

Strömungen in Seen

Untersuchungen in situ und an nachgebildeten Modellseen

Von

PAUL NYDEGGER

Vorwort

Die Notwendigkeit, die in einem See vorherrschenden Strömungen zu kennen, darf wohl heute als allgemein anerkannt gelten. Neben ökologischen Problemen sei zum Beispiel die Bedeutung für die Einleitung geklärter Abwässer und Trinkwasserentnahmen erwähnt.

Der von THOMAS [23] geschilderte Phenolunfall vom 20. September 1967 im Zürichsee zeigt dies eindrücklich an einem von zahlreichen Beispielen.

In neuester Zeit interessieren sich immer mehr auch die Limnosedimentologen für die Bahnen, die die Zuflüsse in einem See beschreiben.

Die Mitteilungen in der vorliegenden Publikation beruhen auf Messungen in Seen und Beobachtungen an Seemodellen, sind also experimenteller Art, und wollen einen kleinen Beitrag zum Problem «Wasserbewegungen in Seen» liefern. Auf physikalische Erörterungen wird nur soweit unbedingt nötig eingegangen. Wer über theoretische Grundlagen mehr wissen möchte, sei auf die neueste, ausserordentlich gründliche und interessante Mitteilung Nr. 20 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH [26] verwiesen.

Ich danke an dieser Stelle der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich und vor allem Herrn Prof. Dr. E. A. Thomas für die Aufnahme des Berichtes in ihre Vierteljahrsschrift und der Schweizerischen Geotechnischen Kommission für die namhaften Beiträge, mit denen unsere jahrelangen Untersuchungen gefördert wurden, sowie für den Beitrag an die Drucklegung.

Diese Mitteilungen sind zudem auch als abschliessender Bericht, den ich seinerzeit der genannten Kommission in Aussicht stellte, gedacht; dabei möchte ich das fördernde Interesse des früheren Kommissionspräsidenten Prof. Dr. Francis de Quervain dankbar erwähnen.

Anerkennung gebührt auch Herrn Prof. Dr. F. Gyax, dem Direktor des Geographischen Institutes der Universität Bern, und zahlreichen Studenten, die unter seiner Leitung bestrebt waren, die Bahnen der Driftkörper genau zu vermessen und aufzuzeichnen.

Dankend darf erwähnt werden, dass das Eidgenössische Amt für Umweltschutz ebenfalls bereit war, einen wesentlichen Teil der Druckkosten zu übernehmen.

Besonderen Dank schulde ich meinem stets einsatzbereiten und ideenreichen Mitarbeiter Herrn Erich Münger aus Brugg. Die meisten Zeichnungen stammen zudem aus seiner Hand, und die Verfilmung der Strömungsbahnen in Modellseen ist zum grössten Teil sein Verdienst.

I. Einführung

Seit etwa fünfzehn Jahren werden am Geographischen Institut der Universität Bern Untersuchungen über Strömungen in Seen durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit werden die wichtigsten Ergebnisse aus Beobachtungen an Brienzer-, Murten und Bielersee zusammengefasst. Messungen an mehreren anderen Seen haben gezeigt, dass die gewonnenen Erkenntnisse weitgehend verallgemeinert werden dürfen, dass aber dennoch jeder See bezüglich Strömung spezifische Merkmale aufweist. Die drei genannten Seen wurden ausgewählt, weil jeder von ihnen, wie wir sehen werden, einen bestimmten Typus repräsentiert. Das Gemeinsame ist andererseits ihre intensive Durchflutung. Dies ist um so wichtiger, weil wir uns vorwiegend mit zuflussbedingter Strömung befassen. Diese wurde unseres Erachtens bis heute vernachlässigt, während über windinduzierte Wasserbewegungen von zahlreichen Forschern, wie zum Beispiel MORTIMER, grossartige Forschungsergebnisse vorliegen. Wir sind uns aber bewusst, dass unsere Ergebnisse hauptsächlich auf Seen mit grossen Einzugsgebieten, wie sie unsere Alpenrandseen aufweisen, zutreffen und dass bei Seen mit geringem Durchflutungsgrad und grosser Oberfläche die zuflussbedingten Strömungen von windbewirkten Bewegungen gewissermassen «überdeckt» werden und eine untergeordnete Rolle spielen.

II. Die untersuchten Seen

1. Gemeinsame Merkmale

Wie bereits erwähnt, sind alle drei genannten Seen stark durchflutet. Das Verhältnis Seeoberfläche zu Einzugsgebiet beträgt für den Brienzersee 1 : 38, für den Murtensee 1 : 30 und für den Bielersee 1 : 143 (ohne Einzugsgebiet Neuenburgersee). Entsprechend zeigen auch alle drei Seen ausgeprägte Trübungshorizonte in der jeweiligen Einschiebungstiefe der Zuflüsse (Abb. 4).

Auch klimatisch ergeben sich ähnliche Verhältnisse, da die betreffenden Gewässer praktisch auf der gleichen geographischen Breite zwischen $46^{\circ} 43'$ (Brienzersee) und $47^{\circ} 05'$ (Bielersee) liegen und Meereshöhen zwischen 564 m (Brienzersee) und 429 m (Murten- und Bielersee) aufweisen. Zudem verlaufen alle drei Gewässer von SW nach NE.

2. Trennendes

Als wichtige trennende Merkmale sind zweifellos die ungleichen Tiefen und damit die unterschiedlichen Volumen zu nennen (siehe Abb. 1). Während der Brienzersee einen ausgesprochen tiefen und steilufrigen Alpenrandsee mit einem grossen Hypolimnion darstellt, handelt es sich bei den beiden andern um verhältnismässig flache Wannen mit mittlerer bis geringer Tiefe (siehe Tabelle 1 und Abb. 1).

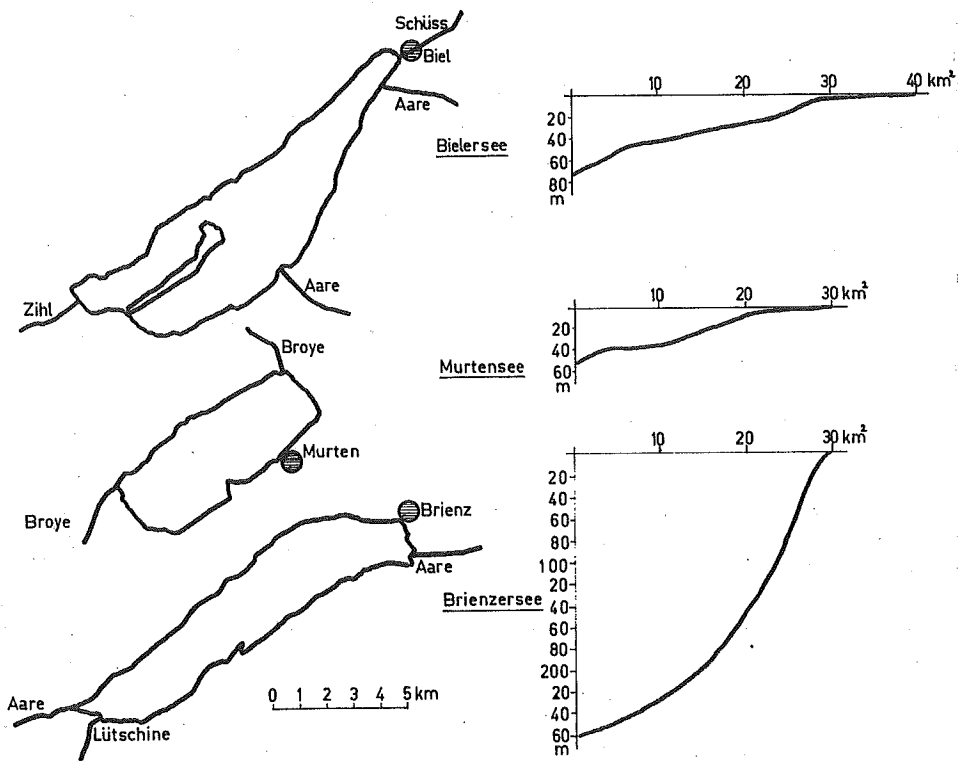


Abb. 1. Oberfläche, Lage und hypsographische Diagramme der untersuchten Seen.

Tabelle 1. Morphometrische und hydrologische Daten

	Meereshöhe m	Oberfläche km ²	Länge km	Volumen km ³	Grösste Tiefe m	Mittlere Tiefe m
Brienzersee	564	29,8	14,0	5,16	259,4	174
Murtensee	529	27,2	8,8	0,61	48,6	22,4
Bielersee	529	40,0	14,9	1,24	74	30,1

	Einzugsgebiet km ²	Mittlere Höhe des Einzugsgebietes m ü. M.	Davon vergletschert in %
Brienzersee	1127	1950	18,2
Murtensee	697	630	0
Bielersee	5634 *	1150	0,3

* Ohne Zihl aus dem Neuenburgersee.

Aus Tabelle 1 ist weiterhin ersichtlich, dass das Einzugsgebiet des Brienzersees grosse mittlere Höhe (grosse Schleppkraft der Zuflüsse), dasjenige des Bielersees mittlere und das des Murtensees ausgesprochen geringe Meereshöhe besitzt. Zu beachten ist ferner der unterschiedliche Grad der Vergletscherung. Während der Brienzersee zur Zeit der Schneeschmelze im Hochgebirge, also Juni bis August, maximal durch-

strömt wird, folgen sich, je nach Niederschlagsintensität, verschiedene Maximas und Minimas der Durchflutung in unregelmässigen Abständen im Murtensee (siehe NYDEGGER [14]). Weil dem Bielersee die Aare die Hauptwassermenge zuführt, zeigt auch er im Sommer maximalen Wasseraustausch, aber bei weitem nicht so ausgeprägt wie der Brienersee.

Wie aus der unterschiedlichen Beckenform zu erwarten und wie aus Tabelle 2 hervorgeht, zeigen sich auch grosse Unterschiede im Trophiegrad der drei Seen. Der Brienersee kann als ausgesprochen oligotroph, der Murtensee als ausgesprochen eutroph bezeichnet werden.

Tabelle 2. Angaben über Stickstoff- und Phosphorgehalt des Oberflächenwassers (nach THOMAS [24], 1953) und der Karbonathärte im Epilimnion (eigene Messungen 1953–1956). W = Winter-, S = Sommermessung.

	NO ₃ ['] , mg/l		NO ₂ ['] , mg/l		NH ₃ , mg/l		N-Abnahme mg/l W/S	PO ₄ ^{''} , y/l aus GR.		Karbonat- härte fr.°	
	W	S	W	S	W	S		W	S	W	S
Brienersee	0,9	0,8	0,005	0,005	0,02	0,03	0,02	15	20	6,7	5,5
Bielersee	4,8	1,6	0,008	0,05	0,05	0,03	0,74	100	40	14,0	10,2
Murtensee	6,0	4,0	0,005	0,07	0,05	0,03	0,49	50	30	17,5	12,5

Der Bielersee muss nach Nährstoffgehalt des Oberflächenwassers (Tabelle 2) ebenfalls als eutroph gelten. Untersuchungen von FRIEDLI [4] und SANTSCHI [19] aus neuester Zeit bestätigen dies auch eindeutig auf Grund der Sauerstoffverhältnisse des Tiefenwassers. 1953 fand MINDER [11] am 5. Sept. noch 63% Sättigung in 35 m Tiefe. 1954 stellten wir am 21. Okt. einen Sättigungswert von 50,4% fest, und FRIEDLI fand am 14. Okt. 1974 noch 18,5% (Werte von MINDER und FRIEDLI interpoliert). Was sich durch den hohen Phosphorgehalt des Oberflächenwassers 1953 ankündigte, ist also unterdessen eingetreten. Der Zustand des Sees ist alarmierend geworden.

Die gewichtigsten Motive für die Wahl der drei Seen aus unserer Untersuchungsreihe sind aber folgende Unterschiede:

- Der Murtensee besitzt nur einen nennenswerten Zufluss, der auf der linken Seite des Seekopfes einfliesst und deshalb genügend Platz findet, um einen ausgeprägten Rechtswirbel zu bilden (Abb. 1). Zudem bildet der See ein ideales, sehr einfach gestaltetes, natürliches «Versuchsbecken», an dem unsere Theorie der Linksrotation ohne Schwierigkeiten, wie im Modell, nachgewiesen werden kann.
- Der Brienersee besitzt am Seekopf und am See-Ende je einen bedeutenden Zufluss, von denen der eine (Aare) Platz zur Bildung eines Rechtswirbels findet, während sich der andere (Lütschine) unmittelbar dem nordöstlichen Ufer entlang schiebt. Im übrigen ist auch dieser See sehr einfach gestaltet.
- Der Bielersee schliesslich besteht aus drei Teilbecken, ist also ausgesprochen gegliedert. Zudem besitzt er drei wesentliche Zuflüsse, von denen der wichtigste (Aare) auf ganz «unnatürliche» Weise seitlich einfliesst (Abb. 1).

Abschliessend ist zu erwähnen, dass von allen drei Seen aus allerjüngster Zeit stammende limnosedimentologische Ergebnisse vorliegen, die interessante Vergleiche mit unseren Feststellungen zulassen.

III. Untersuchungsmethoden

Es ist zu unterscheiden zwischen indirekten und direkten Methoden der Strömungsmessung sowie Modellversuchen.

1. Indirekte Methode oder Methode der Stromberechnung

Diese Berechnung kann, indem sie hydrodynamische Gesetzmässigkeiten berücksichtigt, von der Druckverteilung, von Gefällen an der Oberfläche oder in Grenzhorizonten (Neigung der Isothermen, siehe NYDEGGER [13], Abb. 50), von der Verteilung der Temperatur, des Salzgehaltes, der Trübungsstoffe usw. ausgehen. Über die Verteilung von Trübungsstoffen, die mit einem Transmissionsmessgerät systematisch vor allem im Brienersee verfolgt wurde, liegen von NYDEGGER [13] umfangreiche Untersuchungen vor. Wir werden unser Hauptaugenmerk deshalb in dieser Publikation vorwiegend auf andere Methoden richten.

