

Beiträge zur Geologie der Schweiz — Hydrologie

Nr. 16

Herausgegeben von der Schweizerischen Geotechnischen Kommission
und der Hydrologischen Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft

**Untersuchungen über Feinststofftransport
in Flüssen und Seen, über Entstehung von
Trübungshorizonten und zuflußbedingten
Strömungen im Brienersee und
einigen Vergleichsseen**

von

Paul Nydegger

Kommissionsverlag: Kümmerly & Frey, Geographischer Verlag, Bern
1967

Druck: Buchdruckerei & Verlag Leemann AG, Zürich

Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission und der Hydrologischen Kommission

In Fortsetzung seiner früheren limnologischen Untersuchungen im Brienersee (siehe Hydrologie Nr. 9) bearbeitete Herr Dr. P. Nydegger, unterstützt durch die Schweizerische Geotechnische Kommission, seit 1957 die Frage des Feinststofftransportes in Gewässern.

An der Sitzung vom 21. Januar 1967 lag der Kommission darüber ein Manuskript «Untersuchungen über Feinststofftransport in Flüssen und Seen, über Entstehung von Trübungshorizonten und zuflußbedingten Strömungen im Brienersee und einigen Vergleichsseen» vor und wurde von dieser zum Druck in der Reihe «Hydrologie» entgegengenommen.

Ein Beitrag an die Druckkosten wurde von der Hydrologischen Kommission bereits am 10. Mai 1966 beschlossen.

Für die interessante und neuartige Resultate ergebende Forschungsarbeit über das auch allgemein für die Sedimentologie wichtige Problem möchte die Kommission Herrn Dr. Nydegger den besten Dank aussprechen.

Für den Inhalt von Text und Figuren ist der Verfasser allein verantwortlich.
Zürich, Oktober 1967.

Für die Schweizerische
Geotechnische Kommission
Der Präsident: Prof F. DE QUERVAIN

Für die Hydrologische Kommission
Der Präsident: Prof. G. SCHNITZER

Inhaltsübersicht

Zur Einführung

I. Ziel und Umfang der Untersuchungen	5
II. Topographisch-morphometrische Angaben über den Brienzersee und sein Einzugsgebiet	7

Erster Teil: Schwebestoffführung von Aare und Lüttschine

I. Zum Begriff „Schwebestoff“	9
II. Problemstellung und Untersuchungsmethoden	10
III. Verteilung der Schwebestoffkonzentration über den Flußquerschnitt	11
IV. Korngrößenverteilung	16
V. Zeitliche Schwankung der Schwebestoffkonzentration	21
VI. Jahrestotal der Schwebestoffe	26
1. Allgemeine Betrachtungen	26
2. Berechnungsmethode	26
3. Diskussion der Ergebnisse	30

Anhang zum ersten Teil

Auszug aus der „Anleitung für die Bestimmung des Schwebestoffgehaltes im Wasser 1966“ der Unterabteilung für Landeshydrographie des Eidgenössischen Amtes für Wasser- wirtschaft	34
1.8. Membranfilter gewichtskonstant	34
2.3. Volumenbestimmung der Wasserproben	34
2.4. Aufbereitung der Filter (teilweise)	34
2.5. Trocknung der Filter und der Schwebestoffe	35

Zweiter Teil: Untersuchungen über Einschichtung und Ausbreitung des Zuflußwassers mit einem Transmissionsmeßgerät

I. Meßmethodik und Untersuchungsgeräte	36
II. Demonstration der Verwendbarkeit des Transmissionsmeßgerätes in verschiedenen Seen	42
III. Jahreszeitlich bedingte Variation der Einschichtungstiefen	43
1. Allgemeine Betrachtungen	43
2. Meßergebnisse	45
3. Kommentar	46
IV. Unterschiede in der Einschichtungstiefe von Aare und Lüttschine	52
V. Horizontale Verteilung des Zuflußwassers und der Trübungsstoffe	55
1. Problemstellung	55
2. Ergebnisse der Trübungsmessungen über Querprofile	56

