Meßwerte nach Zeit und Wasserführung sehr stark streuen, sodaß eine wie durch (4) gegebene Funktion nur eine bestmögliche Schätzung in Abhängigkeit von Dichte und Qualität der Messungen sein kann.

III.1.5. Geschiebe

Die rollend in den Bodensee verbrachte Flußbett-Fracht konnte schon vor Beginn der Vorstreckungsmaßnahme vernachlässigt werden. Sie betrug nach WAIBEL (1952, 1962) weniger als 2% der Gesamtfeststofffracht.

III.1.6. Temperatur

Welche Temperatur der Alpenrhein an seiner Mündung in den Bodensee aufweist, hängt davon ab, wie sein Wasser (und das seiner Nebenflüsse) auf seinem Weg von den Quellen bis zur Mündung im Wärmeaustausch mit der Umgebung aufgrund der Gegebenheiten des Einzugsgebiets beeinflusst wird. Der sich an der Mündung ergebende Jahresgang der Temperatur wird von WAGNER und STIELER (1978) durch eine Sinusfunktion

$$T = a + b \cdot \sin(k \cdot (x - c)) \quad (5)$$

angenähert, deren Kenngrößen für den Alpenrhein durch folgende Werte gegeben sind: Die mittlere Temperatur, um welche die Sinusfunktion schwingt ($a = 7,7^\circ\text{C}$); die größte Abweichung von der mittleren Temperatur im Zeitverlauf ($b = 4,5^\circ\text{C}$); die zeitliche Verschiebung des Beginns der Sinusschwingung ($c = 113$ Tage). Mit k ist die Jahresfrequenz bezeichnet ($k = 2 \cdot \pi / 365$). Damit kommt der alpine Charakter der Temperaturschwankung im Alpenrhein zum Ausdruck, die bei einer verhältnismäßig niedrigen mittleren Temperatur eine geringe Amplitude im Jahresverlauf zeigt.

Von der strengen Korrelation zwischen Temperatur und Zeitablauf, die sich in obenstehender Formel ausdrückt, gibt es vorallem in der warmen Jahreszeit in Abhängigkeit von der Witterung und damit von der Wasserführung größere Abweichungen: Hochwassertemperaturen liegen unter, Niedrigstwassertemperaturen häufig über dem mittleren Verlauf. Andererseits können die Temperaturen während winterlicher Hochwässer über dem Mittel liegen (WAGNER und WAGNER, 1978).

Die Tagestemperaturen schwanken um die Temperaturganglinie eines Jahres. Im Alpenrhein wird für Juni/Juli 1961 von WAGNER und STIELER (1978) eine tägliche Schwankungsamplitude von 0,9 °C ermittelt.

III.1.7. Einflüsse auf die Dichte des Wassers

Die in den Abschnitten III.1.3 - III.1.6 dargelegten Zusammenhänge haben natürlich einen großen Einfluß auf die Dichte des zufließenden Alpenrheinwassers, wobei im Gegensatz zu stehenden Gewässern davon ausgegangen werden muß, daß nicht nur die Temperatur eine Bedeutung für unterschiedliche Dichten hat, sondern daß die starken Veränderlichkeiten auch durch den Gehalt an gelösten und (mehr noch) an suspendierten Stoffen bestimmt werden. Vor allem bei Hochwassern überwiegt der Einfluß der suspendierten Stoffe auf die Dichte des Flußwassers, weil dann - wie in Abschnitt III.1.4 dargelegt - große Schwebstoffkonzentrationen auftreten.

Wir folgen im Weiteren den Darlegungen von WAGNER und WAGNER (1978), die einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Dichte des Wassers und den einzelnen Inhaltsstoffen herstellen.

Zunächst gilt für reines Wasser im Temperaturbereich von 0°C bis 30°C die Formel

$$D_1 = k_1 - \frac{(T - k_2)^2 (T + k_4)}{k_3 (T + k_5)} \quad (6)$$

wobei D_1 die Dichte des reinen Wassers (g/ml) ist und T die Temperatur (°C); k_1 bis k_5 sind positive Koeffizienten ($k_1=0,99997297$; $k_2=3,98$; $k_3=503570$; $k_4=283$; $k_5=67,26$).

Die graphische Darstellung dieses Zusammenhangs ergibt die gestrichelte Linie der Abb.15.

Die Dichte von Wasser bei Anwesenheit gelöster Salze läßt sich ausdrücken durch

$$D_2 = D_1 + \frac{G}{1000} \cdot \left(1 - \frac{D_1}{D_4}\right) \quad (7)$$

wobei D_2 die Dichte des salzhaltigen Wassers (g/ml) ist, D_1 die durch (6) ermittelte Dichte des reinen Wassers (g/ml), D_4 die Dichte der Salze in wässriger Lösung (g/cm³) und G der Gehalt an gelösten Salzen (g/l) (siehe dazu Abschnitt III.1.3).

Für die hier zu berücksichtigenden Konzentrationen setzen WAGNER und WAGNER (1978) pauschal $D_4=5$. Die Konzentration gelöster Salze in Abhängigkeit von der tagesmittleren Wasserführung berechnet sich aus (1) (siehe Abschnitt III.1.3) und wird auch bei sehr niedriger Wasserführung nicht größer als 0,25 g/l. Dieser Wert läßt

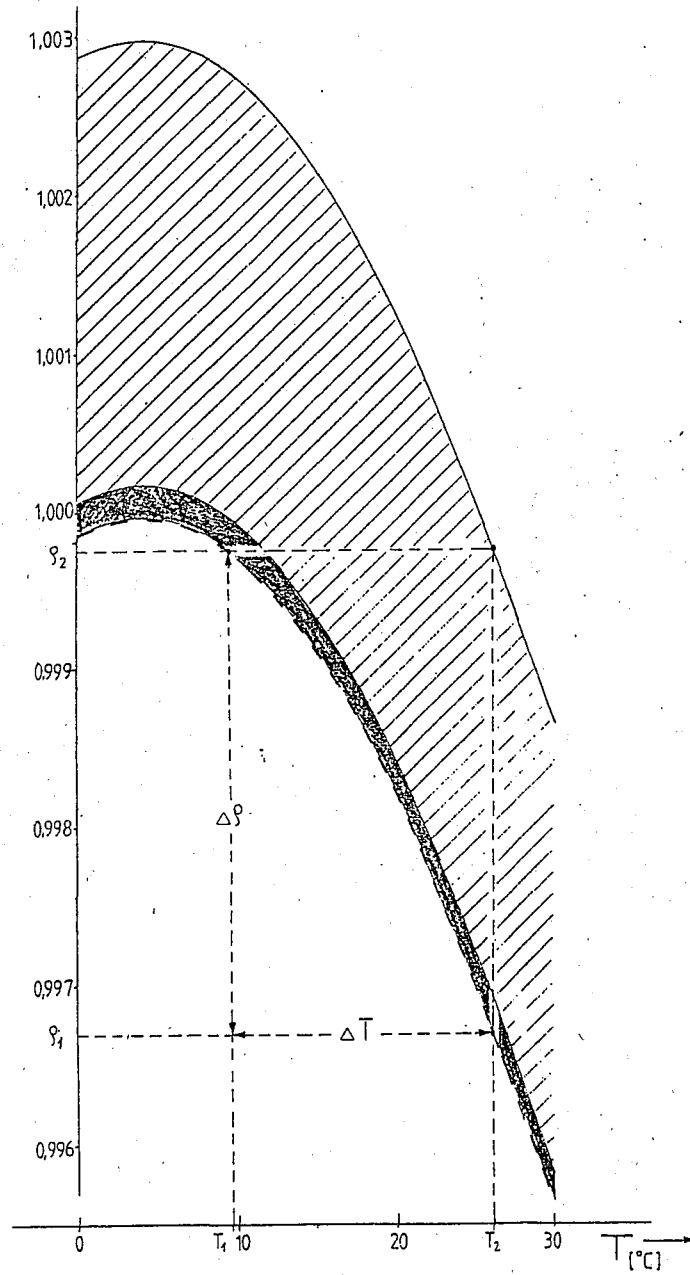


Abb. 15: Dichte des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur (gestrichelte Linie gemäß (6)), von gelösten Salzen (der geschwärzte Bereich entspricht den Veränderungen durch gelöste Salze bis zu 0,25 g Salz im Liter) und von der Schwebstoffkonzentration (der schraffierte Bereich entspricht den Dichteänderungen durch Schwebstoffe bis zu 5 g Schwebstoffe im Liter).

sich gemäß (7) in einen Dichtezuwachs aufgrund gelöster Salze umrechnen. Das Ergebnis ist in Abb.15 als Einhüllende des geschwärzten Bereichs eingezeichnet und gibt somit einen Eindruck über die (geringen) durch gelöste Salze bewirkten Dichteänderungen.

Schließlich der (vor allem bei Hochwasser) dominierende Faktor auf die Dichte des zufließenden Wassers: die Schwebstoffkonzentration. Die Berücksichtigung des Platzbedarfs suspendierter Stoffe ergibt

$$D_3 = D_2 + \frac{P}{1000} \cdot \left(1 - \frac{D_2}{D_5}\right), \quad (8)$$

wobei D_3 die Dichte des salz- und partikelhaltigen Wassers (g/ml) ist, D_2 die durch (7) ermittelte Dichte des salzhaltigen Wassers (g/ml), D_5 die Dichte der Schwebstoffe (g/cm³) und P die Schwebstoff- (=Partikel-) Konzentration (g/l) (siehe dazu Abschnitt III.1.4).

Die durchschnittliche Dichte von Schwebstoffen (Trockengewicht) in Bodenseezuflüssen wird von WAGNER und WAGNER (1978) in Übereinstimmung mit KLEINSCHMIDT (1921) zu 2,5 g/cm³ bestimmt. Damit ergibt sich eine Zunahme der Dichte des Wassers (bei $D_2=1$ und $D_5=2,5$) bei Niedrigwasser in Flüssen (0,005 g Schwebstoffe im Liter) von 0,000003 g/ml und bei Hochwasser (5 g Schwebstoffe im Liter) von 0,003 g/ml. Auch letzterer Wert ist in Abb.15 eingetragen, nämlich als Einhüllende des schraffierten Bereichs, woraus sich der große Einfluß der Schwebstoffkonzentration im Verhältnis zum Temperatur-Effekt gut ablesen läßt.

III.1.8. Veränderungen der Stofffrachten des Alpenrheins

III.1.8.1. Jährlich

Durch die Ausführungen der vorangegangenen Abschnitte ist der Zusammenhang zwischen Stofffrachten und Wasserführung des Alpenrheins dargelegt worden.

Abhängig von den hydrologischen Gegebenheiten schwanken die Jahresschwebstofffrachten sehr stark.

III.1.8.2. Langfristig

Es soll an dieser Stelle auf die langfristigen Veränderungen der Phosphorbelastung und auf den seit einem guten Jahrzehnt zu beobachtenden Anstieg der Stickstoffverbindungen hingewiesen werden.

III. 2. Das Deltawachstum und das Gefälle der letzten Rheinkilometer

Obwohl die Vorstreckungsmaßnahme der Österreichisch-Schweizerische Rheinkommission erst im Jahr 1973 aufgenommen wurde, ist eine Betrachtung der Ablagerungs- und Sedimentationsvorgänge vor diesem Datum von Interesse. Erste konkrete Angaben über den Feststoffeintrag nach der Verlegung der Rheinmündung (Fussacher-Durchstich) vermittelt die Seegrundvermessung von 1911, die von der schweizerischen Landeshydrographie durchgeführt wurde. Seither wurde das Rheindelta in einem neun- bis zehnjährigen Turnus neu vermessen. Die Ergebnisse sind jeweils in einem Bericht der Internationalen Rheinregulierung veröffentlicht worden.

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung des ermittelten jährlichen Sedimenteintrags, wonach der Rhein von 1911 bis 1979 im Jahresmittel rund 3 Mio. m³ Feststoffe in den Bodensee schüttet.

Aufnahme	Zeitraum	Mittlerer jährlicher Sedimenteintrag
Herbst 1911 Frühjahr 1921	9 Jahre	$2.6 \times 10^6 \text{ m}^3$
Frühjahr 1921 Frühjahr 1931	10 Jahre	$3.6 \times 10^6 \text{ m}^3$
Frühjahr 1931 Herbst 1941	11 Jahre	$3.4 \times 10^6 \text{ m}^3$
Herbst 1941 Frühjahr 1951	9 Jahre	$1.9 \times 10^6 \text{ m}^3$
Frühjahr 1951 Frühjahr 1961	10 Jahre	$3.8 \times 10^6 \text{ m}^3$
Frühjahr 1961 Herbst 1969	9 Jahre	$3.1 \times 10^6 \text{ m}^3$
Herbst 1969 Herbst 1979	11 Jahre	$2.9 \times 10^6 \text{ m}^3$
1911 - 1979	68 Jahre	$3.0 \times 10^6 \text{ m}^3$

Tabelle 1: Sedimenteintrag des Rheins im Bodensee seit 1911
(nach LAMBERT 1989).

Die Wirksamkeit der Vorstreckungsmaßnahme, die die Feststofffracht des Rheins von den östlichen Seeteilen fernhalten soll, konnte schon mit der Deltavermessung von 1979 bestätigt werden, aus der ersichtlich ist, daß sich das Hauptablagerungsgebiet deutlich nach Nordwesten verlagert hat (siehe Abb. 17b). Dies kommt auch in Abb. 16 zum Ausdruck, die die Entwicklungsstadien des Rheindeltas längs eines Süd-Nord-Schnittes in Verlängerung des Einmündungskanals zeigt. Der relativ geringe Zuwachs von 1969 bis 1979 (als auch von 1979 bis 1989; siehe INT. RHEINREG., 1992) ist auf die bogenförmige Vorstreckung der Mündungsdämme nach Nordwesten zurückzuführen. Südöstlich des Rheinzufusses haben nur noch die künstlich errichteten Leitdämme der Vorstreckungsbauwerke zu wesentlichen Veränderungen am Seeboden geführt. Die Ablagerungen östlich der verlängerten Rheinachse betragen für die letzte Dekade weniger als 2m (siehe dazu Abb. 17a).

Der Vergleich der Abbildungen 17a und 17b verdeutlicht, daß außer der kanalisierenden Wirkung der Leitdämme der Flachwasserbereich in nördlicher Verlängerung des Rohrspitz eine steuernde Funktion für die Ausbreitung des Alpenrheinwassers ausübt.

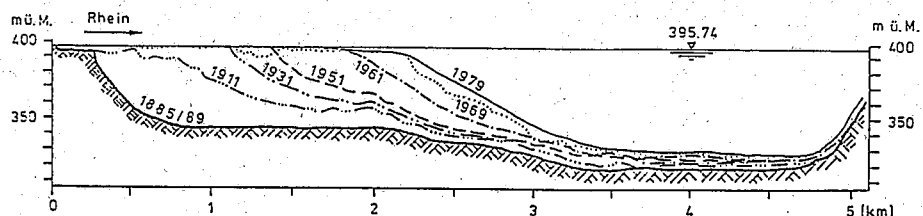


Abb. 16: Entwicklungsstadien des Rheindeltas nach der Korrektur von 1900 (Fussacher-Durchstich). Süd-Nord-Längsprofil in der geradlinigen Fortsetzung des Einmündungskanals (nach INT. RHEINREG., 1980).

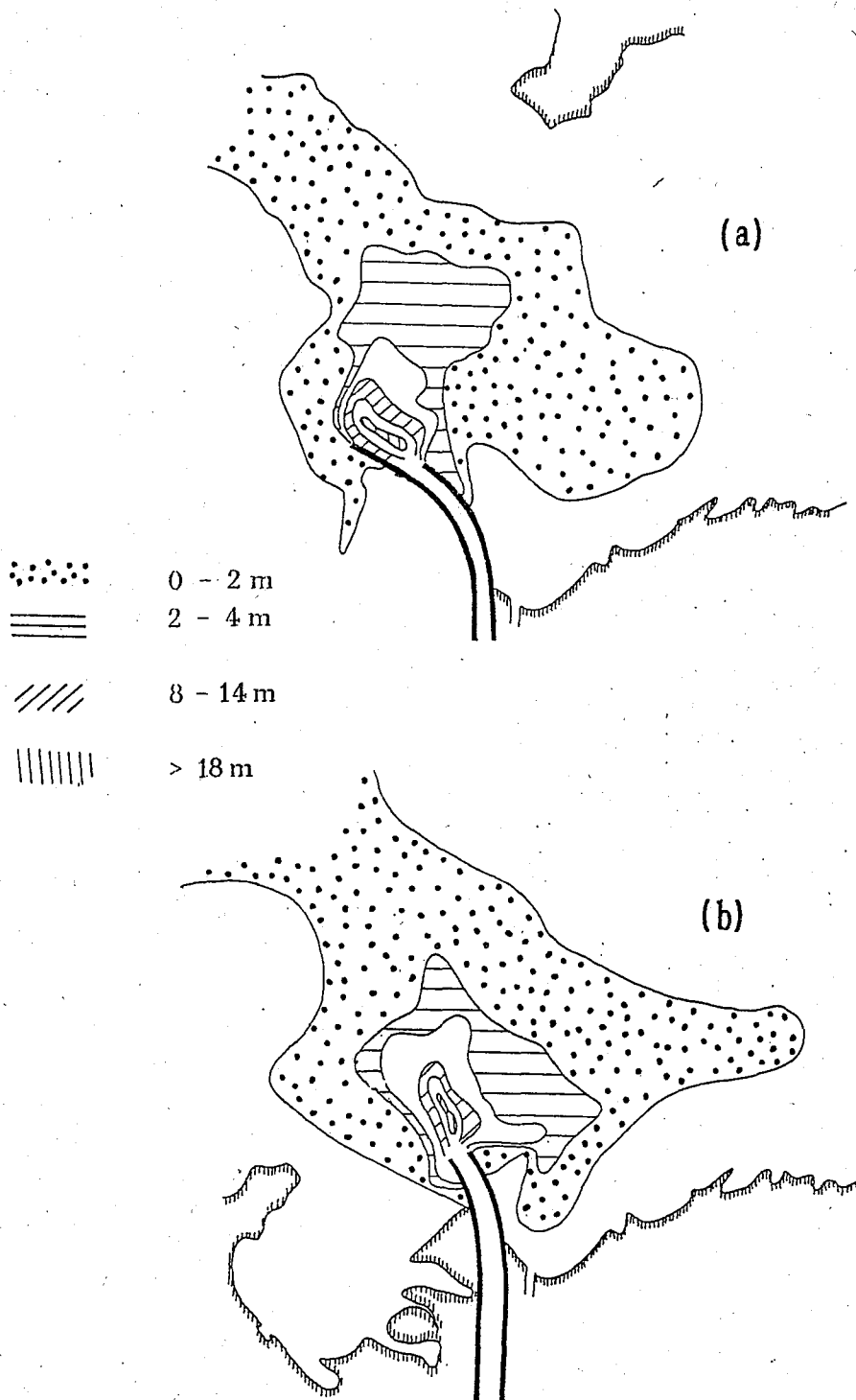


Abb. 17: Ablagerungen der Schwemmstoffe im Mündungsbereich des Alpenrheins

a) Sommer 1979 - Sommer 1989 (nach INT. RHEINREG., 1992),

b) Herbst 1969 - August 1979 (nach INT. RHEINREG., 1980).

Mit Beginn der Vorstreckungsmaßnahme 1972 wurde vorgesehen, daß die gesamte Geschiebefracht (Kiesfraktionen) des Rheins im Bereich der damaligen Mündung (km 90) ausgebaggert werden muß, was in den letzten Jahren jährlich 40 000 - 50 000 m³ Kies ausmachte (JÄGGI 1989). Dem Gerinne des ursprünglichen Fussacher Durchstichs sind heute ein Geschiebesammler und im Anschluß an diesen das eigentliche Vorstreckungsgerinne vorgelagert. Auf der Sohle dieses Vorstreckungsgerinnes und an der momentanen Mündung (Stand 1984) haben sich Ablagerungen gebildet, die aus Sand mit einem repräsentativen Korndurchmesser von 0.25 mm bestehen. Diese Fraktion entspricht etwa den größten 10% jenes Materials, das in Schwebstoffproben des Rheins vorgefunden wird. Somit hat bis zum Ende des Vorstreckungskanals eine Sortierung stattgefunden. Die Hauptmenge der Feststofffracht, bestehend aus Feinmaterial, wird somit im See abgelagert und zum großen Teil weit in den See hinausgetragen, wodurch sie sich auf einer viel größeren Bodenfläche verteilt.

Zweifellos ist das Gefälle des Rheins, bevor er in den Bodensee mündet, von Bedeutung für seine Ausbreitung im See. Dabei ist zu unterscheiden:

- die Strahlwirkung (Stärke des Einström-Impulses) des einströmenden Wassers bei unterschiedlicher Wasserführung und unterschiedlichem Wasserstand (siehe Abschnitt III. 4)
- die unterschiedlichen Absetzraten für die einzelnen Fraktionen der Schwebstoffe.

Die Vorstreckungsmaßnahmen vermindern das Gefälle im Verlauf ihrer fortschreitenden Realisierung und machen damit zwangsläufig einen Teil der durch den Rheindurchstich beabsichtigten Effekte wieder rückgängig.

Wenn man die Impulsstärke des einströmenden Wassers und die Schwebstoffzusammensetzung des zuströmenden Wassers betrachtet und dabei deren zeitliche Entwicklung im Verlauf eines Hochwassers untersuchen will, so muß man das Phänomen des "Mündungswalls" in Betracht ziehen (JÄGGI 1989). Es handelt sich hierbei um eine Ablagerung im letzten Teil des Mündungskanals, die sich regelmäßig am Ende eines Hochwassers bildet, wenn der Wasserstand im See angestiegen ist und wegen des nachlassenden Abflusses ein Rückstau entsteht. (Eine detaillierte hydromechanische Berechnung dieses Phänomens findet sich in VAW 1972). In dem überhöhten Längsprofil der Abb.18 (nach Jäggi 1989) sieht dieser Mündungswall aus wie eine Sprungschanze.

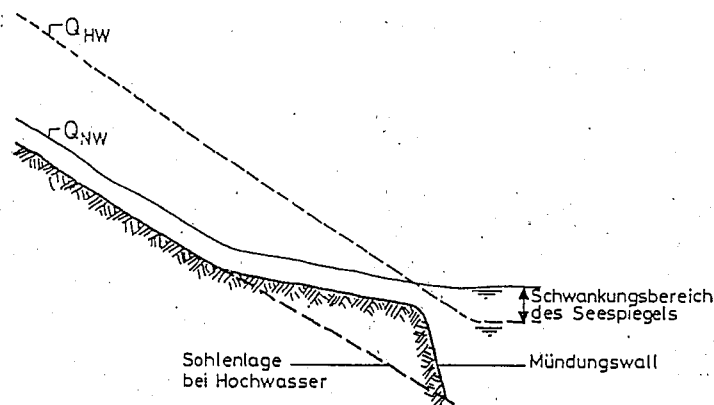


Abb.18: Schematisierte Darstellung des "Mündungswalls"
(nach JÄGGI 1989).

Beim Anstieg des Abflusses zur nächsten Hochwasserspitze werden diese Ablagerungen an der Mündung abgetragen und im weiteren Verlauf des Hochwassers wird die Sohle des Mündungskanals ausgeräumt. Dies gilt es zu bedenken, wenn die Stoffzusammensetzung des Zuflusses (siehe Abschnitt III.1) und das Phänomen der Dichteströme zu untersuchen ist.

III.3 Kurzfristige Änderungen und die langfristige Entwicklung des Wasserstands im Obersee. Der aktuelle Wasserstand als Bezugsniveau

Neuere Untersuchungen von LUFT et al. 1990 zeigen, daß der mittlere Wasserstand des Obersees den Trend einer geringfügigen Wasserstandserniedrigung aufzeigt. Für die Vorgänge im Mündungsbereich des Alpenrheins dürfte dies allerdings ohne nennenswerten Einfluß sein.

Die Wirkung von Windstauwirkungen ist wegen der großen mittleren Tiefe des Obersees von untergeordneter Bedeutung. Seichesbewegungen (Oberflächenseiches) sind nach den Beobachtungen im Bodensee nicht sehr ausgeprägt. Die Lage des Mündungsgebiets des Alpenrheins am Ostende des Obersees und zudem noch abgesetzt vom äußersten Ende bringt dort prinzipiell geringere Seiches-Schwankungen mit sich.

Der momentane Wasserstand ist von beträchtlichem Einfluß für den Zustrom der Wassermassen des Alpenrheins. Als dramatisches Beispiel sei das Hochwasser vom Juli 1987 erwähnt, als der Alpenrhein, gemessen am 19.7. bei Diepoldsau, mit $2650 \text{ m}^3/\text{s}$ einen seiner größten Abflußwerte dieses Jahrhunderts erreichte. Der Bruch des linken (noch nicht auf seine projektierte Höhe fertiggestellten) Hochwasserdamms dürfte vorallem im hohen Bodensee-Wasserstand als Folge einer Reihe von Hochwasserereignissen im Sommer 1987 zu begründen sein (BERGMEISTER 1989). (Ein weiterer Grund liegt wohl in einer Querschnittsverengung des Mündungskanals infolge von Sandablagerungen; siehe dazu auch Abschnitt III.2).

Welchen beträchtlichen Schwankungen der Wasserstand des Bodensee-Obersees unterworfen sein kann, geht aus Abb.19 hervor, in der die Jahreshöchststände in Rorschach aufgezeigt sind (aus VISCHER 1989).

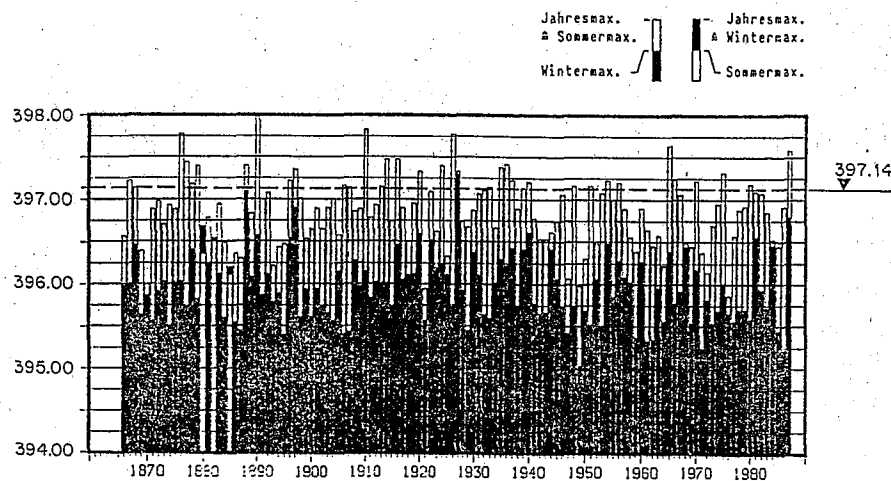


Abb. 19 : Jahreshöchststände des Wasserstands des Bodensee-Obersees in Rorschach von 1866 bis 1987 (aus VISCHER, 1989).

III.4 Der jahreszeitliche Zyklus der Schichtung ohne Berücksichtigung der Zuflüsse

Tages- und Jahresgang des Temperaturprofils eines Sees sind Ergebnis der täglichen und saisonalen Variationen der Oberflächenflüsse (Impuls- und Wärmefluß). Der momentane Wärmeinhalt einer Wassersäule entspricht dem zeitlichen Integral über die Oberflächenwärmeflüsse. Die Struktur der Wassersäule ist bestimmt durch die an der Wasseroberfläche angreifende Windschubspannung und die dadurch bewirkte Produktion turbulenter kinetischer Energie. Voraussetzung für Turbulenz im oberflächennahen Wasserkörper sind die vom Wind hervorgerufenen Triftströmungen, die sich zu einer beckenweiten Zirkulation der Wassermassen entwickeln können, und die ebenfalls vom Wind induzierten Oberflächenwellen. Der Vorgang der jahreszeitlichen Entwicklung der Temperaturschichtung eines Sees ist also ein Prozeß, der gesteuert wird durch die groß- und kleinskaligen dynamischen Bewegungsvorgänge. Es nimmt daher nicht Wunder, daß bei der theoretischen Behandlung und mathematischen Modellierung des Schichtungsverlaufs die Parametrisierung dieser Vorgänge eine zentrale Bedeutung inne hat. Die folgenden Abschnitte dieser Studie werden zeigen, daß wir bezüglich des Verständnisses dieser Prozesse immer noch am Anfang stehen.

Worauf an dieser Stelle im Zusammenhang mit dem Zufluß des Alpenrheins hingewiesen werden soll, ist, daß dessen Beitrag zum Schichtungsgeschehen des Sees nicht als einfaches aufaddierendes Hinzufügen zu einem im Prinzip bekannten Vorgang zu sehen ist, sondern vielmehr einen die sich dynamisch entwickelnden Prozesse zusätzlich verkomplizierenden Vorgang darstellt. Dabei kommt es zu vielfältigen Wechselwirkungen, wobei aber - selbst im unmittelbaren Mündungsbereich - der See-Wasserkörper die dominierende Rolle spielt.

Aus diesen Darlegungen dürfte hervorgehen, daß die in einem See beobachtete Temperaturverteilung eine Synthese aus einer Reihe von komplizierten, teilweise voneinander unabhängigen, teilweise miteinander gekoppelten Prozessen ist. Selbst wenn die meteorologischen Eingangs-Daten mit genügender Genauigkeit und Zuverlässigkeit vorhanden wären, würde doch unser Wissen über die Vermischungsvorgänge im Inneren des Sees nicht ausreichend sein, um eine detaillierte Berechnung der Temperaturstruktur zu erhalten.

Für den Bodensee kann man davon ausgehen, daß es in erster Linie die Austauschprozesse zwischen Luft und Wasser sind, die zur Beschaffenheit der Wassersäule beitragen. Abb.20 zeigt skizzenhaft einige Prozesse, die man bei der Behandlung der thermischen

Struktur eines Sees in Betracht ziehen muß, wobei keine Effekte dargestellt sind, die von horizontalen Veränderlichkeiten ausgehen.

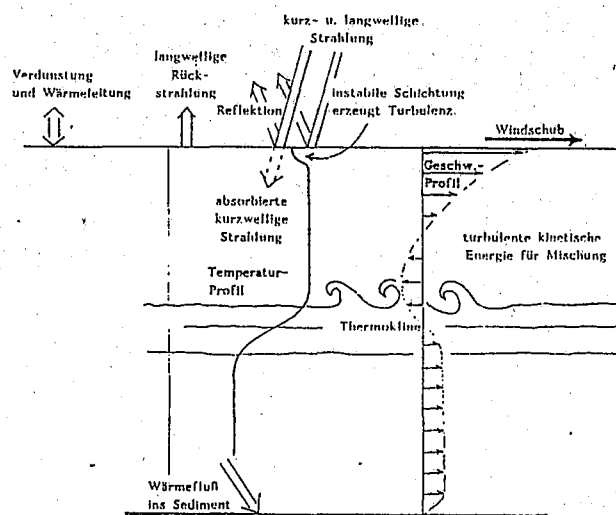


Abb.20 Skizzenhafte Darstellung von Prozesse, die die thermische Struktur eines Sees beeinflussen (ohne Berücksichtigung von Zu- oder Abflüssen).

Die wesentliche Wärmequelle für den See ist die eintretende lang- und kurzwellige Strahlung, deren Hauptanteil im See gespeichert wird. Nur ein kleiner Anteil wird an der Oberfläche reflektiert. Wegen der Wärmestrahlung des Wasserkörpers wird (gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz) langwellige Strahlung emittiert, die stets eine Senke im Wärmebudget des Sees darstellt.

Wärmeleitung und Verdunstung können sowohl eine Quelle als auch eine Senke bilden. Der in Abb.20 angedeutete Wärmefluß ins Bodensediment dürfte als unbedeutend für den Wärmehaushalt der Wassersäule anzusehen sein.

Wind, der über die Wasseroberfläche weht, bewirkt einen Impulsfluß vom Wind ins Wasser, erzeugt Geschwindigkeitsscherungen und dadurch turbulente kinetische Energie. Ein Teil davon ist verfügbar für Vermischungsprozesse. Zur Vermischung einer stabil geschichteten Wassersäule ist bekanntlich Energie notwendig, da nach der Vermischung mehr potentielle Energie gespeichert ist als zuvor.

Außer durch windinduzierte Geschwindigkeitsscherungen und instabile Schichtung wird turbulente kinetische Energie durch große Geschwindigkeitsgradienten in der Nähe der Thermokline gebildet (Kelvin-Helmholtz-Instabilität).

In Abschnitt IV.5 wird darauf eingegangen, welchen Beitrag horizontal wirkende Prozesse, hauptsächlich der Zustrom des Alpenrheins bzw. der Abfluß des Seerheins z.B. für die Deckschichttemperatur und -tiefe spielen. Es wird gezeigt, wie advective Prozesse sowohl den Wärmehalt als auch die vertikale Struktur der geschichteten Wassersäule ändern können.

Während der Impulsfluß von Frühjahr bis Herbst neben dem Wärmefluß verantwortlich ist für die Entwicklung einer Deckschicht, bestimmt im Winter, als Folge der starken Abkühlungsrate, eine tiefgreifende Konvektion den See bis in seine größten Tiefen.