2. Direkte Methoden

KALLE führt in «Allgemeine Meereskunde» aus: «Zwischen Drifts- und ortsfesten Messungen bestehen dieselben grundsätzlichen Unterschiede wie zwischen den Bewegungsgleichungen nach LAGRANGE und nach EULER. Im Sinne von LAGRANGE ist diese Aufgabe gelöst, wenn die Bahn jedes Wasserteilchens beschrieben ist. Im Sinne von EULER ist sie gelöst, wenn an jedem Ort Richtung und Geschwindigkeit bekannt sind.»

a) Methoden der Driftmessung

An Eisenrahmen aufgespannte Plastikfolien von etwa 6 m^2 Fläche wurden in die gewünschte Messtiefe versenkt und hingen mittels einer Schnur an einem Schwimmer

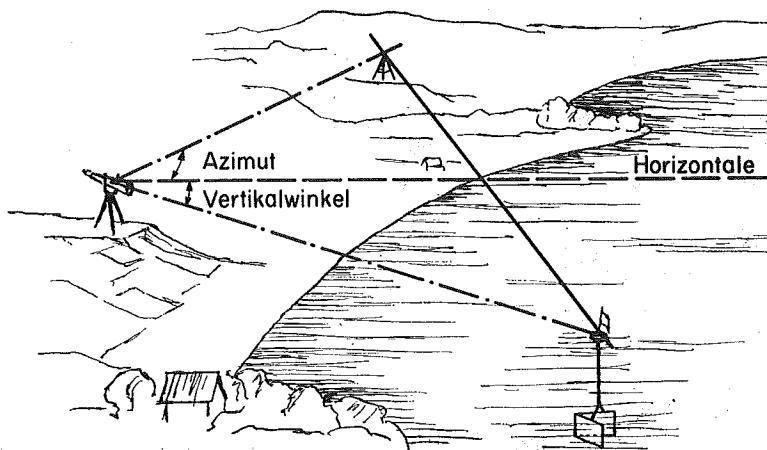


Abb. 2. Bestimmung von Strömungsbahnen mit Driftkörpern.

(z. B. Sagexquader). Durch Vorwärts- oder Rückwärtseinschnitt konnten die Bahnen der Schwimmer auf der Seeoberfläche, die den Bahnen in der Tiefe entsprechen müssen, eingemessen und dann aufgezeichnet werden. Zahlreiche Versuche ergaben, dass der Einfluss des Windes und die Wasserbewegungen an der Oberfläche gegenüber dem Widerstand, den die Plastikfolien in der Tiefe finden, ausser bei Sturm, vernachlässigt werden dürfen (Abb. 2).

Ähnliche Vorrichtungen wurden unter anderem von MERCANTON [9], STÄDLER [20] sowie KELLER und HOFER verwendet. Bei schlechten Sichtverhältnissen wurde gleichzeitig mit den Driftkörpern je eine Fixboje (am Boden verankert) ausgesetzt und in bestimmten Zeitintervallen Abstand und Richtung zu dieser ermittelt.

b) Ortsfeste Messungen

Da bei Seeströmungen, im Gegensatz zu Wasserbewegungen im Meer, nur geringe Geschwindigkeiten von höchstens einigen Zentimetern pro Sekunde auftreten, versagt die Methode der Flügelmessung (z. B. MERZ-ECKMANN'sches Gerät). In jahrelanger Arbeit entwickelten wir deshalb ein Mess- und Registriergerät, das Geschwindigkeiten von Millimetern anzeigt. Die Ergebnisse dieser Registrierungen sollen in einer spä-

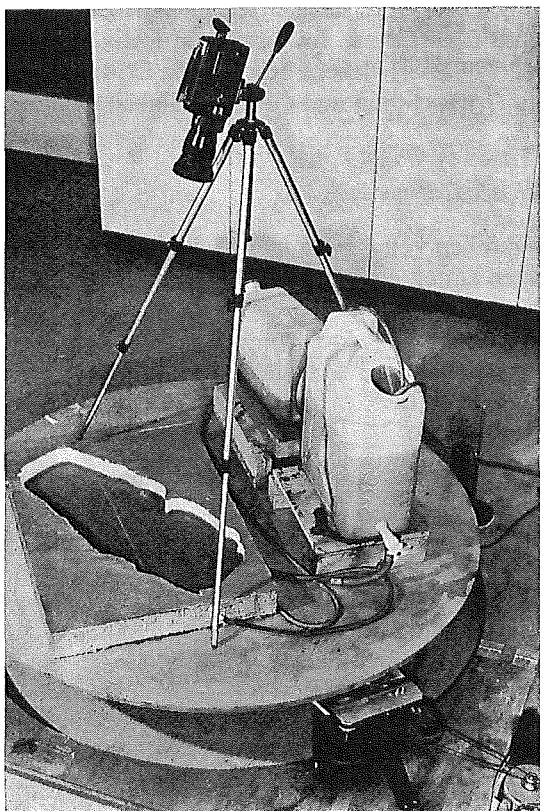


Abb. 3. Modellversuchsanordnung.

teren Arbeit umfassend publiziert werden. Wir hoffen, durch sie weitere Erkenntnisse über das Zusammenspiel von zuflussbedingten und windbedingten Wasserbewegungen zu gewinnen.

3. Modellversuche

Um die Erdrotation und damit die Wirkung der Coriolisablenkung zu simulieren, wurde eine runde Holzplatte von 140 cm Durchmesser so montiert, dass sie um eine senkrechte Achse rotierte; der See drehte sich also um eine Achse, die ihrerseits einen Kreis beschrieb (siehe Abb. 3). Die drei genannten Seen wurden aus Polyester nachgebildet, und durch eingebaute Röhrchen kann verschieden gefärbtes Wasser zu- und abfließen. Eine Kamera, auf der Platte montiert, filmt die Bahnen der Zuflüsse im Modellsee. In dieser Publikation müssen selbstverständlich Momentaufnahmen an Stelle des Films treten.

IV. Allgemeines über Seeströmungen und die Bedeutung der Corioliskraft

Abb. 4 zeigt schematisch und an einer Transmissionsmessung, wie sich die Zuflusswassermassen in jener Tiefe des Sees einschichten, in der sie die entsprechende Dichte vorfinden. Diese ist gegeben durch Temperatur, Salzgehalt und Trübungstoffe. Heute ist bekannt, dass sich bei beträchtlicher Trübung ein Teil der Wassermassen löst und als sogenannter «Turbidity Current» über die Halde hinunter gleitet und dem Seeboden entlang einschichtet. Da diese «Turbidity Current», wie Untersuchungen gezeigt haben (STURM und MATTER [22] und andere), ohne wesentliche Ablenkung

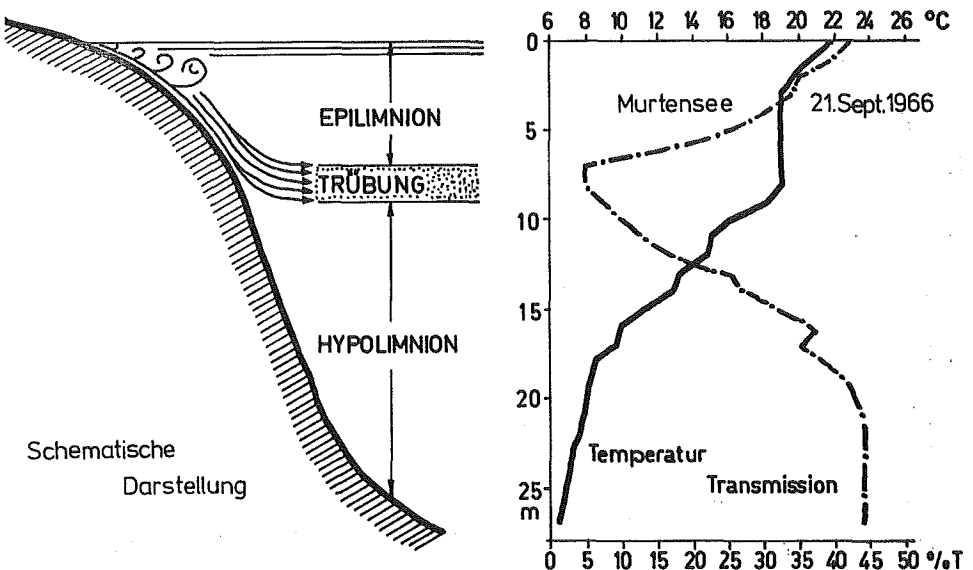


Abb. 4. Einschichtung der Zuflüsse und Bildung von Trübungshorizonten (Temperatur- und Trübungsmessung im Murtensee).

meist in «Tiefenrinnen» weiterfliessen, sind sie für die von uns untersuchten Zirkulationen mit vertikaler Achse von untergeordneter Bedeutung und werden deshalb hier nicht weiter betrachtet. Damit soll nicht gesagt sein, dass sie gar keinen Einfluss auf das Strömungsgeschehen in Seen ausüben.

Wie Tafel I zeigt, fliessen die Wassermassen nun nicht geradlinig in der erreichten Tiefe weiter, sondern bilden dort infolge der Corioliswirkung einen Rechtswirbel, dessen Durchmesser sich berechnen lässt.

Wir sind gewöhnt, alle Bewegungen relativ zur Erde, also in bezug auf ein rotierendes Koordinatensystem zu betrachten. Die Bewegungsgesetze, die für ein ruhendes System gelten, behalten ihre Gültigkeit auch dann, wenn wir sie auf ein rotierendes Koordinatensystem transformieren. Unser System habe die Koordinaten x , y , z , und in der x -, y -, z -Richtung wirken die Beschleunigungen der Corioliskraft f_x , f_y , f_z .

Wichtig ist dabei vor allem die Horizontalkomponente $f_x = 2\omega\nu\sin\varphi$, während, nach PRANDTL [17], die beiden andern vernachlässigt werden können.

ω = Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation = $7,29 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

ν = Einschichtungsgeschwindigkeit

φ = geographische Breite

Da die Beschleunigung senkrecht zur Fliessrichtung erfolgt, wird ein reibungsfrei bewegter Massenpunkt einen Kreis beschreiben. Der Radius dieses Kreises, der von PRANDTL [17] als «Trägheitskreis» bezeichnet wird (Trägheitskreis, weil der bewegte Massenpunkt, für uns die bewegte Wassermasse, die Rotationsbewegung nicht mitmacht), berechnet sich aus

$$\frac{\nu^2}{r} = 2\omega\nu\sin\varphi \text{ zu } r = \frac{\nu}{2\omega\sin\varphi}.$$

Beim Wirbel auf Tafel I beträgt der Durchmesser ca. 1500 m, woraus sich eine Strömungsgeschwindigkeit von ungefähr 7,5 cm pro sec. berechnen lässt, eine Grösse, die mit unseren Messungen im Mittel recht gut übereinstimmt. Nun ergeben sich weiter folgende Überlegungen:

1. Da ständig neue Wassermassen nachdrängen, lösen sich Teilwirbel vom Hauptwirbel und werden weitergeschoben.
2. Weil diese weitergestossenen Wassermassen auch in ihrer Gesamtheit nach rechts abgelenkt werden und dabei gegen das Ufer drängen, übt dieses eine Zwangskraft aus, die gleich der ablenkenden «Trägheitskraft» der Corioliswirkung und senkrecht zur Bewegungsrichtung verläuft.
3. Dadurch wird eine Strömungsbahn entlang dem Ufer erzwungen.
4. Diese Bahn bewirkt schliesslich eine Linksrotation der Hauptwassermasse in der Einschichtungstiefe der Zuflüsse, wobei die unter- und überlagerten Wassermassen mit nach unten und nach oben abnehmender Geschwindigkeit infolge der Reibung mitgeschleppt werden. Selbstverständlich kann es dabei in tieferen und höheren Schichten, namentlich bei rascher Geschwindigkeitszunahme, zu Gegenbewegungen kommen, ähnlich den Erscheinungen bei windinduzierter Strömung.

Es sei hier ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Theorie von namhaften Forschern bezweifelt wird. Herr Prof. MORTIMER zum Beispiel hat vor einiger Zeit

an einem Vortrag vor Fachleuten in Zürich erklärt, dass er an eine solche «Düsenwirkung» der Zuflüsse nicht glauben könne. Wir müssen aber berichtigen, dass wir nie von einer «Düsenwirkung», sondern stets von einem Nachdrängen der Zuflusswassermassen und einem dadurch bewirkten Wegstossen der vorangegangenen gesprochen haben.

V. Bahnbestimmungen mit Driftkörpern

1. Beobachtungen im Brienzersee

Systematische Beobachtungen wurden erstmals 1965/66 durchgeführt. Die Driftkörper wurden jeweils in Ufernähe ausgesetzt, und zwar in jene Tiefe, in welcher (mit Hilfe von Transmissionsmessungen ermittelt) sich die Hauptmenge des Zuflusswassers dahinschob. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 und 6 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Pfeilspitzen die Strömungsrichtung, die grossen Kreise oder Doppelkreise den Ort des Aussetzens des Schwebekörpers, ein kleiner Kreis den Ort des ersten, die Mitte von zwei kleinen Kreisen den Ort des zweiten Rückwärtseinschnittes usw. angeben.

a) Messungen vom 15.–17. Sept. 1965 (Abb. 5, Nummern in einfachen Kreisen)

Aus Abb. 5 ergibt sich eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 103 m/h, wobei zu beachten ist, dass die Driftkörper bei Nr. 1, 3, 4 die Strömungsrichtung von

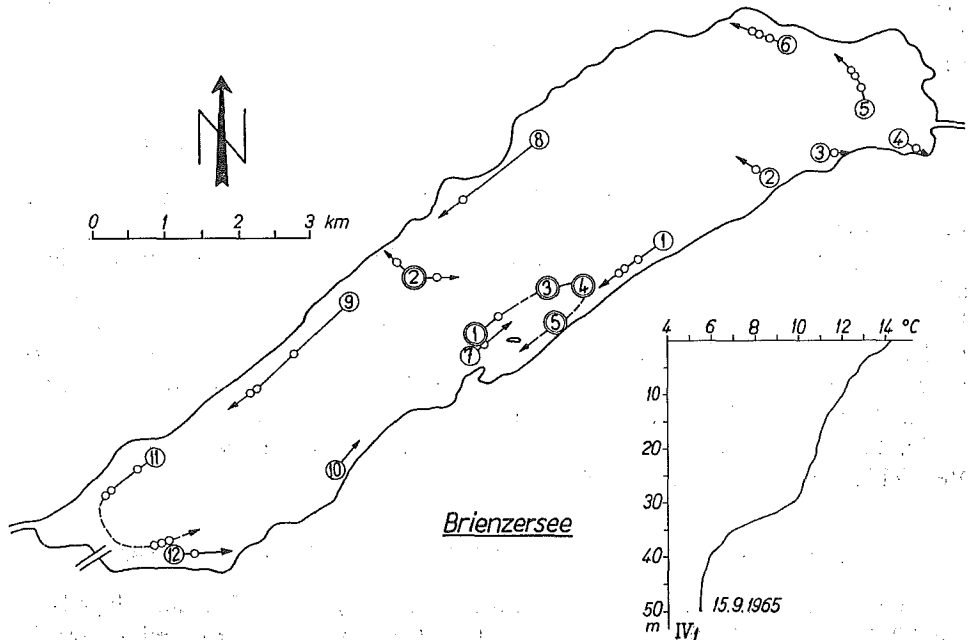


Abb. 5. Ermittlung von Strömungsbahnen im Brienzersee in 25 m Tiefe und Temperaturschichtung am 15. September 1965.