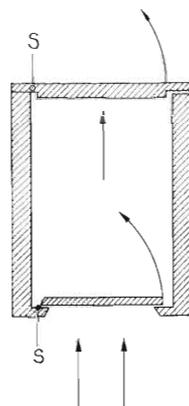
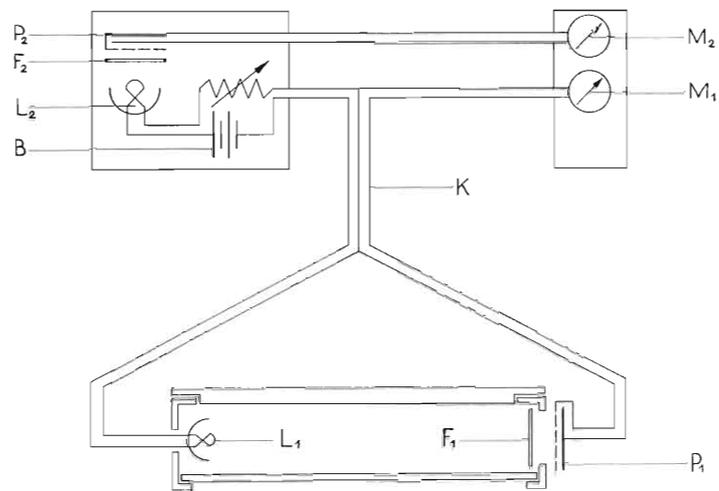
VI. Überlegungen und Untersuchungen über die Ursache des Schwebens	63
1. Allgemeines	63
2. Experimenteller Nachweis des Existierens einer „Sinkstoffalle“	65
3. Beobachtungen über Schwebestoffe im Mondsee	65
<i>Dritter Teil: Untersuchungen über die Bedeutung der Zuflüsse und der Erdrotation für Strömungen und Zirkulationen in Seen</i>	
A. Einführung	68
I. Zielsetzung	68
II. Allgemeines über Strömungen	68
III. Die ablenkende Kraft der Erdrotation.	69
IV. Strömungsbedingte Grenzflächenneigungen.	71
B. Beobachtungen über zuflußbedingte Strömungen im Brienersee und einigen Vergleichsseen	73
I. Methodische Bemerkungen.	73
1. Indirekte Methode oder Methode der Stromberechnung	73
2. Direkte Methoden	73
II. Beobachtungen im Brienersee	75
III. Beobachtungen im Murtensee	78
IV. Beobachtungen im Bielersee	82
C. Vergleiche mit Veröffentlichungen verschiedener Autoren	84
I. Beobachtungen im Genfersee	84
II. Beobachtungen in verschiedenen Schweizerseen.	85
III. Beobachtungen im Bodensee	86
D. Schlußbetrachtung	89
Verwendete Literatur	90

Zur Einführung

I. Ziel und Umfang der Untersuchungen

Die vorliegenden Untersuchungen erstrecken sich über die Jahre 1957—1965 und sind als Fortsetzung und Ergänzung der Arbeit „Vergleichende limnologische Untersuchungen an sieben Schweizerseen“ [42] gedacht. Die genannten Untersuchungen befassen sich vor allem mit der Lichtdurchlässigkeit von Seen, und es zeigte sich dabei, daß, mit einem am Geographischen Institut der Universität Bern entwickelten Transmissionsmeßgerät (siehe Abb. 1), der Verlauf der Zuflüsse in Seen anhand ihrer Trübung mit außerordent-

Schaltschema des Transmissionsmessers



Querschnitt durch das Abschirmgehäuse des Transmissionsmessers

S Scharniere

↑ Strömungsrichtung beim Hinunterlassen des Gerätes

Abb. 1.
Schema des von Nydegger
1951—1956 verwendeten
Transmissionsmeßgerätes.

licher Feinheit verfolgt werden kann (siehe Abb. 2). Ferner hatte sich herausgestellt, daß in stark durchfluteten Seen während des Sommers eine sozusagen vollständig lichtundurchlässige Trübungszone gebildet wird, deren Tiefenlage sich beispielsweise im Brienersee vom Frühsommer bis Herbst aus Oberflächennähe bis ca. 25 m Tiefe absenkt und erst bei Wintervollzirkulation vollständig aufgelöst wird. Selbstverständlich wird dadurch die, für die Phytoplanktonproduktion wichtige, lichtdurchdrungene Zone gerade im Frühsommer, der Zeit der Hochproduktion, auf eine sehr dünne Oberflächenschicht begrenzt. Dies allein würde wohl eine eingehende Untersuchung rechtfertigen.