Der jahreszeitliche Zyklus der Dichteschichtung im Bodensee-Obersee ist ein Prozeß, der seit langem, allerdings nur in seiner generellen Erscheinungsform bekannt ist. In unterschiedlicher räumlicher Entfernung und zeitlicher Abfolge wurden Temperaturmessungen vorgenommen. Diese Messungen waren dann Grundlage für Vertikalprofile der Temperatur an einer Meßstation, für Isothermen-Diagramme an einer Station (meist über ein Jahr) oder für über mehrere Jahre gemittelte Isothermen-Diagramme.

Beim Erstellen und Interpretieren solcher Isothermen-Diagramme muß man sich stets die Veränderlichkeiten vor Augen halten, mit denen man bei der Messung eines Temperaturprofils konfrontiert ist: Zum Einen erhalten die Daten häufig die Temperaturschwankungen aufgrund der internen Bewegungen, seien es interne Eigenschwingungen, Auf- und Abtriebsvorgänge oder die dynamische Schrägstellung der Isotherme. Zum Anderen besteht von Jahr zu Jahr ein unterschiedlicher zeitlicher Verlauf der Schichtungsentwicklung und des Schichtungsabbaus, sodaß ein mittleres Profil immer nur aus einer Mittelung von Daten erhalten werden kann, die mehr oder weniger große Schwankungen enthalten. Ein statistisch gesicherter, mittlerer Jahresgang für die Temperatur kann deshalb niemals aus einem allzu engen Netz an Isothermen bestehen.

Durch die 3-dimensionale Darstellung der räumlichen Verteilung der Isothermen wurden von LEHN (1962) sehr anschaulich die "momentanen" Schrägstellungen des Schichtungssystems veranschaulicht. Ob sich diese horizontalen Ungleichförmigkeiten - längere Meßreihen vorausgesetzt - durch einen zeitlichen Mittelungsprozeß sämtlich aufheben würden, muß in Frage gestellt werden, denn Untersuchungen von ZENGER et al. (1990) zeigen, daß im Schichtungs Aufbau ein horizontaler Gradient zwischen Überlingersee und eigentlichem Obersee besteht. Dieser wird von ZENGER et al. (1990) hauptsächlich auf die unterschiedliche Windexponiertheit der beiden Seeteile zurückgeführt.

Die soeben gemachten Ausführungen sollen aufzeigen, daß es eines beträchtlichen theoretischen Wissens über die physikalischen Prinzipien der Schichtungsentwicklung im See bedarf, wenn man sich der Frage nach den Auswirkungen der Alpenrheinvorstreckung stellt, denn es ist nicht von vornherein klar, wie die Beobachtungen zu interpretieren sind, wenn nicht angegeben werden kann, wie sich die Schichtungsverhältnisse (auch im Detail!) darstellen würden, wenn überhaupt kein Zu- oder Abfluß vorhanden wäre. Darauf wird in Abschnitt IV.5 nochmals eingegangen.

III.5. Das windgetriebene Strömungssystem des Bodensees

Es ist davon auszugehen, daß die Ausbreitung von im Wasser gelösten oder suspendierten Stoffen im See großen zeitlichen Schwankungen unterliegt, die durch die Veränderlichkeit der äußeren Anregungskräfte verursacht werden. Dabei ist es primär das durch das Windfeld über dem See induzierte großräumige Strömungsfeld, das die Advektion, d.h. die horizontale und vertikale Verfrachtung des Wassers, steuert. Dem überlagert, aber bestenfalls bei Hochwasserereignissen oder bei langanhaltend ruhigen meteorologischen Verhältnissen von gleichbedeutendem Einfluß, sind die durch den Zufluß bedingten Strömungen.

III.5.1. Die meteorologischen Gegebenheiten

Die Mischungs- und Strömungsvorgänge in einem See hängen stark vom Windenergieeintrag ab. Da der durch den Wind verursachte Energieeintrag proportional zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit ist, ist die Kenntnis des Windfeldes über dem See von großer Wichtigkeit für das Verständnis und die Parametrisierung der beobachteten Transport- und Mischungsphänomene.

Durch die meteorologischen Untersuchungen von KOPFMÜLLER (1923), HUSS und STRANZ (1970) und HUSS (1975) sind der Tagesgang der mittleren Windgeschwindigkeit sowie die Häufigkeit der Winde als Funktion der Richtung bekannt. Eine von MÜHLEISEN (1977) durchgeführte ganzjährige Meßkampagne mit 11 Stationen

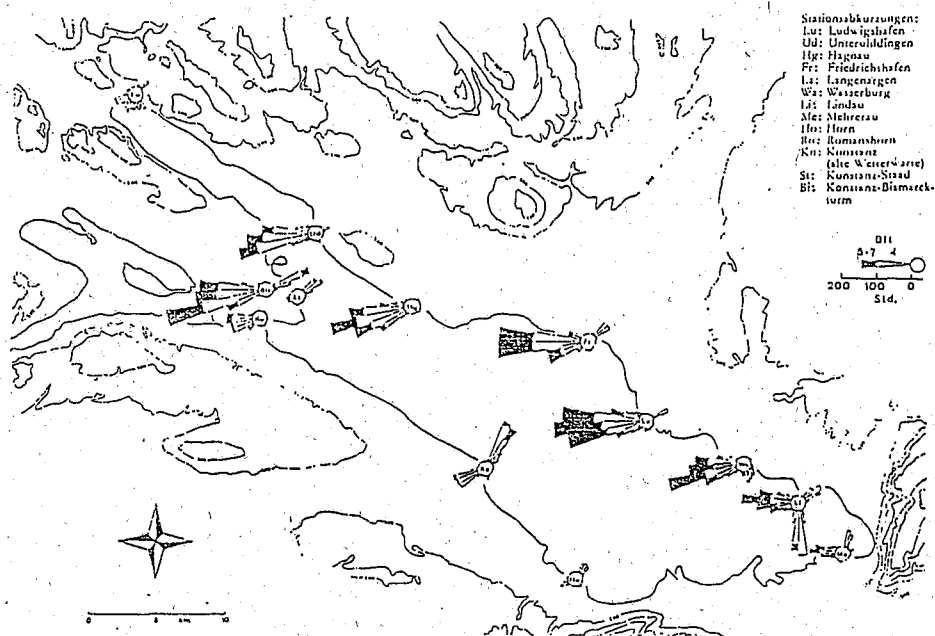


Abb. 20: Häufigkeitsverteilung der Richtungen der Starkwinde für 1968. Einteilung in 10°-Intervalle und Häufigkeit der vorkommenden Stundenmittel (aus MÜHLEISEN, 1977).

rund um den eigentlichen Obersee sowie 2 Stationen am Überlingersee ermittelt die Häufigkeit von Starkwindereignissen mit Windgeschwindigkeiten größer 5.5 m/s. Es ergibt sich (MÜHLEISEN, 1977), daß solche Starkwinde hauptsächlich aus westlichen und südwestlichen Richtungen registriert werden und daß sie am Nordufer des Bodensees häufiger auftreten als am Südufer (siehe dazu Abb.21).

Die Registrierungen der Station Konstanz-Bismarckturm werden im allgemeinen als repräsentativ für die großräumigen Windverhältnisse angesehen. ZENGER et al. (1990) zeigen allerdings, daß für südwestliche Winde aufgrund der gegebenen Geländestrukturen eine deutliche Abschattung des Überlinger Sees festzustellen ist.

Eine solche Untersuchung der Abschattungseffekte wäre auch für andere Seeteile wünschenswert, vorallem für den östlichen Teil bezüglich der Föhnstürme.

III.5.2 Beobachtete windbedingte Strömungen

Spätestens seit den Arbeiten von ELSTER und EINSELE (1937) und ELSTER (1939) ist bekannt, daß es vor allem die meteorologischen Verhältnisse über dem Bodensee sind, die für die Strömungen und Isothermenschwankungen im See verantwortlich sind. Die Beurteilung von älteren Arbeiten, in welchen die "Rheinströmung" im Obersee untersucht worden war, soll durch ein Zitat aus ELSTER (1939) vorgenommen werden:

"Die früheren Autoren, vor allem AUERBACH und SCHMALZ, haben in dem Rheinstrom die Haupttriebkraft für die Ströme im Bodensee gesehen. Bereits W.NÜMANN (1938) konnte zeigen, daß dem Rhein eine so überragende Rolle bei der Ausbildung der Bodenseeströmungen nicht zukommen kann, da das Wasser mitunter auch an den Stellen, welche maximal mit Rheinwasser vermischt sind, entgegen der normalen Stromrichtung des Rheinwassers im Bodensee strömt, also gewissermaßen stromaufwärts fließt. In den vorliegenden Arbeiten sind eine Reihe von Beispielen aufgeführt, die auf das deutlichste zeigen, daß nicht dem Rhein, sondern der lokal verschiedenen Windverteilung die Hauptrolle bei der Ausbildung der Strömungen im Obersee zukommt: Die typische Isothermenlage und damit auch die typische Stromverteilung ist im Bezirk vor Langenargen bereits ausgebildet, ehe der Rhein sein Hochwasser in den See bringt, zur Zeit der maximalen Hochwasserführung des Rheins ist die Schichtenlage und damit auch die Stromverteilung nicht extremer, sondern zeitweise eher schwächer ausgeprägt als zu anderen Zeiten. Maximale Schräglagen der Isothermen und maximale Strömungen finden wir aber z.B. Ende Oktober bei Föhnlage, als der Rhein bereits wieder wenig Wasser führt und daher

keine große Schubkraft besitzen kann. Damit soll natürlich nicht bestritten werden, daß der Rhein vor allem im östlichen Oberseegebiet die Ausbildung der Stromsysteme weitgehend beherrscht bzw. maßgeblich beeinflußt. Auch wird er besonders in den tieferen Schichten zwischen 5 und 15 m im mittleren Oberseegebiet zumindest zeitweise von bedeutendem Einfluß auf Richtung, Konstanz und Stärke sein. Schon die Ausbildung des Wirbels im mittleren Oberseegebiet läßt sich aber, wie bereits früher gezeigt wurde (ELSTER und EINSELE, 1937), nur aus der durchschnittlichen Windverteilung in diesem Bezirk erklären. Für die Ausbildung der Schichtengrenzlage ist aber nicht nur die absolute Stärke und die Richtung der Strömungen maßgebend, sondern vor allem auch die relative Stromgeschwindigkeit der einzelnen Schichten zueinander, vor allem also das Geschwindigkeitsverhältnis der oberen und der unteren Wassermassen. Dieses Verhältnis aber wird, wie leicht einzusehen ist, von den Winden stark beeinflußt."

Und an gleicher Stelle heißt es:

"Es wird das Ziel künftiger Untersuchungen sein müssen, Zusammenhänge zwischen den meteorologischen Verhältnissen und dem Stromsystem im Bodensee im einzelnen festzustellen."

Die neueren Meßkampagnen aus den Jahren 1972 (HOLLAN, 1974), 1979 (KROEBEL, 1979; HOLLAN 1984, 1990) und selbst die ganz auf den Mündungsbereich des Alpenrheins konzentrierten Messungen von 1980 (VAW, 1981; LAMBERT, 1982) belegen eindrucksvoll den von ELSTER postulierten dominierenden Einfluß der Windverhältnisse auf die Stromsysteme des Bodensees.

III.5.3. Numerische Modelle

Auf die mit der mathematisch-numerischen Modellierung verknüpften Probleme hinsichtlich der Energieübertragung von Wind- in Strömungsbewegung an der Grenzfläche Luft-Wasser soll hier nicht eingegangen werden. Als Randbedingung an der Wasseroberfläche wird die Schubspannung vorgegeben, die in der Parametrisierung

$$\tau = C_D \rho_L u_*^2$$

zugrunde gelegt wird. Dabei ist u_* die Windgeschwindigkeit in einem geeigneten Referenzniveau (siehe dazu ZENGER et al. 1990c), C_D der passend gewählte Drag-Koeffizient und ρ_L die Dichte der Luft.

Wie unter III.5.1 schon dargelegt wurde, ist das Windfeld in der Regel nur an wenigen Meßstellen bekannt. Von dort muß es auf die Berechnungspunkte des numerischen Gitters interpoliert werden.

Die bisher anspruchsvollsten Modellrechnungen bezüglich der dynamischen Reaktion des Bodensee-Obersees auf Windanregung wurden von HOLLAN and SIMONS 1978 durchgeführt, wobei ein mehrere Tage anhaltendes Westwindereignis im Oktober 1972 als treibender Mechanismus für die Nachbildung der Strömungen in einem dreidimensionalen instationären Finite-Differenzen-Modell zugrunde gelegt wurde. Die Ergebnisse wurden in Form von Zeitreihen an Meßpunkten diskutiert, an denen exakt synoptische Strömungsmeßreihen mit selbsttätig registrierenden Strommessern aufgenommen wurden (siehe HOLLAN 1974).

Ein horizontal besser aufgelöster Einblick in die beckenweiten, windinduzierten Strömungsfelder des Bodensee-Obersees wurde gewonnen durch die numerischen Rechnungen von SERRUYA et al. 1984, wobei ein theoretisch vereinfachter Ansatz gemacht wurde und das Hauptaugenmerk auf der zweidimensionalen Struktur der vertikal integrierten Zirkulation aufgrund von stationären Windverhältnissen lag. Durch die Bedingung der Stationarität scheiden die oszillierenden und andere markante zeitliche Änderungen des Bewegungsfeldes aus und die Wind- und Zuflusssituation wird durch charakteristische zeitliche Mittelwerte vorgegeben. Dennoch ist anzunehmen, daß Hauptformen der Zirkulation aufgrund solcher Randbedingungen in groben Zügen aufgezeigt werden können.

Von den in SERRUYA et al. (1984) ausführlich beschriebenen Untersuchungen sollen nachfolgend zwei Rechenergebnisse vorgestellt werden, denen zwei sehr unterschiedliche Windlagen zugrundeliegen. Wie in Abb.22 zu sehen ist, führt ein räumlich und zeitlich konstanter Längswind, der vom nordwestlichen See-Ende her weht,

zu einer Zirkulation, die im flachen ufernahen Bereich in Windrichtung und im tiefen mittleren Teil des Seebeckens entgegengesetzt zur Windrichtung verläuft. Hierdurch entstehen zwei große gegenläufig drehende Zellen. (Bei regelmäßig geformten Becken ist dies die prinzipielle Struktur der zweidimensionalen Zirkulation).

Die Lösung der Abb.22 ist ein Beispiel für ein ausschließlich durch die Veränderlichkeit der Bodenform gesteuerte Zirkulation, denn das Windfeld ist als konstant vorausgesetzt. Wenn eine räumlich veränderliche Anregung erfolgt, tritt ein Zirkulationsanteil hinzu, der aus einer Drehbewegung entsprechend der horizontalen Scherung des Windfeldes besteht (RAO et al., 1970).

Diese Überlagerung der beiden Zirkulationsbestandteile kommt z.B. für den Fall eines schematisierten Föhnsturms zum Tragen, der die Wasserbewegung in der östlichen Hälfte des Sees stark anfacht (aus SERRUYA et al., 1984). Die angenommene Schubspannungsverteilung des Windes ist in Abb.23, oben, eingetragen und läßt eine extreme Scherung erkennen, die bedingt ist durch die orographischen Verhältnisse in der Umgebung des Sees sowie durch die Zunahme des Windes und das Anwachsen des Seegangs seewärts des südöstlichen Uferabschnitts. Die in Abb.23, unten, dargestellte Zirkulation weist eine starke, die volle Breite des Sees einnehmende Drehbewegung entgegen dem Uhrzeigersinn auf.

In einem zweiten Schritt ermitteln SERRUYA et al. (1984) die vertikale Abhängigkeit der Strömung durch die lokale Zerlegung der vertikal integrierten Bewegung in Drift- und Gradientströmungsanteil, um dann als letzten Schritt die advective Verlagerung von Wasserteilchen durch Bahnintegration der drei Komponenten des Strömungsfeldes zu bestimmen.

Obwohl dieses Verfahren nur als sehr grobe Annäherung an die dreidimensionalen Bahnversetzungen eines passiven, keinen Diffusionsprozessen unterworfenen Teilchens betrachtet werden kann - zeitliche Veränderlichkeiten und dynamische Wirkungen der Dichteschichtung wurden nicht berücksichtigt -, unternehmen SERRUYA et al. (1984) aufgrund der so ermittelten Modellergebnisse eine Interpretation der auffälligen Sedimentverteilung in der westlichen Seehälfte. Darauf soll im Abschnitt III.6 eingegangen werden.

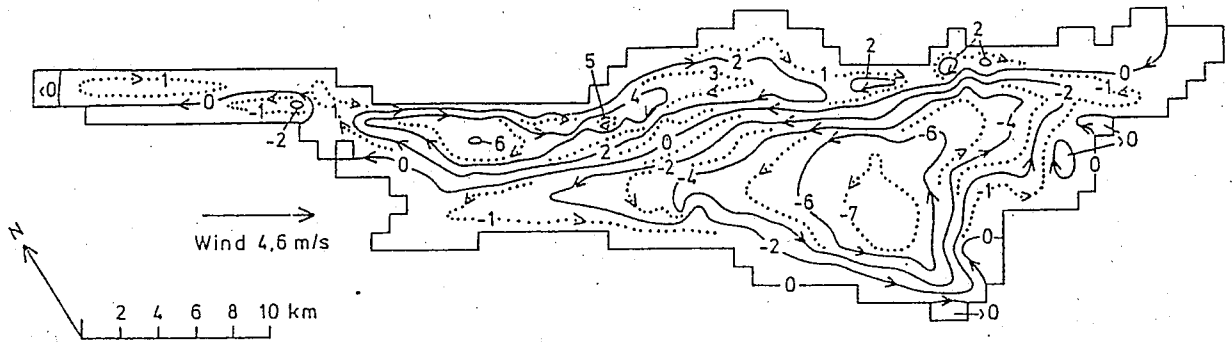


Abb.22 : Zweidimensionale, vertikal integrierte Zirkulation im Bodensee-Obersee für konstanten Längswind der Stärke 4,6 m/s. Die Stromfunktion ist in Abständen von $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ gezeichnet (aus SERRUYA et al., 1984).

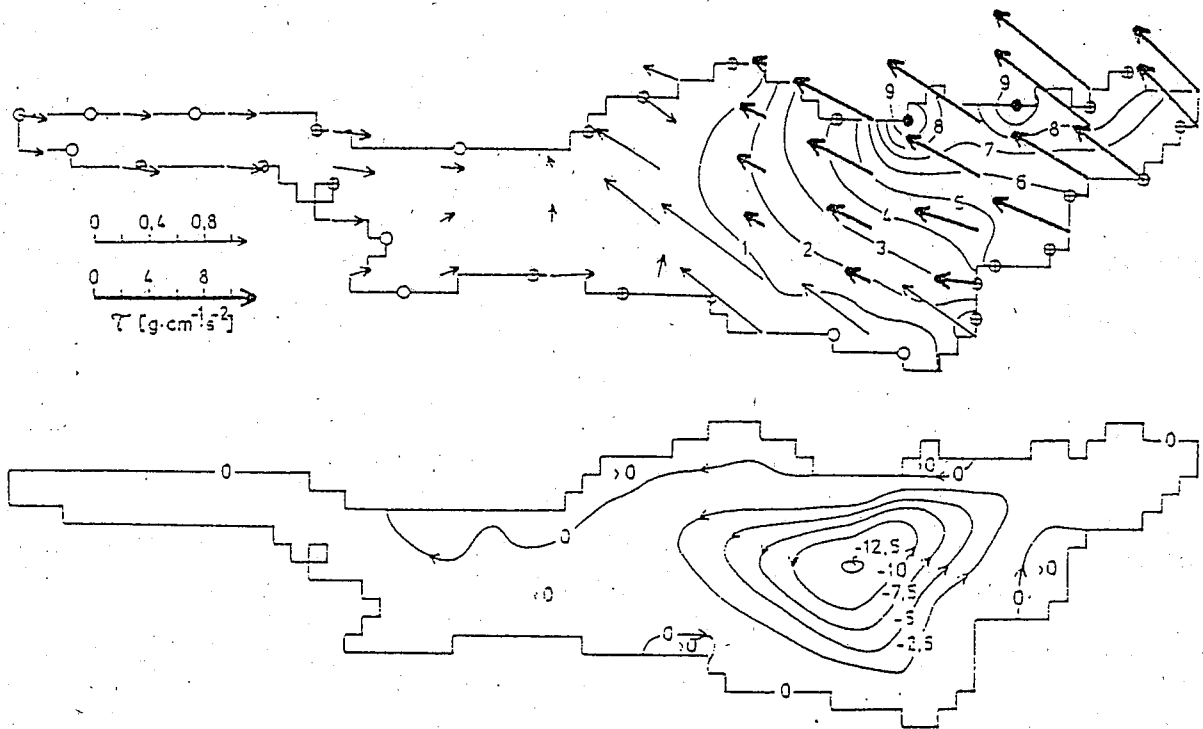


Abb.23, oben: Schubspannungsverteilung eines schematisierten Föhnsturms. Die Größe der lokalen Schubspannungsvektoren ist der beigelegten Skala zu entnehmen. Auch dargestellt sind Linien gleichen Schubspannungsbetrags (aus SERRUYA et al., 1984).

Abb.23, unten: Zweidimensionales, vertikal integriertes Zirkulationssystem im Bodensee-Obersee für den Föhnsturm des obigen Bildes. Die Stromfunktion ist in Abständen von $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ gezeichnet (aus SERRUYA et al., 1984).

III.6. Interne Schwingungen

Interne Schwingungen sind mit teilweise beträchtlichen Vertikalverlagerungen der horizontalen Dichtehorizonte des geschichteten Sees verbunden, sodaß ihr Auftreten für den zufließenden Wasserkörper eine ständige Veränderung der Zuflußbedingungen bewirkt, zumal mit dem Auf und Ab der Dichtehorizonte eine starke Stromscheidung im Bereich des größten vertikalen Dichtegradienten (der Thermokline) einhergeht. Dies hat zur Folge, daß der Einschichtungs- und die horizontale Ausbreitung des Flußwassers anders abläuft als im Falle eines ruhenden Seewasserkörpers. Darauf wird in Abschnitt IV.8 ausführlich eingegangen.

Für den Bodensee wurden die internen Seiches relativ spät nachgewiesen, wenn man bedenkt, daß schon von WEDDERBURN (1911) die internen Eigenschwingungen des Loch Ness und des Loch Earn beschrieben wurden. Durch intensive Meßkampagnen seit Anfang 1960 erkannte LEHN (1963, 1965, 1968) die Bedeutung der periodischen vertikalen Verlagerungen der Isothermen und der dadurch verursachten Strömungen.

Wie für den Bodensee zum ersten Mal 1972 durch den umfangreichen Einsatz ozeanographischer Meßgeräte in genügender raumzeitlicher Synopse nachgewiesen wurde (HOLLAN, 1974) und nochmals durch intensive, seit 1986 in einem Teilprojekt des SFB248 getätigte Beobachtungen bestätigt wurde (ZENGER et al., 1990), sind die internen Seiches während der Sommer- und Herbstmonate ein ständig wirkender Prozeß. Trotz der Beschränkung der letztgenannten Messungen auf den Überlinger See zeigt sich (ZENGER et al., 1990) die Bedeutung einer seeweiten Schwingung (der Grundschwingung), die natürlich auch am anderen Ende des Sees (also bei der Alpenrheinmündung) ihre Wirkung zeigt.

Wie die ausführlichen Messungen von 1972 gezeigt haben (HOLLAN, 1974), werden aber auch Schwingungsordnungen interner Seiches angeregt, die periodenmäßig in der Nähe (aber unterhalb) der lokalen Trägheitsperiode (für den Bodensee: 16.3 h) liegen, und theoretische Modelluntersuchungen (BÄUERLE, 1981) zeigen die Vielfalt an möglichen Schwingungsstrukturen, die vorallem im zentralen und östlichen Obersee ausgebildet sein können.

Neuere numerische Rechnungen mit dem Zweischichtenmodell (BÄUERLE, 1989, 1991), die im Auftrag der LfU ausgeführt wurden, verdeutlichen den bestimmenden Einfluß der Dichteschichtung (zusammen mit der Corioliskraft) auf das zeitliche und räumliche Spektrum der internen Eigenschwingungen.

Aus den vielfältigen Rechenergebnissen seien zwei Beispiele vorgestellt, die unterschiedliche, aber jeweils charakteristische Schwingungsstrukturen aufweisen. Abb.24 zeigt (als Ausschnitt über dem östlichen Teil) die Stromellipsen und die Abbildungen 25 und 26 zeigen die Grenzflächenauslenkungen der 1.Schwingungsordnung (der Grundschiwingung) bei Schichtungsverhältnissen, wie sie typisch für die Sommermonate sind. Die fetten Punkte im Zentrum der amphidromischen Systeme zeigen zyklonale Drehrichtung der Schwingungsstrukturen an (Abb.25 und Abb.26, sowie Abb.28 und Abb.29), die offenen Kreise stehen für antizyklonale Drehrichtung. Man erkennt zum einen (Abb.26) die im Gegenuhrzeigersinn umlaufende Aufwölbung bzw. Absenkung der Temperatursprungschicht mit einer mehrtägigen Periode und zum anderen (Abb.24) das nahezu geradlinige Hin- und Herpendeln der Strömung im Uferbereich (wie stark sich die mit der Grundschiwingung verknüpfte Schwingungsaktivität im ufernahen Bereich konzentriert, ist wesentlich von der Stärke der Schichtung abhängig).

Ganz anders zeigen sich die Auslenkungs- und Strömungsverhältnisse für die Eigenschwingungen höherer Ordnung (die gleichwohl häufig angeregt werden; siehe Abb.30): Die Auslenkungen der Grenzfläche sind nicht auf den ufernahen Bereich beschränkt (Abb.29), das Strömungsmuster ist stärker strukturiert und die Strömungsrichtungen haben einen eher rotierenden Charakter (Abb.27).

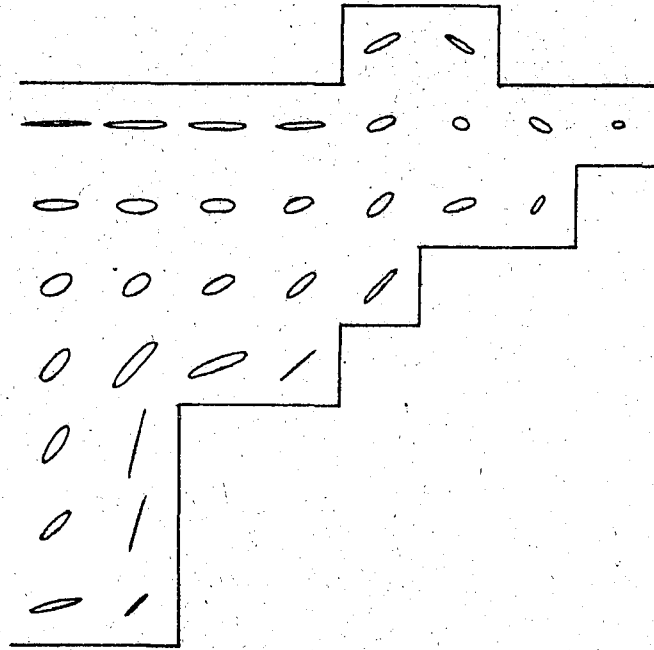


Abb.24 : Die Strömungsvektoren der 1.Schwingungsordnung über dem östlichen Teil des Obersees im Verlauf einer Schwingungsperiode.

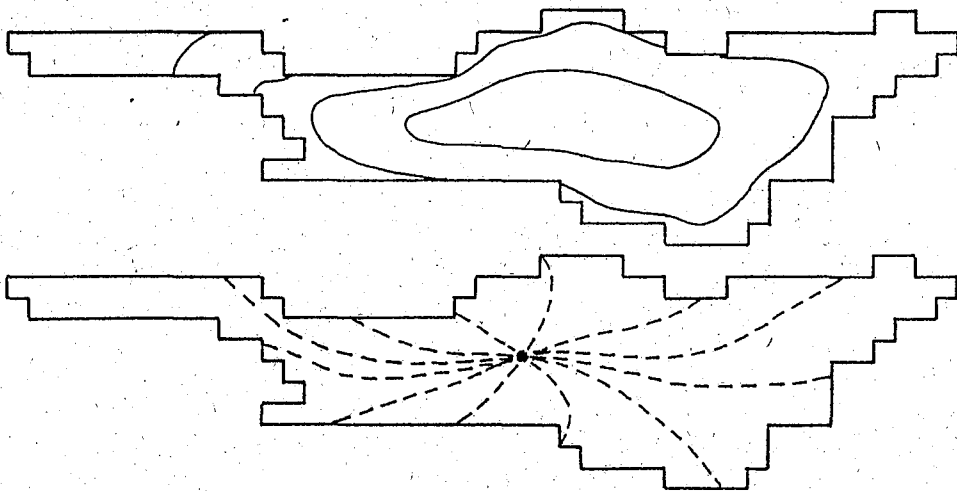
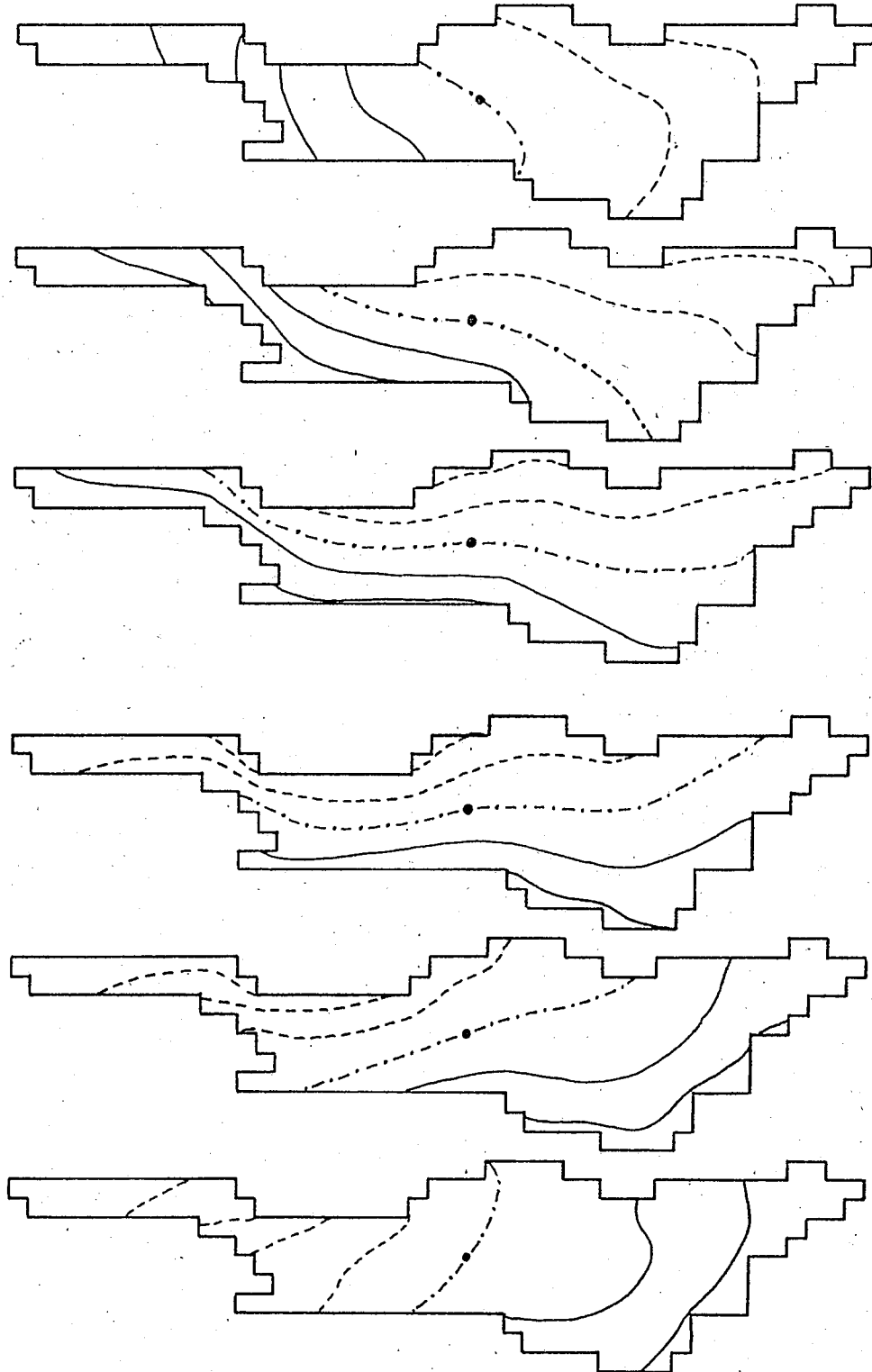


Abb.25: Die Amplituden (oben) und Phasen (unten) der Grenzflächenauslenkung der 1.Schwingungsordnung des Bodensee-Obersees.

Abb.26: Die Grenzflächenauslenkung der 1. Schwingungsordnung für 6 unterschiedliche Phasenlagen im Verlauf einer halben Schwingungsperiode.