örtlichen Randwirbeln ergeben. Ein ganz typischer Randwirbel bildet sich jeweils im Gebiet Schneckeninsel–Glote (siehe auch Abb. 6). Es ist hier eine Parallele mit den sogenannten «Widerwassern», die sich am Rand eines Flusses in kleinen Buchten bilden, zu erkennen. Ein ähnlicher Randwirbel wurde fast immer auch in der Bucht von Oberried, unmittelbar vor der Dampfschiffstation, gefunden. Es ist deshalb wahrscheinlich, dass der Driftkörper Nr. 8 eine so geringe mittlere Strömungsgeschwindigkeit zeigt, weil er während der Nacht vorübergehend in diesen Randwirbel geriet.

b) Messungen vom 10.–13. Okt. 1965 (Abb. 5, Nummern in Doppelkreisen)

Gerät Nr. 1 wurde am 10. Okt. um 11.30 Uhr ausgesetzt und zeigte bis zum Einziehen um 19.30 Uhr eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 55 m/h. Am 11. Okt. wurde es erneut um 14.25 Uhr ausgesetzt und ergab gleiche Strömungsrichtung und bis zum Abend eine Geschwindigkeit von 61 m/h. Am 12. Okt. um 13.45 Uhr wurde es an der Stelle Nr. 3 und am gleichen Tag um 17.15 Uhr bei Nr. 4, am folgenden Tag um 10.10 Uhr an der Stelle Nr. 5 festgestellt. Dabei sank die Strömungsgeschwindigkeit auf 41 m/h, was nicht verwunderlich ist, wenn man beachtet, dass das Gerät in den bereits genannten Randwirbel hinter der Schneckeninsel geriet. Gerät Nr. 2 zeigte am 10. Okt. um 12.20 Uhr eine Strömungsgeschwindigkeit von 21 m/h in NNW-Richtung; am 11. Okt. um 13.10 Uhr bewegte es sich mit 42 m/h in E-Richtung. Dieses Verhalten kann von uns nicht restlos erklärt werden. Aus Aussagen und Beobachtungen von Fischern muss aber geschlossen werden, dass sich oftmals innerhalb der den See umlaufenden Uferströmung je ein Linkskreis in der oberen und unteren Seehälfte bildet, deren gegenseitige Grenze gewissermassen in Längsrichtung des Sees hin und her pendelt.

c) Messungen vom 23.–28. Juli 1966 (Abb. 6, einfache Kreise)

Die Nummern von 1 bis 10 zeigen den Lauf eines Driftkörpers, den wir am 23. Juli um 14.00 Uhr vor der Burg in Iseltwald aussetzten und bis zum 28. Juli 8.00 Uhr ständig verfolgten. Die Punkte wurden alle durch Rückwärtseinschnitt ermittelt. Die geschlossenen Linien zeigen beobachtete, die punktierten mutmassliche Strömungsbahnen (während der Nacht zurückgelegt). Das Strömungsmessgerät geriet vorerst in den bereits mehrfach erwähnten Randwirbel hinter der Schneckeninsel und wurde dann durch einen sehr kräftigen Nordwestwindeinbruch, der bloss während ca. 2 Stunden wirksam war, wieder in die Bahn der Lütschineströmung gedrängt.

Am 28. Juli, 8.00 Uhr, musste das Gerät eingezogen werden, weil die Gefahr der Verwicklung mit Fischernetzen bestand.

d) Messung vom 29.–30. Juli (Abb. 6, Nummern in Doppelkreisen)

Diese Messung war als Fortsetzung der Beobachtungen vom 23.–28. Juli gedacht. Am 29. Juli um 14.00 Uhr wurde das Gerät bei Nr. 1 ausgesetzt, trieb mit einer mittleren Geschwindigkeit von 160 m/h bis zur Stelle Nr. 2, wo es am Abend des gleichen Tages gesichtet wurde. Am Morgen des 30. Juli fand es sich um 11.00 Uhr an der Stelle

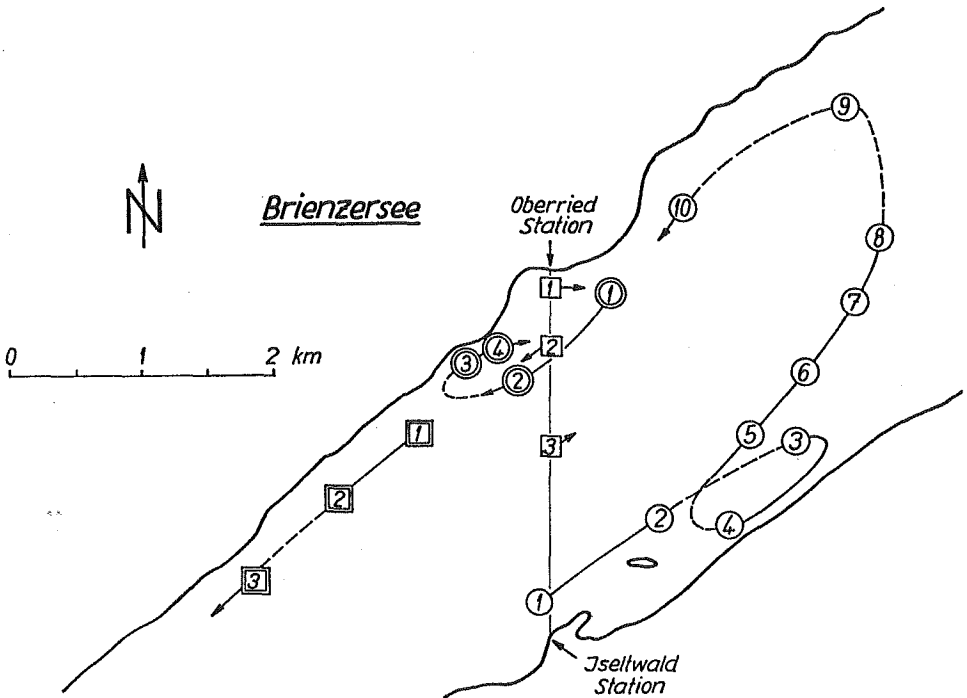


Abb. 6. Ermittlung von Strömungsbahnen im Brienzersee in 19 m Tiefe im Sommer 1966.

Nr. 3, geriet also in einen Randwirbel und musste drei Stunden später bei Nr. 4 wegen Einsetzens eines ziemlich kräftigen Sturmes an Bord gezogen werden.

e) Beobachtungen vom 26. Juli 1966 auf der Geraden zwischen den Stationen Iseltwald und Oberried (Abb. 6, Nummern in einfachen Quadraten)

Auf einer Überfahrt wurden die drei Schwebekörper ausgesetzt und zwei Stunden später auf der Rückfahrt wieder eingezogen, wobei die eingezeichnete Bewegungsrichtung festgestellt wurde. Die ungefähren Geschwindigkeiten betrugen für Nr. 1 110 m/h, für Nr. 2 125 m/h und für Nr. 3 40 m/h. Nr. 1 und Nr. 2 lassen wieder deutlich einen Randwirbel in der Bucht von Oberried erkennen.

f) Messungen vom 29.–30. Juli 1966 (Abb. 6, Nummern in Doppelquadraten)

Diese Messung wurde gleichzeitig mit Messung d durchgeführt. Gerät Nr. 1 wurde am 29. Juli um 12.00 Uhr ausgesetzt, bewegte sich bis um 19.10 Uhr zu Stelle Nr. 2, was eine mittlere Geschwindigkeit von 160 m/h gibt. Am Morgen des 30. Juli um 7.30 Uhr sichteten wir die Boje noch bei Stelle Nr. 3. Das Gerät wurde später von einem Fischer, um Komplikationen mit seinen Netzen zu vermeiden, an Bord genommen.

Zusammenfassend kann gesagt werden: Die Beobachtungen ergeben eindeutig am SE-Ufer Strömungsbewegungen gegen NE, am NW-Ufer solche in SW-Richtung. Diese Feststellungen werden eindrücklich untermauert durch das Luftbild der Eidg. Landestopographie aus 7000 m Höhe in Tafel II. Deutlich ist zu erkennen, wie sich das Lütschinewasser dem Ufer entlang gegen Iseltwald zu bewegt, während die Aare bei Brienz vorerst einen mächtigen Rechtswirbel von ca. 2 km Durchmesser bildet. Weil die Wassertemperatur der Aare zu dieser Zeit (3. Aug.) wesentlich unter derjenigen der obersten 10-m-Schicht des Sees liegt, ist der Weiterverlauf des Aarewassers auf Tafel II nicht mehr deutlich zu erkennen.

2. Beobachtungen am Murtensee

Wie bereits erwähnt, bildet der Murtensee ein ideales «natürliches Modellbecken» mit einem einzigen bedeutenden Zufluss. Nach dessen Lage und ohne Berücksichtigung der Corioliswirkung könnte angenommen werden, dass das Zuflusswasser dem nord-westlichen Ufer entlang gleiten und den See bei Sugiez verlassen würde. Dieser Ansicht sind merkwürdigerweise auch fast alle Seeanwohner, mit denen ich mich über den Lauf des Broyewassers unterhielt. Zwei Berufsfischer aber wussten zu berichten, dass die Broye vor der Grengthalbinsel durchflüsse und dort meist unregelmässige Wirbel bilde, die häufig die Fischernetze zu einem Knäuel verwickeln.

Aus der grossen Zahl von Messungen der Jahre 1965–1970 greifen wir auch hier die interessantesten heraus.

a) Juli 1968 und 1970 (Abb. 7)

Vom 6.–8. Juli 1968 bildeten initiative Studenten vom Geographischen Institut der Universität Bern ein Team, das vom Schulhaus Vallamand aus im oberen Seeteil, also im Zuflussgebiet, die Bahnen von Driftkörpern ununterbrochen, also auch nachts, mit Theodoliten verfolgte. Damit die Schwimmer auch nachts beobachtet werden konnten, wurden sie mit Blinklichtern versehen. Der Beobachtungspunkt liegt 78 m über dem Seeniveau, so dass aus dem Vertikalwinkel die Horizontalabstände verhältnismässig genau berechnet werden konnten. Ausgesetzt wurden sechs Geräte, deren Bahnen auf Abb. 7 teilweise zu finden sind. Um das Bild nicht zu «überlasten», wurden die Trajektorien jener zwei Driftkörper weggelassen, von denen durch Unbekannte die Blinklichtvorrichtung während der Nacht entwendet worden war. Die Bahnen in unmittelbarer Nähe der Broyemündung verlaufen recht verworren (Einschichtungswirbel) und werden erst gegen die Grengthalbinsel zu einigermaßen übersichtlich. Vom 5.–6. Juli herrschte ein kräftiger Westwind, so dass interne Seiches (Schaukelbewegungen) angenommen werden dürfen, die sich auch auf den Lauf der Driftkörper auswirkten. Um das Strömungsbild des Sees zu ergänzen, wurden die aus ortsfesten Messungen gewonnenen Ergebnisse vom 8. Juli 1970 ebenfalls in Abb. 7 eingezeichnet.

b) August 1968 (Abb. 8)

Im August 1968 beobachteten Studenten vom Technikum Burgdorf Strömungsbahnen im Murtensee (Vermessungsdiplomarbeit). Nach Möglichkeit wurde auch

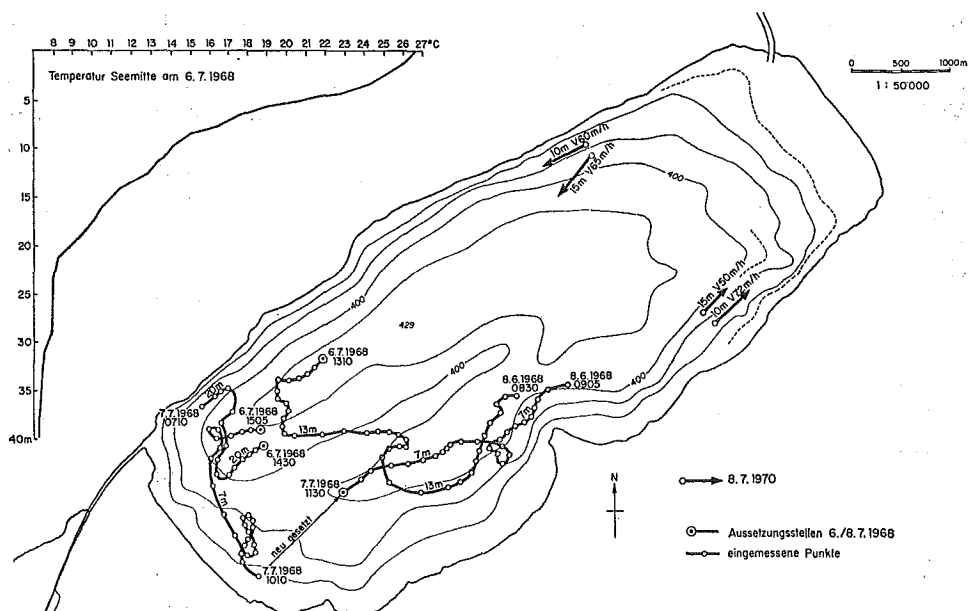


Abb. 7. Strömungsbewegungen im Murtensee, Juli 1968 und 1970.

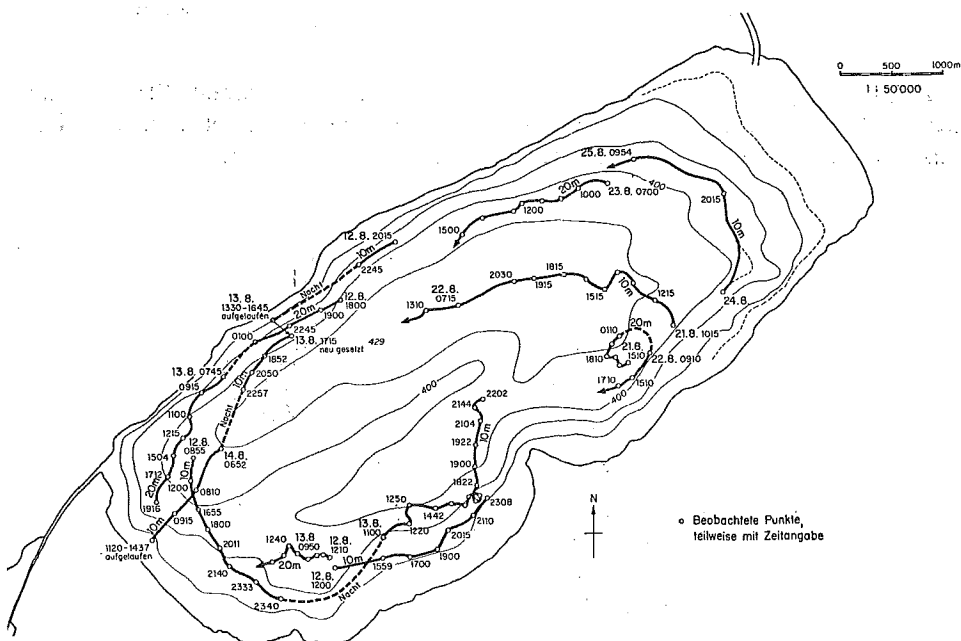


Abb. 8. Strömungsbewegungen im Murtensee, August 1968.

während der Nacht beobachtet (Blinklichter). Um möglichst gleichzeitig ablesen zu können, waren die verschiedenen Gruppen durch Funkgeräte miteinander in Verbindung. Beobachtet wurde von Murten (Mole), von Môtier (Schiffstation) und von Vallamand (Schulhaus) aus. Leider wurden auch diesmal einzelne Schwimmer, Blinklichter und Batterien von Unbekannten während der Nacht zerstört oder entwendet. Aus organisatorischen Gründen mussten die Arbeiten im oberen Seeteil vom 12.–14., diejenigen im unteren Seeteil vom 21.–23. August durchgeführt werden. Die unterste Bahn (Muntelier bis Praz) wurde ferner vom 24.–25. Aug. von uns (Rückwärts-einschnitt) ermittelt.

Das Arbeiten auf dem See wurde durch hohen Wellengang zeitweilig sehr erschwert.

Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- In ca. 10 m Tiefe finden wir die bekannte Linksrotation der gesamten Wassermassen.
- Die Bahnen verlaufen teilweise recht zackig, ein Verhalten, das wohl den internen Seiches zuzuschreiben ist. Dieselbe Ursache dürfte den häufigen Wechseln in der Strömungsgeschwindigkeit zugrunde liegen.
- Während sich die Wassermassen auf der Nordwestseite des Sees in der erwarteten Richtung gegen Südwesten bewegen, finden wir vor Faoug eine, allerdings sehr langsame, rückläufige Bewegung. Vor Murten liess sich sogar ein Rechtswirbel von beträchtlichem Ausmass in 20 m Tiefe feststellen. Hier sei auf diese merkwürdige Erscheinung lediglich hingewiesen; wir hoffen, durch weitere Untersuchungen eine Erklärung für diese sonderbaren Tiefenwirbel, die wir auch an anderen Seen beobachten konnten, zu finden.

Aus allen Beobachtungen wurde schliesslich das in Abb. 9 gezeigte Strömungsbild des Murtensees erstellt. Das Schema wurde schon 1965 gezeichnet, und es ist interessant, dieses mit den neuesten Modellaufnahmen zu vergleichen.

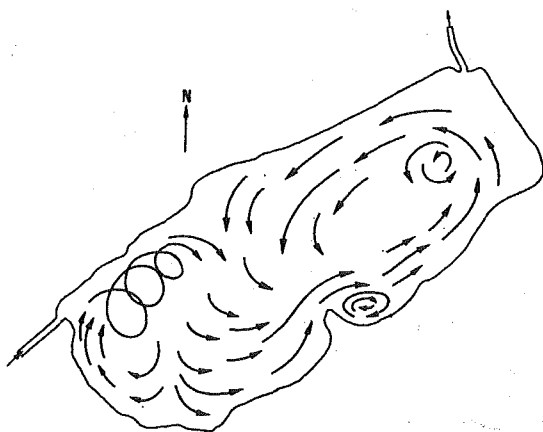


Abb. 9. Strömungsbild des Murtensees in Einschichtungstiefe der Broye.

3. Beobachtungen am Bielersee

In Tafel I wurde bereits eine Aufnahme der Rechtswirbel, die sich bei der Einmündung der Aare in den Bielersee bilden, gezeigt. Auf der Aufnahme ist auch gut zu erkennen, dass das Aarewasser nach NE, dem rechten Ufer entlang, weitergeschoben wird.

a) Erste Messungen vom 30. Sept. bis 2. Okt 1965 (Abb. 10)

Die Plastikflächen wurden jeweils, nachdem die Tiefenlage des maximalen Trübungshorizontes bestimmt worden war, in 16–28 m Tiefe ausgesetzt. Mit Ausnahme von 1a bis 1b handelt es sich um ortsfeste Messungen (mit Fixbojen) der Strömungsrichtung und der Geschwindigkeit. Die Nummern in einfachen Kreisen beziehen sich auf die Messung vom 30. Sept., diejenigen in Doppelkreisen auf den 1. Okt. und diejenigen in Quadraten auf den 2. Okt. 1965. Die Pfeillänge gibt auch hier die ungefähre Strömungsgeschwindigkeit an, wobei als Anhaltspunkt gelten mag, dass die minimale Geschwindigkeit 36 m/h, die maximale 104 m/h und die mittlere 58 m/h betrug. Ein Driftkörper wurde am 1. Okt. vor Gerolfingen (1a) in 20 m Tiefe ausgesetzt und am 2. Okt. um 9.20 Uhr an der Stelle 1b gefunden, wobei die Schwefelflächen, wie an Schlammrückständen festgestellt werden konnte, den Seegrund berührt hatten, so dass keine zuverlässigen Rückschlüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit möglich sind. Vor

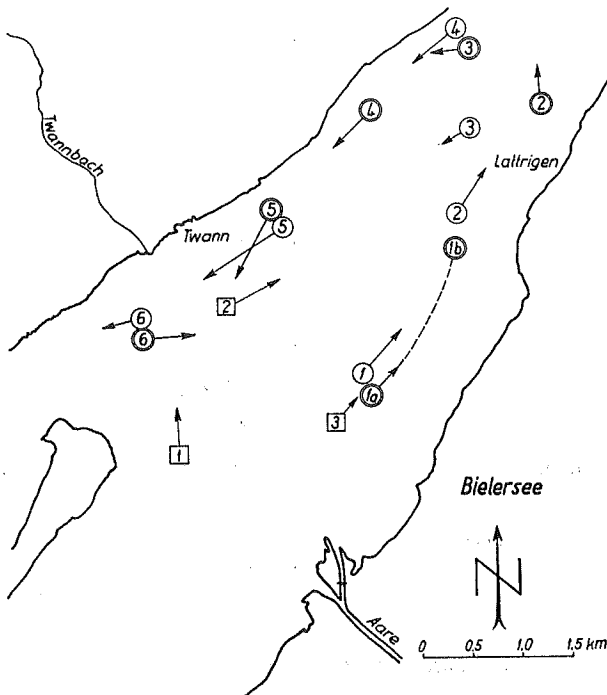


Abb. 10. Strömungsbewegungen im Bielersee (siehe Text).

Twann wurden später weitere Messungen durchgeführt, um die in dieser Gegend recht verwinkelten Verhältnisse abzuklären. Es zeigte sich, dass sich die Strömungsrichtung von einer Stunde auf die andere um 180 Grad wenden kann, so dass sich oft ein recht verworrenes Bild ergab, auf dessen Veröffentlichung wir vorläufig verzichten. Vermutlich sind diese raschen Wechsel auf das Aufeinanderprallen von Zühl- und Schüsswasser zurückzuführen (siehe Abb. 15 und Aufnahme 3 auf Tafel V).

b) Untersuchungen Sommer 1970 bis Herbst 1972

1970–1972 wurden im Bielersee ausgedehnte Strömungsmessungen im Hinblick auf die geplante Trinkwasserfassung für die Stadt Biel durchgeführt.

Aus den umfangreichen Erhebungen greifen wir jeweils eine, die für den betreffenden jahreszeitlichen Abschnitt repräsentativ ist, heraus.

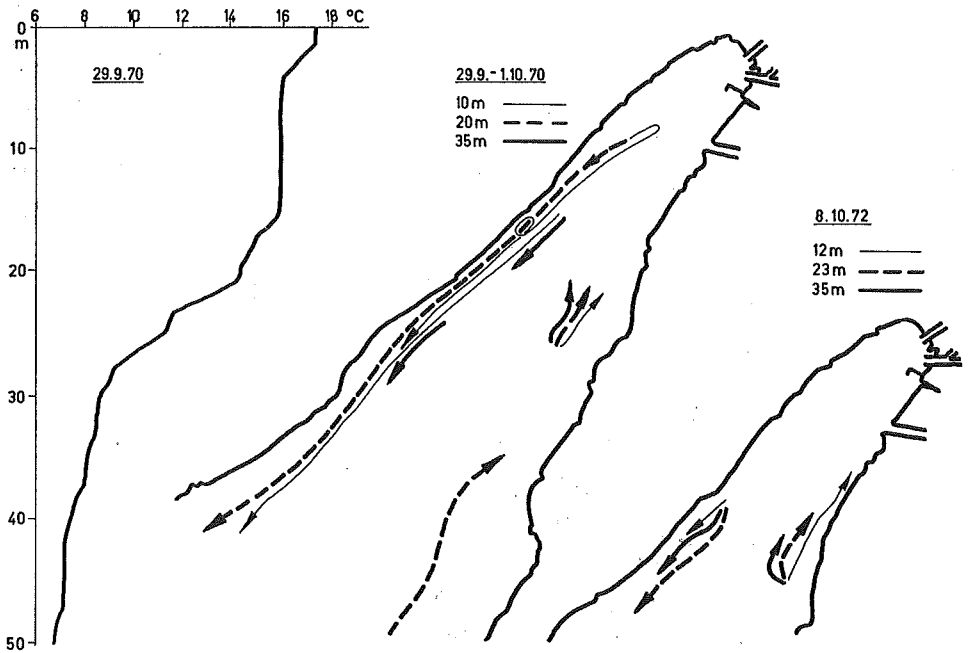
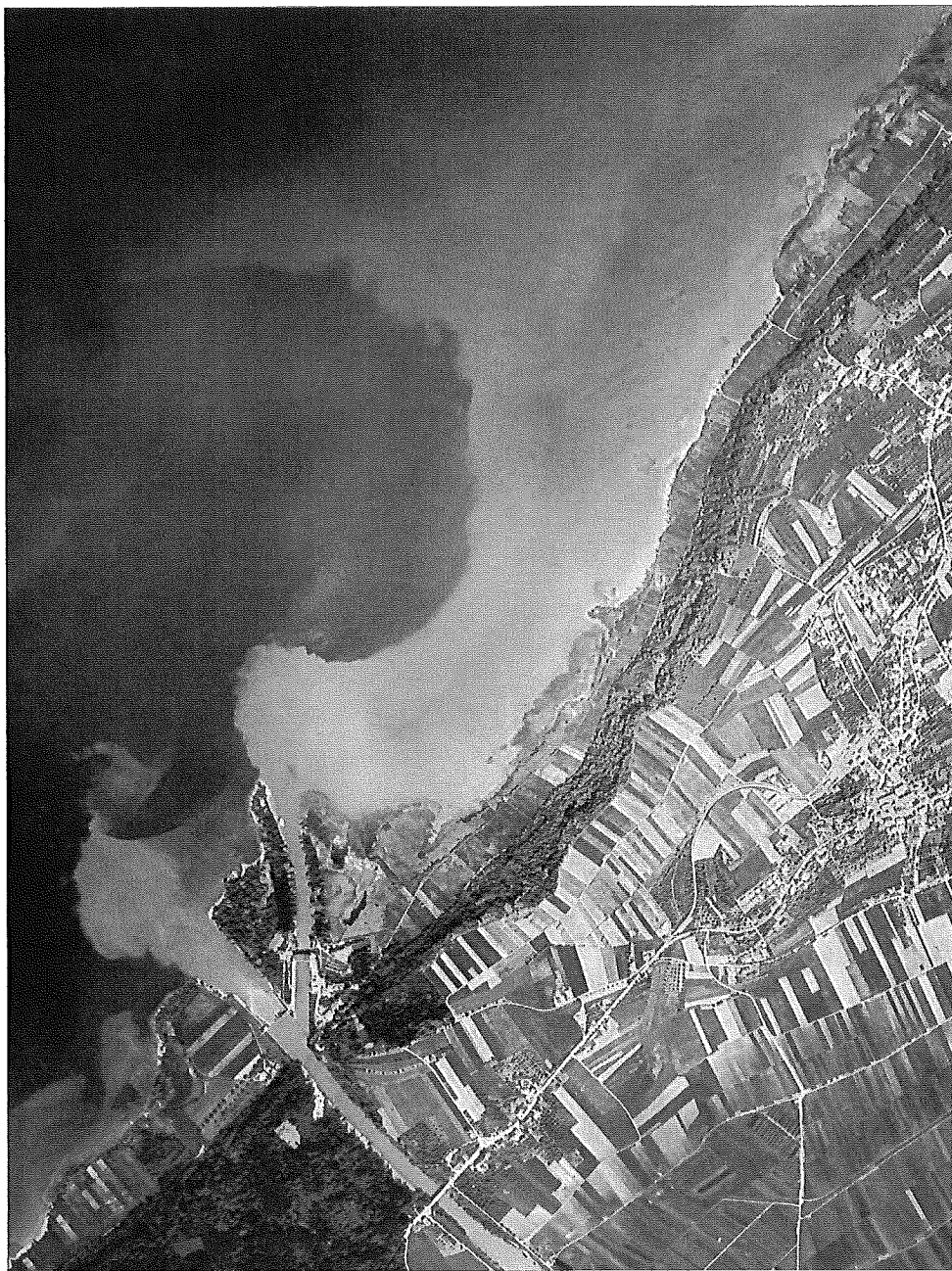


Abb. 11. Strömungsbahnen im Bielersee, Herbst 1970 und 1972.