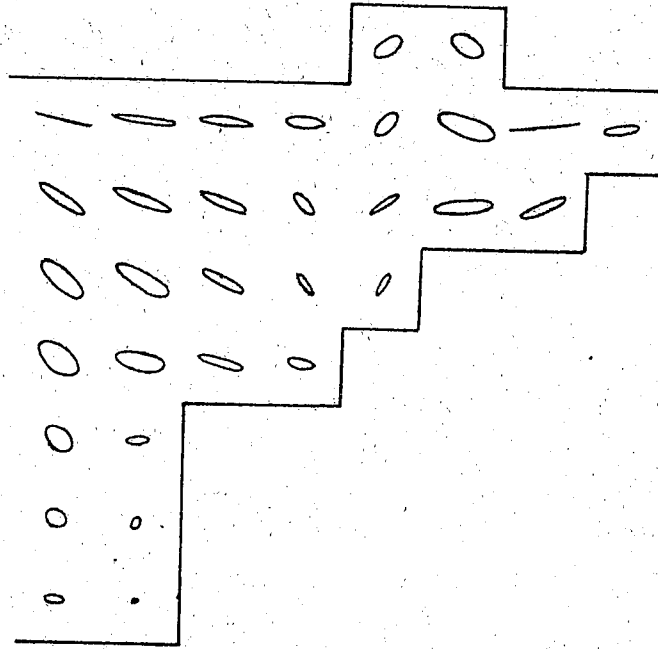


Abb.27: Die Strömungsvektoren der 15. Schwingungsordnung über dem östlichen Teil des Obersees im Verlauf einer Schwingungsperiode.

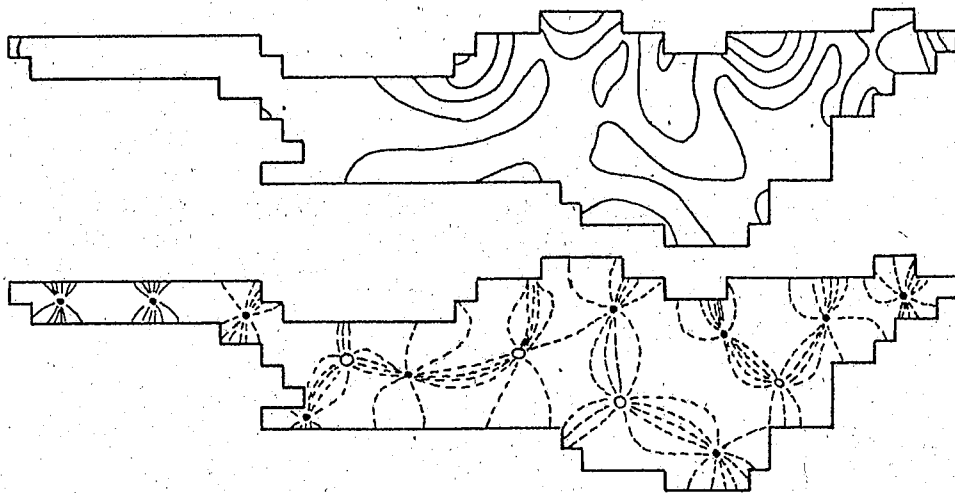
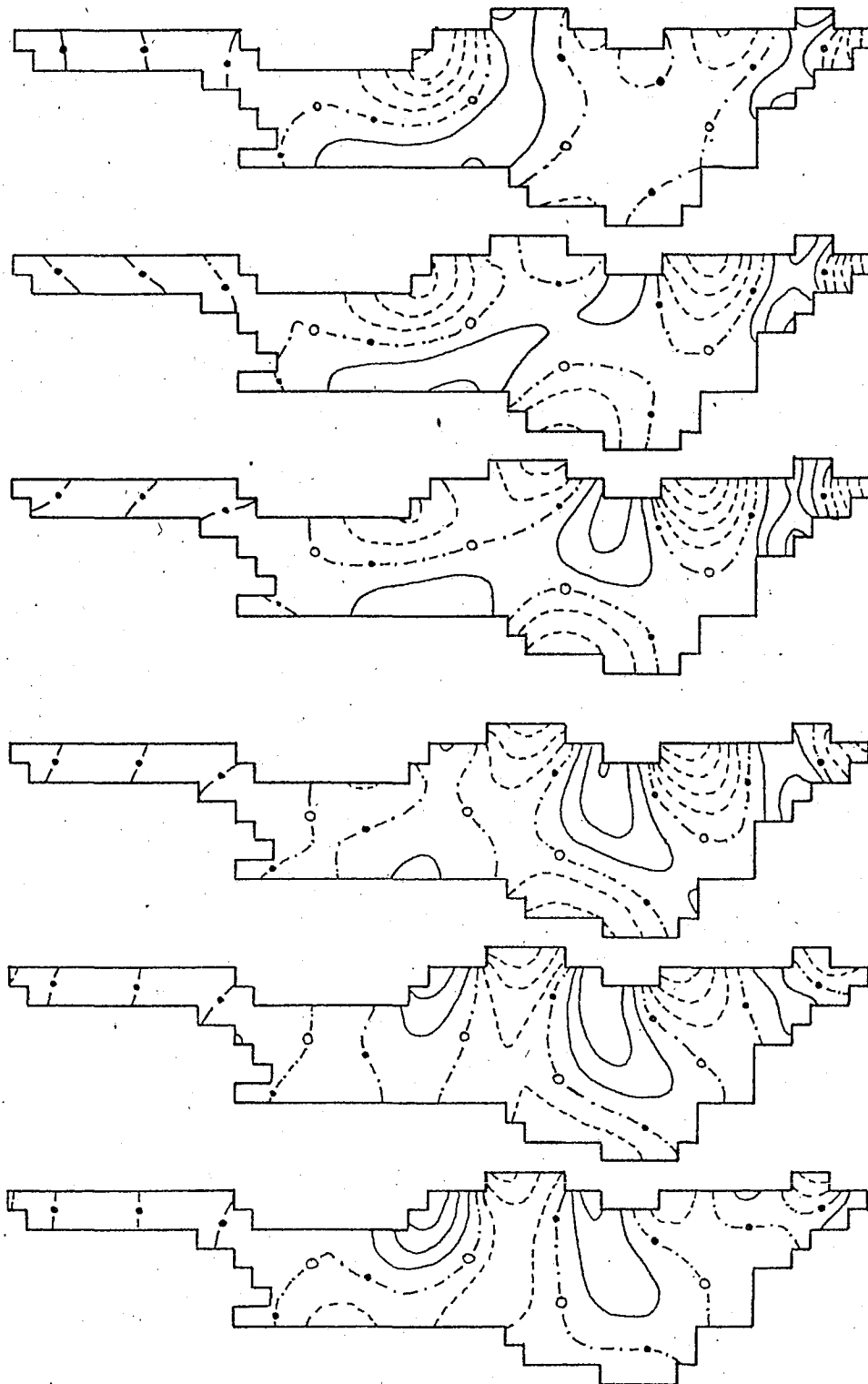


Abb.28: Die Amplituden (oben) und Phasen (unten) der Grenzflächenauslenkung der 15. Schwingungsordnung des Bodensee-Obersees.

Abb.29: Die Grenzflächenauslenkung der 15. Schwingungsordnung für 6 unterschiedliche Phasenlagen im Verlauf einer halben Schwingungsperiode.



Daß diese Modellergebnisse physikalische Realitäten sind, zeigen die Ergebnisse der Meßkampagne von 1972 (HOLLAN, 1974), wovon Abb.31 als augenfälliges Beispiel präsentiert sei. Es zeigt sich, daß an der Meßstation S8 in der Bregenzer Bucht die Isothermen immer wieder periodische Vertikalverlagerungen mit Amplituden von einigen Metern erfahren.

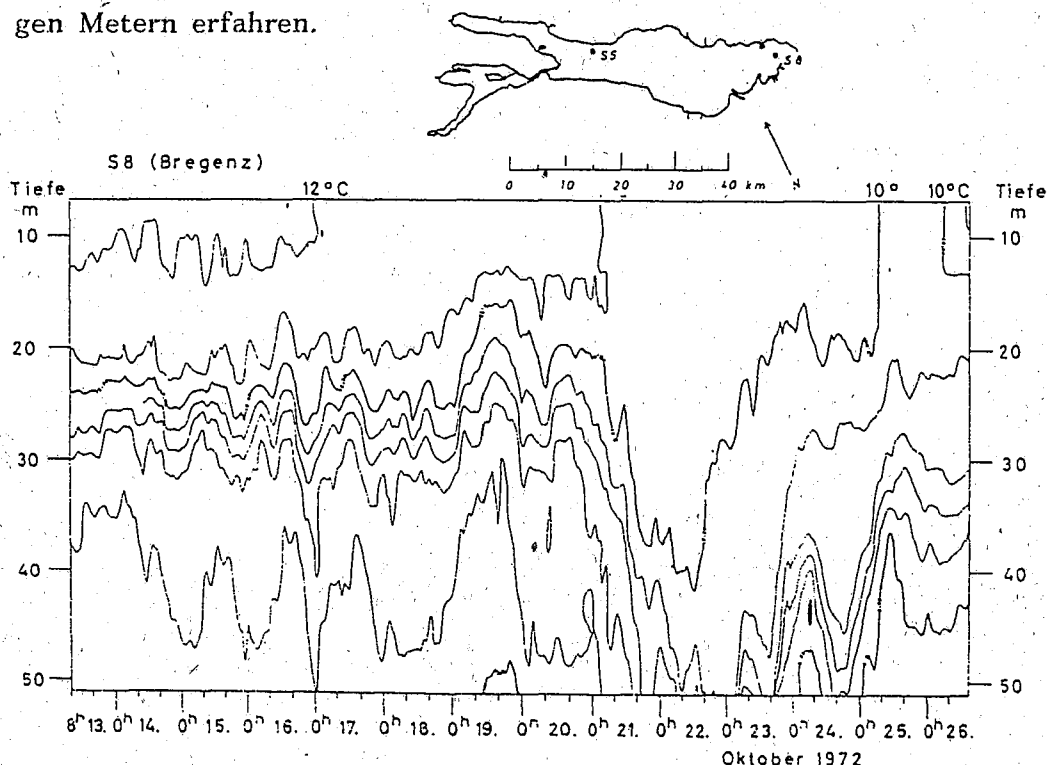


Abb. 31: Isoplethendiagramm der Temperaturschwankungen infolge interner Wellen und Auftriebs- bzw. Absenkungsbewegungen an der Meßstation S8 (aus HOLLAN, 1984).

Quasi als Nebenprodukt einer Meßkampagne, die von der VAW im Jahre 1980 mit dem Ziel durchgeführt wurde, die Ausbreitung des Alpenrheins im östlichen Teil des Bodensees zu untersuchen (ausführlicheres dazu siehe Abschnitt IV.2), ergaben sich periodische Schwankungen der Temperatur in der Meßtiefe des Strömungsmessers (BSR1 in 30 m Tiefe, 6 m über Grund; siehe dazu Abb.31). Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeiten bis 40 cm/s (!) wurden beobachtet, die einen periodischen Wechsel der Strömungsrichtungen in ungefähr entgegengesetzte Richtungen (NW/SE) aufwiesen (Abb.35). Ein Vergleich mit den Strömungsmustern der Abb.27 soll lediglich auf die qualitativen Übereinstimmungen hinweisen; eine ausführliche Darlegung der Rechenergebnisse ist zur Zeit in Ausführung (BÄUERLE, 1991).

Die Konsequenzen, die sich aus dem Vorhandensein eines von internen Schwingungen bewirkten Strömungsfeldes für das Einschichtungsverhalten des Alpenrheins ergeben können, werden - wie gesagt - in Abschnitt IV.8 diskutiert.

IV. WECHSELWIRKUNGEN PHYSIKALISCHER ART

IV.1. Einschichtung aufgrund der Dichte-Relationen

Aufgrund der Darlegungen des Abschnitts III.1 ist klar, daß sich der Vorgang des Zufließens des Alpenrheins in den Bodensee-Obersee wechselnd und in vielfältiger Weise einstellt, je nachdem wie sich die Dichten des Flußwassers bzw. des Seewassers zueinander verhalten. Der Einschichtungsvorgang ist schon allein dadurch kompliziert und variabel, daß der Zustrom großer zeitlicher Veränderlichkeit unterliegt (siehe Abschnitt III.1) und das Seewasser über den größten Teil des Jahres geschichtet ist (siehe Abschnitt III.4). Obwohl nicht davon ausgegangen werden kann, daß sich die Einschichtungstiefen des Zuflusses von Alpenrheinwasser in den See allein aufgrund einer Zuordnung von Flußwasser zu Seewasserkörpern gleicher Dichte ergeben, wird durch eine von WAGNER und WAGNER (1978) durchgeführte Bilanzierung eine Reihe von Aussagen gewonnen, die den nicht unwesentlichen Einfluß des Alpenrheinzuflusses auf den Stoff- und Wärmehaushalt des Bodensees belegen.

Da diese Methode aber die Vermischungsvorgänge beim Eindringen des Flusses in den See in keiner Weise in Betracht zieht, lassen sich auch keine Schlüsse auf eventuelle Auswirkungen der Vorstreckungsmaßnahme ableiten.

Es wird schon an dieser Stelle deutlich, daß ein prinzipieller Nachteil bei der vorzunehmenden Betrachtung über die Auswirkungen der Vorstreckungsmaßnahme darin liegt, daß unsere Kenntnisse von den Prozessen beim Übergang vom Fluß (wie er sich unmittelbar vor seinem Zustrom darstellt) in den Wasserkörper des Sees (wenige km vom Ende des Kanals entfernt) sehr lückenhaft und die Möglichkeiten einer quantifizierenden Erfassung deshalb äußerst begrenzt sind.

IV.2. Einstrom, Einschichtung und Vermischung des Alpenrheins im Obersee

In diesem Abschnitt soll die Dynamik des Einstromvorgangs, die Einschichtung und die Vermischung des Alpenrheins im Obersee im Nahbereich der Mündung untersucht werden. Dabei wird zunächst davon abgesehen, daß die Wassermassen des Sees normalerweise nicht in Ruhe sind. (In den Abschnitten IV.7 und IV.8 werden die Modifikationen erläutert, die sich ergeben, wenn man von dieser Annahme abgeht).

Die Richtung des Rheinwassers im See ist zunächst durch den Einstromimpuls gegeben. Durch die ständige Vorstreckung der Alpenrhein-Mündung ändert sich die mittlere Richtung dieses Einstromimpulses und durch die Verlängerung der Vorstreckung vermindert sich das Gefälle (siehe Abschnitt III.2). Wie sich dadurch bei vergleichbarer Wasserführung des Alpenrheins die Stärke dieses Einstrom-Impulses verhält, ist gleichbedeutend mit der Frage des Impulsverlustes durch horizontalen Impulsaustausch an seitlichen, festen Berandungen.

Die Ausbreitung des zuströmenden Wassers hängt nun in starkem Maße davon ab, welcher Dichteunterschied zwischen Flußwasser und Seewasser im Verlauf des Zustromvorgangs maßgebend ist. Dabei ist im Prinzip von drei unterschiedlichen Erscheinungsformen auszugehen: Aufgleiten des Flußwassers auf das Oberflächenwasser des Sees (overflow), Zwischenschichtung des Flußwassers und Auffächerung in einem bestimmten Dichte-Horizont (interflow) und Zustrom über Grund bis in die größten Tiefen des Sees (underflow).

Wie die in Abschnitt IV.1 vorgestellten Untersuchungen von WAGNER und WAGNER (1978) ergeben haben, gelangt der größte Teil des Zuflusswassers unter die Thermokline. Sieht man ab von den wenigen, an Hochwasserereignisse gekoppelte, tiefenwärtsgerichteten Transporten, so stellt sich diese Zwischenschichtung folgendermaßen dar:

Als Tauchstrahl erfährt der Zustrom nach dem oben erwähnten Impulsverlust durch seitliche Reibung einen weiteren Impulsverlust durch turbulente Zumischung (Entrainment) des umgebenden Seewassers.

Während weniger Hochwassertage des Jahres sind die Voraussetzungen gegeben für den Zustrom bis in große Wassertiefen. Das Auftreten von grundberührenden Tauchstrahlen (LAMBERT, 1982) ist prinzipiell nur möglich, wenn das zuströmende Flußwasser eine relativ hohe Dichte aufweist, und dies ist korreliert mit Abfluß-Spitzenwerten und den damit einhergehenden hohen Feststoffkonzentrationen des Zuflusses.

Wegen der durch die Vorstreckungsmaßnahme gegebene Streckenführung ist der Alpenrhein bei Hochwasser nach seinem Eintritt in den Bodensee als gegen Westen einseitig begrenzter Tauchstrahl zu bezeichnen. In seinem weiteren Verlauf erfährt der Trübestrom durch den Seerücken (in der nördlichen Fortsetzung des Rohrspitz) eine Ablenkung (zum Zeitpunkt von 1980) nach N-NNO. Da man davon ausgehen kann, daß bei Hochwasser der Rhein sich unterhalb der Oberfläche einschichtet, ist der momentane Wasserstand hierfür von untergeordneter Bedeutung.

Für die Beeinflussung des gegenüberliegenden nördlichen Ufers durch die Schwebstoffwolke eines Rheinhochwassers spielt die Schwelle des Seerückens zusammen mit dem Einstromimpuls des Rheinwassers und unter Berücksichtigung des Fortschritts der Vorstreckungsmaßnahme sicherlich eine bedeutende Rolle. Es wäre zu prüfen, wie die Verhältnisse im Sommer 1987 waren, als die Rohwasserentnahme beim Seewasserwerk Nonnenhorn durch die Trübstoffe des Alpenrheins stark beeinträchtigt war.

Der Begriff des "Tauchstrahls" beschreibt angesichts des beobachteten Zuflußverhaltens des mit Trübstoffen beladenen Alpenrheins die Zustände im Mündungsbereich nicht sehr realistisch: Seit alters her wird dieser Vorgang als "Rheinbrech" bezeichnet. Die folgende Beschreibung ist aus LEHN (1965) entnommen:

"Milchig-trübes Alpenrheinwasser schiebt sich in den Bodensee vor und taucht dann wie ein Wasserfall unter das Seewasser hinunter; an der Grenze beider Wasserkörper sammelt sich streckenweise der hereintransportierte schwimmende Unrat an".

Der analoge Vorgang spielt sich bei der Einmündung der Rhone in den Genfer See ab, wo die Eintauchstelle des Zuflusses im See von den Einheimischen "la bataillere" genannt wird (FOREL, 1887).

Die theoretische Behandlung dieses Phänomens wurde für den "Rheinbrech" bisher nicht in Angriff genommen. Es ist zu erwarten, daß sich dahinter - vom hydrodynamischen Standpunkt betrachtet - ein schier unlösbares Problem verbirgt.

Im Sommer 1980 wurde von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich ein Pilotstudie durchgeführt, deren Ziel es war, die Rheinwassermassen im Nahbereich der Mündung bei unterschiedlichen Abfluß- und Schichtungsverhältnissen im Einmündungsbereich genauer zu lokalisieren. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in einem Bericht der VAW (1981) dokumentiert, und selektive Resultate sind von LAMBERT (1982) publiziert worden.

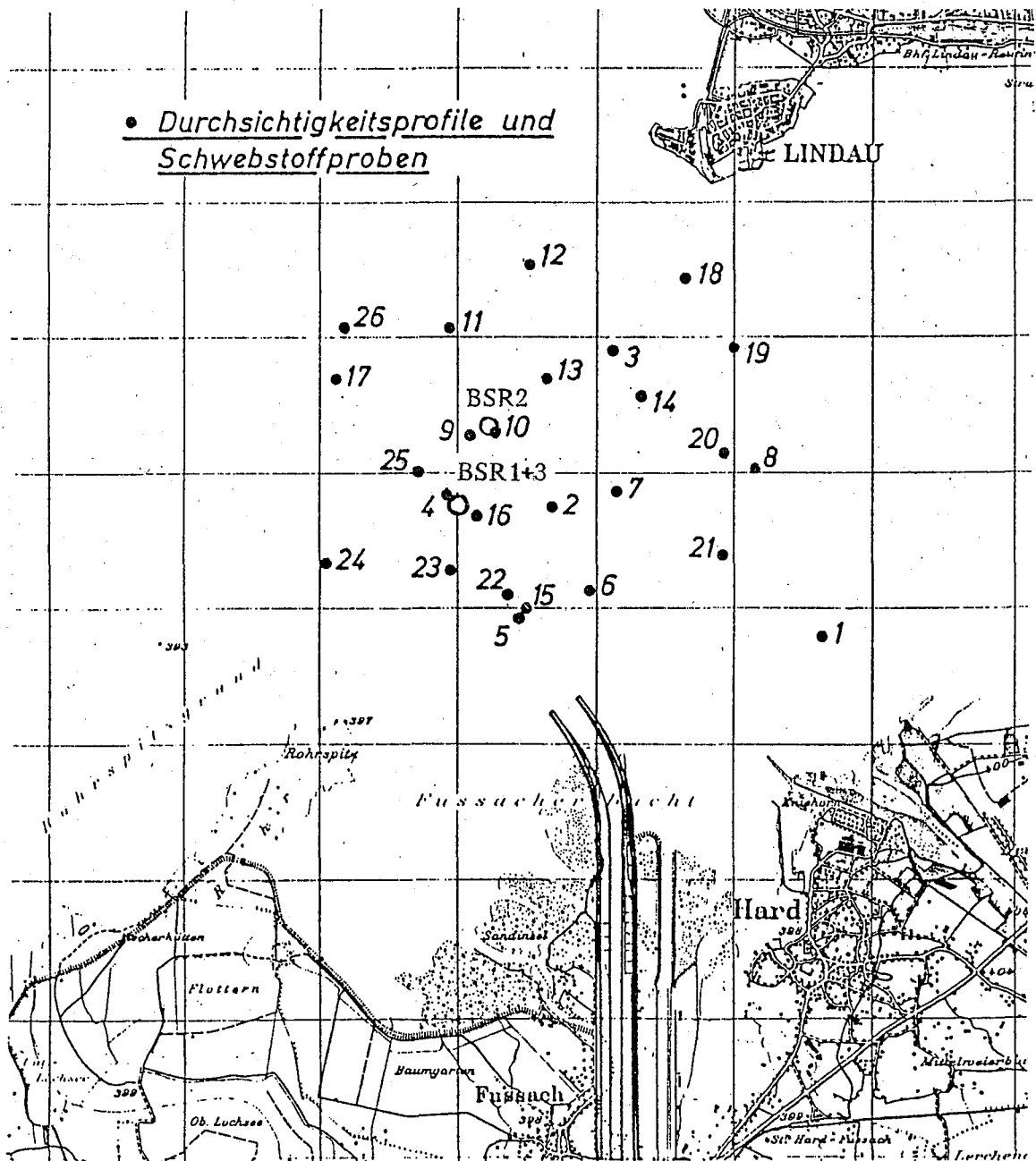
Auf die erstgenannte Studie soll hier ausführlich eingegangen werden, weil sie eine der wenigen Forschungsunternehmungen darstellt, die sich konkret mit der Vorstreckungsmaßnahme beschäftigen. Die Autoren des VAW-Berichts (1981) greifen außer auf die Ergebnisse ihrer Meßkampagne auch auf die kurz zuvor erfolgte Seegrundaufnahme von 1979 (INT. RHEINREG., 1980) zurück.

Während der VAW-Kampagne wurde die Durchsichtigkeit des Wassers (zusammen mit der Temperatur) mit Hilfe des Nydeggerschen Transmissionsgeräts (NYDEGGER, 1967) gemessen, womit eine relativ rasche Lokalisierung von Trübungshorizonten erreichbar war. Mit der Durchsichtigkeit allein ist allerdings kein direktes Maß für die Konzentration von Feststoffen gegeben. Dafür mußten Wasserproben analysiert werden, die gezielt aufgrund der Durchsichtigkeitsprofile in ausgesuchten Tiefen aufgenommen wurden.

Drei Strömungsmeßgeräte vom Typ "Aanderaa" bzw. "Inter Ocean" wurden in 6 m bzw. 21 m über Grund an zwei unterschiedlichen Positionen (siehe Abb. 31) fest verankert. Zusätzlich wurden die Aufzeichnungen des Rheinpegelstands an der Station Schmitter mit in die Untersuchungen einbezogen, da (siehe Abschnitt III.2) eine strenge Korrelation zwischen dem Abfluß des Rheins und der Schwebstoffkonzentration besteht.

Die Meßpunkte der VAW-Kampagne von 1980 sind der Karte in Abb. 31 zu entnehmen.

Abb.31: Die Positionen der Durchsichtigkeitsprofile und der Schwebstoffproben der VAW-Meßkampagne von 1980 (Pos.1-9 am 18.6; Pos.10-17 am 24.7.; Pos.18-26 am 7.8.), sowie der Strömungsmessungen (BSR1 vom 19.6. - 18.9.1980 in 30 m, 6 m über Grund; BSR2 vom 24.7.-18.9.1980 in 50 m, 6 m über Grund; BSR3 vom 7.8.-18.9.1980 in 15 m, 21 m über Grund).



Natürlich ist es mit diesen einzelnen Punktmessungen der Strömung und ohne Berücksichtigung der meteorologischen Faktoren nicht möglich, den Einfluß der großräumigen Zirkulation auf die gemessenen Vorgänge zu erfassen. Es ist zu erwarten, daß eine Interpretation der Datensätze unter Berücksichtigung der meteorologischen Anregungskräfte einige interessante Einblicke in die internen Bewegungsvorgänge im Nahbereich der Alpenrheinmündung ermöglichen würde. Zwar ist zu bedenken, daß sich dort die morphologischen Verhältnisse in den vergangenen zehn Jahren geändert haben, auf die großräumige Zirkulation und die internen Schwingungen dürfte sich dies allerdings nur unmerklich auswirken.

Von den in der VAW-Studie von 1981 gezeigten Strömungsregistrierungen sei als weiteres Beispiel das vom 31.8.80 aufgegriffen, das für die Station BSR1 (siehe Abb.31) durch Strömungsgeschwindigkeiten um 10 cm/s und eine Strömungsrichtung nach SE gekennzeichnet ist, d.h. die Strömung zeigte seeaufwärts. Bewirkt wurde dies durch westliche Winde, die an diesem Tag Spitzengeschwindigkeiten bis 17 m/s erreichten. Die hierdurch induzierten Strömungen reichten also bis in 15 m Wassertiefe. Es zeigt sich an diesem Beispiel, wie stark die Ausbreitungsrichtung von einmündendem Rheinwasser durch die meteorologischen Randbedingungen beeinflusst werden kann. Daß durch solche Starkwindfelder der See bis in seine größten Tiefen in Bewegung versetzt werden kann, ist auch schon von HOLLAN (1974) und HOLLAN and SIMONS (1978) betont worden.

Diese von der Meteorologie dominierten Ereignisse werden in dem VAW-Bericht (1981) ausdrücklich nicht in Betracht gezogen, vielmehr ruht das Hauptaugenmerk auf der Erfassung der Schwebstoffhorizonte, die im untersuchten Sektor durch den Alpenrhein aber auch durch die Bregenzer Ach hervorgerufen werden. Abb.31 zeigt ein Beispiel, in dem deutlich zwei verschiedene "Trübungshorizonte" zu erkennen sind. Der Feststoffgehalt in der tieferen, von der Bregenzer Ach herrührenden Schicht ist allerdings im Vergleich zur höheren, vom Rheinwasser herrührenden, trüben Zone von untergeordneter Bedeutung.

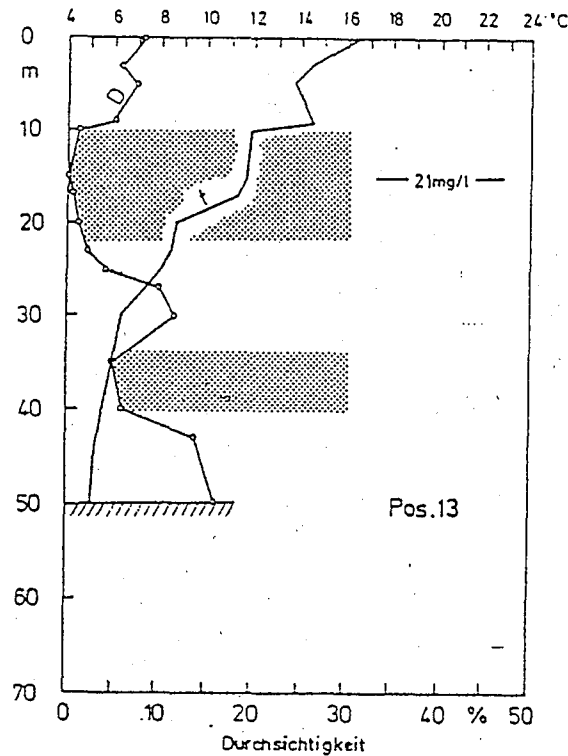


Abb.32: Vertikalprofil der Durchsichtigkeit D [%] und der Temperatur t [°C], sowie Schwebstoffkonzentration in mg/l an der Station 13 (siehe Abb. 30). Die Haupteinschichtungszone des Rheinwassers und der Bregenzer Ach sind mit einem Raster hervorgehoben [Auszug aus Bild 9 des VAW-Berichts, 1981].

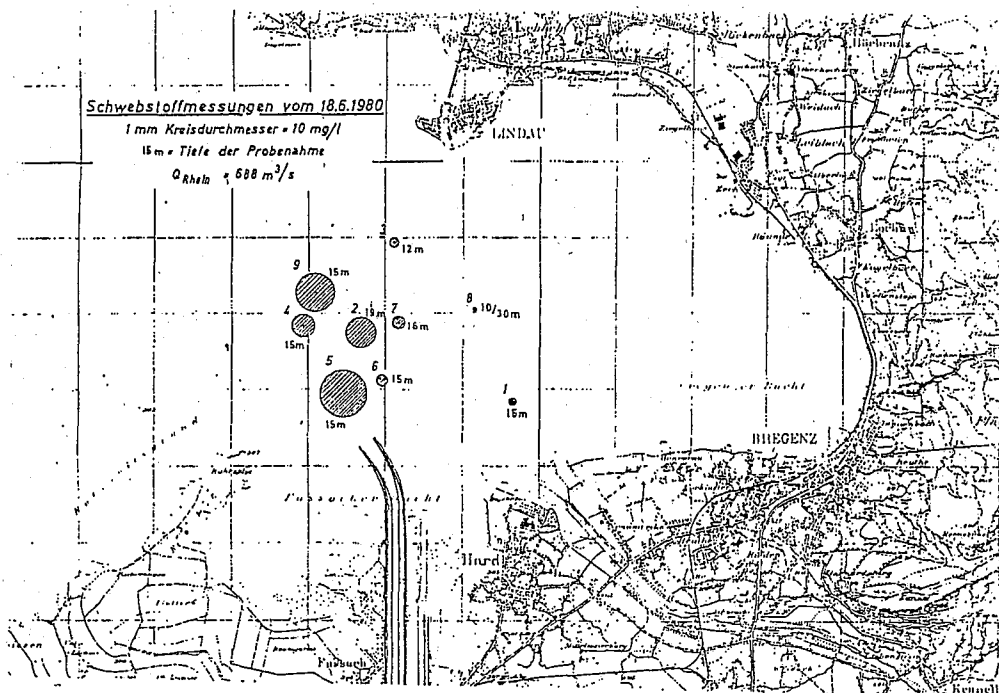
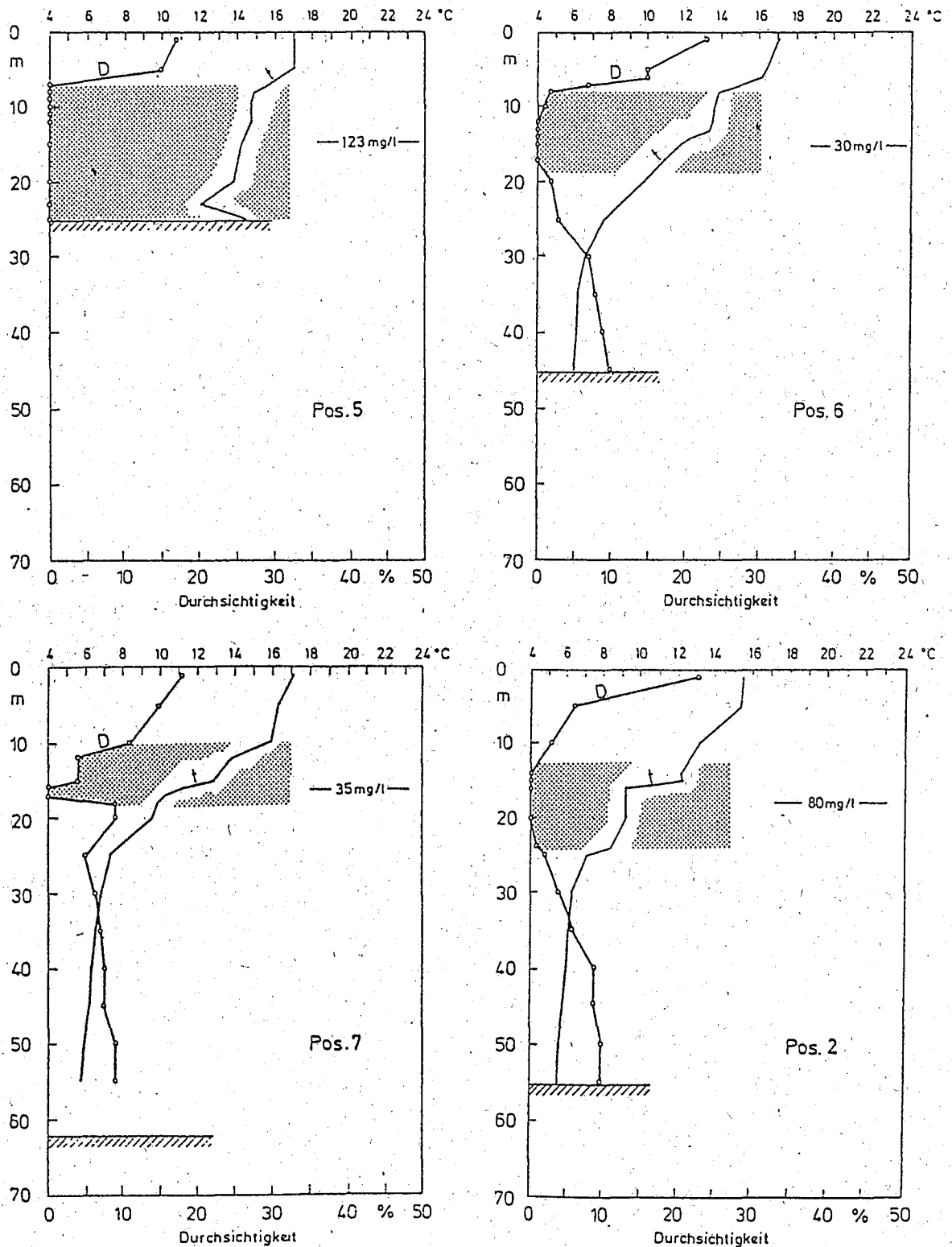


Abb.33: Schwebstoffkonzentrationen am 18.6.1980 in unterschiedlichen Meßtiefen. 1 mm Kreisdurchmesser entspricht 20 mg/l. Wasserführung des Rheins an diesem Tag $Q_{\text{Rhein}} = 688 \text{ m}^3/\text{s}$ [Verkleinerung von Bild 13 des VAW-Berichts, 1981].