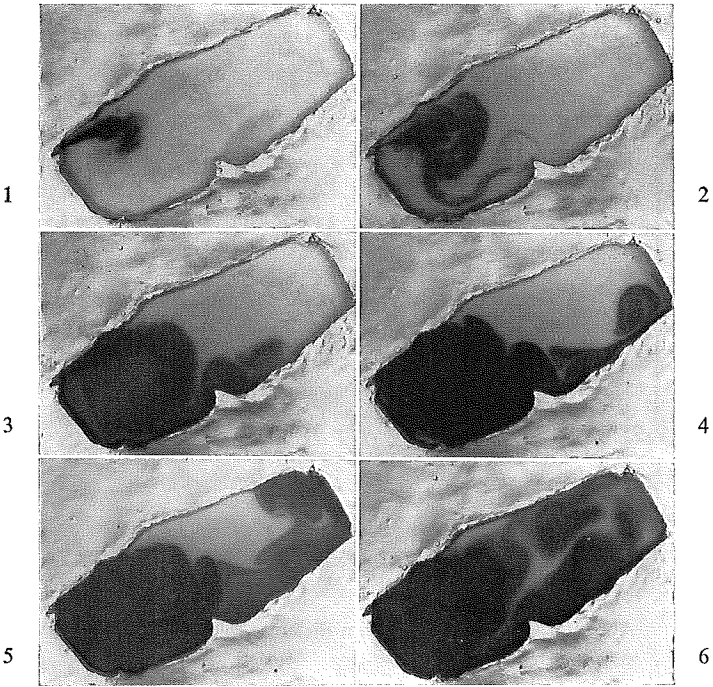
Abb. 11 (29. Sept. bis 1. Okt. 1970 und 8. Okt. 1972). Die beiden Beobachtungen aus zwei Jahren wurden zusammengefasst, weil sie verblüffend übereinstimmend sind. Vom 29. Sept. bis 1. Okt. 1970 wurden die Driftkörper teilweise über Nacht im See belassen.

Abb. 12 (18.–19. Nov. 1972). Die Temperaturkurve zeigt Homothermie bis 60 m Tiefe. Die Transmission betrug ca. 40% und sank unterhalb 65 m sogar unter 30%. Das Zuflusswasser schichtet sich also in wechselnden Tiefen, aber doch vorwiegend in



Tafel I. Aaremündung bei Hagneck, Flugaufnahme der Eidg. Landestopographie vom 19. 5. 1951.





Tafel III. Momentaufnahmen der Strömungsbahnen im Murtenseemodell.

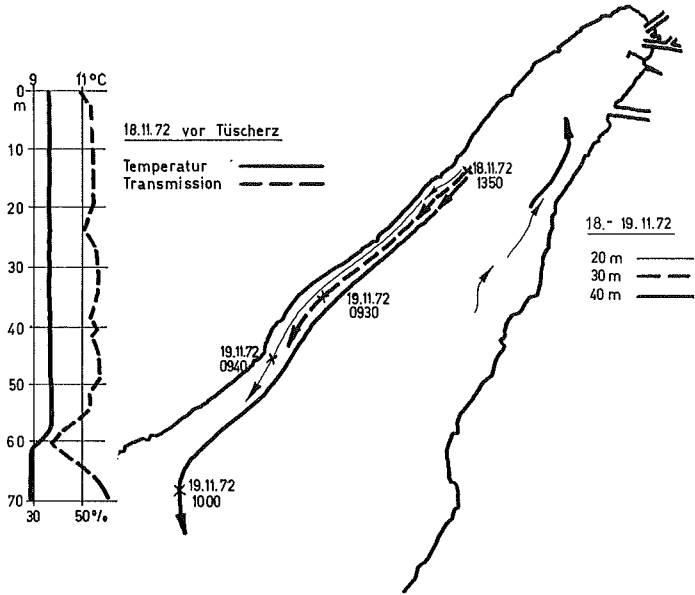


Abb. 12. Strömungsbahnen im Bielersee, November 1972.

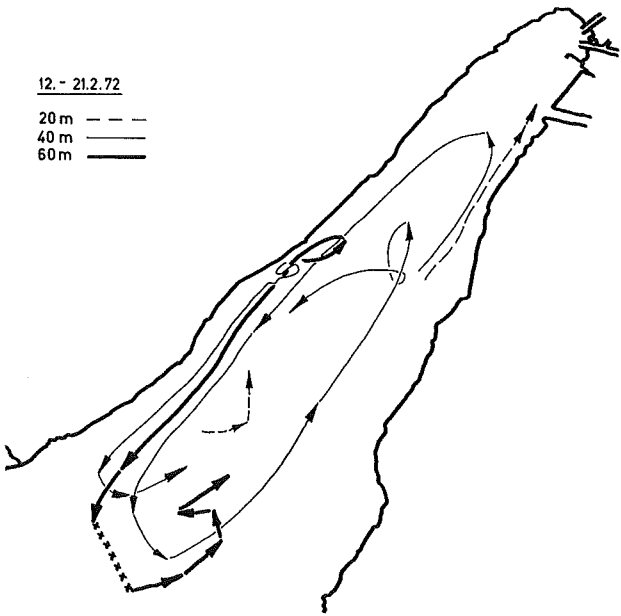
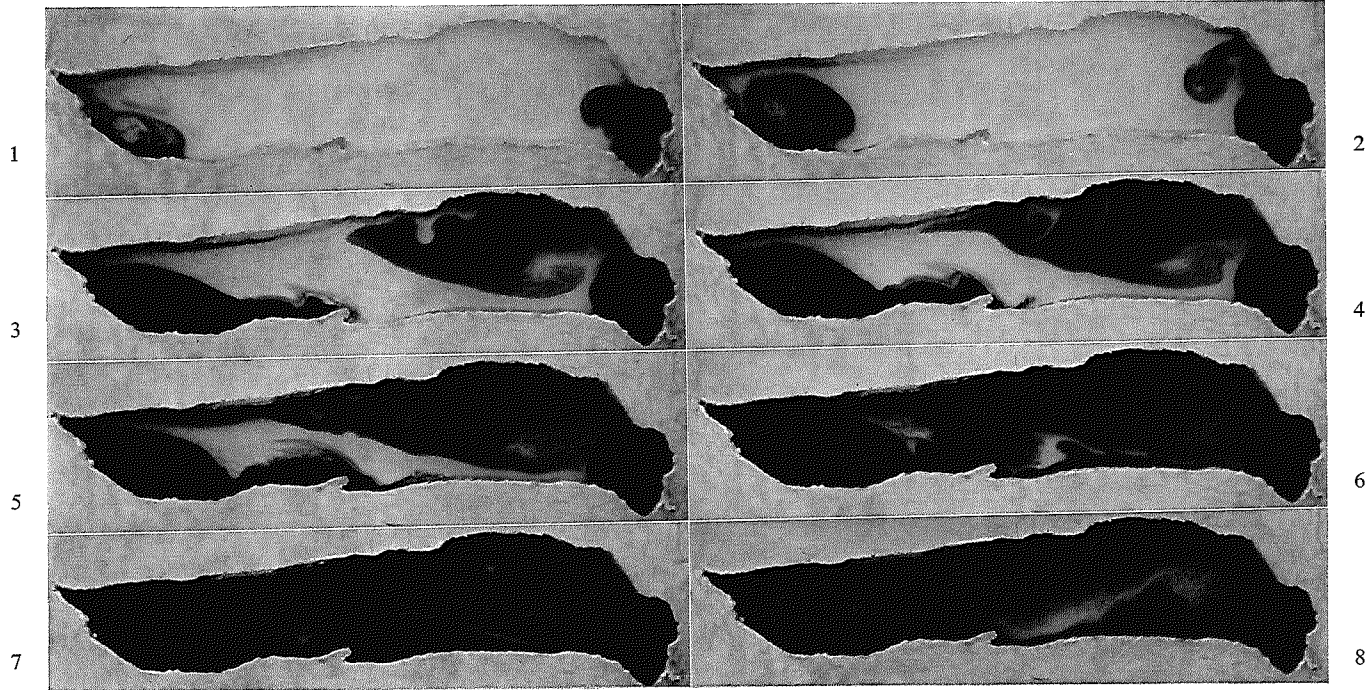


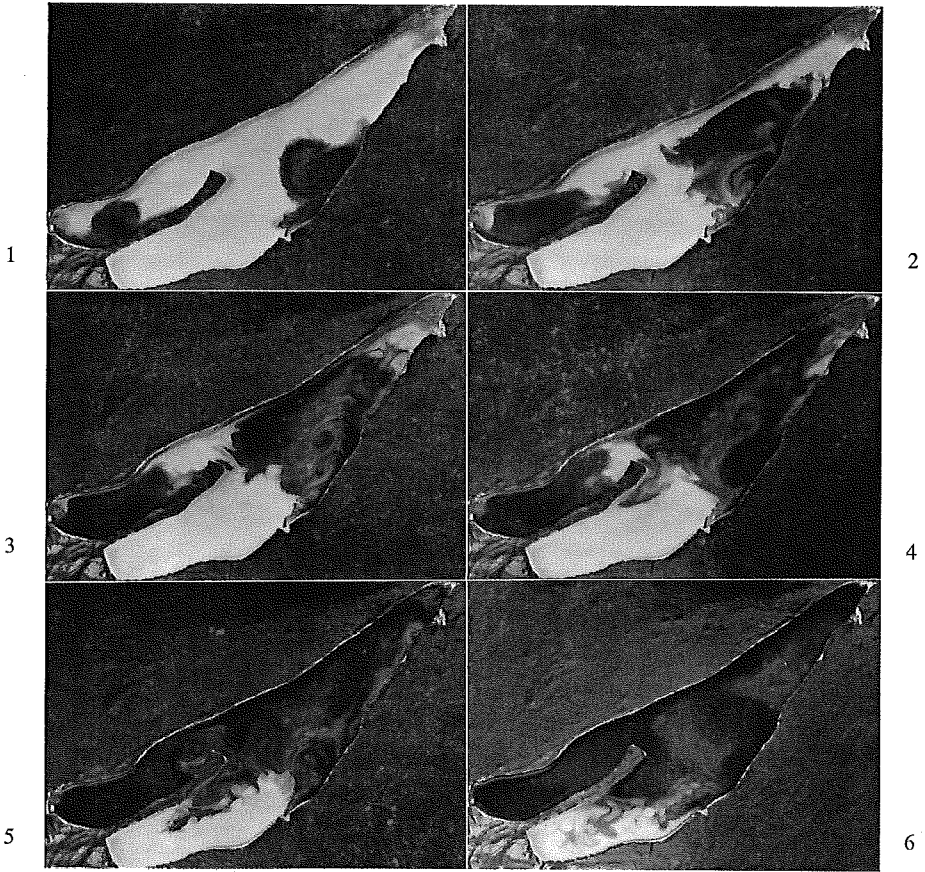
Abb. 13. Strömungsbahnen im Bielersee im Februar 1972.



Tafel IV. Momentaufnahmen der Strömungsbahnen im Brienzerseemodell.

Aufnahmen 1-7: Linksrotation

Aufnahme 8: Rechtsrotation



Tafel V. Momentaufnahmen der Strömungsbahnen im Bielerseemodell.

Bodennähe ein. Dementsprechend finden wir in 40 m Tiefe auch die grösste Strömungsgeschwindigkeit. Ab 13. Nov. fielen heftige und andauernde Niederschläge. Wie zu erwarten, schiebt die Schüss die Wassermassen kräftig und in allen Tiefen dem NW-Ufer entlang bis fast nach Twann. Von dort aus biegen sie in Richtung «Aaresog» nach links ab.

Abb. 13 (12.–21. Februar 1972). Die Aare lieferte eine Wassermenge von ca. 40 m^3 , die Schüss von ca. 3 m^3 pro sec. Trotz dieser geringen Durchflutung ergibt sich eindeutig Linksrotation im unteren Seebecken. Es herrschte Homothermie bis zum Grund, und die Zuflüsse schichteten sich zufolge der wechselnden Tages- und Nachttemperaturen in wechselnden Tiefen ein. Die Driftkörper, deren Plastikflächen in 40 und 60 m Tiefe lagen, wurden während der Nacht draussen belassen und ihre Lage jeweils morgens und abends durch Rückwärtseinschneiden ungefähr bestimmt. Die Strömungsgeschwindigkeiten waren erwartungsgemäss gering und lagen in 40 m Tiefe um 65 m/h , in 60 m Tiefe um 60 m/h . Beachtenswert ist, dass bei Homothermie in 20 m Tiefe ab Sutz bereits die Sogwirkung des Ausflusses dominierte. Die punktierte Linie vor der Petersinsel bedeutet, dass der Driftkörper aufgelaufen war und ca. 1200 m südwestlich neu ausgesetzt wurde.

Abb. 14: Um die Strömungsvorgänge des Bielersees in der Gesamtheit zu erfassen, begannen wir im Sommer 1971 mit Beobachtungen in den Becken von La Neuveville und Lüscherz. In 40 Fällen, also zu 87%, verliefen die Strömungen in diesen Becken in

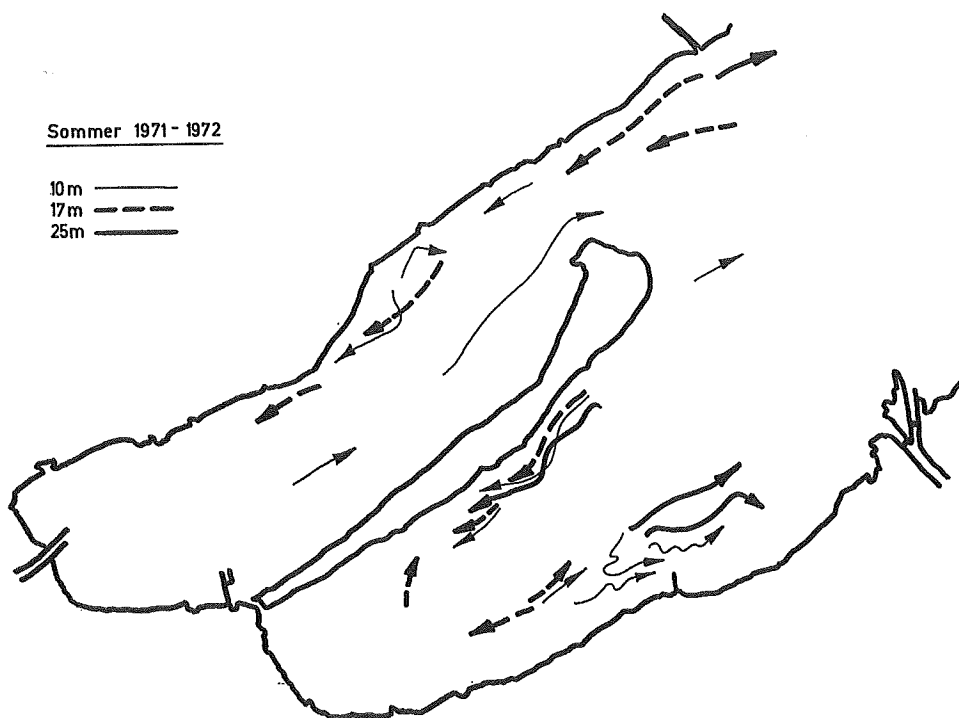


Abb. 14. Strömungsbahnen in den Becken von Lüscherz und Neuenstadt.

der erwarteten Richtung, demnach auch hier Linksrotation, in 6 Fällen (zu 13%) fanden wir Gegenrichtung. Die Pfeile in E-Richtung (29. Juli) am NE-Ende der Petersinsel lassen sich wohl mit der Sogwirkung des Aarewirbels erklären. Die Gegenbewegung vor Poudeilles stellt vermutlich einen Teil eines Randwirbels dar, während verschiedene andere Ungereimtheiten nicht gedeutet werden können.