Abb. 34: Vertikalprofil der Durchsichtigkeit D [%] und der Temperatur t [°C], sowie Schwebstoffkonzentration in mg/l an den Stationen 2, 5, 6, 7 (siehe Abb. 31). Die Haupteinschichtungs-zonen des Rheinwassers und der Bregenzer Ach sind mit einem Raster hervorgehoben [Auszug aus Bild 6 u. 7 des VAW-Berichts, 1981].



Als weiteres Merkmal der Zuströmung und der Wirkung des (in diesem Fall: rechtsseitigen) Vorstreckungsbauwerks wird in dem VAW-Bericht (1981) der Unterschied an Schwebstoffgehalten herausgestellt, der sich zwischen den Positionen 5 und 6 bzw. den Positionen 2 und 7 zeigt (siehe Abb.33): Obwohl die Positionen nur jeweils eben 300 m auseinanderliegen, unterscheiden sich die Konzentrationen (in 15 m Tiefe!) ganz erheblich. Die Hervorhebung soll andeuten, daß bedacht werden sollte, daß durch die fixierte Meßtiefe der Einzelproben nichts über die Vertikalverteilung der Schwebstoffkonzentration ausgesagt werden kann. Die Durchsichtigkeitsmessungen an diesen Positionen (siehe Abb.34) zeigen lediglich, daß die Bänder teilweise beträchtliche vertikale Mächtigkeit aufweisen, sodaß nicht ausgeschlossen werden kann, daß die beobachteten Konzentrationsunterschiede durch eine Schrägstellung der Strombänder bewirkt werden.

Die von der Sonde BSR1 (in 30 m Tiefe, 6 m über Grund) zweimal registrierten Strömungsereignisse (Pfeile in Abb.35) gehen einher mit einer Temperaturerhöhung in Höhe der Sonde um etwa 5°C . Die Frage erhebt sich natürlich, ob diese Temperatur einfach die Wassertemperatur des Rheins (die im Moment nicht bekannt ist) widerspiegelt oder ob sie durch Zumischung (Entrainment) von Seewasser des Metalimnions zustande kommt (12°C ist die Temperatur, die der See zu diesem Zeitpunkt in 15 m Tiefe aufweist).

Auffällig ist, daß der "Spuk" bei BSR1 mit Beginn des 22.7.1980 vorbei ist (die Strömung in 30 m Tiefe verschwindet und die Wassertemperatur wieder auf den ihrem Tiefenniveau angemessenen Wert fällt).

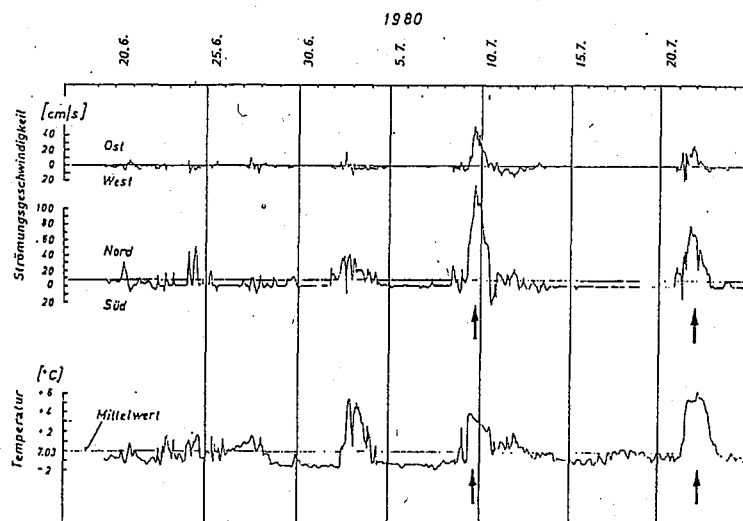


Abb. 35: Aufzeichnung von Strömung und Temperatur an der Station BSR1. Die Pfeile kennzeichnen Durchgänge des Rheins als grundberührender Tauchstrahl (aus VAW-Bericht, 1981).

Dem VAW-Bericht (1981) entnimmt man, daß sämtliche am 24.7.1980 aufgenommenen Tiefenprofile der Durchsichtigkeit (Stationen 10-17) mit Ausnahme von Station 15, die in direkter Fortsetzung des Vorstreckungskanals liegt, unterhalb 25 m relativ hohe Durchsichtigkeitswerte aufweisen. Die beobachteten Trübungshorizonte liegen zwischen 5 m und 25 m. Wo läßt der Hochwasser führende Rhein seine Fracht ab?

Obwohl diese Frage an dieser Stelle unbeantwortet bleiben soll, zeichnen die eben vorgestellten Überlegungen ein ungefähres Bild, wie durch Hochwasser-Ereignisse Wasserkörper unbekannter horizontaler und vertikaler Ausdehnung in den See eingebracht werden. Wenn diese Wasserkörper in weiterer Entfernung von der Mündung aufgespürt werden (siehe dazu die folgenden Seiten), weisen sie stets ungefähr die "richtige" Temperatur auf und unterscheiden sich lediglich aufgrund ihrer reduzierten Durchsichtigkeit. Die schwereren Partikel müssen also unterwegs abgeladen worden sein, mit der Konsequenz, daß die Wasserkörper aus größeren Tiefen wieder aufgeglitten sein müssen, solange sie noch genügend Strömungsimpuls dafür hatten.

All dies sind Prozesse, die noch einer Klärung bedürfen. Man erkennt hieran auch, daß die ungenügende Kenntnis über die maßgeblichen physikalischen Prozesse beim Einstrom- und Ausbreitungsvorgang mit Unsicherheiten bei der Parametrisierung verbunden sind.

Ein vorzügliches Instrument zum Erfassen des Ausbreitungsvorgangs der Zuflüsse durch den Obersee ist gegeben durch die Kieler Multisonde. Durch die extrem schnelle Aufnahme der Meßwerte ist es möglich, synoptische bzw. quasisynoptische Profilaufnahmen über die ganze Seetiefe bei geringen Stationsabständen kontinuierlich durchzuführen. Während zweier Meßkampagnen wurden im Sommer 1979 (21.7.-3.8.) und Herbst 1979 (16.11.-4.12.) eine Vielzahl von Längs- und Querprofilen aufgenommen. Durch Trübungsmessungen können die mit der mittleren Bewegung mitlaufenden, sich durch unterschiedlichen Gehalt an suspendierten Partikeln unterscheidenden Wasserkörper identifiziert werden. Die Ausbreitung eines derartig markierten Wasserkörpers und damit räumliche Verteilungsstruktur des eingeschichteten Alpenrheinwassers können verfolgt werden. Der Schwebstoffgehalt ist damit - wie im Zusammenhang mit der VAW-Studie betont - nicht zu ermitteln.

Aus der Vielzahl von gewonnenen Profilen greift HOLLAN (1984) den ersten Tag der zweiten Meßaktion 1979, den 16.11.1979, heraus und dokumentiert daran den - zumindest an diesem Tag - dominierenden Einfluß des Windes auf die Zirkulation im See.

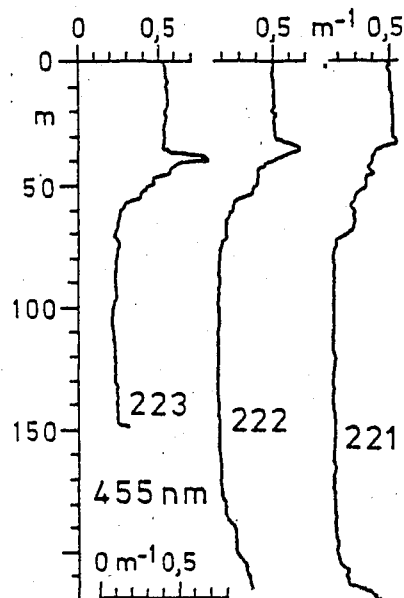
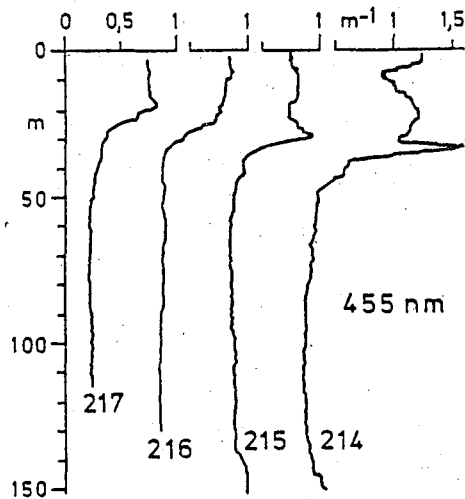
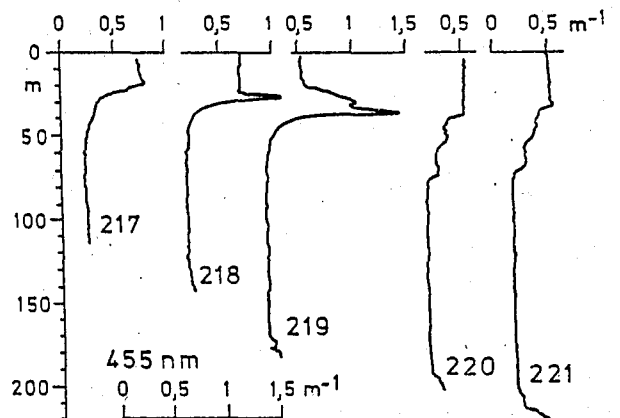
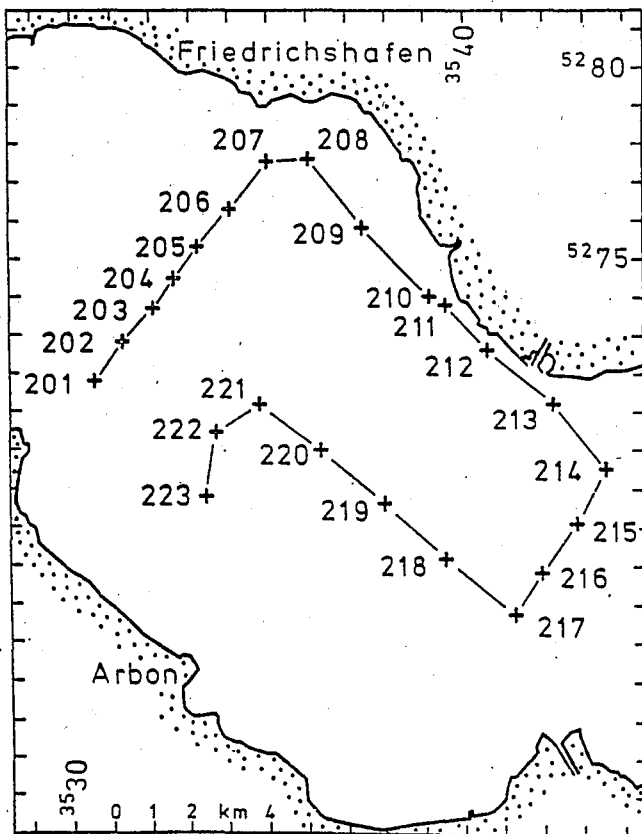
Abb. 36: (unten) Lage der 23 Meßstationen, an denen mit der Kieler Multisonde im zentralen Teil des Bodensee-Obersees am 16.11.1979 Vertikalprofile hydrographischer Parameter aufgenommen wurden.

(rechts) Vertikalverteilungen der Attenuation von blauem Licht (455 nm)

(rechts, oben) an den Meßstationen Nr. 217 bis 221 auf dem zentralen Längsschnitt,

(rechts, Mitte) an den Meßstationen Nr. 214 bis 217 des östlichen Querschnitts,

(rechts, unten) an den Meßstationen Nr. 221 bis 223 von der Seemitte in Richtung nach Arbon (aus HOLLAN, 1984).



In Abb. 36 ist eine auszugsweise Zusammenstellung der Abbildungen 5 - 8 aus HOLLAN (1984) dargestellt, wobei die Trübungsprofile zur Identifizierung des eingelagerten Wasserkörpers dienen. Aus den Temperaturprofilen, als indirekten Indikatoren für das vorherrschende Zirkulationssystem, folgert HOLLAN (1984) überzeugend, daß die Zirkulation am 16.11.1979 im mittleren und südlichen Teil des Hauptbeckens entgegengesetzt zur schematisierten mittleren Zirkulation im Bodensee, wie sie von AUERBACH (1939) postuliert wurde (siehe Abschnitt IV.3).

Obwohl bisher nur ein kleiner Teil der Multisonden-Messungen von 1979 durch Veröffentlichung zugänglich gemacht wurde (HOLLAN, 1984; HOLLAN et al., 1990) ist deutlich zu sehen, welch wertvolle Einblicke in den Bewegungszustand des Sees sich mit dieser Meßmethode ergeben. Dennoch ist festzuhalten, daß die direkte Messung schwacher Strömung noch fehlt, vorallem wenn langsame Bewegungen in größeren Räumen und Zeitspannen mit Geschwindigkeiten unter 2 cm/sec (der Ansprechgeschwindigkeit herkömmlicher ozeanographischer Rotorströmungsmesser) herrschen.

Obwohl während der zweiten Meßphase der Expedition von 1979 ein dichtes Netz von Stationen vor die (damalige) Mündung des Alpenrheins gelegt wurde, ist es fraglich, ob bei einer einmaligen Wiederholung der Meßkampagne zwecks der Erfassung eines veränderten Einschichtungsverhaltens des zufließenden Rheinwassers aufgrund der Vorstreckungsmaßnahme ein signifikanter Unterschied festgestellt werden könnte, zu sehr hängen die Vorgänge von den momentan vorliegenden Randbedingungen (Zuflußmenge, meteorologische Situation) ab. Vielmehr ist die Variabilität im Inneren des östlichen Obersees dermaßen ausgeprägt strukturiert, daß man die ursächlichen Zusammenhänge mit den Randbedingungen nur schwer zu finden vermag.

IV.3. Zustrominduziertes Strömungssystem im Obersee

Natürlich ist die Zirkulation im See, die durch die Zuflüsse "angeschoben" wird, in großen Seen wie dem Bodensee nicht so stark wie dies in kleineren Seen der Fall sein kann. Andererseits sind die Langzeiteffekte der zuflußbedingten Zirkulation, die sich während Phasen ruhigen Wetters ausbilden können, durchaus von Bedeutung und zwar deshalb, weil auch durch diese - mengenmäßig nicht unbedingt stark ausgeprägten - Zuflüsse Wasserkörper gebildet werden können, die sich in bestimmten Tiefenhorizonten einschichten und auf diesem Horizont seitwärts ausbreiten (HOLLAN et al., 1990).

Schon eine einfache Überschlagsrechnung zeigt, daß das Wasservolumen in einer nur mehrere Meter dicken Einlagerungsschicht so groß ist, daß es selbst bei einer (hoch angesetzten) Zuflußrate von $1000 \text{ m}^3/\text{sec}$ fast 1 Monat dauern würde, bis diese Wasserschicht als Ganzes aufgefüllt bzw. ersetzt wäre. Die damit einhergehenden Strömungsgeschwindigkeiten sind entsprechend gering. Auch wenn man der Tatsache Rechnung trägt, daß sich das Rheinwasser nicht auf ganzer Breite in den See zuströmt und sich vom umgebenden Seewasser auf weite Strecken unterscheiden läßt, ist seine Strömungsgeschwindigkeit in dem Maße reduziert wie eine Auffächerung erfolgt. Dabei geschieht diese fächerartige Aufteilung nicht nur horizontal sondern auch vertikal in verschiedene zeitgleich vorkommende Einschichtungshorizonte. Es ist also zu erwarten - und sowohl die "klassischen" Untersuchungen als auch die Untersuchungen der 70er Jahre und erst recht die hochauflösenden Profilmessungen mit der Kieler Multisonde haben dies bestätigt -, daß eine beträchtliche horizontale und vertikale Variabilität des eingeschichteten, zuflußbedingten Wasserkörpers vorliegt (HOLLAN et al., 1990).

Die Ausführungen dieses Abschnitts treffen also - streng nach der Realität betrachtet - nur unter idealisierten Gegebenheiten zu, denn ein allein zustrominduziertes Strömungssystem ist zwar im Obersee physikalisch denkbar, jedoch durch die Überlagerungen mit anderen Strömungssystemen und Wechselwirkungen mit ihnen überformt.

Selbst wenn wir von meteorologischen Einflüssen auf die Zirkulation im See absehen, bedarf es sehr idealisierter Randbedingungen, damit sich ein ungestörtes stationäres Zirkulationssystem aufbauen kann. Ein kritischer Punkt hierbei ist es, wie stabil eine Strömungsstruktur gegenüber geringfügigen Änderungen der Randbedingungen ist, hauptsächlich gegenüber einer veränderlichen Zuflußrate und Wasserzusammensetzung des Alpenrheins. Natürlich ist auch die Schichtung im See selbst ein sich langsam verändernder Einflußfaktor, der im östlichen Seeteil nicht frei von der Rückwirkung des Zustroms ist in dem Sinne, daß ein schichtungsmodifizierender Effekt zu erwarten ist.

Das Mäandrieren des Strömungsbandes im Nahbereich der Mündung und die gelegentliche Bifurkation vor Erreichen des gegenüberliegenden Ufers sind zuweilen beobachtete Phänomene und zeigen sich auch bei den Versuchen mit dem physikalischen Modell (STEWART and HOLLAN, 1984). Auch wenn ein bestimmtes Mäandrieren in STEWARTs Versuchen durch Probleme mit der Einpumptechnik verursacht wurde, indem nämlich stoßartig wechselnde Zulaufsimulation den Einstrom pulsieren ließ und damit unmittelbarer Anlaß für die Mäander nahe der Mündung war (HOLLAN, pers. Mitt.), haben diese Experimente mit dem physikalischen Modell des Bodensees den - in der Wirklichkeit praktisch nie realisierten - Vorteil, daß bestimmte, in hohem Maße identische Randbedingungen gegeben sind. Dabei zeigt sich, daß bei Wiederholung der Experimente zwar der grobe Verlauf der Strömungsbahn im allgemeinen erhalten bleibt, die Details des Mäandrierens sich aber sehr wohl unterscheiden können (Stewart and Hollan, 1984). Das bedeutet, daß das Problem gewisse Merkmale eines nichtdeterministischen Vorgangs aufweist.

Bezüglich des Mäandrierens kann erwartet werden, daß eine Mittelwertbildung einen "Rheinstrom" ergibt, der etwa dem entspricht, was sich aus den Beobachtungen der vergangenen Jahrzehnte ableitet. Bezüglich der beobachteten und im Modell erfaßten Bifurkation ist die Mittelbildung bei weitem nicht mehr so trivial.

(Um es in Erinnerung zu rufen: die eben angestellten Betrachtungen geschehen vor dem Hintergrund quasi-identischer Gegebenheiten; die Sensibilität der Ergebnisse auf signifikante Veränderungen der Randbedingungen soll für den Moment nicht zur Betrachtung stehen).

In Bezug auf die Auswirkungen gewisser Veränderlichkeiten von physikalischen Parametern auf biologische Prozesse sind entweder die mittleren Verhältnisse von Interesse oder Extremereignisse, die "durchschlagende" Wirkung zeigen. Von untergeordnetem Interesse sind Schwankungen mit kleiner Schwankungsbreite, die so schnell vonstatten gehen, daß sie von dem biologischen System nicht "erfaßt" oder nicht "verarbeitet" werden können.

Es ist das Verdienst der Arbeit von STEWART and HOLLAN (1984), zum ersten Mal Richtwerte für diese "Schwankungsbreiten" erarbeitet zu haben und obwohl die Übertragbarkeit der Ergebnisse wegen der experimentellen Schwierigkeit, die in einer hydraulisch nicht genügend ähnlichen Modellierung der Schichtungsverhältnisse besteht, nur unter gewissen Einschränkungen möglich ist, so haben sie dennoch den Vorteil, die Vorgänge unter kontrollierten Veränderungen der Randbedingungen studieren zu können - eine Unmöglichkeit bei den auf Messungen im See sich stützenden Untersuchungen.

In zusätzlichen Untersuchungen, deren Ergebnisse in der oben erwähnten Arbeit nicht veröffentlicht wurden, ist die Vorstreckung des Alpenrheins von STEWART (1988) explizit mit in Betracht gezogen worden (siehe Abb.37). Unter den bedingten Aussagemöglichkeiten der Experimente ist erkennbar, daß der Alpenrhein im windfreien Falle und bei oberflächennaher Einsichtung weiter westlich am Nordufer auftritt und zwar im Abschnitt von Nonnenhorn bis etwa zur Kressbronner Bucht.

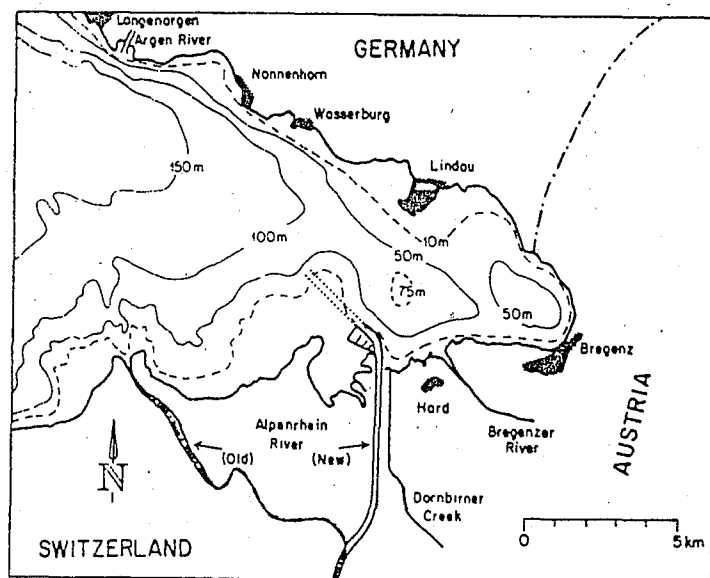


Abb.37: Die modellmäßige Erfassung der vorgestreckten Alpenrheinmündung (aus STEWART, 1988).

Ein erster Schritt der numerisch-mathematischen Modellierung des zuflußinduzierten Zirkulationssystems ist durch HOLLAN (in SERRUYA et al., 1984) unternommen worden, indem mit einem zweidimensionalen, vertikalintegrierten, stationären Modell der hydraulische Durchfluß der vier Hauptzuflüsse (Alpenrhein, Bregenzer Ach, Schussen und Argen) simuliert wurde. Dabei wird für die Position der Rheinmündung von drei Alternativen ausgegangen: Die Mündung vor der Rheinverlegung vor 1900, die momentane und die projektierte Lage (ersichtlich aus Abb.38 durch die Pfeile, die die jeweilige Einstromrichtung anzeigen). Für die Wasserführung des Alpenrheins wird ein Wert von $225 \text{ m}^3/\text{s}$ angesetzt.

Das sich einstellende Durchströmungsmuster wird durch die Stromfunktion $\Psi(x,y)$ des Volumentransports repräsentiert, aus der sich die x- und y-Komponenten des Volumentransportes definitionsgemäß durch

$$M = - \frac{\partial \Psi}{\partial y} , \quad N = \frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

bestimmen lassen.

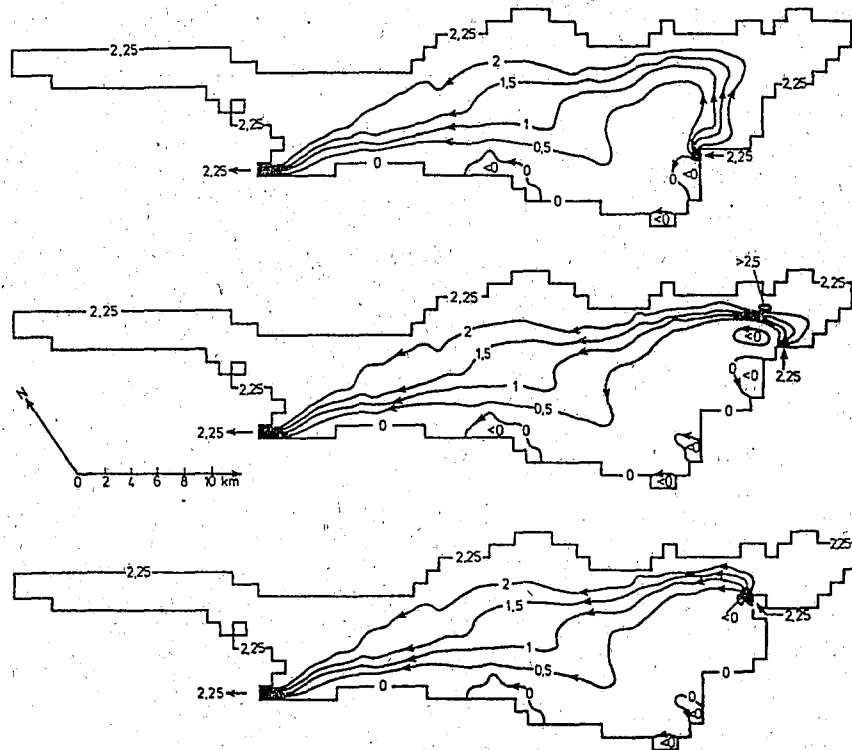


Abb.38: Hydraulische Strömung des Alpenrheins in einem zweidimensionalen, vertikalintegrierten Zirkulationsmodell des Bodensee-Obersees. Die Lage der Mündung ist die von vor der Rheinverlegung (oben), die momentane (Mitte) und die projektierte (unten); (aus SERRUYA et al., 1984).

Aufgrund der Vielzahl von teilweise gravierenden Voraussetzungen können die in Abb.38 vorgestellten Ergebnisse nicht als Abbild der realen Situation betrachtet werden. Außer der schon erwähnten Annahmen bezüglich der zeitlichen Konstanz des Durchströmungsvorgangs (Stationarität) und der vertikalen Gleichförmigkeit der Strömung ist - vor allem für den Nahbereich der Alpenrheinmündung - die Vernachlässigung der advektiven (nichtlinearen) Terme in der Bewegungsgleichung eine schwerwiegende Einschränkung, wird dadurch doch jegliche "Strahlwirkung" des Einstrom-Impulses außer Betracht gelassen. Dies wird verstärkt durch die Gitterweite des numerischen Gitters (950 m), womit zwar eine durchaus angemessene Erfassung der topographischen Gegebenheiten im Bodensee (auch im Überlinger See) möglich ist, womit aber auch der zuströmende Alpenrhein auf eine Breite von 950 m festgelegt wird. Die Folge all dieser Voraussetzungen (Stationarität, Linearität, Verteilung auf die ganze Wassersäule und überbreites Stromband des zufließenden Alpenrheins) ist eine unrealistisch kleine Strömungsgeschwindigkeit auch im Nahbereich der Alpenrheinmündung. Damit sind aber auch die ermittelten Strukturen im weiteren Abstand von der Mündung fragwürdig.

Trotzdem sind die eben beschriebenen Modellergebnisse die notwendige erste Annäherung an eine zukünftige, realistischere Modellierung. Die Ansprüche, die sich hierfür ergeben, sind außerordentlich groß. Darauf soll nochmals im letzten Abschnitt dieser Studie eingegangen werden.

IV.4. Abfluß des Mischwassers

Obersee und Untersee sind durch den 5 km langen Seerhein verbunden (siehe Abb.39). Die Abflußschwelle, etwa 500 m vor der Rheinbrücke gelegen, liegt im Sommer 3-4 m, im Winter etwa 2 m unter dem Seespiegel.

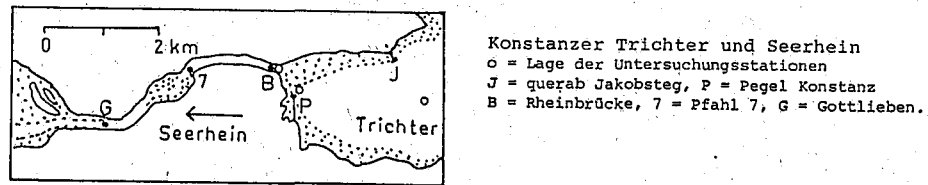


Abb. 39: Konstanzer Trichter und Seerhein (aus LEHN, 1978).

Der Zusammenhang zwischen Höhe des Seespiegelstands und Wasserabfluß wurde in Abschnitt III.1.1 angesprochen. Demnach folgt der Jahreszyklus des Oberseeabflusses dem alpinen Wasserregime in gedämpfter Form.

Neben der Wassermenge interessiert der Tiefenbereich des vom Abfluß erfaßten Oberseewassers. Nach LEHN (1978) kann während der fünf Zirkulationsmonate binnen weniger Stunden Wasser aus den verschiedensten Tiefenschichten des Obersees in den Abfluß gelangen. Für diese Zeitspanne ist eine Tiefenbegrenzung des Oberflächenabflusses nicht möglich.

Während der Sommerstagnation, in der 3/4 des teilweise sehr unterschiedlichen Jahresabflusses geschieht, fließt eine obere Wasserschicht aus dem See ab. KLEINSCHMIDT (1921), AUERBACH und SCHMALZ (1931) und AUERBACH (1952) stellen im Seerhein jeweils niederere Temperaturen als an der Wasseroberfläche des Trichters fest. Danach ist der Schwerpunkt des Abflusses die 0-4 m-Wasserzone, der gelegentlich auch Wasser aus mehr als 5 m Tiefe beigemischt sein kann. Anders deuten ELSTER und EINSELE (1937) sowie NÜMANN (1938) die Ergebnisse von Leitfähigkeitsmessungen, wonach das Wasser des Seerheins zeitweise aus 7.5-10 m Tiefe des Trichters stammt. Temperatur-Fahrregistrierungen durch den Konstanzer Trichter und den Seerhein (LEHN, 1978) während der Jahre 1965/66 (Hochwasserjahr) und 1971/72 (Niedrigwasserjahr) zeigen, daß sich der Abflußbereich gelegentlich erweitert bis zu mehr als 20 m, daß aber etwa bei einem Drittel der Messungen, zumeist im Juli/August, Wasser aus der 0-5 m-Zone, in einem weiteren Drittel aus der 0-10 m-Zone und im restlichen Drittel, vorallem im April/Mai und Oktober, Wasser aus dem 0-15 m-Bereich abfließt. Die Wassererneuerung des Obersees ist aufgrund der unterschiedlichen Abflußraten und Abflußbereiche während Hoch- und Niedrigwasserjahren sehr verschieden. Dies bleibt natürlich nicht ohne Folgen für die primär-produktive Zone, wie LEHN (1978) am Beispiel der Abflußverluste an Phytoplanktern und an den Änderungen der Stoffkonzentrationen im Obersee aufzeigt.

IV.5. Der jahreszeitliche Zyklus der Dichteschichtung bei Berücksichtigung des Rheinzufusses

Will man sich der Frage stellen, ob und wie die Vorstreckung der Alpenrheinmündung Einfluß nimmt auf die Schichtungsverhältnisse, so muß man sich im klaren darüber sein, daß man eine Antwort auf diese Frage erst erwarten kann, wenn

1.) die messende Beobachtung der Schichtungsverhältnisse in ihrer räumlichen und zeitlichen Abfolge und der sie bewirkenden meteorologischen, seephysikalischen und limnologischen Faktoren ganz entscheidend intensiviert werden. Die Meßkampagne mit der Kieler Multisonde (KROEBEL, 1978; HOLLAN et al., 1990) haben gezeigt, wie groß die Kenntnislücken noch sind und die Modellrechnungen von HOLLAN et al. (1990) mit dem DYRESM-Modell haben gezeigt, daß es Modellparameter gibt, die für den Bodensee wegen fehlender Beobachtungen noch nicht bestimmbar sind.