Aus der Gesamtheit der Beobachtungen wagten wir 1973 das in Abb. 15 schematisch gezeichnete Strömungsbild des Bielersees zu erstellen. Es wird interessant sein, dieses mit den Bildern aus den Modellversuchen zu vergleichen.

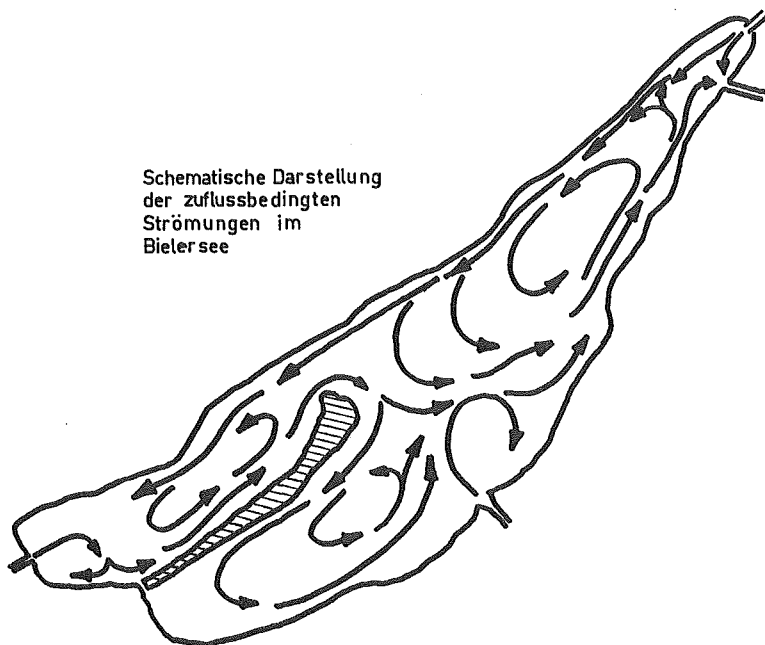


Abb. 15. Schematische Darstellung der zuflussbedingten Strömungen im Bielersee.

Tabelle 5 enthält eine Zusammenstellung der Mittelwerte der zu verschiedenen Jahreszeiten gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten der Jahre 1970–1972. Sehr oft wurden nur die Strömungsrichtungen ermittelt, und so sind die Angaben natürlich nicht vollständig. Es ist zu bedenken, dass die Sommermonate 1971 und 1972 gegenüber 1970 sehr trocken waren.

Um so erstaunlicher ist die Feststellung, dass das Sommermittel von 1971 mit 105,9 m/h in der gleichen Grössenordnung wie dasjenige von 1970 mit 104,2 m/h liegt. Erst 1972 zeigt sich ein deutliches Absinken auf 82,4 m/h. Offenbar wirkte sich die Trockenheit erst im Herbst aus; finden wir doch für die Monate September bis Oktober im Jahr 1970 ein Mittel von 249,2 m/h, während die Mittelwerte für 1971 bzw. 1972 bei 65,5 bzw. 63,0 m/h liegen. Das hohe Wintermittel von 161,6 m/h für 1972/73, gegenüber 72,8 m/h im Frühjahr 1972, ist darauf zurückzuführen, dass die erstgenannten Werte aus Messungen vom 18. Nov. und 16. Dez. 1972 stammen, also nach einer Zeit-

Tabelle 5. Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeiten in m/h

Tiefe in m	vor Alfer- mée	vor Sutz- Lattigen	vor Ligerz	vor La Neuve- ville	vor Lüscherz	vor Hagneck	Mittel- werte	Mittel aus allen Tiefen
Sommer 1970:								
10	82,5	141,5	205,0				143,0	104,2
20	43,0	43,5	300,0				128,8	
30	61,5	32,5	74,0				56,0	
40	8,0	43,0	—				25,5	
Sommer 1971:								
8	97,2	193,5	91,7			126,0	127,1	105,9
15/17	102,0	100,7	142,7			212,3	139,4	
30/35	38,7	46,0	52,0			69,0	51,7	
Sommer 1972:								
10	47,7	179,7	161,0	137,5	74,0		120,0	82,4
22	64,7	75,5	80,0	74,5	52,5		67,4	
35	38,3	57,3	123,5	—	20,0		59,8	
Herbst 1970:								
10	250	555	205			465	368,8	249,2
20	261	202	300			401	291,0	
35	35	162	66			—	87,7	
Herbst 1971:								
10	44,5	43,0	29,5			168,0	71,3	65,5
22	80,0	90,5	47,0			182,0	99,9	
35	25,0	31,0	19,5			—	25,2	
Herbst 1972:								
10/12	40,0	102,7	52,6	120,0	101,5		83,4	63,0
22	83,3	36,7	56,3	—	57,2		58,4	
35	14,3	14,0	42,7	—	118,0		47,2	
Frühjahr 1972: (Homothermie)								
20/30	80,3	136,0			93,0		103,1	72,8
40/60	47,0	38,0					42,5	
Winter 1972/73: (Homothermie)								
20/26	197,5	118,7					158,1	161,6
30/35	192,0	117,5					154,7	
40/45	156,5	187,5					172,0	

periode kräftiger Niederschläge, während diejenigen vom Frühjahr 1972 nach wechselndem und für die Jahreszeit normalem Wetter gemessen wurden und deshalb wohl repräsentativer sind.

Weiter stellen wir fest:

- In der Einsichtungstiefe der Zuflüsse liegen die Strömungsgeschwindigkeiten im Sommer und Herbst (6–25 m Tiefe) um 130 m/h, während die tieferen Schichten mit Geschwindigkeiten um 50 m/h mitgeschleppt werden.
- Das Maximum der Geschwindigkeit wurde mit 555 m/h am 29. Sept. 1970 vor Sutz-Lattrigen in 10 m Tiefe gefunden (in Tabelle 5 nicht aufgeführt).
- Im Spätherbst und Winter sinkt das Zuflusswasser in die Tiefe und verursacht dort die grössten Strömungsgeschwindigkeiten. So finden wir vom 12.–21. Februar 1972 (siehe Abb. 19) vor Alfermée in 20, 40 und 60 m Tiefe Werte von 22, 65 und 60 m/h, während am 7.–9. April 1972 sich das Zuflusswasser bereits wieder oberflächennah einschichtete. Erstaunlich ist, dass die intensiven Niederschläge in der zweiten Novemberwoche 1972 die gesamte Wassermasse so rasch und so nachhaltig in Rotation zu versetzen vermochten. Ergibt doch die Rechnung für die Messungen vom 18. Nov. und 16. Dez. 1972 vor Alfermée und Sutz Mittelwerte, die von 20–45 m Tiefe von ca. 155 auf 172 m/h zunehmen.

VI. Modellversuche

Wie einleitend erwähnt, wurden die Seebecken von Murten-, Brienzer- und Bielersee aus Kunststoff nachgebildet und der Lauf der «Zuflüsse», deren Wasser unterschiedlich gefärbt worden war, bei Rotation der Modellseen gefilmt. Die Winkelgeschwindigkeit der Rotation lag bei 0,5 pro Sekunde, war also ca. 10^4 mal so gross wie in Seen unserer Breite. Das Massverhältnis Modell zu See betrug 1 : 25000. Das Brienzerseemodell ist etwa zweifach, dasjenige des Bielersees zirka siebenfach und jenes des Murtensees etwa zehnfach übertieft. Bei einer Einstömungsgeschwindigkeit von 3 cm pro Sekunde, die im Mittel gewählt wurde, ergab sich also nach der Formel $r = \frac{v}{2\omega \sin \varphi}$, weil φ zu 90° angenommen werden muss, ein Wirbeldurchmesser von ca. 6 cm. Einzig beim Murtensee wählten wir eine Einsichtungsgeschwindigkeit von etwa 6 cm pro Sekunde, was einen Wirbeldurchmesser von 12 cm ergab. Dies entspricht massstäblich ungefähr den von uns beobachteten Mittelwerten.

In den Tafeln III, IV und V sind die Momentaufnahmen des Strömungsverlaufes zu finden. Ein Kommentar zu den Aufnahmen ist kaum nötig und vor allem für diejenigen gedacht, die die bisherigen Ausführungen nicht ganz durchgelesen haben.

1. Murtensee (Tafel III)

- | | |
|----------------|---|
| Aufnahme 1: | Bildung des Rechtswirbels bei Einmündung der Broye. |
| Aufnahme 2: | Vom Hauptwirbel lösen sich einzelne Teilwirbel ab und wandern gegen das rechte Ufer. |
| Aufnahme 3: | Die nachdrängenden Teilwirbel füllen allmählich den oberen Seeteil, wodurch Wirbelkörper um die Grengthalbinsel und weiter dem rechten Ufer entlang gestossen werden. |
| Aufnahmen 4–6: | Die Wassermassen drängen gegen das «Ufer» und werden gezwungen, diesem entlang zu gleiten, was schliesslich zu einer Linksrotation der Hauptwassermassen führt. |

2. Brienzersee (Tafel IV, Aufnahmen 1–8)

Aufnahmen 1–5: Die Aare bildet beim Einfließen einen Rechtswirbel, der die ganze Seebreite ausfüllt. Einzelne Teilwirbel lösen sich ab und ziehen dem NW-Ufer entlang. Die Lütchine kann zufolge der Lage des Zuflusses keinen Rechtswirbel bilden und schiebt sich direkt dem SE-Ufer entlang. Dabei werden die benachbarten Wassermassen unmittelbar nach dem Einfließen zur Bildung eines sanften Linkswirbels angeregt.

Aufnahmen 6 und 7: Lütchine- und Aarewassermassen vermischen sich und gleiten gemeinsam vor der Halbinsel von Iseltwald vorbei, um vor dem Aarewirbel bei Brienzen den Kreis zu schliessen.

Der dem NW-Ufer entlang laufende Arm der Aare bewegt sich teils in Richtung Seeausfluss, teils biegt er nach links ab und gelangt ebenfalls in die Strömung der Lütchine.

Aufnahme 8: Ein aufschlussreiches Experiment schien uns, den See auch in Gegenrichtung rotieren zu lassen, also so, wie wenn er sich auf der südlichen Hemisphäre befinden würde. Wir erkennen, wie in diesem Fall die Lütchine dem NW-Ufer entlang gleitet, während die Aare unmittelbar dem SE-Ufer folgen muss. Interessant ist die Stauung der Aarewassermassen an der Halbinsel bei Iseltwald.

3. Bielersee (Tafel V)

Aufnahmen 1 und 2: Die gewaltige linksherum rotierende Walze der Aare dominiert das Hauptbecken, während sich die Schüss als schmales Band dem NW-Ufer entlang schiebt. Ein Teil wird aber bereits vom Ausfluss «angesogen». Die Zihl schiebt sich dem SE-Ufer des Beckens von La Neuveville entlang und verursacht, ähnlich der Lütchine im Brienzersee, dort eine ausgedehnte Linksrotation, die allmählich fast das ganze Becken erfasst.

Aufnahmen 3 und 4: Schüsswasser fliesst bereits in das Becken von Neuenstadt und hilft dort die Linksrotation ankurbeln, während sich Aarewasser, vermischt mit Wasser der Zihl, allmählich um die NE-Spitze der Petersinsel «schlängelt».

Aufnahmen 5 und 6: Zu beachten ist der Wirbel, bestehend aus Zihl- und Aarewasser, im NE-Ende des Neuenstadter Beckens. Dieser Wirbel ist auch auf zahlreichen Luftbildern deutlich zu erkennen (siehe NYDEGGER [13], Seite 72). Weiter ist interessant, wie sich Schüss- und Zihlwasser teilweise vermischen und in den Aaresog gelangen. Erstaunlich ist auch, wie die Zihl einen beträchtlichen Wasseranteil um die NE-Spitze der Petersinsel herum in das Lüscherzerbecken entsendet. Damit wird auch die mit Driftkörpern ermittelte Linksrotation in diesem Seeteil einleuchtend.

VII. Transmissionsmessungen

In den folgenden Abbildungen sind von zahlreichen Transmissionsmessungen, die für den betreffenden See fast immer weitgehend übereinstimmende Bilder ergaben, einige herausgegriffen. Die Transmissionen wurden mit dem von NYDEGGER [13] konstruierten Messgerät ausgeführt.

1. Murtensee (Abb. 16)

Gemessen wurde vor Murten, in der Seemitte und vor Môtier (Messprofile durch senkrechte Linien angedeutet). Die Linien gleicher Transmission wurden durch Extrapolation erstellt. Eindeutig ist zu erkennen, dass sich durch das Umströmen des Sees an beiden Ufern Trübungszonen in Einschichtungstiefe der Broye bilden, die gegen die Seemitte auskeilen. Dieses Auskeilen ergibt sich aus dem Verlauf der 15%-Transmissionsgrenzen. Man beachte ferner den konkaven bzw. konvexen Verlauf der Linien oberhalb bzw. unterhalb des maximalen Trübungshorizontes.