Darüberhinaus kann man diese Frage erst dann beantworten, wenn

2.) die theoretische Durchdringung der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse weiter vorangeschritten ist. Dabei sind es zum Einen die Vorgänge, die sich in Vertikalrichtung innerhalb der Wassersäule abspielen (wie Wärme- und Impulsflüsse an der Oberfläche und im Inneren, Absorption von Strahlung usw.; siehe dazu auch Abb.20), die es zu beschreiben gilt. Zum Anderen sind es die Reaktionen des Sees in seiner Ganzheit auf meteorologische Ereignisse, die dadurch bewirkten weiträumigen Bewegungsvorgänge und die damit einhergehenden lateralen Inhomogenitäten, die als bestimmender Hintergrund für die Prozesse in der Wassersäule anzusehen sind. Solange diese Problemstellungen - vor allem in ihrer zeitlichen Entwicklung - noch nicht hinreichend erforscht sind, müssen die Untersuchungen über zuflußbedingte Effekte oder gar deren Veränderungen auf unsicherer Basis geschehen.

Dennoch ist durch die Modellierung der jahreszeitlichen Schichtungsentwicklung mit Hilfe des oben erwähnten DYRESM-Modells (HOLLAN et al., 1990) ein entscheidender Schritt zum Verständnis der grundlegenden Prozesse getan worden.

Die meteorologischen Daten, die in das Modell eingehen, sind tägliche Mittelwerte der Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, relative Feuchte, Bewölkung und der kurzwelligen Sonnenstrahlung, die gewonnen wurden an der Station Konstanz des Deutschen Wetterdienstes. Diese Daten werden als repräsentativ für den ganzen Bodensee-Obersee genommen.

Zweifelloos ist die Parametrisierung der Stromscherung im Bereich der Thermokline, die durch interne Seiches hervorgerufen wird, ein wichtiger Aspekt, der in den eindimensionalen Simulationsmodellen berücksichtigt werden muß. Es ist zu bezweifeln, daß diese Parametrisierung durch die bestehenden Modelle befriedigend gelöst ist. Das hat seinen Grund zum einen in der komplizierten Struktur der internen Seiches, wie dies durch die Arbeiten gezeigt wird, die 1989 und 1991 im Auftrag der IfU durchgeführt wurden (BÄUERLE, 1989, 1991). Es zeichnet sich ab, daß diese Parametrisierung für unterschiedliche Bereiche des Sees unterschiedlich angesetzt werden muß.

Zum anderen ist der Anregungsmechanismus der internen Seiches (nicht nur für den Bodensee) eine weitgehend unbearbeitete Fragestellung. Es ist zu erwarten, daß auch hier die Parametrisierung von lokal unterschiedlichen Ansätzen ausgehen muß.

Zwar hat der Ansatz, aus den drei auf den ganzen Obersee verteilten Stationen einen (gewichteten) mittleren Zustand zu ermitteln, um die Schwingungsaktivität der internen Seiches zu eliminieren eine gewisse Berechtigung, aber andererseits haben - wie in Abschnitt III.4 erwähnt - die Untersuchungen von ZENGER et al. (1990) ergeben, daß der Überlinger See ein etwas anderes Schichtungsverhalten aufweist als der eigentliche Obersee.

Schließlich bedarf auch noch der Zusammenhang zwischen Lichtdurchlässigkeit und Sedimentkonzentration einer für den Bodensee angemessenen Formulierung. Dieser Aspekt ist deshalb von großer Wichtigkeit, weil in der Lichtdurchlässigkeit ein Kopplungsmechanismus zu sehen ist zwischen "physikalischen" Parametern des zugeschichteten Wassers und dadurch bewirkten veränderten Randbedingungen für biologische Prozesse (TILZER, 1985). Hier liegt bezüglich der Vorgänge in der Nähe von Flußmündungen zweifellos ein beträchtliches Wissensdefizit und es bedarf gezielter Untersuchungen im Nahbereich der Alpenrheinmündung, wenn man tatsächlich durch die Vorstreckungsmaßnahme bewirkte Veränderungen in ihrem ursächlichen Zusammenhang erkennen will. Die Ergebnisse der Untersuchungen, die im Rahmen des SFB 248 durchgeführt wurden, sind fast ausschließlich für den Überlinger See repräsentativ und auch die vom IfS Langenargen im zentralen Obersee angestellten Untersuchungen ziehen den Alpenrhineinfluß nur sehr entfernt mit in Betracht.

Bezüglich der herbstlichen Abkühlung ist zu erwarten, daß das gängige Bild einer turbulent durchmischten Deckschicht, die sich allmählich vertieft, im Fall von zufließendem Flußwasser modifiziert werden muß. Bis in welche Entfernung von der Alpenrheinmündung die seitliche Advektion von mehr oder weniger stark vermischem Alpenrheinwasser zu beachten ist, könnte eine der Fragen sein, die durch die mathematische Modellierung zu klären ist. (Ob hierfür allerdings die natürlichen Randbedingungen genügend genau messend erfaßt worden sind, ist zu bezweifeln).

Gehen wir für die folgenden Überlegungen davon aus, daß das Flußwasser eine Dichte aufweist, die zwischen der Dichte der im Herbst gut durchmischten Deckschicht und der des Bodenwassers liegt. Das Flußwasser wird sich also, nachdem es in den See eingeströmt ist, auf den ihm angemessenen Dichtehorizont (siehe Abschnitt III.1) einschichten und sich dort horizontal ausbreiten. Aus Kontinuitätsgründen wird die "unterströmte" Schicht nach oben angehoben und wenn wir davon ausgehen, daß am Ausfluß des Sees überwiegend Deckschichtwasser abfließt, dann ist der Effekt des sich zwischenschichtenden Flußwassers ein kontinuierliches Anheben der Untergrenze der durchmischten Deckschicht.

Eine grobe Abschätzung dieses Effekts ergibt bei einem Zustrom von $500 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Fläche des Sees im Niveau des eingeschichteten Wassers von 500 km^2 eine Vertikalverlagerungsgeschwindigkeit von 10^{-6} m/s oder 0.1 m/d . (Wenn man berücksichtigt, daß der Nahbereich der Mündung sehr viel stärker betroffen ist als der Rest des Obersees, wird sich diese Rate entsprechend erhöhen, womit sich die enorme vertikale Erweiterung des Metalimnions im östlichen Seeteil erklärt verglichen mit dem zentralen und westlichen Seeteil).

Um die Bedeutung dieses Effekts in Vergleich zu der Vertiefung der durchmischten Deckschicht aufgrund herbstlicher Abkühlung setzen zu können, soll dieser letztere Prozeß abgeschätzt werden. Dazu gehen wir davon aus, daß dieser Vorgang durch konvektive Angleichung vor sich geht, daß also bei Dichteinstabilitäten aufgrund von Temperaturinversionen eine vollständige Durchmischung der Deckschicht stattfindet und zwar solange bis jegliche Temperaturinversionen aufgehoben sind. Das führt natürlich zu einer Vertiefung der Deckschicht, d.h. die Mischungstiefe h , in der die Temperatur der durchmischten Deckschicht stetig an den Temperaturverlauf im Inneren anschließt, wird zunehmen (in größeren Tiefen bleibe der Temperaturverlauf unverändert).

Um eine ausgeglichene Wärmebilanz bis in die Mischungstiefe h zu gewährleisten, muß der Wärmeaustausch, der über die Oberfläche an die Atmosphäre stattfindet, durch eine Veränderung der Deckschichttemperatur dT_m/dt ausgeglichen werden. Dabei ist zu beachten, daß (wegen der eben beschriebenen konvektiven Angleichung) eine Vertiefung der Mischungstiefe dh/dt erfolgt.

Die Temperatur verändere sich im Bereich der Thermokline in Vertikalrichtung mit der konstanten Rate dT/dz . Daraus ergibt sich für die Vertiefungsgeschwindigkeit der Mischungstiefe

$$dh/dt = (dT_m/dt)/(dT/dz).$$

Typische Werte für den Bodensee sind $dT_m/dt = 0.1^\circ\text{C/d}$ und $dT/dz = 0.5^\circ\text{C/m}$, woraus sich $dh/dt = 0.2 \text{ m/d}$ ergibt.

Damit zeigt sich, daß es Zeitabschnitte geben kann, während denen die Vertiefung der durchmischten Deckschicht aufgrund herbstlicher Abkühlung durch die Zwischenschichtung zufließenden Flußwassers rechnerisch ausgeglichen werden kann. Da sich - wie schon angedeutet - der Effekt der Mischungstiefen-Anhebung im Nahbereich der Mündung stärker bemerkbar machen wird als im Rest des Sees, müßten sich horizontale Gradienten in den Dichteflächen einstellen. Inwiefern dieser Effekt durch die Vorstreckungsmaßnahme beeinflusst wird, ist ebensowenig untersucht worden wie die Schichtungsbeeinflussung im Inneren des Sees durch einen größeren Zu-
strom.

IV.6. Sedimentation

Die Sedimentation im Bodensee-Obersee wird durch die Zufuhr klastischen Materials aus dem Alpenrhein und - bereits mit großem Abstand - aus der Bregenzer Ach beherrscht. Auch die in Tabelle 1 (siehe Abschnitt III.2) festgehaltenen 9-11jährigen Mittel des Sedimenteintrags zeigen die beträchtlichen Schwankungen, die sich auf die von Jahr zu Jahr stark variierende Wasserführung des Alpenrheins zurückführen lassen.

Im Gegensatz zum Sedimentfächer des Alten Rheins fehlen beim Neuen Rhein (sprich: heutiger Alpenrhein) tiefeingeschnittene Canyons (LAMBERT, 1982). Bis vor Beginn der Vorstreckungsmaßnahmen (1973) befand sich die Sedimentation des Neuen Rheins noch im Stadium der propagierenden Deltaschüttung (SCHRÖDER und NIESSEN, 1988), wie aus den Untersuchungen der Sedimente und des Sedimentgefüges des Rheindeltas von FÖRSTNER et al. (1968) hervorgeht. Nach LAMBERT (1982) ist erst dann wieder mit Rinnenbildung zu rechnen, wenn der Neue Rhein über einen längeren Zeitraum nicht mehr durch Baumaßnahmen beeinflusst wird.

SCHRÖDER und NIESSEN (1988) weisen im Bereich südwestlich Lindau auf rinnen- und leveeähnliche Strukturen hin, die möglicherweise den Beginn eines neuen Sedimentfächers anzeigen.

Die Sedimentationsraten im Bodensee-Obersee variieren sehr. Während im zentralen Becken Akkumulationsraten von ca 1 mm pro Jahr (ohne Berücksichtigung der Kompaktion) bestimmt wurden (DOMINIK et al, 1981), sind im östlichen Obersee mit zunehmender Annäherung an das Rheindelta wesentlich höhere Ablagerungsraten zu erwarten.

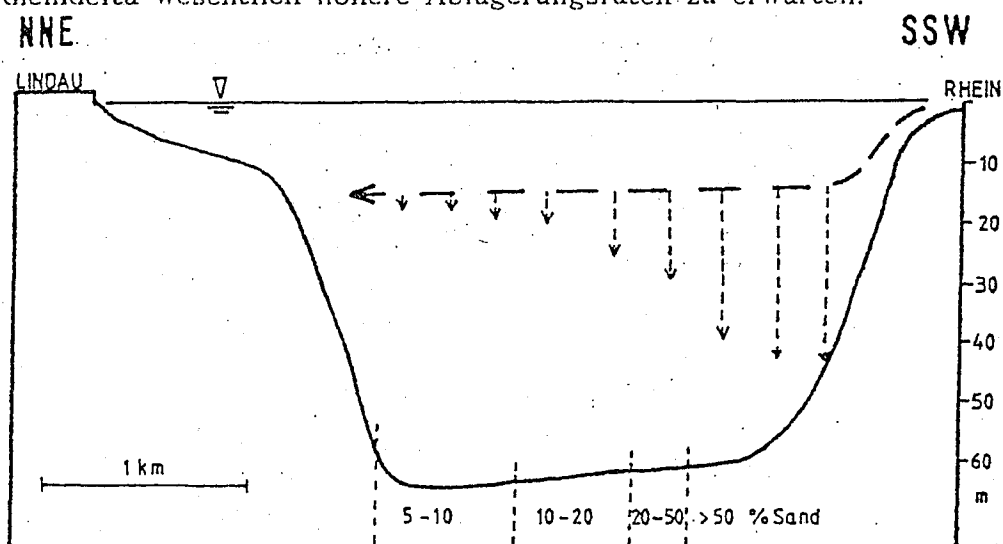


Abb. 40 : Profil zwischen Lindau und Rheinmündung. Die Einschichtung des Rheins und die Sandgehalte der Sedimente sind schematisch dargestellt (aus ZEH, 1986).

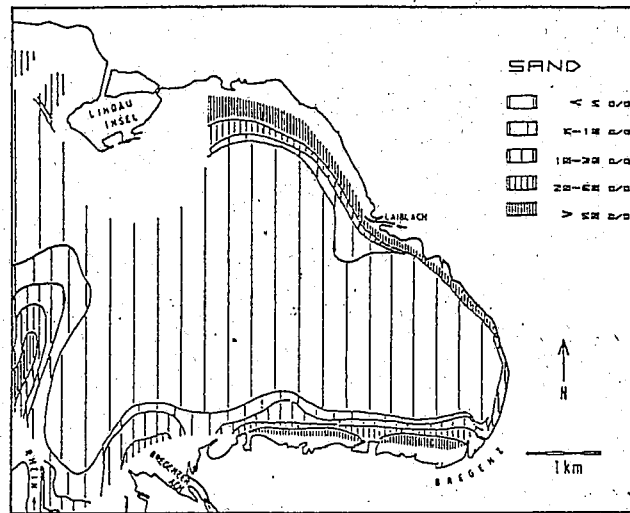


Abb. 41 : Zungenförmiges Vorstossen der Sandschüttungen des Rheindeltas (aus ZEH, 1986).

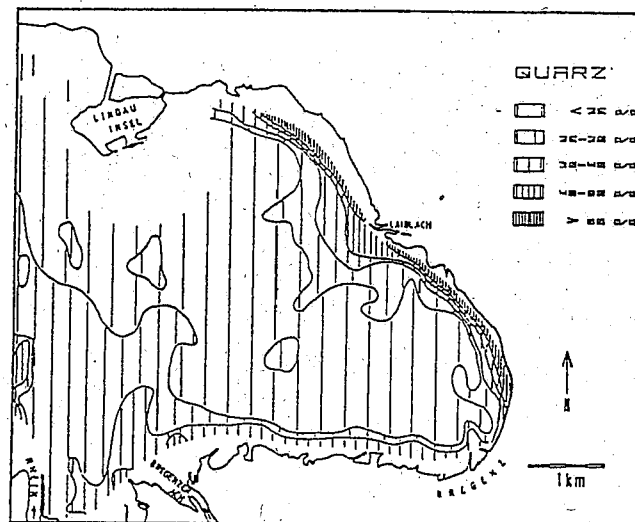


Abb. 42: Prozentuale Quarzgehalte in den Oberflächensedimenten der Bregenzer Bucht (aus ZEH, 1986).

Nach der Rheinregulierung 1900 kam es insbesondere in der Bregenzer Bucht zu gravierenden Veränderungen des Sedimentationsverhaltens (vgl. FÖRSTNER et al, 1968), die sich auch im sedimentologisch-mineralogischen Inventar dieses Gebietes widerspiegeln (ZEH, 1986).

Die Korngrößenverteilung der Sedimente zeigt deutlich den Einfluß des Rheins auf die mittleren Sandgehalte in der Bregenzer Bucht. Die mineralogische Zusammensetzung der Sedimente zeigt im Bereich der heutigen Rheinmündung keine erkennbaren Veränderungen bei den Karbonaten, jedoch erhöhte Gehalte an Quarz im Gebiet des Rheindeltas. Feldspäte sind nur in Spuren vertreten.

VUYNOVICH und MÜLLER (1986) untersuchten die geochemische Zusammensetzung der Sedimente in der Bregenzer Bucht. Hierbei zeigte sich ein insgesamt geringer Anteil von anthropogen eingebrachten Schwermetallen mit Anreicherungen in der Tonfraktion. Die Kupfergehalte im Bereich des Rheindeltas zeigen eine zungenförmige Verteilung nach Nordosten. VUYNOVICH und MÜLLER leiten daraus besondere Strömungsbedingungen ab.

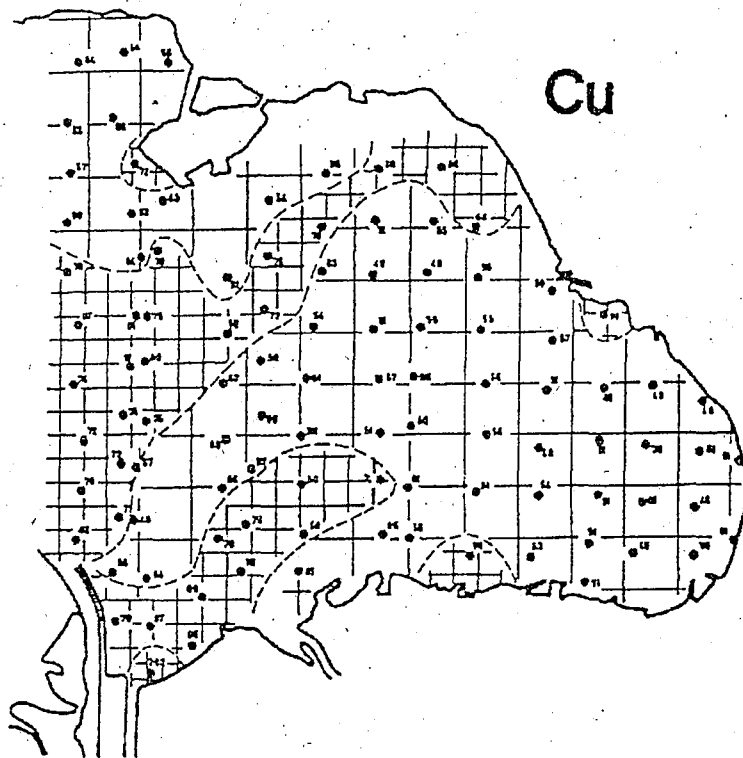


Abb. 43: Regionale Verteilung von Kupfer in der Tonfraktion der Sedimente (aus VUYNOVICH und MÜLLER, 1986).

Es sollen an dieser Stelle einige Betrachtungen über die Sortierung der Sedimente dargelegt werden. Die eigentlichen See-Sedimente zeigen eine schlechte Sortierung (Müller, 1966), die z. T. allerdings nur vorgetäuscht sein könnte, weil es methodisch nicht möglich ist, die einzelnen Schichten (Phasen), die einem bestimmten Ereignis im Sedimentationsraum zukommen, getrennt zu erfassen. Solche Ereignisse sind charakterisiert durch eine Anzahl von Kenngrößen (z. B. Wasserführung des Alpenrheins, Schwebstoffgehalt, Temperatur des Alpenrheins, usw.). Sollte es möglich sein, den einzelnen Ereignissen eine bestimmte Wirkung zuschreiben zu können (z. B. räumliche Ablagerungsmuster im See), so ließe sich darüber nachdenken, wie diese Ereignisse im Sedimentationsraum aufgrund der Vorstreckung quantifizierbare Veränderungen aufweisen.

ZEH (1986) fand im Bereich des Rheindeltas sehr gut bis mäßig sortierte Sande, die zum Schweb der Bregenzer Bucht hin in schlecht sortierte tonige Silte und Tonsilte übergehen.

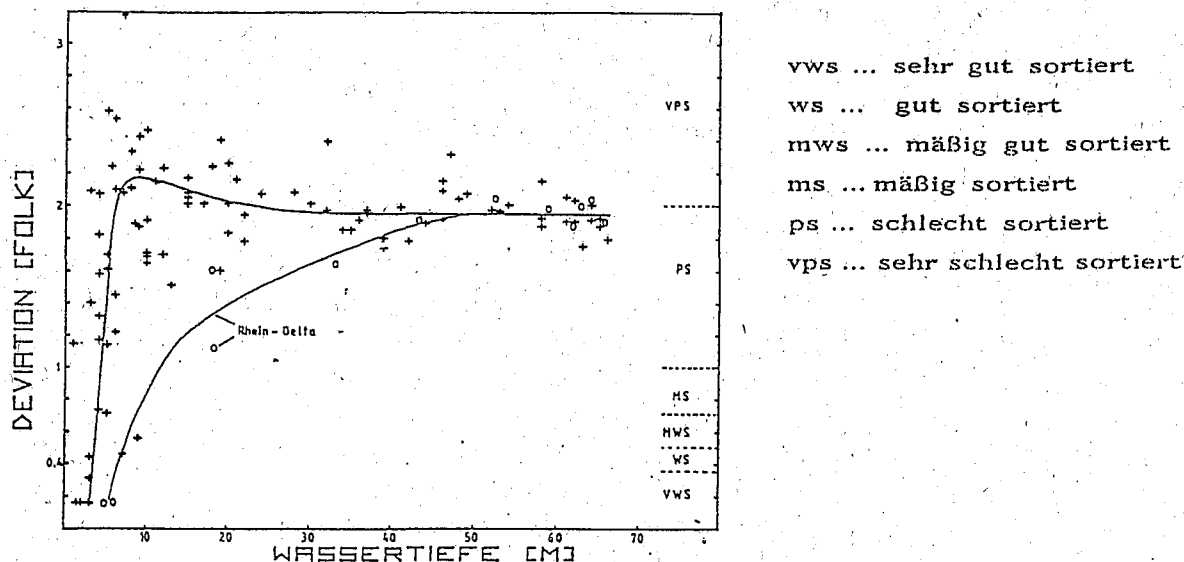


Abb. 44 : Standard-Abweichung in Abhängigkeit von der Wassertiefe (aus ZEH, 1986).

ZEH deutet die gute Sortierung der Flachwassersedimente als Ergebnis der Auswaschung von Feinanteilen. Die schlechte Sortierung von Schwebesedimenten und Teilen der Deltasedimente wird als Effekt einer Mischprobenentnahme gesehen, bei der mehrere genetisch unterschiedliche Sedimentschichten vermischt wurden (z.B. Hochwasserlagen, Calcitfällung, Ablagerungen nach Diatomeensterben etc.)

Mikroskopische Untersuchungen (WAGNER, 1976) ergaben, daß die während der Hochwasserperiode des Alpenrheins abgesetzten Teilchen bedeutend größer sind als solche, die während Niedrigwasser abgesetzt wurden. Ob dies Ausdruck der unterschiedlichen Korngrößenverteilung während des Hochwassers ist, oder ob das nur bedeutet, daß für den einen, in Betracht stehenden Ort die feineren Teilchen (wegen der hochwasserbedingten Strömung) noch in Bewegung sind und weiter transportiert werden, ist zu prüfen.

Da es innerhalb eines jeden Jahres zu extremen Schwankungen der Wasserführung des Alpenrheins kommt und hierdurch auch die Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Bodensee beeinflusst werden (die wiederum für die Größe der absinkenden Teilchen verantwortlich sind), besteht eine Jahresschicht aus vielen, nur Bruchteile von mm dicken Einzelschichten, die in sich sicherlich weit besser sortiert sind als die Summe der Einzelschichten (MÜLLER, 1966).

Was hier für die Wasserführung des Alpenrheins und die daraus folgende (aber nicht bekannte!) zeitliche Variabilität seiner "Bahn" postuliert wird, gilt natürlich auch und in besonderem Maße für den "dynamischen Zustand" des Sees aufgrund von meteorologischen Gegebenheiten. Dazu gehört die Struktur der vorherrschenden windgetriebenen Zirkulation und Kenntnis über den "Nachhall" der Windereignisse, d. h. wie lange und in welchen räumlichen Strukturen diese transportwirksam nachklingen. Es könnte also sehr wohl so sein, daß die schlechte Sortierung ein (zu erklärendes) Faktum ist und die "Bruchteile von mm dicken Einzelschichten" die Ausnahme sind, die nur bei ungestörten Einzelereignissen auftreten.

Man muß die Variabilität des Strömungsverhaltens in Beziehung setzen zu den Sinkraten der Schwebstoffe, um abschätzen zu können, wie dick eine wohlsortierte Schicht überhaupt werden kann.

Als weitere Ursache der schlechten Sortierung kommt noch die Überlagerung der normalen Sedimentation von Partikeln durch biogene Ausscheidungen hinzu, die in bezug auf die Korngrößenverteilung und die hieraus abzuleitende Sortierung als Störfaktoren wirken.

IV.7. Die Folgen der windgetriebenen Strömungen für den Zustrom und die Einschichtung

Wie in Abschnitt IV.3 dargestellt wurde ist schon aufgrund einer Bilanzierung des Wasservolumens, das in unterschiedlicher zeitlicher Abfolge unterschiedlichen Tiefenhorizonten des Sees zugeführt wird, eine beträchtliche horizontale Variabilität zu erwarten. Immerhin wäre diese Variabilität als Folge des (deterministischen) Vorgangs zu begreifen, daß eine Wassermasse mit variablen aber jeweils eindeutig definierten Eigenschaften in einen ansonsten ruhenden Wasserkörper mit (anderen) definierten Eigenschaften einströmt. (Daß selbst dieses hydrodynamische Problem in seinen Einzelheiten noch nicht genügend geklärt ist, sei für den Moment nicht von Belang).

Eine weitere Mannigfaltigkeit von Ergebnissen erhält man (zumindest theoretisch), wenn ein anderer als der ruhende "Grundzustand" des Sees vorausgesetzt wird, also zum Beispiel eine Zirkulation besteht, die sich als Folge eines stationären Windfelds aus z.B. westlicher Richtung einstellt. Die Modellrechnungen von SERRUYA et al. (1984) (siehe Abschnitt III.5.3) zeigen exemplarisch die Unterschiede, die verschiedene Windrichtungen in der Reaktion des Modellsees haben. Es wird dort gezeigt, daß sich schon durch einen als stationär und gleichförmig vorausgesetzten Wind völlig unterschiedliche Zirkulationssysteme im See aufbauen können.

Es ist an dieser Stelle hervorzuheben, daß für die in Schüben erfolgende Zufuhr von Alpenrhein-Wasser häufig völlig unterschiedliche Bedingungen im See vorliegen, wenn also fast alle auf Beobachtungen basierende Untersuchungen eine beträchtliche horizontale Variabilität des eingeschichteten, zuflußbedingten Wasserkörpers feststellen, so kann die Ursache hierfür sowohl in der Variabilität der Zuflußbedingungen als auch in der Variabilität der im See vorherrschenden Bedingungen zu finden sein.

IV.8. Die Folgen der internen Schwingungen auf die Einschichtung und Ausbreitung

Das Auftreten von internen Eigenschwingungen ist nur möglich, wenn der See geschichtet ist. In Abschnitt III.6 sind die Vorgänge ohne Betracht von Zu- und Abflüssen dargestellt worden. Wenn wir jetzt der Einfachheit halber ein Zweischichten-Modell der Dichteschichtung zur Beschreibung heranziehen und ansetzen, daß die Dichte des zuströmenden Fließwassers zwischen der in der Deckschicht bzw. der Bodenschicht liegt, so stellt sich der Einschichtungsvorgang folgendermaßen dar:

Das zuströmende Flußwasser sinkt ab und strömt als bodenberührender turbulenter Dichtestrom bis in den Horizont der Dichtesprungschicht (siehe Abschnitt IV.2). Trotz der Einmischung von Oberflächenwasser sei das Flußwasser immer noch schwerer als das Deckschichtwasser. Im Horizont der Dichtesprungschicht löst sich das Flußwasser vom Boden und breitet sich horizontal entlang der Dichtesprungschicht aus.

Zweierlei Effekte verkomplizieren dieses Bild, wenn periodische Vertikalverlagerungen der Dichtesprungschicht auftreten (wenn also interne Seiches angeregt wurden):

- Der Horizont der Dichtesprungschicht steigt bzw. fällt an dem Unterwasserabhang, verkürzt bzw. verlängert den Weg des bodenberührenden Dichtestroms. Das kann bei geringer Boden-neigung beträchtliche Strecken ausmachen.
- Die mit Vertikalauslenkungen der Isothermenflächen einhergehenden Ausgleichströmungen sind oberhalb der Dichtesprungschicht stets entgegengesetzt gerichtet zu denen unterhalb der Sprungschicht. Es ist zu prüfen, wie die Stabilitätsbedingungen im Bereich der Sprungschicht durch die Einlagerung des Flußwassers geändert werden. Welchen Wert hat die Richardson-Zahl, die das Verhältnis zwischen den (stabilisierenden) Auftriebskräften und der (destabilisierenden) Geschwindigkeitsscherung beschreibt? Damit ist die Rückwirkung der Einschichtung von Flußwasser auf den internen Schwingungsvorgang angesprochen. Es ist zu erwarten, daß, nachdem der Flußwasserkörper sich eingeschichtet hat, sich die Richardson-Zahl erhöht hat, die durch die internen Schwingungen bewirkte Instabilität also abgenommen hat.

- Im Uferbereich zeigen die internen Eigenschwingungen zumeist uferparallele Strömungen (siehe Abschnitt III.6), die hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeit und in der Richtung um 180° mit der Periode schwanken, allerdings in der Deckschicht stets entgegengesetzt zur Bodenschicht. Wenn die Dichte des zufließenden Flußwassers nicht - wie bei den vorangehenden Überlegungen zugrundegelegt - zwischen der Dichte des Deckschichtwassers und der des Unterschichtwassers liegt, stellt sich der Zuström ähnlich dar wie im Fall der windgetriebenen Strömungen (Abschnitt IV.7): Je nach Phasenlage der internen Schwingung gerät das zuströmende Wasser in das mit der Schwingung einhergehende Strömungsfeld, das wegen der langen Perioden der internen Seiches in erster Näherung als quasi-stationär betrachtet werden kann.

Anders stellt sich die Situation dar, wenn die Einschichtung im Bereich der Dichtesprungschicht erfolgt und damit in den Bereich maximaler Stromscherung gelangt: Das Flußwasser wird, wenn es sich in seinen Dichtehorizont eingeschichtet hat, wird "auseinandergerissen", unterschiedlich in Deck- bzw. Bodenschicht eingemischt und wieder "zusammengeführt". Daß sich die Vorgänge oberhalb und unterhalb der Sprungschicht sehr unterschiedlich entwickeln können, ist offensichtlich, besonders, wenn man auch bedenkt, daß der Corioliseffekt noch Einfluß auf die Vorgänge ausübt.

V. WECHSELWIKUNGEN CHEMISCHER UND BIOLOGISCHER ART

V.1. Beobachtungs-Material

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die physikalischen Aspekte des Zufließens und der Ausbreitung des Alpenrheinwassers dargestellt wurden, sollen in diesem Abschnitt Fragen beantwortet werden, die sich mit Veränderungen hinsichtlich der chemischen und vor allem hinsichtlich der biologischen Verhältnisse im Bodensee befassen, die eventuell heute schon erkennbar sind, oder die als Folge der weiteren Baumaßnahme noch zu erwarten sind.

Da die derzeitig laufende Vorstreckung des Alpenrheins der größte technische Eingriff im Bodensee seit der Verlegung der Rheinmündung um 1900 ist und die Arbeiten 1972 begonnen wurden, also schon beinahe 30 Jahre im Gange sind, kann davon ausgegangen werden, daß die Vorstreckung und Ablenkung so weit vorangeschritten ist, daß

- 1.) in der Bregenzer Bucht keine nennenswerten Ablagerungen durch die Schwebstoffe des Rheins mehr stattfinden und
- 2.) die Bucht nicht mehr unter dem direkten Einfluß des Alpenrheins steht.

Abgesehen von dem veränderten Sedimentationsgeschehen, sollte man deshalb zumindest in der Bregenzer Bucht infolge der physikalisch-hydrographischen Bedingungen grundsätzliche Veränderungen der chemischen Bedingungen erwarten, die sich auch in biologischer Hinsicht auswirken müßten. Diese Überlegung stand im Vordergrund der Literaturrecherche und der Befragung bezüglich der chemischen und biologischen Problematik.

Systematische Untersuchungen der physikalischen und chemischen Verhältnisse und des Phytoplanktons sind in der Bregenzer Bucht erst seit 1977 durchgeführt worden, also lange Zeit nach Beginn der Baumaßnahmen. Sie können deshalb das ursprüngliche Bild nicht widerspiegeln und es gibt deshalb keine Möglichkeit eines statistisch haltbaren Vergleichs mit den früheren Verhältnissen.

Etwas günstiger steht es um die Zooplanktondaten, da immerhin schon seit 1971 die Bregenzer Bucht und mindestens vier weitere Stationen im Längsschnitt durch den Obersee in die Untersuchungen mit einbezogen wurden. Insbesondere die gleichzeitig erhobenen Temperaturdaten könnten zumindest Anhaltspunkte für die Klärung der Frage liefern, ob und wie sich seit dem allmählichen Rückgang und schließlich dem Fortfall des direkten Einflusses des Alpenrheins die hydrographische Struktur in der Bregenzer Bucht geändert hat. Hieraus ließen sich dann auch Rückschlüsse auf die Freiwasserbiologie dieses Seeteils ziehen.

Für eine statistische Bearbeitung ist aber auch dieses Material (Temperaturdaten) ungeeignet, da - besonders für die Zeit vor Beginn der Baumaßnahmen - zu wenige Jahresgänge erfaßt worden sind, um die meteorologisch bedingten Variationen der hydrographischen Verhältnisse auszuschalten.

Generell läßt sich sagen, daß die Phyto- und Zooplanktondaten von dem Eutrophierungsgeschehen überlagert sind. Die Daten reichen für eine statistisch fundierte Analyse der Folgen der Rheinvorstreckung nicht aus. Insbesondere die Daten vor der Rheinvorstreckung sind zu dürftig. Prinzipiell ist festzustellen, daß selbst über die Auswertung noch unbearbeiteter Daten und über verbesserte Vorstellungen bezüglich der physikalischen Seite des Problems, eindeutige Antworten auf die Frage nach den biologischen Folgen der Alpenrhein-Vorstreckung nicht möglich sein werden, weil die langsame Umkehr im Trophiezustand des Bodensees sich etwa zeitgleich mit dem allmählichen Voranschreiten der Baumaßnahmen vollzog. Veränderungen in der Freiwasserbiologie lassen sich demnach allenfalls spekulativ dem einen oder dem anderen Prozeß zuordnen.

Die Bodensee-Literatur wurde bis ins Ende des letzten Jahrhunderts gesichtet. Abgesehen von den technisch-praktischen Problemen im Hinterland, der natürlich auch damals schon voraussehbaren Verlandung der Hard-Fußacher Bucht und der wissenschaftlich interessanten Frage, ob sich, ähnlich der an der alten Rheinmündung gerade entdeckten, künftig auch an der neuen Rheinmündung eine unterseeische Rinne ausbilden würde, kann man nichts erfahren - jedenfalls nichts, was uns der Lösung der Frage nach der Auswirkung der jetzigen Baumaßnahme auf die Biologie des Sees näherbringen könnte.

KELLERMANN (1895) erwähnt immerhin, daß durch den Alpenrhein sauerstoffreiches Wasser in die Bregenz-Lindauer Bucht eintragen wird, was sich günstig auf den Fischreichtum der Bucht auswirken müßte,

und daß es ein Vorteil für die örtlichen Fischer sein könnte, daß die Fische, die zum Laichen in den Rhein aufsteigen, nun das bayrische Ufer (und nicht mehr das schweizerische) bevorzugen würden. WASMUND (1927/1928), der seine Strömungstheorien auf Driftbeobachtungen der Schwebnetzfisher aufbaute, sagt in einem Nebensatz, daß die Bregenzer darüber klagten, ihre Bucht sei viel kälter als vor der Verlegung. WASMUND erwähnt weiter, daß ältere Fischer ihm erzählt hätten, einige Strömungen hätten sich verändert. Sehr stark - resp. von grundsätzlicher Natur - kann diese Veränderung aber nicht gewesen sein, das hätte WASMUND sonst sicher ausführlich beschrieben. Es kann als indirekter Hinweis dafür angesehen werden, daß die damalige Verlegung der Rheinmündung die Strömungen im Bodensee (die die Fischer sehr genau kennen mußten) wenig beeinflußt hat.

Diese Ansicht kommt auch schon in den Arbeiten von ELSTER & EINSELE (1937) und ELSTER (1938; 1939) zum Ausdruck, in denen der ganz entscheidende Einfluß des Windes betont wird, während noch in den Arbeiten von AUERBACH & SCHMALZ (1927; 1931), vor allem von SCHMALZ (1933; 1934) und auch noch von AUERBACH & RITZI (1938) und AUERBACH (1939) dem Zu- und Abfluß des Rheins als der einzigen immer in der gleichen Richtung wirkenden Kraft ein sehr großer Einfluß auf die Hydrographie des gesamten Sees zugeschrieben wurde.

Diese Aspekte und neuere Betrachtungsweisen sind in den vorangehenden Abschnitten ausführlich behandelt worden, sodaß wir uns jetzt der Rolle des Alpenrheins für das limnische Geschehen im Bodensee und hier insbesondere auf die Biologie des Freiwassers zuwenden können.

Über die spezifische Rolle des Alpenrheins für die Freiwasserbiologie wird in der Literatur wenig an konkreten Vorstellungen vorgestellt. Welchen Einfluß nehmen Temperatur, Trübung, Turbulenz, Strömungen, Einschichtung, Überschichtung, Mischung, Abfluß, die besonderen chemischen Eigenschaften usw. dieser alljährlich immerhin ein Sechstel bis ein Viertel des Seevolumens ausmachenden Wassermenge des Alpenrheins auf die Verteilung und auf die Biologie der im See lebenden Organismen? Das sind alles Fragen, deren Lösung vorallem für den östlichen Teil des Sees (der Bregenz-Lindauer Bucht) von größter Bedeutung sind, da sich dieser Einfluß dort am deutlichsten zeigen müßte. Es ist uns keine Arbeit bekannt, die diese Problematik gezielt in Angriff genommen hätte.

Dabei waren sich die Limnologen von Anfang an im klaren über die starke Abhängigkeit der Produktionsbiologie von den örtlichen Besonderheiten der hydrographischen Verhältnisse. Vergleichende hydrographisch-biologische Untersuchungen wurden deshalb immer wieder als unerlässlich für die Beurteilung des Seegeschehens postuliert, sind aber letztlich doch nicht konsequent durchgeführt worden. Schon bei AUERBACH et al. (1924; 1926) wird Klage darüber geführt, daß in früheren Untersuchungen, z. B. bei HOFER (1896), keine Angaben zur Hydrographie zu finden sind und deshalb der Vergleich mit den eigenen Befunden - zumindest den quantitativen - kaum möglich sei. Sie selbst schaffen eine derartige Synthese von Hydrographie und Planktonverteilung aber auch nicht und verweisen auf eventuelle spätere, besser gesicherte Aussagen.

In den Berichten und Veröffentlichungen sind zu diesem Aspekt nur wenige Fallbeispiele zu finden, die sich überwiegend mit den Verhältnissen im Überlinger See beschäftigen, wo im Zusammenhang mit der Frage nach der günstigsten Entnahmetiefe für die Sipplinger Fernwasserversorgung die Amplitude der Isothermenschwankungen infolge von Windstau und internen Seiches und die damit kausal verknüpfte Auf- und Abbewegung der Untergrenze der planktonführenden Schicht eine besondere Rolle spielen (GRIM 1939; LEHN 1956, 1963; EINSLE 1969, GAEDKE und SCHIMMELE, 1990).

Die Regel ist allerdings eine eher strikte Trennung von hydrographischer und biologischer Betrachtung der Verhältnisse. Auch der Alpenrhein, als der mit Abstand wichtigste Zufluß des Bodensees, wird in der Literatur zwar keineswegs vernachlässigt, aber er wird eben auch nur monographisch abgehandelt. Insbesondere hat das Phänomen des Rheinbrechs und die Frage über den "Verlauf des Rheines im See" immer wieder das Interesse der Bodenseeforscher gefunden. Für diese Studien wurde in Einzeluntersuchungen saisonale Unterschiede im Karbonatgehalt (SCHMALZ 1933), in der Leitfähigkeit (NÜMANN 1938) und im Trübstoffgehalt (LEHN 1967) von Alpenrhein- und Seewasser als "Tracer" herangezogen; biologische Aspekte wurden in diesem Zusammenhang nicht behandelt.

Das Problem der heterogenen Horizontalverteilung des Planktons und ihre hydrographischen Ursachen ist zweifellos eines der vordringlichsten limnologischen Forschungsthemen im Bodensee. Es steht zu erwarten, daß durch die projektierte stärkere Verknüpfung von physikalischen und biologischen Forschungsansätzen bezüglich dieser Fragestellung die Möglichkeit eines besseren Verständnisses eröffnet wird. Dabei wird die Frage nach der Rolle des Alpenrheinzufusses sicherlich ein bedeutender Aspekt sein. Ob allerdings auch bei der Frage nach der "biologischen Auswirkung der Alpenrhein-Vorstreckung" entscheidende Fortschritte erzielt werden, hängt bestimmt von der Intensität der gezielt betriebenen Untersuchungen ab.

V.2. Beobachtete Veränderungen im Bodensee und mögliche Zusammenhänge mit der Alpenrhein-Vorstreckung

Vorläufig bleiben die möglichen Zusammenhänge zwischen beobachteten Veränderungen und der Alpenrhein-Vorstreckung hypothetisch. Zwei Aspekte sollen angesprochen werden:

V.2.1 Eutrophierung und Sanierung

Tatsache - und zumindest für die zentrale Station Fischbach-Uttwil seit 1961/62 auch fortlaufend gut dokumentiert - ist der Eutrophierungsprozeß infolge wachsender Phosphorbelastung. Dieser Prozeß setzte im Obersee offensichtlich in den 30er Jahren ein und erfuhr nach dem 2. Weltkrieg eine rapide Beschleunigung, die bis Anfang der 70er Jahre anhielt. Mitte der 70er Jahre begannen die eingeleiteten Sanierungsmaßnahmen (Kläranlagenbau, Phosphatfällung, Eindämmung der Waschmittelphosphate) allmählich zu greifen, und nach einigen Jahren der Stagnation auf hohem Niveau sind die Phosphorkonzentrationen im See ab 1979 deutlich rückläufig.

Im Prinzip ähnlich - wenn auch naturgemäß mit großen witterungsbedingten Variationen - verlief die langfristige Entwicklung der Jahresmittelwerte für die Biomasse des Phyto- und des Zooplanktons. Hinzu kamen eutrophierungsspezifische Veränderungen in den jeweiligen Artenspektren, wobei auch hier in jüngster Zeit Anzeichen einer Rückentwicklung zu früheren Verhältnissen erkennbar sind.

Angestrebtes Ziel ist es, den Seezustand der 50er Jahre wiederherzustellen. In bezug auf die Phosphorbelastung ist man heute wieder auf dem Stand der frühen 60er Jahre angelangt. Das Beurteilungskriterium ist hier recht einfach, nämlich die P-Konzentration in der Seemitte zur Zeit der Vollzirkulation. Die biologischen Befunde lassen sich leider nicht so einfach beurteilen, da die Planktonentwicklung im Laufe eines Jahres noch von weiteren, kompliziert ineinandergreifenden meteorologischen, physikalischen, chemischen und biologischen Faktoren mitbestimmt wird (Licht, Temperatur, Schichtung, aktuelle Nährstoffzufuhr, Wegfraß u. a.).

Mit der Eutrophierungsproblematik beschäftigen sich fast alle der bisher 40 IGKB-Berichte. Die Eutrophierung war schließlich das zentrale Anliegen der IGKB in den vergangenen 30 Jahren ihrer Tätigkeit. Für unsere (biologische) Fragestellung besonders zu erwähnen sind die Berichte über die Phytoplanktonentwicklung (Ber. 18: BÜRGI 1976; Ber. 23: BÜRGI & LEHN 1979; Ber. 39: KÜMMERLIN & BÜRGI 1989), über die Zooplanktonentwicklung (Ber. 20: EINSLE 1977; Ber. 37: EINSLE 1987), über die Oligochaeten als Indikatoren für die Belastung des Seebodens (Ber. 38: PROBST, B. WAGNER & MEIER 1988) und über die Entwicklung der Phosphorbelastung (Ber. 40: G. WAGNER & BÜHRER 1989).

Fragen der Fischereibiologie sind bei ELSTER (1940), KRIEGSMANN (1955; 1958) und bei NÜMANN (1962, 1966, 1973) abgehandelt.

Als zusammenfassende Überblicke seien die Aufsätze von KUHN (1957), KIEFER (1962), ELSTER (1974) und LEHN (1981/82) erwähnt.

Die dokumentierten Veränderungen haben allerdings primär nichts mit der Alpenrhein-Vorstreckung zu tun.

V.2.2 Die einzige konkret geäußerte Hypothese

Die Alpenrhein-Vorstreckung findet in der Literatur nur an zwei Stellen Erwähnung: bei EINSLE (1987) und bei KÜMMERLIN & BÜRGI (1989), und zwar im Zusammenhang mit den Besonderheiten der Zoo- und der Phytoplanktonentwicklung in der Bregenzer Bucht in jüngerer Zeit.

EINSLE, der seit 1962 regelmäßig die zentrale Station Fischbach-Uttwil, seit 1971 aber mindestens fünf Stationen im Längsschnitt des Obersees, darunter auch eine Station im Zentrum der Bregenzer Bucht, hinsichtlich der Artenverteilung und Biomasse des Zooplanktons untersucht hat, stellt in seinem zusammenfassenden Bericht über die Entwicklung in den Jahren 1972 - 1985 (EINSLE 1987) einen allgemeinen Rückgang der Biomasse im Obersee fest, der aber in der Bregenzer Bucht stärker gewesen sei als an den übrigen Stationen, so daß die früher auffällige Sonderstellung des Crustaceenplanktons in der Bregenzer Bucht für die meisten Arten verflachte - EINSLE belegt dies mit zahlreichen Beispielen - und die Verhältnisse sich mehr und mehr denen im übrigen See angeglichen hätten. Die Horizontalverteilung weise also nicht mehr die von früher gewohnten Ost-West-Gradienten auf.

Als Erklärung für die von den Verhältnissen im übrigen See abweichende Populationsdynamik (in diesem Falle des Phytoplanktons) bringen KÜMMERLIN & BÜRGI (1989, S.25) folgendes zum Ausdruck: "Die Strömungsverhältnisse durch den Einfluß des Alpenrheins bewirken

einen gewissen Abschluß der Bregenzer Bucht gegenüber den westlichen Seeteilen. Durch die vorgesehene weitere Vorstreckung des Alpenrheins sind in Zukunft Änderungen zu erwarten." In dieser Bemerkung steckt die Andeutung, daß als Folge der Alpenrhein-Vorstreckung auch bezüglich des Phytoplanktons Änderungen - und zwar vermutlich ebenfalls im Sinne eines Ausgleichs des Ost-West-Gradienten - zu erwarten sind. Nähere Erläuterungen, worin die abweichende Populationsdynamik des Phytoplanktons in der Bregenzer Bucht denn eigentlich besteht, werden in diesem Bericht nicht gegeben; in den vorangegangenen Berichten (BÜRGI 1976; BÜRGI & LEHN 1979), in denen die Phytoplanktonentwicklung zwischen 1961 und 1975 behandelt wird, fehlen sie schon deshalb, weil die Station Bregenzer Bucht erst ab 1977 systematisch beprobt wurde.

Die Hypothese, daß wegen der Alpenrhein-Vorstreckung die neuere Planktonentwicklung in der Bregenzer Bucht offensichtlich etwas anders verläuft als im übrigen See, scheint auf den ersten Blick einleuchtend. Nun muß man allerdings bedenken, daß es im Zuge des Eutrophierungsprozesses eine Sonderentwicklung des Planktons in der Bregenzer Bucht gegeben hat, die - da sie längst vor dem Beginn der Baumaßnahmen stattfand - nichts mit der Alpenrhein-Vorstreckung zu tun haben kann. So zeigte sich z. B. bei den seit den 50er Jahren im See neu auftretenden Arten und Bastardformen eine deutliche Bevorzugung des nordöstlichen Seeteils, insbesondere der Bregenzer Bucht (EINSLE 1977).

Zur Erklärung der neueren Planktonentwicklung in der Bregenzer Bucht bedarf es nicht unbedingt der Alpenrhein-Vorstreckung. Was nicht heißen soll, daß Effekte dieser Maßnahme nicht doch in der allgemeinen Entwicklung versteckt sind, die aber offensichtlich stark überwiegend von dem Wandel der Phosphorbelastung gesteuert wird. Denn es ist schwer vorstellbar, daß ein derart gravierender Eingriff, dessen erklärte Absicht es ist, den früher offensichtlich großen Zustrom von Rheinwasser - dessen Trübstoffgehalt zumindest doch Wirkung auf das Lichtklima im Freiwasser und damit auf die Produktionsbiologie des Phytoplanktons gehabt haben müßte - möglichst vollständig von der kleinen Bucht fernzuhalten, ohne Folgen für das limnische Geschehen in diesem Seeteil geblieben sein sollte.

Weder darüber, noch über die Veränderungen hinsichtlich der anderen physikalischen Faktoren (Strömung, Temperatur, Schichtung) oder der chemischen Eigenschaften (Nährstoffgehalt) geben die Berichte und Veröffentlichungen eine Auskunft.

V.3. Der Ost-West-Gradient

In keinem Beitrag, wo von der Sonderstellung der Bregenzer Bucht in bezug auf die Planktonbiologie die Rede ist, wird der Alpenrhein und sein hydrographischer Einfluß auch nur erwähnt. Stets werden die besonderen klimatischen Bedingungen des östlichen Seeteils hervorgehoben (die im April/Mai sich häufenden Föhnlagen, die günstigeren Lichtbedingungen) und natürlich die spezielle Morphologie der Bucht und der benachbarten Gebiete mit ihrem relativ großem Anteil von litoralen Lebensräumen. Diese sog. "Kinderstuben des Phytoplanktons", in denen die Entwicklung früher einsetzt und aus denen immer wieder Nachschub ins offene tiefe Freiwasser gelangt, wurden jedenfalls von LEHN (1965, 1971) als die hauptsächlichste Ursache für einen gewissen Ost-West-Gradienten herausgestellt. An diesen grundsätzlichen Bedingungen hat die Alpenrhein-Vorstreckung nichts geändert.

MUCKLE (1956) erklärt den von ihm am 18./19.1.1954 vorgefundenen sehr starken Ost-West-Gradienten in der Phyto- und Zooplanktonbesiedlung (0-50 m) damit, daß der vorherrschende Westwind die oberflächlichen Wasserschichten samt ihrer Planktonbevölkerung in den östlichen Seeteil getrieben und dort konzentriert habe.

Es handelt sich hierbei aber zweifellos um einen Sonderfall, sodaß sich hieraus keine verallgemeinernden Aussagen herleiten lassen.

Schon WASMUND (1933) und später ELSTER & EINSELE (1937, Messungen 27.-29.9.1932) machten darauf aufmerksam, daß die Schichtdicke des Epilimnions von E nach W abnimmt, brachten dies allerdings in Zusammenhang mit der allgemein größeren Windhäufigkeit und Windstärke und der dadurch bedingten größeren Durchmischungstiefe im östlichen Seeteil. In der Bregenzer Bucht mit ihren besonders starken vertikalen Austauschvorgängen wird außer den Winden aus dem Rheintal ein direkter dynamischer Einfluß des Rheins und der Bregenzer Ach als Mitursache für die größere Durchmischungstiefe vermutet. Systematische Untersuchungen dazu gibt es nicht. Es wäre also zu überprüfen, ob es einen grundsätzlichen Ost-West-Gradienten hinsichtlich der Schichtdicke des Epilimnions überhaupt gibt und worauf er evtl. beruht.

Nach HARTMANN (1984) sprechen fischereibiologische Beobachtungen für "ein möglicherweise klimatisch beeinflusstes limnologisch-biologisches Ost-West-Gefälle im Bodensee-Obersee. Für die Fischer bedeutet das: von Ost nach West sich verschlechternde Fangaussichten."

AUERBACH et al. (1926) kamen übrigens zu dem Schluß, daß das Phytoplankton überall im See qualitativ von gleicher Beschaffenheit sei; "dagegen sind quantitative Unterschiede festgestellt, derart, daß die Menge eines Planktonten gleichmäßig, und zwar gegen Westen zunimmt" (gezeigt am Beispiel von *Asterionella*, 12.-14.7.24). GRIM (1939) entlarvt dieses Beispiel als irreführend, da es nur für die 5 m-Proben zutreffe, jedoch nicht für die Wassersäule 0-100 m. Hier seien zwar die Werte für die Stationen an der neuen Rheinmündung und vor Lindau tatsächlich sehr niedrig (Erklärung: die verdünnende Wirkung des nahezu planktonlosen Flußwassers), gefolgt von denen vor der Alt-Rheinmündung und Staad-Meersburg, die größte Menge sei allerdings die zwischen Romanshorn und Langenargen gefundene.

GRIM (1939) führt nun seinerseits einige Vergleiche der Stationen Bregenzer Bucht, vor Langenargen und vor Überlingen durch, kann aber keine vereinheitlichende Feststellung treffen (Werte aus dem Jahr 1935).

V.4. Biologie des Seebodens - Oligochaetenbesiedlung

Nach Untersuchungen von PROBST, B. WAGNER & MEIER (1988) ist die Dichte der Oligochaetenbesiedlung direkt (und sogar mit einer erstaunlich guten Korrelation) abhängig von der Zufuhr an organischer Substanz.

Zwar ist das Alpenrheinwasser mit organischen Schwebstoffen relativ wenig belastet, jedoch wird wegen seiner gewaltigen Wassermenge durch den Rhein erheblich mehr partikulär gebundene organische Substanz in den See eingetragen als durch alle anderen Zuflüsse zusammengenommen. Diese organische Substanz sedimentiert vor allem im Mündungsgebiet. Der Seeboden im Mündungsgebiet des Alpenrheins weist deshalb die höchste Oligochaetendichte des gesamten Bodensees auf.

Es ist anzunehmen, daß sich im neuen Sedimentationsraum des Alpenrheins die Oligochaetendichte erhöhen wird und daß sie im alten abnehmen wird (Abb. 45).

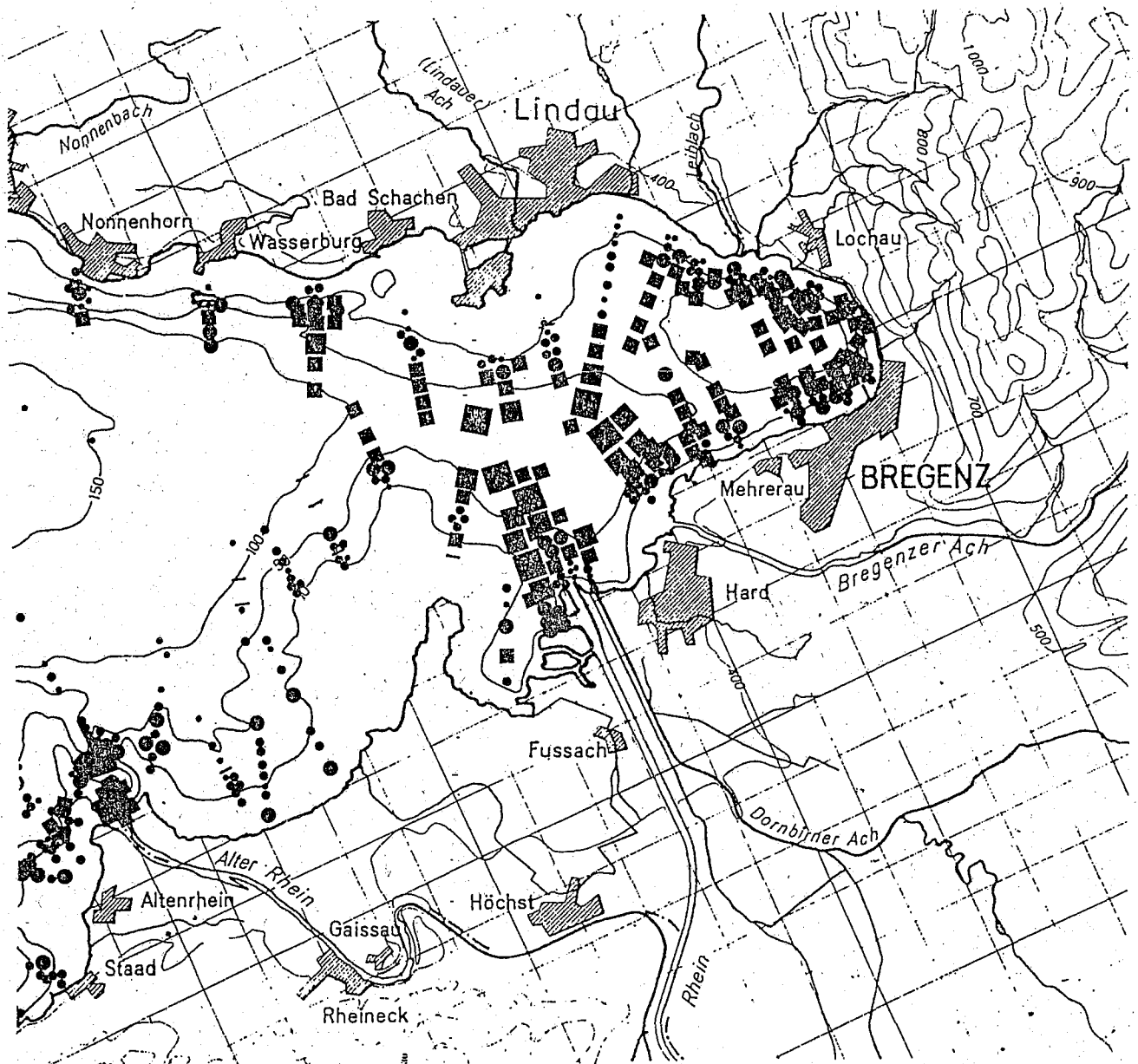
V.5. Einfluß auf den Trophiezustand (Phosphorhaushalt)

Der Alpenrhein transportiert jährlich 2 - 3 Mio m³ Sink- und Schwebstoffe in den Bodensee. Während das grobe Material innerhalb kurzer Wegstrecke sich auf den Boden absetzt, bleibt das Tonmaterial (2 m) am längsten im Wasserkörper und wird durch die Vorstreckung nur insofern beeinflusst, daß es an der neuen Mündung weiter draußen im offenen See anders von den Wasserbewegungen im See erfaßt und weitertransportiert wird.

Die Sedimentation der mineralischen Sinkstoffe wird - und gerade das ist ja mit der Baumaßnahme beabsichtigt - von der bereits sehr flachen (verlandeten) Hard-Fußacher Bucht in den tieferen See verlagert. Der direkte Weg der Partikel zum Seegrund wird dadurch erheblich verlängert, und zusätzlich ist noch anzunehmen, daß auch die horizontale Verteilung der Rheinsedimente im See sehr viel weitläufiger sein wird.

Das hätte zwei Konsequenzen:

Die Sedimente aus dem vergleichsweise phosphatarmen Alpenrhein können auf ihrem Weg durch das phosphatreiche Hypolimnion des Sees adsorptiv Phosphate binden und zum Seegrund transportieren. Je länger die Sinkstrecke im phosphatreicheren Medium ist, desto mehr Phosphate können gebunden werden - bis zur Herstellung des neuen Fließgleichgewichtes.



Individuendichte / m²

(Tiere $\approx$ 1cm)

- | | |
|-----------------|-------------------|
| - 0 | ■ 10.000 - 49.900 |
| • 100 - 900 | ■ 50.000 - 99.900 |
| • 1.000 - 4.900 | ■ 100.000 u. > |
| ● 5.000 - 9.900 | |

BODENSEE

Seeboden - Untersuchung

1972 - 1978

Individuendichte der Tubificiden

M 1 : 100 000

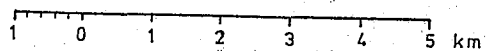


Abb. 45: Verteilungsbild der Oligochaeten im Mündungsbereich von Altem Rhein, Neuem Rhein, Dornbirner Ach, Bregenzer Ach (aus IGKB-Bericht, 25).

Für den Bodensee ist die quantitative Wirkung dieses Vorgangs anfangs offensichtlich stark überschätzt worden. U. a. (z. B. MÜLLER & TIETZ 1966; ELSTER 1974) hat auch WAGNER (1976) vermutet, daß allochthone Sinkstoffe eine wesentliche Rolle im Stoffhaushalt des Bodensees spielen. Das gab Anlaß zu einer Reihe von Adsorptions-/Desorptions-Ver suchen mit Sedimenten aus verschiedenen Zuflüssen und Bodenseewas ser mit dem Ergebnis, daß nur die Sinkstoffe aus dem Rhein (und in sehr viel geringerem Maße aus der Bregenzer Ach) Phosphate zu binden vermögen. Die aus den Experimenten abgeleiteten Umsätze durch Ad sorption und Desorption deuten auf einen, gemessen am Gesamtumsatz, nur sehr geringen Einfluß dieser Prozesse hin (WAGNER 1989). Exakte Bestimmungen stehen noch aus, wären aber wegen des raschen Tro phiewandels in den vergangenen Jahrzehnten ohnehin nur vorläufig gewe sen.

STABEL & GEIGER (1985; die Untersuchungen wurden 1981 durchge führt) schätzen, daß die Sinkstoffe des Alpenrheins jährlich maximal 18 - 25 t Phosphatphosphor aus dem hypolimnischen Seewasser zu binden und aus dem Verkehr zu ziehen vermögen (das wäre weniger als 1 % des damals während eines Jahres im See bio-verfügbaren Phosphats).

Dadurch, daß bislang der weitaus größte Teil der Rhein-Schwebstoffe in der flachen Hard-Fußacher Bucht sedimentierte, dürfte dieser ohnehin schon geringe Maximalwert auch nicht annähernd erreicht worden sein. Eine weit bessere Ausnutzung der Phosphatbindungskapazität ist infolge der längeren Sinkstrecke künftig zu erwarten, verliert allerdings immer mehr an der - wie bereits angemerkt - ohnehin geringen Bedeutung, je mehr sich die Phosphatkonzentrationen in Rhein- und Seewasser anglei chen.

(Zu diesem Thema und zur biologischen Wirkung von Fluß- resp. Bach trübstoffen s. a. CLASEN & BERNHARDT 1969).

An Sedimentkernen aus der Seemitte (252 m) wurde festgestellt, daß in der Zeit vor der Verlegung der Rheinmündung um 1900 der Anteil von Feststoffen aus dem Rhein - erkennbar z. B. am höheren Medianwert der Korngröße und am höheren Anteil von Kobalt - an dieser Stelle sehr viel größer war als in den nachfolgenden Jahrzehnten (FÖRSTNER et al. 1974). Dies könnte durch eine sehr viel weiter gestreute Sedimentation von Rheintrübstoffen aber auch durch die Ausläufer gelegentlicher Hangrutschungen im ehemaligen (steilen) Mündungsgebiet zustande gekommen sein.

Über die lokalen Unterschiede der Sedimentationsraten (sowohl der aktuellen wie der früheren) liegen unterschiedliche Ergebnisse vor. Es muß bedacht werden, daß Mischproben aus den obersten 2 - 5 cm des Seegrundes Zeiträume von weniger als einem Jahr bis 20 oder mehr Jahren repräsentieren können.

Als ein weiterer Punkt soll noch die Frage der Einschichtungstiefe des Rheinwassers angesprochen werden. Das Rheinwasser ist noch immer wesentlich phosphatärmer als das des Hypolimnions im See. Falls es sich künftig tiefer einschichten sollte als bisher (bislang setzen die geringen Tiefen im Mündungsgebiet eine Grenze und erzwingen Mischvorgänge in der Deckschicht, die im neuen, viel tieferen Mündungsgebiet möglicherweise nicht in dem Maße stattfinden werden), so würde dies insgesamt verdünnend auf die P-Konzentration im See wirken.

Alle drei angesprochenen Punkte könnten so gedeutet werden, daß die Alpenrhein-Vorstreckung, insgesamt gesehen, eher im Sinne der Sanierungsmaßnahmen wirken, d. h. zur Verminderung der P-Konzentration im See beitragen könnte. Dabei muß allerdings regional differenziert werden. Wie z. B. wirkt der Fortfall des verdünnenden Rheinwassers innerhalb der Bregenzer Bucht? Bregenzer Ach (und erst recht Dornbirner Ach) zeigen weit höhere P-Konzentrationen und gewinnen in der Bregenzer Bucht an Einfluß.

VI. PROBLEMSTELLUNG NACH DEM HEUTIGEN WISSENSSTAND UND WERTUNG DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Wie in einigen der vorangehenden Abschnitte schon angedeutet wurde, ergeben sich für die numerisch-mathematische Modellierung des Zustroms des Alpenrheins in den Bodensee eine ganze Reihe von anspruchsvollsten wissenschaftlichen Problemstellungen, die man sich - ohne deshalb vor der Herausforderung zu kapitulieren - stets vor Augen halten sollte. Andernfalls liefe man Gefahr, aus den Ergebnissen der einzelnen approximativen Näherungslösungen Vor-Urteile herzuleiten und Vorurteile aufzubauen, aus denen ein Hemmschuh für den wissenschaftlichen Fortschritt werden kann. Als Beispiel sei die "Auerbachsche Strömungswalze" angeführt, die manchem Beobachter in den vergangenen Jahrzehnten den unbefangenen, kritischen Blick erschwert zu haben scheint.

Die nun folgende Liste von Anforderungen an das zu entwickelnde numerische Modell (oder besser: an die zu entwickelnde Modellhierarchie) spiegelt die ungeheure Komplexität des zu untersuchenden Phänomens wider, wobei - nicht nur nebenbei - bedacht werden sollte, daß von den biologisch-chemischen Prozessen vorderhand abgesehen wird.

Wie (auch durch die Gliederung dieser Studie) zum Ausdruck gebracht werden soll, sind es zunächst die dynamischen Vorgänge im See, die den bestimmenden Hintergrund für die Zuströmung des Alpenrheins bilden und die rechnerisch modellierend teilweise erst in ganz groben Ansätzen behandelt worden sind. In jüngerer Zeit sind eine Reihe von bewährten und teilweise neuentwickelten Verfahren der seenphysikalischen und ozeanographischen Fachrichtungen für den Bodensee zur Anwendung gebracht worden. Sowohl durch messende Beobachtungen (HOLLAN, 1974; KROEBEL, 1979) als auch durch den Einsatz von numerischen Modellen (HOLLAN & SIMONS, 1978; HOLLAN, HAMBLIN and LEHN, 1990; HOLLAN, 1981; SERRUYA et al., 1984; BÄUERLE, 1981) wurden Einblicke in das hochkomplizierte physikalische Geschehen im See eröffnet. Damit wurde die vorrangige Notwendigkeit von aufwendigen Untersuchungen dieses Problembereichs verdeutlicht.