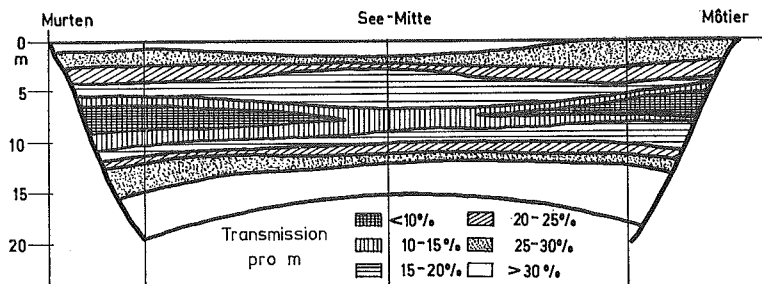


Abb. 16. Transmissionsquerschnitt durch den Murtensee von Murten bis Môtier am 5. Juli 1974

2. Brienersee (Abb. 17 und 18, je 5 Messprofile durch senkrechte Linien angedeutet)

Im Transmissionsquerschnitt bei Ebligen dominiert verständlicherweise der «Trübungskeil» der Aare am NW-Ufer gegenüber demjenigen der Lüscherne. Das Gleichgewicht verschiebt sich aber zugunsten der Lüscherne, je weiter seeabwärts wir uns bewegen.

Was längst bekannt ist, dass sich die Lüscherne zufolge des grösseren Trübstoffanteils (siehe NYDEGGER [13], S. 52) tiefer einschichtet als die Aare, kommt schon bei Abb. 17 klar zum Ausdruck und wird in Abb. 18 nochmals eindrücklich dokumentiert, indem am SE-Ufer Aare- und Lüscherne-Trübungshorizont mit ca. 10 m Höhendifferenz übereinander erscheinen.

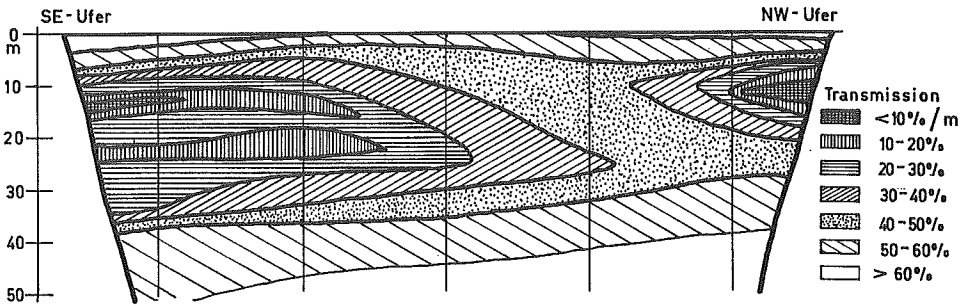


Abb. 17. Transmissionsquerschnitt durch den Brienzersee, Höhe Ebligen, am 28. April 1974.

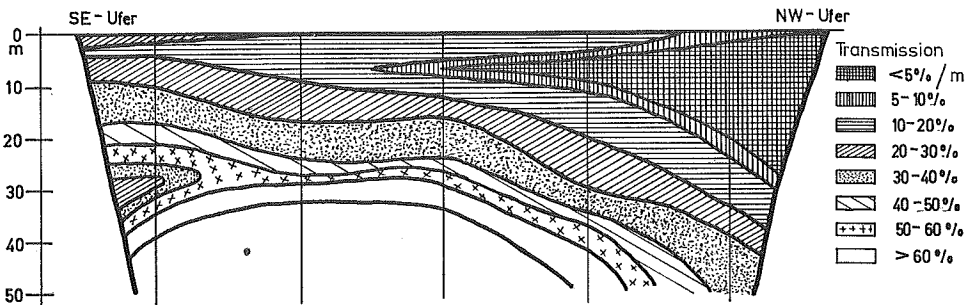


Abb. 18. Transmissionsquerschnitt durch den Brienzersee, Höhe Senggfluh-Niederried, am 5. September 1974.

3. Bielersee (Abb. 19)

Die einzelnen Transmissionskurven zeigen folgende charakteristische Merkmale:

- Zuzolge des Temperatursprungs in 8 m Tiefe bedeutende Trübung oberhalb, namentlich im Hauptbecken, wenig ausgeprägt in den Becken des oberen Seeteils.
- Grosse Lichtdurchlässigkeit des Epilimnions im Becken von La Neuveville, weil diesem verhältnismässig klares Oberflächenwasser des Neuenburgersees zugeführt wird (Temperatur der Zühl am 29. Juli 1972, um 9.20 Uhr: 19,5° C).
- Gut ausgebildete Trübungszone bei 16 m, bedingt durch den kräftigen Temperatursprung in dieser Tiefe, begreiflicherweise am besten ausgeprägt vor Sutz (Aareströmung), am geringsten im Becken von Lüscherz.
- Das Extinktionsmaximum in 23 m Tiefe, am besten ausgeprägt vor Alfermée, dürfte auf die Einschichtung der Schüss zurückzuführen sein. Temperaturmessungen ergaben nämlich:

Aare bei Hagneck: am 28. Juli 1972, 18.00 Uhr: 16,1° C,
am 29. Juli 1972, 08.00 Uhr: 15,5° C.

Schüss bei unterster Brücke: am 29. Juli 1972, 08.20 Uhr: 11,0° C.

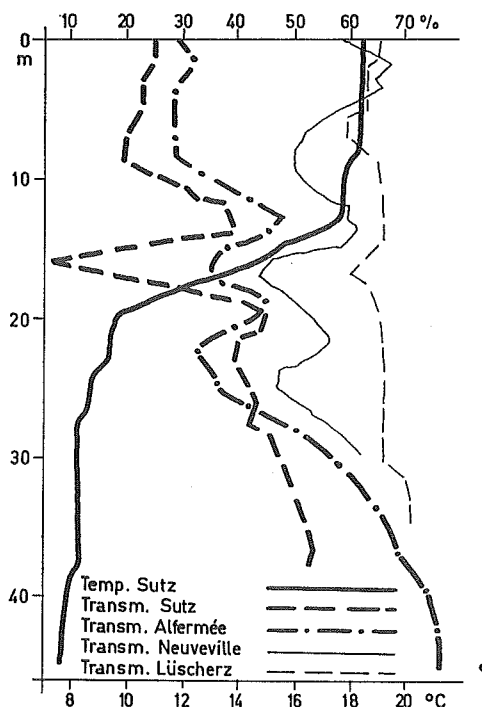


Abb. 19. Transmissionskurven im Bielersee am 28. Juli 1972.

— Bezeichnend ist die in allen Tiefen unbedeutende Trübung im Becken von Lüscherz, was mit Bestimmtheit auf äusserst geringe Durchflutung hinweist.

VIII. Vergleiche mit limnosedimentologischen Ergebnissen jüngster Zeit

Die Berner Geologen STURM und MATTER [21, 22] führen seit einigen Jahren Untersuchungen limnosedimentologischer Art namentlich am Briener-, Thuner- und Bielersee durch. Eine kurze Betrachtung über ihre bisherigen Befunde soll lediglich auf interessante Berührungspunkte mit unseren Ergebnissen hinweisen.

Auf Seite 3 [22] wird ausgeführt: «Der Ablauf von Sedimentationsmechanismen bzw. die Bildung bestimmter Sedimentstrukturen lässt sich im Meer nur mit grossem finanziellem und apparativem Aufwand verfolgen. Demgegenüber stellen Thuner- und Brienersee leichter überschaubare und geschlossene Sedimentationssysteme dar, in denen sich, wie in einem Modellversuch, Ablagerungsvorgänge einfacher und genauer studieren lassen.»

Und auf Seite 1 [21] lesen wir: «Die entsprechenden Untersuchungen rezenter Ablagerungen im Brienersee stehen im Zusammenhang mit ähnlichen Arbeiten im Thuner- und Bielersee. Im Gegensatz zu diesen beiden Seen haben jedoch im Brienersee

biologisch-chemische Vorgänge keinen Einfluss auf die Sedimentbildung. Die vorliegende Arbeit soll daher der erste Schritt für die Erstellung eines klastischen Seemodells sein.»

Nachdem in den Schlussfolgerungen erwähnt wird [21], dass die groben Anteile des Sedimentmaterials longitudinal, auf kürzestem Weg dem Seebodenrelief entlang in ihre Sedimentationsgebiete transportiert werden (gemeint sind wohl die Turbiditecurrents), heisst es weiter: «Die Verfrachtung der Feinfraktionen der Flusssedimente (Fraktionen $< 0,063$ mm) erfolgt dagegen in Form von Suspensionswolken innerhalb der Wassermasse selbst. Entsprechend zeigt die Karbonatverteilung (Fig. 7), dass karbonatreiches Lütchinmaterial dem S-Ufer folgend weit nach E, karbonatärmeres Material der Aare, abgedrängt an das N-Ufer, dagegen weit nach W gelangt.»

Man vergleiche hierzu unsere Aufnahmen auf Tafel III sowie Abb. 17 und 18. Aus verständlichen Gründen darf die erwähnte Abb. Nr. 7 sowie eine ebenso instruktive aus dem Bielersee, die weitgehend den Verlauf des Aarewassers aus den Sedimenten erkennen lässt, nicht veröffentlicht werden, bevor die entsprechenden Publikationen erschienen sind.

Über den Murtensee liegen Arbeiten von J. P. VERNET [25] und von E. DAVAUD [2] vor.

In [25] wird über das Vorkommen der Isotope Cs^{137} , K^{40} , Ra^{226} , Th^{232} in Oberflächensedimenten von Genfer- und Murtensee berichtet. Die Ergebnisse sind äusserst interessant auch im Hinblick auf das Strömungsgeschehen in Seen.

Zu K^{40} bemerken die Autoren: «Cet isotope présente un schéma de répartition totalement différent de celui des trois précédents: les plus fortes teneurs se rencontrent le long des rives et les zones à faible teneur coïncident avec celles à forte sédimentation carbonatée.»

In der entsprechenden Figur 2 ist sehr schön zu erkennen, wie K^{40} vorwiegend im oberen Seeteil und den Ufern des Murtensees entlang vorherrscht, und wir vermuten, dass dies mit dem von uns gefundenen Verlauf des Broyewassers in engem Zusammenhang steht. Eine eingehendere Deutung wäre unsererseits in Ermangelung der Kenntnis der Materie kaum angebracht.

Zum Schluss sei lediglich noch folgende Bemerkung aus [25] zitiert: «Seul le K^{40} reste nettement associé aux éléments constitutifs des argiles et négativement lié aux carbonates et à la matière organique.»

Dies lässt unseres Erachtens ebenfalls darauf schliessen, dass dieses Isotop durch die Broye zugeführt wird.

IX. Ausblick

(Überlagerung von Zufluss- und Windwirkung auf Bewegungen in Seen)

Wie bereits erwähnt, spielt die Windtätigkeit durch den auf die Seeoberfläche ausgeübten Tangentialschub ebenfalls eine bedeutende Rolle bezüglich Wasserbewegungen in Seen. Die Windwirkung wird um so besser erkannt, je geringer die Durchflutung und je grösser die Seeoberfläche ist. Während aber die Zuflüsse nicht rhythmische

Bewegungen auslösen, bewirkt die Windinduktion im allgemeinen Schwingungen der einzelnen Horizonte (seiches internes) rhythmischer Art. Durch diese Schwingungen werden natürlich die zuflussbedingten Bewegungen wechselweise beschleunigt oder abgebremst.

Unser Ziel für die nächsten Jahre ist es, diese Wechselwirkung eingehender zu untersuchen. Aus diesem Grunde sei an Beispielen zum Schluss diese «Überlagerung» aufgezeigt.

Abb. 20 zeigt Temperaturregistrierungen aus drei Tiefen des Bielersees vor Ipsach. Die Temperaturschwankungen wurden bewirkt, indem durch windbedingte Schaukelbewegungen in der Längsrichtung des Bielersees abwechselungsweise kälteres oder wärmeres Wasser in die betreffenden Tiefen der Temperaturfühler gelangte.

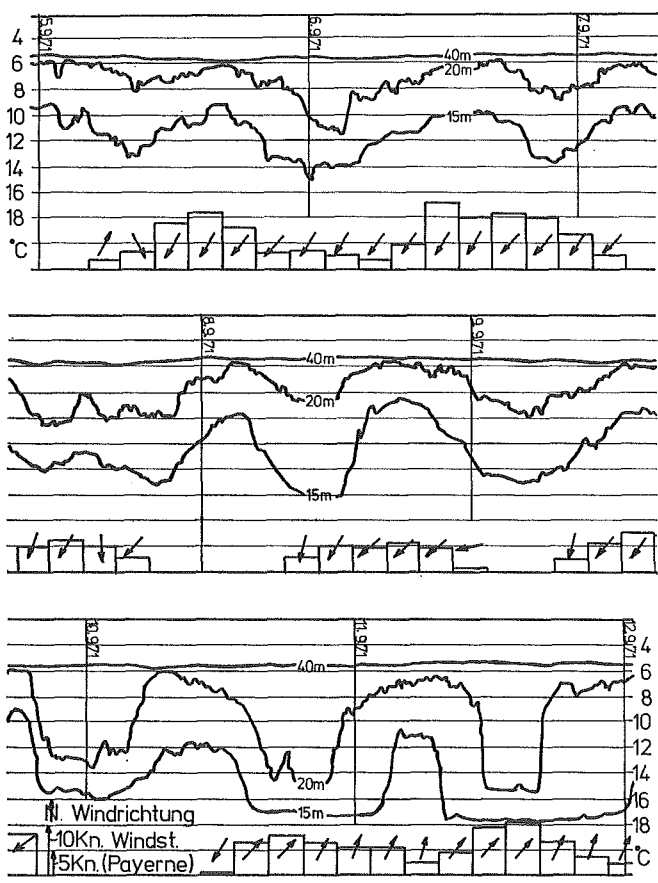


Abb. 20. Durch «seiches internes» bewirkte Temperaturschwankungen im Bielersee.