Es sollen aber auch die diesbezüglichen Bemühungen seit den Anfängen der Bodensee-Forschung von AUERBACH et al., WASMUND, NÜMANN, ELSTER, LEHN (siehe Literaturverzeichnis) erwähnt und gewürdigt werden, bildet doch das reichhaltige Beobachtungsmaterial eine Basis für unser anschauendes Verständnis der Bewegungsvorgänge im Bodensee.

Wie nicht anders zu erwarten ist, ergibt sich aus den drei räumlichen und der zeitlichen Dimension der Problemstellung in der Regel eine ebenso dimensionierte Lösung. Lösungsansätze, die eine (oder mehrere) dieser Dimensionen ausklammern, müssen durch physikalische Begründungen rechtfertigbar sein, wenn die erzielten Ergebnisse als Abbilder der Wirklichkeit gelten sollen. Ansonsten sind sie auf der Ebene von Prinzipstudien oder Gedankenexperimenten anzusiedeln und als solche zu interpretieren.

Der Zufluß des Alpenrheins in den Bodensee ist offensichtlich ein Vorgang, der die Betrachtung sämtlicher 4 Dimensionen erfordert: Die zeitliche Variabilität ist ein hervorstechendes Merkmal sowohl auf jahreszeitlichen und täglichen, manchmal sogar auf stündlichen Skalen. Die Vertikalabhängigkeit ist über weite Strecken des Jahres durch die Schichtung des Sees manifestiert, aber auch beim ungeschichteten See ist der Zustrom nicht gleichförmig über die ganze Wassersäule gegeben. Und schließlich ist die seitliche Inhomogenität des zufließenden Wassers offensichtlich.

VII. ZUSAMMENFASSUNG

Die Dokumentation der Untersuchungen mit Angaben über die Folgewirkungen, die die Vorstreckung der Alpenrheinmündung verursacht, geht von der historischen Entwicklung der Mündungsverlegung in die Fußacher Bucht um 1900 aus. Die Zielsetzungen des zwischen Österreich und der Schweiz 1892 geschlossenen Staatsvertrages für die Regulierung des Alpenrheins durch Verkürzung des Unterlaufes um 8 km und Verlegung der Mündung waren

- Behebung der Hochwassergefahr im unteren Alpenrheintal,
- Vermeidung weiterer Geschiebeablagerungen im Unterlauf,
- Verbauung der Wildbäche und anderer Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet zur Reduktion der Geschiebezufuhr.

Über die Entwicklung der Schwebstoff- und Geschiebeablagerungen an der neuen Mündung war man Fehleinschätzungen unterlegen und hatte, vereinbart durch weitere Staatsverträge, die Vorstreckung der Regulierungsbauwerke an der Mündung und deren Änderung im Unterlauf vorgenommen. Ein wesentliches Ziel war, daß die Fußacher Bucht und vor allem auch die Bregenzer Bucht durch den eingetretenen Verlauf des Mündungvorstoßes auf lange Sicht nicht vom Obersee abgetrennt werden und nicht einer schnellen Verladung unterliegen sollten. Diese Aufgabenstellung wurde durch die gemeinsame Rheinkommission seit 1973 mit der ständigen Vorstreckung der Mündungsbauwerke erfolgreich betrieben. Mit diesen wasserbaulichen Maßnahmen erfolgte ein großer Eingriff in die hydrologischen und limnologischen Randbedingungen des Obersees. Daraus hat sich die Frage ergeben, mit welchen Folgewirkungen auf den Bodensee hieraus zu rechnen sei.

Um einen Überblick über den Kenntnisstand und Folgerungen für künftige Untersuchungsansätze zu diesem Fragenkomplex zu gewinnen, wurde die vorliegende Recherche über die aus wissenschaftlichen Untersuchungen am Bodensee hierzu greifbaren Ergebnisse vorgenommen. Generell ist nach der Erhebung festzustellen, daß die gezielte Aufklärung der Folgewirkungen nur in wenigen speziellen Fragestellungen durchgeführt worden ist und die Einflüsse vielfach nur als Nebenaspekt in Untersuchungen mit anderen Zielsetzungen behandelt wurden.

Die physikalischen Randbedingungen des Einstroms sind durch die Impulsstärke und -richtung des Zustroms sowie seine Dichte im Vergleich zum benachbarten Seewasser gegeben. Der weitere Verlauf des Einstroms in Gestalt des im See-Inneren vordringenden Mischwasserkörpers aus Zufluß- und Seewasser unterliegt komplizierten Wechselwirkungen mit den see-eigenen Schichtungs- und Strömungsverhältnissen. Die Impulsgröße des Einstroms ist dann gegenüber dem Impulseintrag durch den Wind in den See von untergeordneter Bedeutung. Das räumlich variierende und zeitlich i.a. stark veränderliche Massen- und Bewegungsfeld des Sees hat besonders vor der Mündung

eine stark modifizierende Wirkung auf die Ausbildung und den späteren Verlauf des Zufluß-Mischwasserkörpers. Die Kenntnis dieser großräumigen see-eigenen physikalischen Einflußfelder bildet eine grundlegende Voraussetzung dafür, daß die zuflußerzeugten Änderungen des seenphysikalischen und limnologischen Zustands des Obersees quantitativ festgestellt werden können.

Zu den Randbedingungen der Zuflußseite gehört neben dem Abflußverhalten auch die Beschaffenheit des Rheinwassers, die in den vergangenen Jahrzehnten durch Stauhaltungen und natürliche Regimeveränderungen Abwandlungen erfahren hat. Was die Abflußverhältnisse betrifft, so wurde aus langjährigen statistischen Analysen der Bodenseewasserstände und Rheinabflüsse ermittelt, daß die monatlichen mittleren Abflüsse des Alpenrheins im Winterhalbjahr zugenommen haben. Dieses Verhalten äußert sich auch im Anstieg der niedrigsten 7-tägigen Abflußmittelwerte. Des weiteren ist die Abnahme der höchsten mittleren täglichen Abflüsse signifikant. Die umrissenen Veränderungen im jährlichen Abflußregime des Alpenrheins sind wesentlich bedingt durch den Ausbau von Kraftwerkspeichern und die Überleitungen vor allem aus dem Inn-Gebiet durch die Vorarlberger Ill-Kraftwerke. Der zur Zeit bestehende nutzbare Speicherraum im Einzugsgebiet beträgt rund 780 Mio. m³. Der Betrieb macht sich durch die Aufhöhung der Niedrigwasser- und das Fallen der Hochwasserabflüsse deutlich bemerkbar.

Hinsichtlich der Dichte des Alpenrheinwassers ist festzustellen, daß beträchtliche Kenntnislücken über den Konzentrationsgang der Summe der gelösten Stoffe in Abhängigkeit vom Abflußverhalten bestehen. Daher sind Einblicke, die sich aufgrund dieses Zusammenhangs in irgendwelche Veränderungen als Folge der bisherigen Mündungsvorstreckung ergeben könnten, kaum möglich. Der größere Einfluß der Schwebstoffführung auf die Dichte des Alpenrheinwassers ist ausführlicher untersucht worden, läßt sich jedoch wegen der ungenauen Kenntnis der Schwankungsbreite in der Relation zwischen Abfluß und Schwebstoffgehalt nicht ausreichend bestimmen. Es ist bestenfalls nur im Bereich mäßiger Abflüsse, die mengenmäßig weniger beitragen, möglich, einen Einfluß der Änderungen durch den Mündungsausbau zu ermitteln. Vor diesem Hintergrund werden beispielsweise die Veränderungen der Schwebstoffführung aufgrund von Stauhaltungen und anderen baulichen Eingriffen im Oberlauf nur bedingt faßbar, da der wesentliche Schwebstoffeintrag außerdem bei extremen Hochwasserereignissen erfolgt, deren Schlammfracht durch zu geringe oder fehlende Messungen nicht genügend genau quantifiziert werden kann.

Im Hinblick auf die Temperaturschwankungen des Zuflusses, die ebenfalls zur Dichteänderung wesentlich beitragen, sind der sinusförmig idealisierte Verlauf des Jahrganges und mittlere tägliche Änderungen für einzelne Monate bestimmt worden. Die Abweichungen der Temperaturschwankungen in extremen Einzelereignissen der Wasserführung sind in der Temperatur/Abflußbeziehung nicht erfaßt, was die Möglichkeit, die Wirkung der Mündungsvorstreckung

festzustellen, auf gleichbleibende oder langsam veränderliche Abflußsituationen einschränkt.

Von den wenigen gezielten Untersuchungen sind die des Deltawachstums und des Sohlgefälles auf den letzten Kilometern vor der Mündung zu nennen. Die Ergebnisse bilden wesentliche Ausgangsinformationen für den gesamten neueren Mündungsausbau und bestätigen die Wirksamkeit der Vorstreckungsmaßnahmen, durch welche die Feststofffracht von den östlichen Seeteilen ferngehalten werden soll. Aufgrund der Vermessung der Bregenzer Bucht von 1979 hat sich gezeigt, daß das Gebiet der Hauptvorschüttungen deutlich nach Nordwesten verlagert ist. Auf die Entwicklung bis 1989 kann nicht eingegangen werden, da die Vermessung aus diesem Jahr noch nicht veröffentlicht vorliegt. Im mündungsnahen Unterlauf des Alpenrheins tritt dagegen eine unerwünschte Entwicklung durch das mit fortschreitender Vorstreckung abnehmende Sohlgefälle ein. Hierdurch werden Ablagerungsvorgänge im Mündungszulauf begünstigt, die der ursprünglichen Intention einer absetzungsfreien Zuführung zum Bodensee entgegenwirken. In diesem Zusammenhang greifen auch die Seestandsänderungen stärker in die Wirkungsweise der Mündungsgestaltung auf den Feststofftransport zum See ein.

Die deltabildende Ablagerung der gröberen Feststoffanteile ist stark zu unterscheiden von der Absetzung der feineren Feststofffracht, die als Schwebstoffanteile des vom Einstrom gebildeten Mischwasserkörpers um so weiter forttransportiert werden je kleiner die Sinkgeschwindigkeit der einzelnen Fraktionen sind. Das Feinmaterial verteilt sich daher auf eine wesentlich größere Fläche des Seebodens, die sich infolge der Strömungsverhältnisse noch auf bestimmte, häufiger betroffene Bereiche - wie etwa den unterseeischen Abhang entlang dem Nordufer des zentralen Teils des Obersees - unterscheiden lassen. Die Variabilität des Strömungsfeldes, das im See-Innern auf den Flußschwebstoffe enthaltenden Wasserkörper lenkend und dispergierend einwirkt, ist mit großer Wahrscheinlichkeit als Ursache dafür anzusehen, daß die sedimentierten feineren flußbürtigen Stoffe größtenteils schlecht sortiert vorgefunden werden.

Mit dieser Betrachtung rücken die Ausbreitungsprozesse ins Blickfeld, denen der Zustrom des Alpenrheins im See-Innern unterliegt. Die steuernden see-eigenen Strömungssysteme und inhomogenen Massenverteilungen, die nicht nur räumliche Änderungen aufweisen, sondern auch aus mehr oder weniger starken zeitlichen Schwankungen bestehen, werden aufgrund der vorliegenden exemplarischen Untersuchungen ausführlich behandelt. Im einzelnen betrifft dies den jahreszeitlichen Zyklus der Hauptdichteschichtung, der am Beispiel des Seejahres 1979/80 nachgebildet wurde, die internen Seiches sowie Auftriebs- und Absenkungsvorgänge, die vornehmlich für Fälle westlicher Windrichtungen untersucht wurden.

Aufgrund der räumlich stark variabel strukturierten internen Seiches, die windinduziert sind und voll ausgeprägt im Sommer und Herbst auftreten, kann die momentane Lage des Einstromwasserkörpers kurzfristig beträchtlich schwanken. Hinsichtlich der Änderungen in der Tiefenlage sind die Verlagerungen besonders groß im Tiefenbereich der Hauptdichtesprungsschicht, in dem die generell hohen Vertikalauslenkungen der internen Seiches maximale Werte annehmen. Dadurch, daß die Schwingungen infolge der ablenkenden Kraft der Erdrotation zu Drehwellen umgeformt werden, sind ihre Strombahnen, in horizontaler Projektion gesehen, generell nicht linear, sondern bilden horizontal-zweidimensional geschlossene Kurven, die die Ausbreitungsbewegung des Einstromwasserkörpers entsprechend maskieren. Die Zusammenhänge wurden im einzelnen für die verschiedenen Schwingungsordnungen durch Berechnungen mit einem Zweischichtenmodell des Obersees ermittelt, das fallweise für saisonal typische Schichtdicken und Dichteunterschiede angewendet wurde.

Die großräumigen windgetriebenen Zirkulationen wurden auf der Grundlage exakt synoptischer Strömungsmessungen in wenigen Fällen ausführlich betrachtet, wobei insbesondere die Entwicklung von Auftriebs- und Absenkungsvorgängen mit dreidimensionalen Modellrechnungen nachgebildet wurde. Diese Untersuchungen lassen darauf schließen, daß Starkwindereignisse erhebliche kurzfristige Verschiebungen und Vermischungseffekte am Einstromwasserkörper bewirken können, wenn dieser in den Bereichen hoher Intensität des see-eigenen Bewegungsfeldes liegt.

Die Wechselwirkungen der genannten großskaligen see-eigenen Schichtungsvorgänge und Bewegungssysteme mit dem Einstrom im Nahbereich der Mündung wurden durch Messungen, theoretische hydrodynamische Betrachtungen und physikalische Modelle untersucht. Die behandelten Fälle vermitteln erste Einblicke in den zwar zusammenhängend strukturierten Einstromprozeß, lassen aber noch wesentliche Züge der Hauptprägung offen, die durch die begleitenden besonderen turbulenten Prozesse bei der Bildung des Mischwasserkörpers aus Fluß- und Seewasser vor der Mündung vor sich gehen. Umlenkungseffekte an diesem Mischwasserkörper, die durch angeströmte Bodenformen erzwungen werden, wurden durch einzelne Beobachtungen und Messungen nachgewiesen. Diese orographischen Einflüsse können markante Fernwirkungen dadurch erreichen, daß der Einstromwasserkörper episodenhaft in weit voneinander entfernte Seegebiete geleitet wird.

Im Hinblick auf den Erkenntnisstand über die biologischen Folgewirkungen der Mündungsvorstreckung ist festzustellen, daß der Einfluß des Rheins auf die biologischen Strukturen und Prozesse im Bodensee bis jetzt noch nie Gegenstand einer eigenen Untersuchung gewesen ist. Es können daher zum jetzigen Zeitpunkt keine gesicherten Aussagen zu dieser Fragestellung gegeben werden. Gleichwohl stehen zumindest Datensätze über horizontale Verteilungsmuster des Planktons und des Zoobenthos vor der Vorstreckung zur Verfügung, die als Referenzmaterial für allfällige Veränderungen gegenüber dem früheren Verteilungsbild im östlichen Seebecken genutzt werden können.

Danach läßt sich für die Situation vor der Vorstreckung folgendes feststellen:

- Sowohl Phyto- als auch Zooplankton zeigten im Bereich der Bregenzer Bucht eine saisonal frühere und quantitativ oft stärkere Entwicklung als in den Seemittestationen,
- Für das Zoobenthos wurden besonders ausgeprägte Besiedlungsschwerpunkte der Schlammröhrenwürmer vor der Rheinmündung festgestellt.

Für die Beobachtungen bezüglich der Zoobenthosverteilung vor der Rheinmündung läßt sich ein gut gesicherter direkter Zusammenhang mit dem Rhein nachweisen, da allgemein erhöhte Besiedlungsdichten der Schlammröhrenwürmer vor Flußmündungen beobachtet werden und eine statistisch hoch signifikante Korrelation zwischen allochthoner Zufuhr an organischem Kohlenstoff und Tubificidendichte festgestellt wurde.

Im Gegensatz dazu ist die Interpretationsbasis für die beobachteten Planktonverteilungsbilder bis jetzt noch nicht gegeben, um einen allfälligen Einfluß des Rheins gegenüber anderen Einflußfaktoren wie Klima, Beckenmorphologie etc. sicher abzugrenzen. Erschwerend für die Ursachenanalyse ist vor allem die zeitliche Überlagerung der vorhandenen Datensätze durch die Eutrophierungsentwicklung des Sees.

Die Literaturdokumentation macht deutlich, daß die Zusammenhänge zwischen hydrographisch-seenphysikalischen und biologischen Vorgängen bei weitem noch nicht ausreichend verstanden sind und ein verstärkter Forschungsbedarf in dieser Hinsicht besteht.

In einem Ausblick der Studie wird auf die erheblich fortentwickelten hydrodynamisch-numerischen Nachbildungsverfahren hingewiesen, die nach dem gegenwärtigen Stand der Forschung zur Verfügung stehen. Mit diesen weitreichenden Berechnungsmöglichkeiten sind die grundlegenden, in höherer Auflösung benötigten Erkenntnisse über die seenphysikalischen Zusammenhänge zugänglich. Sie sind Voraussetzung für die mit modernen, schnell aufnehmenden Meßgeräten gezielt anzusetzende Meßkampagne des Einstromverlaufes. Die erforderliche synoptische flächenhafte Erfassung wäre ohne diese wichtige Vorinformation mit einem weitaus größeren Aufwand verbunden. Die abschließenden Ausführungen geben die Wertung der bisher gewonnenen Einblicke wieder, die im wesentlichen als Erkenntnisse über erfaßbar gewesene Einzelercheinungen und Einzelfälle zu charakterisieren sind.

LITERATURVERZEICHNIS

Die mit einem Sternchen (*) gekennzeichneten Berichte und Veröffentlichungen sind im Verlauf der Studie gelesen und bearbeitet worden, werden aber nicht im Text dieses Schlußberichts explizit zitiert.

- * AMBÜHL, H., 1967. Die Temperatur- und Sauerstoffverhältnisse des Bodensee-Untersees in den Jahren 1961-1963. IGKB-Bericht, 5: 91-128.

- AUERBACH, M., 1939. Die Oberflächen- und Tiefenströme im Bodensee. Deutsche Wasserwirtschaft, 34: 193-202 und 358-366.

- AUERBACH, M., 1952. Der Wasserabfluß der Konstanzer Bucht. Beitr. naturkundl. Forsch. SW-Deutschld., 11: 54-58.

- AUERBACH, M., MAERKER, W. und SCHMALZ, J., 1924. Hydrographisch-biologische Bodensee-Untersuchungen I. Arch. Hydrobiol., Suppl.-Bd. III: 597-738.

- AUERBACH, M., MAERKER, W. und SCHMALZ, J., 1926. Hydrographisch-biologische Bodensee-Untersuchungen II. Verh. d. Naturw. Ver., Karlsruhe, 30: 128 S.

- AUERBACH, M. und SCHMALZ, J., 1927. Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees. I. Die Ströme der Bregenzer Bucht im Jahre 1926. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 55: 179-214.

- AUERBACH, M. und SCHMALZ, J., 1931. Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees. II. Die konstanten Ströme des Untersees, des Seerheins und der Konstanzer Bucht. Arch. Hydrobiol., 23: 231-249.

- AUERBACH, M. und RITZI, M., 1938. Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees. IV. Der Lauf des Rheinwassers durch den Bodensee in den Sommermonaten. Arch. Hydrobiol., 32: 409-433.

- * BADER, R.-E., 1966. Zur Geschichte der Burgunderblutalge *Oscillatoria tubescens*. GWF, 107: 485-486.

- BÄUERLE, E., 1981. Die Eigenschwingungen abgeschlossener, zweigeschichteter Wasserbecken bei variabler Bodentopographie. Bericht aus dem IfM Kiel, 85.

- BÄUERLE, E., 1989. Die freien internen Seiches des Bodensee-Obersees. Berechnung und graphische Dokumentation. Bericht für die LfU.

- * BÄUERLE, E., 1993. Transverse baroclinic oscillations in Lake Überlingen. (Submitted to Aquatic Sciences).

- * BÄUERLE, E., 1993. Effects of varying Coriolis force on internal seiches. (In preparation).

BÄUERLE, E., 1991. Kartendokumentation der internen Seiches des Bodensee-Obersees für den praxisnahen Gebrauch. Bericht für die LfU (in Erstellung).

BERGMEISTER, U., 1989. Die Rheinregulierung von der Illmündung bis zum Bodensee. Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik 1/89: 23-28.

- * BERNHARDT, H., 1962. Beobachtungen eines Hochwassereinbruchs in eine Talsperre. GWF, 103: 133-137.

- * BOHMANN, L., ENGLÄNDER, H., FROESE, H., KÖRNER, I., RÖCKL, K.W., SCHANZER, W., SCHRÖDER, W. und HSI-MING KIANG, 1939. Untersuchungen über die Ertragsfähigkeit einiger Seen Oberbayerns. Int. Rev. ges. Hydrobiol., 39: 547-599.

- * BOYCE, F.M., 1974. Some aspects of Great Lakes physics of importance to biological and chemical processes. J. Fish. Res. Board Can., 31: 689-730.

- * BUCHWALD, K., 1963. Die voraussichtlichen Auswirkungen der Schiffbarmachung des Hochrheins auf die Hochrhein- und Bodenseelandschaft. GWF, 104: 851-854.

- * BÜHRER, H. und AMBÜHL, H., 1975. Die Einleitung von gereinigtem Abwasser in Seen. Schweiz. Z. Hydrol., 37: 347-369.

BÜRGI, H.-R., 1976. Die Phytoplanktonentwicklung im Bodensee in den Jahren 1961-1963. IGKB-Bericht, 18: 87 S.

- * BÜRGI, H.-R., 1977. Die langjährige Entwicklung des Phytoplanktons im Bodensee (1963-1973). Teil 1: Untersee. IGKB-Bericht, 21.

BÜRGI, H.-R. und LEHN, H., 1979. Die langjährige Entwicklung des Phytoplanktons im Bodensee (1965-1975). Teil 2: Obersee. IGKB-Bericht, 23: 86 S.

- * CARMACK, E.C. and FARMER, D.M., 1982. Cooling processes in deep, temperate lakes: a review with examples from two lakes in British Columbia. J. Mar. Res., 40 (Supplement): 85-111.

CLASEN, J. und BERNHARDT, H., 1969. Die Remobilisierung von Phosphaten und Mikronährstoffen und ihre Wirkung auf die Planktonproduktion in Modellgewässern. Arch. Hydrobiol., 65: 523-538.

DAUNER, F., 1964. Ist das Hemishofener Stauwehr noch notwendig? GWF, 105: 809.

- * DEUFEL, J., 1965. Über die Verbreitung von Coli-Keimen im Bodensee und ihre Zunahme während der letzten zehn Jahre. Schweiz. Z. Hydrol., 27: 250-256.
- * DFG, 1968. Bodensee-Projekt. Zweiter Bericht: 166 S.
- * DVWK, 1988. Feststofftransport in Fließgewässern - Berechnungsverfahren für die Ingenieurpraxis. DVWK-Schriftenreihe, 87: 135 S.
- * DITTRICH, A. und WESTRICH, B., 1988. Bodenseeufererosion: Bestandsaufnahme und Bewertung. Mitt. Inst. f. Wasserbau Univ. Stuttgart, 68: 182 S.
- * DREXLER, A.-M., 1980. Umweltpolitik am Bodensee Baden-Württemberg. Dr. Neinhaus-Verlag Konstanz: 301 S.
- * EINSLE, U., 1967. Über einige Auswirkungen der Eutrophierung des Bodensee-Obersees auf seine planktisch lebenden Copepodenpopulationen. Schweiz. Z. Hydrol., 29: 305-310.
- EINSLE, U., 1969. Zur Frage der horizontalen Verteilung des Crustaceen-Planktons im Bodensee-Obersee. GWF, 110: 108-111.
- EINSLE, U., 1977. Die Entwicklung des Crustaceenplanktons im Bodensee-Obersee (1962-1974) und Rheinsee (1963-1973). IGKB-Bericht, 20: 63 S.
- * EINSLE, U., 1978. Qualitative und quantitative Änderungen im Crustaceenplankton des Bodensee-Obersees. Arch. Hydrobiol., 82: 300-315.
- EINSLE, U., 1987. Die Entwicklung des Crustaceen-Planktons im Bodensee-Obersee (1972-1985) und Untersee - Gnadensee und Rheinsee - (1974-1985). IGKB-Bericht, 37: 103 S.
- * EINSLE, U. und WALZ, N., 1972. Die täglichen Vertikalwanderungen der Larven von Dreissena polymorpha PALLAS im Bodensee-Obersee. GWF, 113: 428-430.
- * ELSTER, H.-J., 1934. Über die Ursachen von guten und schlechten Fangjahren in der Blaufelchenfischerei. Allg. Fisch. Z., 59: 34-42.
- ELSTER, H.-J., 1938. Einige Beobachtungen über das Verhalten der oberen Wasserschichten des Bodensees (Obersee). Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 65: 34 S.
- ELSTER, H.-J., 1939. Beobachtungen über das Verhalten der Schichtgrenzen nebst einigen Bemerkungen über die Austauschverhältnisse im Bodensee (Obersee). Arch. Hydrobiol., 35: 286-346.
- * ELSTER, H.-J., 1954. Über die Populationsdynamik von Endiaptomes gracilis SARS und Heterocope borealis FISCHER im Bodensee-Obersee. Arch. Hydrobiol. Suppl. 20: 546-614.

- * ELSTER, H.-J., 1961. Einige Beobachtungen über die Sichttiefen im Bodensee (Obersee und Untersee) während der Jahre 1932 bis 1935. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.*, 46: 43-50.

- ELSTER, H.-J., 1974. Das Ökosystem Bodensee in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. *Schr. Ver. Gesch. Bodensees*, 92: 233-250.

- ELSTER, H.-J., 1974. Wechselwirkungen zwischen Chemie und Biologie bei der Eutrophierung des Bodensee. *Vom Wasser*, 43: 1-14.

- ELSTER, H.-J. und EINSELE, W., 1937. Beiträge zur Hydrographie des Bodensees (Obersee). *Int. Rev. ges. Hydrobiol.*, 35: 522-585.

- * ELSTER, H.-J. und EINSELE, W., 1938. Beiträge zur Kenntnis der Hydrographie des Untersees (Bodensee). *Int. Rev. ges. Hydrobiol.*, 36: 241-284.

- * ELSTER, H.-J. und SCHMOLINSKY, F., 1952. Morphometrie, Klimatologie und Hydrographie der Seen des südlichen Schwarzwaldes I und II. *Arch. Hydrobiol. Suppl.*, 20: 157-211 und 375-441.

- * ELSTER, H.-J. und SCHWOERBEL, I., 1970. Beiträge zur Biologie und Populationsdynamik der Daphnien im Bodensee. *Arch. Hydrobiol. Suppl.*, 38: 18-72.

- * FÄH, R. und KÜHNE, A., 1984. Computersimulation im Dienst des Hochwasserschutzes. Darstellung am Beispiel der Thur. Schweiz. *Ing. u. Arch.*, 47/84: 929-933.

- * FARMER, D.M. and CARMACK, E., 1981. Wind mixing and restratification in a lake near the temperatur of maximum density. *J. Phys. Oceanogr.*, 11: 1516-1533.

- FAST, H., 1955. Systematische Untersuchungen über den chemischen und bakteriologischen Zustand des Bodensees. *Vom Wasser*, 22: 11-37.

- * FISCHER, A., 1989. Geschiebemanagement im österreichischen Rheineinzugsgebiet. Geschichtliche Entwicklung und Praxis. *Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik*, 1/89: 17-20.

- FÖRSTNER, U., MÜLLER, G. und REINECK, H.-E., 1968. Sedimente und Sedimentgefüge des Rheindeltas im Bodensee. *N Jb. Miner. Abh.*, 109: 33-62.

- * FÖRSTNER, U. und MÜLLER, G., 1974. Schwermetallanreicherungen in datierten Sedimentkernen aus dem Bodensee und aus dem Tegernsee. *TMPM Tschermaks Min. Petr. Mitt.*, 21: 145 -163.

- * FÖRSTNER, U. und MÜLLER, G., 1974. Gefahr durch Waschmittelphosphat-Ersatz. U - das technische Umweltmagazin, 5/74: 16-17.

- FÖRSTNER, U., MÜLLER, G. und WAGNER, G., 1974. Schwermetalle in Sedimenten des Bodensees. Naturwiss., 61: 270.
- FOREL, F.A., 1887. Le ravin sous-lacustre du Rhone. Bull. Soc. vaud Sci. nat., 23.
- * FOREL, F.A., 1893. Die Temperatur-Verhältnisse des Bodensees. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 22: 1-30.
- * FOREL, F.A., 1893. Transparenz und Farbe des Bodenseewassers. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 22: 33-46.
- * FRIES, W., 1961. Schifffahrt auf Hochrhein und Bodensee? GWF, 102: 823-835.
- * GARVINE, R.W. and MONK, J.D., 1974. Frontal structure of a river plume. J. Geophys. Res., 79: 2251-2259.
- GRIM, J., 1939. Beobachtungen am Phytoplankton des Bodensees (Obersee) sowie dessen rechnerische Auswertung. Int. Rev. ges. Hydrobiol., 39: 139-315.
- * GRIM, J., 1951. Ein Vergleich der Produktionsleistung des Bodensee-Untersees, des Obersees und des Schleinsees. Abh. Fisch. Hilfswiss. L., 4: 787-841.
- * GRIM, J., 1955. Die chemischen und planktologischen Veränderungen des Bodensee-Obersees in den letzten 30 Jahren. Arch. Hydrobiol. Suppl., 22: 310-322.
- * GRIM, J., 1957. Für den Bau und Betrieb von Trinkwassertalsperren wichtige Vorgänge in natürlichen und künstlichen Seen. GWF, 98: 234-238 und 277-279.
- * GRIM, J., 1962. Die Wasser des Bodensees im Luftbild. GWF, 103: 787-790.
- * GRIM, J., 1967. Der Phosphor und die pflanzliche Produktion im Bodensee. GWF, 108: 1261-1271.
- * de HAAR, U., 1968. Zum Wasserhaushalt des Alpenrheins. GWF, 109: 814-820.
- * HALLER, E., 1961. Beitrag der Stadt Lindau zur Reinhaltung des Bodensees und Rheins. GWF, 102: 353-354.
- * HAMBLIN, P.F. and CARMACK, E.C., 1978. River-induced currents in a fjord lake. J. Geophys. Res., 83 (C2): 885-899.
- HANTKE, R., 1979. Zur Geologie von Molasse und Quartär der Nordost-Schweiz. Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F., 61: 31-40.
- * HARTMANN, J., 1983. Charr as indicators of pollution. Fisheries, 8: 10-12.

- HARTMANN, J., 1986. Zur gebietsweisen Verteilung der Fische im Bodensee. Österr. Fischerei, 37: 231-233.
- * HARTMANN, J., 1986. Der Fisch als Anzeiger einer Nährstoffabnahme im See? Österr. Fischerei, 39: 101-104.
- * HAUBENSAK, U., 1989. Die Rechtslage auf dem Bodensee. Vermessung-Photogrammetrie- Kulturtechnik, 1/89: 44-47.
- * HELLMANN, H., 1974. Zur Herkunft von Kohlenstoffen in Sedimenten. Vom Wasser, 43: 179-192.
- HOFER, B., 1896. Die Verbreitung der Tierwelt im Bodensee (nebst vergleichenden Untersuchungen in einigen andern Süßwasserbecken). Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 28: 1-64.
- * HOFFMANN, C., 1956. Untersuchungen über die Remineralisation des Phosphors im Plankton. Kieler Meeresforsch., 12: 25-36.
- * HOFMANN, F., 1989. Geologie des Bodenseeraums, Vermessung-Photogrammetrie- Kulturtechnik, 1/89: 4-8.
- HOLLAN, E., 1974. Wenn der Bodensee aufgewühlt wird. Umschau, 74: 152-154.
- HOLLAN, E., 1974. Erste Ergebnisse des Strömungs- Temperaturmeßprogramms im Bodensee 1972. Ber. Inst. Meeresk. Kiel, 23 S.
- * HOLLAN, E., 1974. Zwischenbericht über die Durchführung und Auswertung von Strömungs- und Temperaturmessungen im Bodensee 1972.
- HOLLAN, E., 1974. Strömungsmessungen im Bodensee. Bericht der AWBR, 6(6): 112-187.
- * HOLLAN, E., SCHRÖDER, R. und KAUSCH, H., 1976. Vorversuche zur Verwendung von Schleppsonden in Binnengewässern. Arch. Hydrobiol., 77: 518-542.
- HOLLAN, E. and SIMONS, T.J., 1978. Wind-induced changes of temperatur and currents in Lake Constance. Arch. Met. Geoph. Bioklim., Ser.A, 27: 333-373.
- * HOLLAN, E., 1981. Erfahrungen mit der mathematischen Modellierung großräumiger Bewegungsvorgänge im Bodensee. Mitt. des IfM Hamburg, 35.
- * HOLLAN, E., 1982. Arbeitsbericht über die durchgeführten seehydrologischen Untersuchungen.
- * HOLLAN, E., 1984. Strömungen im Bodensee. Wasserwirtschaft, 74: 366-373.

HOLLAN, E., HAMBLIN, P.F. and LEHN, H., 1990. Long-term modelling of stratification in large lakes: application to Lake Constance. In: TILZER, M.M. and SERRUYA, C. (eds.): Large lakes. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: 107-124.

- * HOLLUTA, J. und KÖLLE, W., 1967. Untersuchungen über den Mineralölgehalt im Wasser des Bodensees. GWF, 108: 370.
- * HOPPE-SEYLER, F., 1895. Über die Verteilung absorbierter Gase im Wasser des Bodensees und ihre Beziehungen zu den in ihm lebenden Tieren und Pflanzen. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 24: 29-48.
- * HUBER, W.C., HARLEMAN, D.R. and RYAN, P.J., 1972. Temperature prediction in stratified reservoirs. J. Hydraul. Div., ASCE, 98: 645-666.
- * HUMMEL, H.G., 1957. Die Schichtungerscheinungen und Durchflußströmungen in künstlichen Stauseen und ihre Berücksichtigung beim Bau und Betrieb von Trinkwassersperren. Wasserwirtschaftstechnik, 8: 291-296.
- HUSS, E., 1975. Beiträge zur Kenntnis der Winde am Bodensee. Schr. Ver. Gesch. Bodensees 93: 167-223.
- HUSS, E. und STRANZ, D., 1970. Die Windverhältnisse am Bodensee. Pure appl. Geophys., 81: 323-356.
- * IMBERGER, J. and PARKE, G., 1985. Mixed layer dynamics in a lake exposed to a spatially variable wind field. Limnol. Oceanogr., 30: 473-488.
- * INSTITUT FÜR GRUNDBAU UND BODENMECHANIK der ETH ZÜRICH, 1979. Regulierung der Rheinmündung in den Bodensee. Geotechnische Untersuchungen zum Projekt der Vorstreckung der Regulierungsbauwerke. Bericht Nr. 3765/1.
- INTERNATIONALE RHEINREGULIERUNG, 1980. Das Rheindelta im Bodensee: Seegrundaufnahme vom Jahre 1979.
- * JAAG, O., 1946. Untersuchungen zur Abklärung hydrobiologischer Fragen der Bodenseeregulierung. Gutachten, 256 S.
- * JAAG, O., 1968. Bodenseeregulierung. Abklärung hydrobiologischer Fragen. Gutachten der ETH Zürich, 49 S. u. Tabellen.
- JÄGGI, M., 1989. Die Rheinmündung heute und morgen. Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik 1/89: 21-23.
- KELLERMANN, C., 1895. Die Rhein-Regulierung zwischen Vorarlberg und der Schweiz und ihr voraussichtlicher Einfluß auf den Fortbestand der Bregenz-Lindauer Bucht. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 24: 49-64.

- * KIEFER, F., 1955. Naturkunde des Bodensees. Jan Thorbecke Verlag. Lindau und Konstanz. 169 S.
- * KIEFER, F., 1961. Der limnologische Zustand des Trinkwasser-Speichers Bodensee. GWF, 102: 814-820.
- * KIEFER, F., 1963. Das "Große Eis" des Bodensees. GWF, 104: 867-870.
- * KIEFER, F., 1965. Die Wasserstände des Bodensees seit 1871. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 83: 1-3.
- KLEINSCHMIDT, E., 1921. Beiträge zur Limnologie des Bodensees. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 49: 34-69.
- * KLIFFMÜLLER, R., 1960. Beiträge zum Stoffhaushalt des Bodensees (Obersee). I. Die in den Bodensee (Obersee) eingebrachten Schmutz- und Nährstoffe und ihr Verbleib (Versuch einer bilanzmäßigen Erfassung für 1958/59). Int. Rev. ges. Hydrobiol., 45: 359-380.
- * KLIFFMÜLLER, R., 1962. Der Anstieg des Phosphat-Phosphors als Ausdruck fortschreitender Eutrophierung im Bodensee (Obersee). Int. Rev. ges. Hydrobiol., 47: 118-122.
- * KLIFFMÜLLER, R., 1962. Bilanz der dem Bodensee (Obersee) 1958/59 zugeführten Schmutz- und Düngestoffe. GWF, 103: 1365.
- * KLIFFMÜLLER, R., 1969. Beiträge zum Stoffhaushalt des Bodensees (Obersee). II. Stickstoff- und Phosphorhaushalt. Arch. Hydrobiol. Suppl., 35: 309-371.
- * KNORR, M., 1966. Oberflächenwasser als Rohstoff für Trinkwasser in hygienischer Sicht. GWF, 107: 541-548.
- * KÖLLE, W., 1974. Petrochemische und biogene Kohlenwasserstoffe in den Sedimenten des Bodensees. Vom Wasser, 43: 161-177.
- KOPFMÜLLER, A., 1923. Der Land- und Seewind am Bodensee. Das Wetter, 40: 33-41, 65-78, 108-115.
- * KRAPP, P., 1901. Die Geschichte des Rheins zwischen Bodensee und Ragaz. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 30: 119-222.
- * KRAYSS, E. und KELLER, O., 1989. Die eiszeitliche Reliefentwicklung im Bodenseeraum. Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik, 1/89: 8-12.
- * KREUTZER, H., 1955. Wasserwirtschaftliche Probleme am Bodensee. Arch. Hydrobiol. Suppl., 22: 381-388.

KRIEGSMANN, F., 1955. Der Wechsel in der Vergesellschaftung der Fischarten des Ober- und Untersees und die Veränderungen des See-Reagierens. Arch. Hydrobiol. Suppl., 22: 397-408.

KRIEGSMANN, F., 1958. Der Fischbestand des Bodensees als Indikator für Veränderungen des allgemeinen See-Reagierens. Münchner Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie, 4: 153-166.

KROEBEL, W., 1979. Übersichtsbericht von der Bodensee-Expedition vom 21. Juli bis 3. August 1979.

- * KÜHNE, A. and FÄH, R., 1983. Application of a mathematical model to design measures for flood protection. Proc. Int. Conf. Hydr. Aspects of Floods: 272-284.

KÜMMERLIN, R. und BÜRGI, H.-R., 1989. Die langjährige Entwicklung des Phytoplanktons im Bodensee (1961-1986). IGKB-Bericht, 39: 175 S.

KUHN, H., 1957. Zürichsee - Bodensee, ein limnologischer Vergleich. GWF, 98: 228-231.

- * KUHN, H., 1962. Hochrheinschiffahrt, Bodenseeprobleme und Erfahrungen beim schweizerischen Gewässerschutz. GWF, 98: 228-231.

LAMBERT, A., 1982. Trübestrome des Rheins am Grund des Bodensees. Wasserwirtschaft, 72: 169-172.

LAMBERT, A., 1989. Das Rheindelta im See. Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik, 1/89: 29-32.

- * LAMBERT, A., KELTS, K. und ZIMMERMANN, U., 1984. Trübestrome in Seen: Sauerstoffeintrag durch grundnah eingeschichtetes Flußwasser. Schweiz. Z. Hydrol., 46: 42-50.

- * LAMPERT, W., 1971. Untersuchungen zur Biologie und Populationsdynamik der Coregonen im Schluchsee. Arch. Hydrobiol. Suppl. 38 (Falkan Arb.7): 237-314.

- * LAMPERT, W. und SCHÖBER, U., 1978. Das regelmäßige Auftreten von Frühjahrs-Algenmaximum und "Klarwasserstadium" im Bodensee als Folge von klimatischen Bedingungen und Wechselwirkungen zwischen Phyto- und Zooplankton. Arch. Hydrobiol. 82: 364-386.

- * LANG, G., 1973. Die Makrophytenvegetation in der Uferzone des Bodensees unter besonderer Berücksichtigung ihres Zeigerwertes für den Gütezustand. IGKB-Bericht, 12: 67 pp.

- * LANG, G., 1981. Die submersen Makrophyten des Bodensees - 1978 im Vergleich mit 1967. IGKB-Bericht, 26: 64 pp.

LEHN, H., 1956. Kurzfristige Temperatur- und Planktonschwankungen im ufernahen Hypolimnion des Überlingersees (Bodensee). GWF, 97: 222-225.

* LEHN, H., 1962. Der Jahresverlauf der Temperaturschichtung im Bodensee. GWF, 30: 779-785.

* LEHN, H., 1962. Zur Sichttiefen-Minderung im Bodensee seit 1920. Int. Rev. ges. Hydrobiol., 47: 523-532.

LEHN, H., 1963. Einige Frühjahrsbefunde über die Isothermen-Phytoplankton-Relation im Bodensee. Arch. Hydrobiol., 59: 1-25.

LEHN, H., 1965. Zur Durchsichtigkeitsmessung im Bodensee. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 83: 32-44.

* LEHN, H., 1966. Ufernahe Phytoplankton-Biozönosen des Bodensees und ihre Bedeutung für das Pelagial. GWF, 107: 371-372.

LEHN, H., 1967. Die Trübstoffverteilung im Obersee (Bodensee) während des Hochwassers 1965. GWF, 108: 841-843.

LEHN, H., 1968. Wasserbewegungen im Bodensee. Ein Beitrag zu den Ausbreitungsmöglichkeiten von Rohöl im Bodensee. GWF, 109: 89-94.

LEHN, H., 1971. Die Schwebalgen im Frühjahr und das geplante Bodensee-Regulierungswehr. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 89: 105-115.

* LEHN, H., 1972. Zur Trophie im Bodensee. Verh. Internat. Verein. Limnol., 18: 467-474.

* LEHN, H., 1975. Entwicklung des Bodensee-Pelagials seit 1920. GWF, 116: 170-175.

LEHN, H., 1978. Vom Abfluß des Bodensee-Obersees. Verh. Ges. f. Ökologie (Kiel, 1977).

LEHN, H., 1981/82. Der Bodensee - ein Ökosystem im Wandel. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 102: 207-219.

LEHN, H., 1984. Sauerstoff und Zuflußeinschichtung im Bodensee-Obersee. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 102: 207-219.

* LEMMIN, U., 1989. Dynamics of horizontal turbulent mixing in a nearshore zone of Lake Geneva. Limnol. Oceanogr., 34: 420-434.

* LOHR, M., 1957. Die Verschmutzung des Bodensees durch Heizöl im Januar 1957. GWF, 98: 301-302.

LUFT, G., van den EERTWEGH, G. und VIESER, H., 1990. Handbuch Hydrologie Baden-Württemberg, Teil 6.2 Berichte: Veränderung der Bodensee-Wasserstände von 1887 bis 1987.

- * LUNDBECK, J., 1936. Untersuchungen über die Bodenbesiedelung der Alpenrandseen. Arch. Hydrobiol. Suppl., 10: 207-358.
- * MÄCKLE, H., ZIMMERMANN, U. und STABEL, H.-H., 1987. Phytoplanktonentwicklungen in tiefen Voralpenseen. Biologische Indikatoren der Gewässergüte. GWF, 128: 544-550.
- * MÄRKI, E., 1968. Die Verunreinigung des Rheins von seinen Quellflüssen bis zum Bodensee. GWF, 109: 820-822.
- * MAHRINGER, W., 1963. Einschichtung und Verteilung des zufließenden Wassers im Millstättersee. Arch. Hydrobiol., 59: 272-280.
- * MAUZ, J., 1968. Das Vorkommen von Colibakterien im Bereich der Rheinströmung durch den Bodensee. GWF, 109: 883-888.
- * MAUZ, J. und WEINMANN, G., 1962. Vier Jahre Radioaktivitätsuntersuchungen am Bodensee. GWF, 103: 451-456.
- MUCKLE, R., 1956. Die limnologischen Voraussetzungen für eine Groß-Trinkwasserentnahme aus dem Überlingersee (Bodensee). GWF, 97: 213-222.
- * MUCKLE, R., 1963. Eine 10jährige limnologische Untersuchungsserie in der Freiwasser-Region des Überlinger Sees (Bodensee). GWF, 104: 862-866.
- * MUCKLE, R., 1964. Die Sauerstoffschichtung im tiefen Hypolimnion des Bodensee-Obersees 1963/64 mit Berücksichtigung einiger Untersuchungen aus früheren Jahren. IGKB-Bericht, 3: 1-20.
- * MUCKLE, R., 1966. Die Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser des Bodensees. GWF, 107: 847-848.
- * MUCKLE, R., 1967. Die Temperaturverhältnisse des Bodensee-Obersees in den Jahren 1961 bis 1963. IGKB-Bericht, 5: 10-37.
- * MUCKLE, R., 1970. Zur Kenntnis der Zirkulation des Bodensee-Obersees. GWF, 111: 479-484.
- * MUCKLE, R., MUCKLE, G. und ROTTENGATTER, H., 1976. Einige Tabellen und Bemerkungen zur Soziologie des Crustaceenplanktons im Überlinger See (Bodensee-Obersee). Arch. Hydrobiol., 78: 415-455.

MÜHLEISEN, R., 1977. Starkwinde an und auf dem Bodensee. Meteorol. Rdsch., 30: 15-22.

- * MÜLLER, G., 1963. Die rezenten Sedimente im Obersee des Bodensees. Naturwiss., 50: 350.

MÜLLER, G., 1964. Zur Hydrochemie von Alpenrhein und Seerhein. GWF, 105: 810-814.

MÜLLER, G., 1965. Ergebnisse einjähriger systematischer Untersuchungen über die Hydrochemie von Alpen- und Seerhein. Fortschr. Wasserchemie, 2: 33-99.

- * MÜLLER, G., 1966. Die Verteilung des Eisenmonosulfid ($\text{FeS} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) und organischer Substanz in den Bodensedimenten des Bodensees - ein Beitrag zur Frage der Eutrophierung des Bodensees. GWF, 107: 364-368.

MÜLLER, G., 1966. Die Sedimentbildung im Bodensee. Naturwiss., 53: 237-247.

- * MÜLLER, G., 1967. Beziehungen zwischen Wasserkörpern, Bodensedimenten und Organismen im Bodensee. Naturwiss., 54: 454-466.

- * MÜLLER, G., 1968. Origin of the Lake of Constance Basin. Nature, 217: 836-837.

- * MÜLLER, G., 1968. Exceptionally High Strontium Concentrations in Fresh Water Onkolites and Mollusk Shells of Lake Constance. In: Recent Developments in Carbonate Sedimentology in Central Europe (G. MÜLLER and G. FRIEDMAN (eds.)). Springer-Verlag: 116-127.

- * MÜLLER, G., 1969. Hohe Strontium-Gehalte und Sr/Ca-Verhältnisse im Bodensee-Wasser und in den Wässern des Alpenrhein-Einzugsgebiets. GWF, 110: 103-108.

- * MÜLLER, G., 1971. Sediments of Lake Constance. Sedimentology of parts of Central Europe. Guidebook, VIII Int. Sediment. Congress 1971: 237-252.

- * MÜLLER, G., 1978. Strontium Uptake in Shell Aragonite from a Freshwater Gastropod. Naturwiss., 65: 434.

- * MÜLLER, G. und HAHN, C., 1964. Schwermineral- und Karbonatführung der Fluß- Sande im Einzugsgebiet des Alpenrheins. N. Jb. Miner., Mh., 371-375.

- * MÜLLER, G. und SCHÖTTLE, M., 1965. Schwermineral- und Karbonatführung der Flußsande im Gebiet des Bodensees. N. Jb. Miner., Mh., 26-29.

- * MÜLLER, G. und RÖPER, H.P., 1966. Erste Ergebnisse hydrochemischer Untersuchungen am Bodensee. GWF, 107: 825-830.

MÜLLER, G. und TIETZ, G., 1966. Der Phosphor-Gehalt der Bodensee-Sedimente, seine Beziehung zur Herkunft des Sediment-Materials sowie zum Wasserkörper des Bodensees. N. Jb. Miner. Abh., 105: 41-62.

- MÜLLER, G. und FÖRSTNER, U., 1968. General relationship between suspended sediment concentration and water discharge in the Alpenrhein and other rivers. *Nature*, 217: 244-245.
- * MÜLLER, G., und FÖRSTNER, U., 1974. Schwermetalle in Sedimenten des Bodensees. *Naturwiss.*, 61: 270.
- MÜLLER, G. and GEES, R.A., 1970. Distribution and Thickness of Quaternary Sediments in the Lake Constance Basin. *Sedimentary Geology*, 4: 81-87.
- * MÜLLER, H., 1967. Eine neue qualitative Bestandsaufnahme des Phytoplanktons des Bodensee-Obersees mit besonderer Berücksichtigung der tychoplanktischen Diatomeen. *Arch. Hydrobiol. Suppl.*, 33: 206-236.
- * MÜLLER, H., 1972. Wachstum und Phosphatbedarf von *Nitzschia actinastroides* (LEMM.) v. GOOR in statischer und homokontinuierlicher Kultur und Phosphatlimitierung. *Arch. Hydrobiol. Suppl.*, 38: 399-484.
- * MÜLLER, H., 1989. Zum Stoffhaushalt des Bodensees. *Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik*, 1/89: 40-42.
- * MURTHY, C.R., SIMONS, T.J. and LAM, D.C.L., 1986. Dynamic and transport modelling of the Niagara River plume in Lake Ontario. *Rapp. P.-v. Reun. Cons. int. Explor. Mer.*, 186: 150-164.
-
- NAEF, F., 1989. Hydrologie des Bodensees und seiner Zuflüsse. *Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik*, 1/89: 15-17.
- * NIPKOW, F., 1920. Vorläufige Mitteilungen über Untersuchungen des Schlammabsatzes im Zürichsee. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 1: 1-23.
- NÜMANN, W., 1938. Die Verbreitung des Rheinwassers im Bodensee. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.*, 36: 501-530.
- NÜMANN, W., 1966. Der Rückgang der Felchenbestände im Bodensee als Folge der Abwasserbelastung. *GWF*, 107: 368-370.
- * NÜMANN, W., 1972. Überlegungen zu den Veränderungen der größeren Seen mit speziellen Hinweisen auf den Bodensee. *GWF*, 113: 423-427.
- NYDEGGER, P., 1967. Untersuchungen über Feinstofftransport in Flüssen und Seen, über Entstehung von Trübungshorizonten und zuflußbedingten Strömungen im Brienzersee und einigen Vergleichsseen. *Beitr. Geol. Schweiz, Hydrol.*, 16.
- * PASSLACK, G., 1966. Strömungen im Bodensee. *Mitt. des Franzius-Instituts der TU Hannover*, 54 S.

- * PENCK, A., 1894. Morphometrie des Bodensees. In: Festschrift der Geogr. Ges. München zur Feier ihres 25-jährigen Bestehens.

PROBST, L., WAGNER, B. und MEIER, A., 1988. Die Oligochaeten im Bodensee als Indikatoren für die Belastung des Seebodens (1972 bis 1978). IGKB-Bericht, 38: 69 S.

RAO, D.B. and MURTY, T.S., 1970. Calculations of steady state wind-driven circulations in Lake Ontario. Arch. Met. Geophys. Bioklim., Ser.A 19: 195-210.

- * RAUH, P., 1989. Das Klima des Bodenseegebietes. Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik, 1/89: 12-14.

- * RODI, W., 1983. Numerische Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgänge in Gewässern. Wasserwirtschaft, 73: 401-410.

- * SAHLBERG, J., 1983. A hydrodynamical model for calculating the vertical temperature profile in lakes during cooling. Nordic Hydrology : 239-254.

- * SCHLÄFLI, A., 1989. Flora und Fauna des Bodenseegebietes. Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik, 1/89: 37-40.

SCHMALZ, J., 1934. Ein Beitrag zur Klarstellung des Begriffs Strom = Strömung in unseren Seen. Arch. Hydrobiol., 26: 481-487.

SCHMIDT, F., 1979. 25 Jahre Bodensee-Wasserversorgung. Entstehung, Bau und Betrieb. Hrsg.: Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung, Stuttgart: 297 S.

- * SCHMITZ, W., 1967. Die Sauerstoffverhältnisse des Bodensee-Obersees in den Jahren 1961 bis 1963. IGKB-Bericht, 5: 39-89.

- * SCHMITZ, W., 1967. Die Sauerstoffbilanz des Bodensee-Obersees. IGKB-Bericht, 8: 19 S.

- * SCHMITZ, W., 1971. Bodensee-Sedimente, ihre Bedeutung für den Chemismus des Freiwassers und dessen Belastungen mit eutrophierenden Stoffen insbesondere mit Phosphorverbindungen. IGKB-Bericht, 9.

SCHROEDER, H.G. und NIESSEN, F., 1988. Strukturelle Sedimentologie des Bodensees. LfU-Bericht in 3 Bd.

- * SCHRÖDER, R. und GRUNEWALD, J., 1968. «Taches d'huile» und Konvektionsströmungen. Arch. Hydrobiol. Suppl., 33: 73-83.

- * SEIDEL, K., 1989. Möglichkeiten der Fernerkundung - Beispiel Landsat-Bild des Bodensees. Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik, 1/89: 47-49.

- SERRUYA, S., HOLLAN, E. and BITSCH, B., 1984. Steady winter circulations in Lakes Constance and Kinneret driven by wind and main tributaries. Arch. Hydrobiol., Suppl. 70: 33-110.
- * SIEGENTHALER, C., FINGER, W., KELTS, K. and WAND, S., 1987. Earthquake and seiche deposits in Lake Lucerne, Switzerland. Eclogae geol. Helv., 80: 241-260.
- * SIESSEGGGER, B., 1968. Veränderungen des Phosphat-P- und Ammonium-N-Gehaltes im Litoral des Bodensees nach Stürmen durch Eintrag aus den aufgewühlten Sedimenten. GWF, 109: 1237-1238.
- * SIESSEGGGER, B., 1970. Limnologische Untersuchungen über das Litoral am Bodensee (am Beispiel der Friedrichshafener Bucht). GWF, 111: 488-493.
- * SOMMER, U. and STABEL, H.-H., 1983. Silicon consumption and population density changes of dominant planktonic diatoms in Lake Constance. J. Ecol., 71: 119-130.
- * SONTHEIMER, H., 1968. Trinkwasser aus dem Bodensee. GWF, 109: 85-89.
- * SPIGEL, R.H. and IMBERGER, J., 1980. The classification of mixed-layer dynamics in lakes of small to medium size. J. Phys. Oceanogr., 10: 1104-1121.
- * STABEL, H.-H., 1987. Settling velocity and residence time of particles in Lake Constance. Schweiz. Z. Hydrol., 49: 284-293.
- STABEL, H.-H. and GEIGER, M., 1985. Phosphorus adsorption to riverine suspended matter. Implications for the P-budget of Lake Constance. Water Res., 19: 1347-1352.
- STEWART, K.M. and HOLLAN, E., 1984. Physical model study of Lake Constance. Schweiz. Z. Hydrol., 46: 5-40.
- STEWART, K.M., 1988. Tracing inflows in a physical model of Lake Constance. J. Great Lakes Res., 14: 466-478.
- * TESSENOW, U., 1972. Lösungs-, Diffusions- und Sorptionsprozesse in der Oberschicht von Seesedimenten. Arch. Hydrobiol. Suppl., 38: 353-398.
- TILZER, M.M., SOMMER, U., GELLER, W., ECKMANN, R. und STABEL, H.-H., 1985. Untersuchungen zum Stoffhaushalt in der Freiwasserzone des Bodensees/Überlinger See. GWF, 126: 461-466.
- * TILZER, M.M., GAEDKE, U., GIOVANOLI, F. und GELLER, W., 1989. Der Stoffhaushalt des Bodensees. Prozeßorientierte Ökosystemforschung am größten deutschen Binnensee. S. 36-91.

VAW, 1972. Die Vorstreckung der Rheinregulierungsbauwerke an der neuen Rheinmündung. Bericht der VAW, 578/III.

VAW, 1981. Ausbreitung des Rheins im östlichen Teil des Bodensees. Bericht der VAW.

VAW, 1984. Rheinvorstreckung. Prognoserechnung für die Sohlenentwicklung im projektierten Vorstreckungskanal. Bericht der VAW, 874.

VISCHER, D., 1989. Ideen zur Bodenseeregulierung. Ziele, Altes und Neues. Vermessungs-Photogrammetrie-Kulturtechnik, 1/89: 32-37.

- * VOGEL, H.E., 1966. Seereinigungsaktion Bodensee. GWF, 107: 500.
- * VOSS, W., 1963. Der Beitrag des Waschmittel-Phosphors zur Eutrophierung des Bodensees. Eine Analyse, durchgeführt im Flußgebiet der Schussen. GWF, 104: 397-399.
- * WACHEK, F., 1958. Biologisch-chemische Untersuchungen des Bodensees unter besonderer Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher Fragen. Münchner Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- u. Flußbiologie, 4: 116-138.
- * WACHEK, F., 1958. Der biologisch-chemische Zustand der Bodenseezuflüsse Schussen, Argen, Rotach und Laiblach. Münchner Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- u. Flußbiologie, 4: 139-152.
- WAGNER, G., 1964. Untersuchungen am zugefrorenen Bodensee. Schweiz. Z. Hydrol., 26: 52-68.
- * WAGNER, G., 1966. Phosphatspeicherung und N/P-Quotient bei Laichkräutern in abwasserbelasteten und unbelasteten Ufergebieten des Bodensees. Int. Rev. ges. Hydrobiol., 51: 229-235.
- * WAGNER, G., 1967. Beiträge zum Sauerstoff-, Stickstoff- und Phosphorhaushalt des Bodensees. Arch. Hydrobiol., 63: 86-103.
- * WAGNER, G., 1967. Experimentelle Untersuchungen zur Bedeutung von bodenbewohnenden Makroorganismen (Tubificiden) für den Bodensee, GWF, 108: 837-839.
- * WAGNER, G., 1968. Zur Beziehung zwischen der Besiedlungsdichte von Tubificiden und dem Nahrungsangebot im Sediment. Int. Rev. ges. Hydrobiol., 53: 715-721.
- * WAGNER, G., 1968. Petrographische, mineralogische und chemische Untersuchungen an Sedimenten in den Deltabereichen von Schussen und Argen. Schweiz. Z. Hydrol., 30: 75-137.
- * WAGNER, G., 1970. Die Zunahme der Belastung des Bodensees. GWF, 111: 485-487.

- * WAGNER, G., 1971. FeS-Konkretionen im Bodensee. Int. Rev. ges. Hydrobiol., 56: 265-272.
- * WAGNER, G., 1972. Stratifikation der Sedimente und Sedimentationsrate im Bodensee. Verh. Int. Ver. Limnol., 18: 475-481.
- * WAGNER, G., 1972. Die Berechnung von Frachten gelöster Phosphor- und Stickstoffverbindungen aus Konzentrationsmessungen in Bodenseezuflüssen. IGKB-Bericht, 11: 7 S. u. Tab.
- WAGNER, G., 1976. Die Untersuchung von Sinkstoffen aus Bodenseezuflüssen. Schweiz. Z. Hydrol., 38: 191-205.
- * WAGNER, G., 1976. Simulationsmodelle der Seeneutrophierung, dargestellt am Beispiel des Bodensee-Obersees. Teil II: Simulation des Phosphorhaushaltes des Bodensee-Obersees. Arch. Hydrobiol., 78: 1-41.
- * WAGNER, G., 1987. Untersuchung der Stofffrachten von Bodenseezuflüssen Baden-Württembergs im Abflußjahr 1985. Ber. der LfU, Manuskript, 8 S.
- * WAGNER, G., 1987. IGKB-Zuflußuntersuchungen 1985/86: Untersuchungen der Kläranlagen am baden-württembergischen Bodenseeuf. Ber. der LfU, Manuskript, 13 S.
- * WAGNER, G., 1987. Zur Untersuchung von Stofffrachten in Bodenseezuflüssen bis zum Abflußjahr 1985. Ber. der LfU, Manuskript, 37 S.
- * WAGNER, G. und ZAHNER, R., 1964. Die Abwasserbelastung der Uferzone des Bodensees. IGKB-Bericht, 2.
- * WAGNER, G., BÜHRER, H. und AMBÜHL, H., 1976. Die Belastung des Bodensees mit Phosphor-, Stickstoff- und organischen Verbindungen im Seejahr 1971/72. IGKB-Bericht, 17: 55 S.
- * WAGNER, G. und WOHLAND, H., 1976. Simulationsmodelle der Seeneutrophierung, dargestellt am Beispiel des Bodensee-Obersees. Teil I: Die in Simulationsmodellen verwendeten Daten vom Bodensee-Obersees. Arch. Hydrobiol., 77: 431-457.
- * WAGNER, G. und GÜSE, C., 1977. Karbonate in Sinkstoffen aus Bodenseezuflüssen. N. Jb. Miner. Mh., 5: 199-204.
- WAGNER, G. und STIELER, B., 1978. Temperaturgänge in Bodenseezuflüssen. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 96: 241-244.
- WAGNER, G. und WAGNER, B., 1978. Zur Einschichtung von Flußwasser in den Bodensee- Obersee. Schweiz. Z. Hydrol., 40: 231-248.

- WAGNER, G. und BÜHRER, H., 1989. Die Belastung des Bodensees mit Phosphor- und Stickstoffverbindungen, organisch gebundenem Kohlenstoff und Borat im Abfluß-jahr 1985/86. IGKB-Bericht, 40: 1-50.
- * WALDROP, W.R. and FARMER, R.C., 1974. Three-dimensional computation of buoyant plumes. J. Geophys. Res., 79: 1269-1276.
- * WALZ, N., 1978. Die Produktion der Dreissena-Population und deren Bedeutung im Stoffkreislauf des Bodensees. Arch. Hydrobiol., 82: 482-499.
- WASMUND, E., 1927. Die Strömungen im Bodensee. Int. Rev. ges. Hydrobiol., 19: 84-114 u. 231-260.
- WASMUND, E., 1928. Die Strömungen im Bodensee. Int. Rev. ges. Hydrobiol., 19: 21-155.
- WASMUND, E., 1933. Temperaturschichtungen im Bodensee. Gerlands Beiträge zur Geophysik, 40: 399-452.
- WEDDERBURN, E.M., 1911. The temperature seiche. Hydrodynamical theory of temperature oscillations in lakes. Trans. R. Soc. Edinb., 47: 628-634.
- * WEISS, W., FISCHER, K.H., KRAMER, B., ROETHER, W., LEHN, H., CLARKE, W.B. and TOP, Z., 1978. Gas exchange with the atmosphere and internal mixing of Lake Constance (Obersee). Verh. Ges. f. Ökologie (Kiel 1977): 153-161.
- * WIELAND, C., 1989. Der Bodensee als Trinkwasserspeicher. Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik, 1/89: 43-44.
- * WIESER, E., 1956. Die Anwendung einheitlicher Methoden bei der Untersuchung des Bodenseewassers. GWF, 97: 209-213.
- * WIESER, E. und LINK, P., 1970. Ein Beitrag zur Frage der Eutrophierung des Bodensees durch den Alpenrhein. Schweiz. Z. Hydrol., 32: 439-452.
- * ZAHNER, R., 1964. Beziehungen zwischen dem Auftreten von Tubificiden und der Zufuhr organischer Stoffe im Bodensee. Int. Rev. ges. Hydrobiol., 49: 417-454.
- * ZENGER, A., 1989. Ursachen und Auswirkungen von Transport- und Mischungs-Prozessen im westlichen Bodensee. Diss. Univ. Heidelberg: 137 S.
- ZENGER, A., ILMBERGER, J., HEINZ, G., SCHIMMELE, M. und MÜNNICH, K.-O., 1989. Untersuchungen zur Struktur der internen Seiches des Bodensees. Wasserwirtschaft, 79: 616-623.

ZENGER, A., ILMBERGER, J., HEINZ, G., SCHIMMELE, M., SCHLOSSER, P., IMBODEN, D. and MÜNNICH, K.-O., 1989. Behavior of a medium-sized basin connected to a large lake. In: TILZER, M.M. and SERRUYA, C. (eds.). Large lakes. Springer-Verlag: 133-155.

ZENGER, A., ANKER, W., ILMBERGER, J. und MÜNNICH, K.O., 1990. Die Untersuchung der Windverhältnisse im westlichen Teil des Bodensees und die Umrechnung von Landwinden auf Seebedingungen. Meteorol. Rdsch., 42: 42-51.

* ZEPPELIN, E. Graf, 1893. Ältere und neuere Bodensee-Forschungen und -Karten. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 22: 21-45.

* ZEPPELIN, E. Graf, 1893. Die hydrographischen Verhältnisse des Bodensees. Schr. Ver. Gesch. Bodensees, 22: 59-103.

* ZIHLER, J., 1989. Gemeinsam geht's besser! Ein Kurzportrait der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB). Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik, 1/89: 62-65.

ZÜLLIG, H., 1956. Sedimente als Ausdruck des Zustandes eines Gewässers. Schweiz. Z. Hydrol., 18: 5-143.

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 Regenentlastungsanlagen - 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 1: 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 Bodensee-wasser	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
Nr. 40	Die Belastung des Bodensees mit Phosphor- und Stickstoffverbindungen, organisch gebundenem Kohlenstoff und Borat im Abflussjahr 1985/86	1989
Nr. 41	Die Entwicklung der NTA- und der EDTA-Konzentrationen im Bodensee und in einigen Bodensee-Zuflüssen von 1985 bis 1990	1991