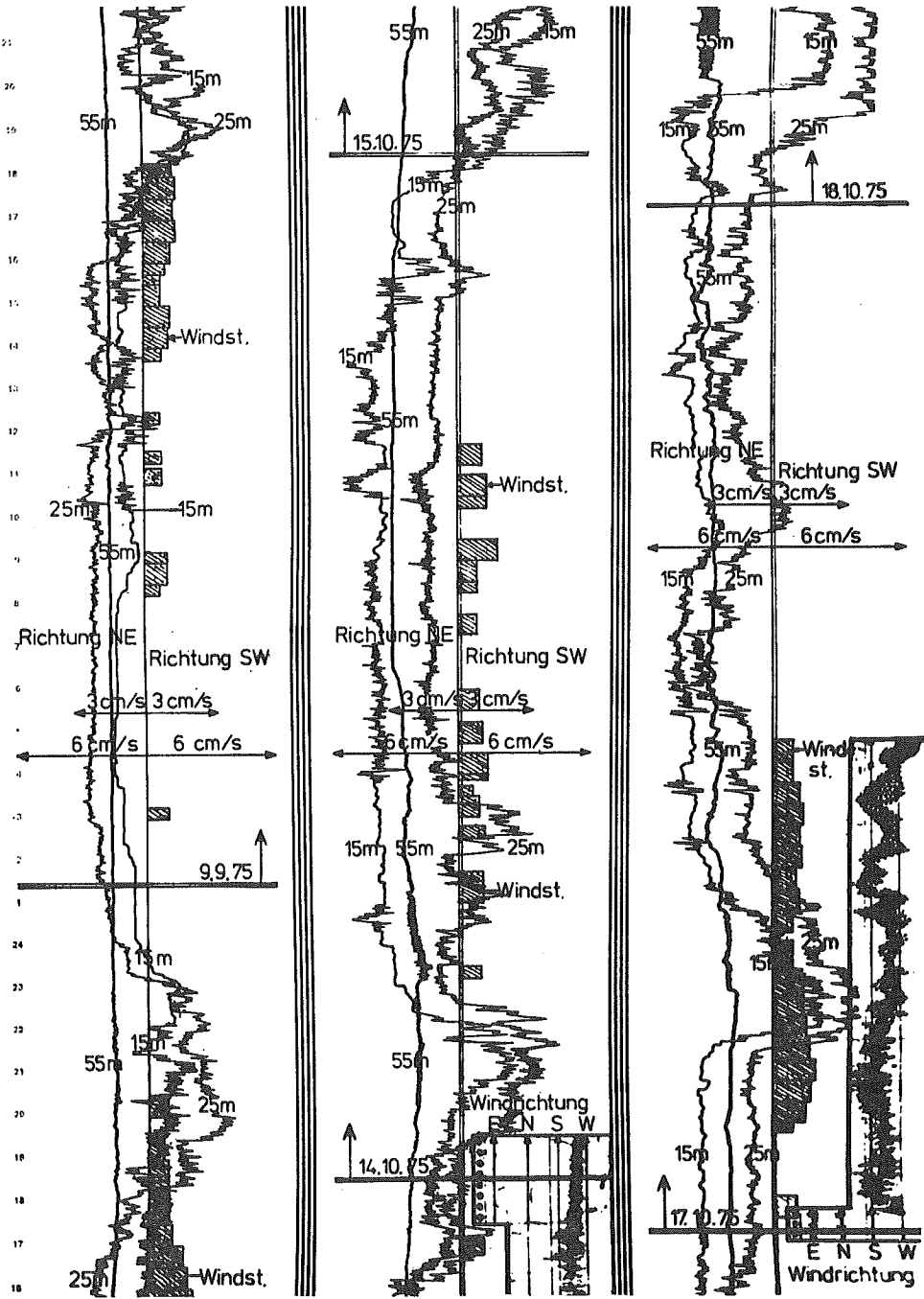


Abb. 21. Strömungs- und Windregistrierungen aus verschiedenen Tiefen des Brienzsees (vor Iseltwald).

Man beachte:

- 5.–10. Sept. 1971. Parallelbewegungen der um ca. 4° C unterschiedlichen Temperaturen in 15 und 25 m Tiefe. Schaukelbewegungen, ausgelöst durch An- und Abschwellen von Winden aus NE. Die Schwingungsdauer beträgt ca. 20 Stunden.
- Die 40-m-Tiefe wird scheinbar kaum beeinflusst. Dies ist ein Trugschluss und rührt von der Gleichmässigkeit des Temperaturverlaufes ab ca. 30 m her.
- Am 10. Sept. wird die Schrägstellung der Temperatursprungschicht durch anhaltende starke Winde aus SE während etwa 10 und am 11. Sept. sogar während zirka 16 Stunden aufrechterhalten (siehe 15-m-Tiefe).

Abb. 21 zeigt Ausschnitte aus Strömungsaufzeichnungen im Brienzersee vor Iseltwald aus 15, 25 und 55 m Tiefe. Diese Aufzeichnungen laufen seit etwa 18 Monaten. Gleichzeitig werden Windstärke (durch Rechtecke umrahmt) und auf einem separaten Streifen die Windrichtung registriert (Teilstreifen beigelegt für 13. und 17. Okt. 1975). Linien links der Mitte zeigen Strömungen nach NE, also Richtung Giessbach–Brienz, solche auf der rechten Seite Richtung Bönigen–Interlaken.

- 8. Sept. 1975, 4 Uhr, bis 9. Sept., 21.30 Uhr: Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5–2 cm/sec (geringe Wasserführung der Zuflüsse). Gegenbewegungen in 15 und 25 m Tiefe, ausgelöst durch böige Winde, die sich aber in 55 m Tiefe kaum bemerkbar machen.
- 13.–18. Sept. 1975: Strömungsgeschwindigkeiten bis 6 cm/sec (mittlere Wasserführung der Zuflüsse). Im übrigen zeigen sich auch hier windbewirkte Gegenbewegungen in 15 und 25 m Tiefe, wobei die am 13. und am 17. Okt. verursachten Schrägstellungen der Sprungschicht Schaukelbewegungen mit einer Schwingungsdauer von etwa 22 Stunden auslösten.

Zusammenfassung

Bis anhin wurde unseres Erachtens die Rolle der zuflussbedingten Strömungen zugunsten der Bedeutung des Windes unterschätzt. Dies gilt namentlich für stark durchflutete Seen unseres Alpengebietes und hat seine Ursache vermutlich im Umstand, dass die Strömungsforschung in Meeren, in denen die Windwirkung extrem dominiert, grossartig vorangetrieben wurde und weil vorwiegend aus stark wind-exponierten Seen Schottlands aufsehenerregende Ergebnisse (MORTIMER u. a.) vorliegen.

In den vorliegenden Mitteilungen wird deshalb vor allem die Bedeutung der Zuflüsse und der Corioliswirkung für das Strömungsgeschehen dargelegt.

Folgende Methoden gelangten zur Anwendung:

- Driftmessungen mit in bestimmte Tiefen versenkten «Plastiksegeln».
- Momentaufnahmen (aus Filmen), welche den Verlauf gefärbter «Zuflusswassermassen» in rotierenden Seemodellen zeigen.

- Transmissionsdiagramme von mehreren Stellen der Seen.
- Vergleiche mit limnosedimentologischen Untersuchungsergebnissen.
- Registrierungen von Richtung und Geschwindigkeit der Strömungen in verschiedenen Tiefen, wobei auch die Überlagerung von zuflussbedingten und windinduzierten Bewegungen an wenigen Beispielen gezeigt wird.

Aus mehreren untersuchten Seen wurden, weil jeder von ihnen in mehrfacher Beziehung charakteristische Merkmale aufweist, Briener-, Murten- und Bielersee ausgewählt. Es wird gezeigt, wie das Zuflusswasser, nachdem es sich in der Tiefe entsprechender Dichte eingeschichtet hat, einen durch die Corioliskraft bewirkten Rechtswirbel bildet und wie die sich vom Wirbel loslösenden Wassermassen durch die nachfolgenden weitergeschoben werden. Dabei drängen sie zufolge der Corioliswirkung gegen rechts und müssen durch die «Zwangskraft», die die Uferbegrenzung ausübt, den See links umlaufen. Dadurch kommt in Einschichtungstiefe der Zuflüsse eine Linksrotation zustande (auf der südlichen Hemisphäre Rechtsrotation), die allmählich die gesamten über- und unterlagernden Schichten erfasst. Dabei kann es, namentlich bei rasch erfolgenden Geschwindigkeitsänderungen, in tieferen Schichten auch zu gegenläufigen Bewegungen kommen.

Abstract

Up to now the role of the inflow of tributaries was, in our opinion, underrated in favor of the importance of the wind. This is particularly true for the lakes of our alpine regions with their vigorous through currents and is probably due to the fact that ocean flow research where the wind effects are extremely dominant was splendidly carried on and because exceptional results from Scottish lakes under strong wind exposure are available (MORTIMER et al.). Therefore, this communication will deal primarily with the influence of the tributaries and the Coriolis effects on the flow pattern.

Following methods were put to use:

- Drift measurements with "plastic sails" submerged to definite depths.
- Single film frames showing the development of dyed feed flows into rotating lake models.
- Transmission diagrams from several locations of the lakes.
- Comparisons with results of limnosedimentary investigations and finally registrations of direction and velocity of currents at various depths, whereby the superimposition of motions caused by the tributaries on the wind induced motions is also shown in a few examples.

From several investigated lakes, the lakes of Brienz, Murten, and Biel were selected because each presents typical characteristics in several respects. It is shown how the inflow, after stratification at the depth corresponding to its density, will form a clockwise vortex induced by the Coriolis force, and how water masses shed from the vortex

are pushed on by the following ones. Therewith they press, owing to the Coriolis effect, to the right and must, by virtue of the "constraint force" resulting from the shore boundary, rotate in the lake in a counterclockwise direction. Thereby a counterclockwise rotation takes place at the stratifying depth of the inflow (clockwise rotation in the southern hemisphere) which gradually draws along the entirety of over- and underlying layers. Contrarotating motions can thereby occur in deeper layers, especially in connection with rapidly changing velocities.

Literaturhinweise

1. AUERBACH M.: Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees. Deutsche Wasserwirtschaft, 34. Jahrg., 1939.
2. DAVAUD E.: Evolution diagénétique du carbonate de calcium dans les sédiments holocènes du lac de Morat. Mitteilungen an der Generalversammlung der SGG in Aarau 1975.
3. ECKEL O.: Zur Frage der Durchflutung der Alpenseen. Sonderdruck aus «Wetter und Leben», Jahrg. 13, Heft 3-4, 5, 57-63.
4. FRIEDLI P.: Limnologische Untersuchungen am Bielersee. Lizentiatsarbeit, Leitung Prof. Dr. P. A. TSCHUMI, Bern 1976.
5. LEHN H.: Die Trübstoffverteilung im Obersee (Bodensee) während des Hochwassers 1965. «Gas- und Wasserfach», 108. Jahrg., 1967.
6. LEHN H.: Wasserbewegungen im Bodensee. Ein Beitrag zu den Ausbreitungsmöglichkeiten von Rohöl im Bodensee. «Gas- und Wasserfach», 109. Jahrg., 1968.
7. MAHRINGER W.: Einschichtung und Verteilung des zufließenden Wassers im Millstättersee. Arch. Hydrobiologie 59, 2, 272-280, Stuttgart, April 1968.
8. MEADE R. H.: Sources and Sinks of Suspended Matter on Continental Shelves. Reprinted from Shelf Sediment Transport, edited by Swift, Duane and Pilkey, 1972 by Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Stroudsburg, Pa.
9. MERCANTON P. L.: Etude de la circulation des eaux du lac Léman. Mém. Soc. Vaud. des sc. Nat., No 27, Vol. 1, 4. Lausanne 1932.
10. MORTIMER C. H.: Water movements in stratified lakes, deduced from observations in windermere and experiments. Freshwater Biological Ass., No. 216, Bruxelles 1952.
11. MINDER L.: Untersuchungen am Bielersee. Zürich 1936.
12. NÜMANN W.: Die Verbreitung des Rheinwassers im Bodensee. Intern. Rev. der gesamten Hydrobiologie und Hydrogr., 1937.
13. NYDEGGER P.: Untersuchungen über Feinststofftransport in Flüssen und Seen, über Entstehung von Trübungshorizonten und zuflussbedingten Strömungen im Brienersee und einigen Vergleichsseen. Beiträge zur Geol. der Schweiz, Hydrologie Nr. 16. 1967.
14. NYDEGGER P.: Vergleichende limnologische Untersuchungen an sieben Schweizer Seen. Beiträge zur Geol. der Schweiz, Hydrologie Nr. 9. 1957.
15. NYDEGGER P. und GYGAX F.: Der Bielersee. Physikalisch-limnologische Untersuchungen im Hinblick auf die geplante Trinkwasserentnahme aus dem Bielersee. Unveröffentlichter Bericht, Bern 1973.
16. v. ORELLI J.: Limnologische Untersuchungen am Bielersee: Fortsetzung. Lizentiatsarbeit, Leitung Prof. Dr. P. A. TSCHUMI. Eigendruck, Bern 1976.
17. PRANDTL: Strömungslehre. Verlag Vieweg u. Sohn, Braunschweig 1965.
18. RUTTNER F.: Grundriss der Limnologie. Berlin 1963.
19. SANTSCHI P.: Chemische Prozesse im Bielersee. Inauguraldissertation, Leitung Prof. Dr. P. SCHINDLER. Eigendruck, Bern 1975.
20. STÄDLER M.: Untersuchungen über die hygienisch bedeutungsvollen Strömungsvorgänge im Zürichsee. Solothurn 1934.

21. STURM M.: Die Oberflächensedimente des Brienzersees. Geologisches Institut der Universität Bern, Publikation in «Eclogae geol. Helv.» Sommer 1976 geplant.
22. STURM M. und MATTER A.: Geologisch-sedimentologische Untersuchungen im Thuner- und Brienzersee. Separatabdruck aus «Jahrbuch Thuner- und Brienzersee», Thun 1972.
23. THOMAS E. A.: Untersuchungen über Auswirkungen und Folgen der Einschichtung von Abwässern in Seen. Verh. Int. Ver. Limnol. 17, 517–538, 1969.
24. THOMAS E. A.: Empirische und experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Minimumstoffe in 46 Seen der Schweiz und angrenzender Gebiete. Monatsbulletin des Schweiz. Vereins von Gas- und Wasserfachmännern, 1953.
25. VERNET J. P., DAVAUD E., COSANDAY M. et BERLIE J.: Analyse de la radioactivité γ des sédiments des lacs Léman et de Morat. Eclogae geol. Helv., Vol. 68/1, Bâle, avril 1975.
26. VISCHER D., HUTTER K. und TRÖSCH J.: Über die hydromechanischen und thermodynamischen Grundlagen der Seezirkulation. Mitteilung Nr. 20 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH, Zürich 1975.
27. WASMUND E.: Die Strömungen im Bodensee, verglichen mit bisher in Binnenseen bekannten Strömungen. Internat. Revue der gesamten Hydrobiologie, 18. und 19. Jahrg., Leipzig 1927/28.