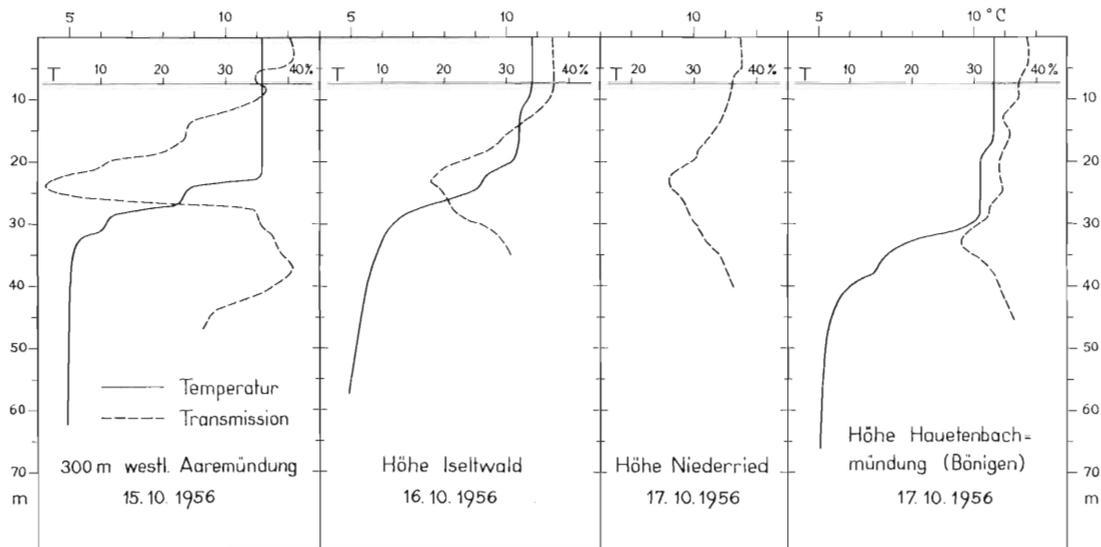


Abb. 2. Trübungszone der Aare im Brienersee (aus [42]).

Daneben interessierten uns folgende Probleme:

1. Größe, Beschaffenheit und Herkunft der suspendierten Stoffe.
2. Horizontale Dichteverteilung des genannten „Trübungsteppichs“.
3. Wie ist es möglich, daß Teilchen, die 2—3mal so schwer wie Wasser sind, während Monaten in Schwebelag bleiben können?
4. Sind gewisse Gesetzmäßigkeiten in der horizontalen Verteilung des Zufließwassers festzustellen (evtl. zuflußbedingte Strömungen und Zirkulationen)?

Im Laufe der Untersuchungen zeigte sich, daß durch die Rechtsablenkung des Zufließwassers (Corioliswirkung) eine charakteristische und kontinuierliche Linksrotation im Brienersee zustande kommt. Um festzustellen, ob es sich hier um ein allgemeingültiges Phänomen handelt, wurden von 1964—1966 weitere Vergleichsseen in die Untersuchung einbezogen und namentlich bisherige Beobachtungen über Strömungen in Seen im Hinblick auf diese Erscheinung studiert.

Das Eidgenössische Amt für Wasserwirtschaft hat in den Jahren 1936—1938 umfangreiche und sehr eingehende Untersuchungen über Geschiebe- und Schwebestofftransport der Aare durchgeführt [14]. Das Hauptaugenmerk war dabei auf die Deltaaufschüttungen der Aare gerichtet. Wir betrachten unsere Arbeit in gewissem Sinne als eine Ergänzung, da wir uns nun mit den von der Strömung außerhalb des Deltas getragenen und im offenen See zur Sedimentation gelangenden Schwerstoffen befassen.

Das Eidgenössische Amt für Wasserwirtschaft zeigte denn auch Interesse und hat unsere Untersuchungen in großzügiger Weise unterstützt und ergänzt. Es ist uns eine angenehme Pflicht, dem Direktor des Amtes sowie dem Leiter der Abteilung Landeshydrographie und seinen Mitarbeitern herzlich zu danken für das große Verständnis, das sie unseren Untersuchungen entgegenbrachten.

Ganz besonders freute uns auch die Mitarbeit einiger Knaben der Oberschulklassen von Bönigen, die unter Leitung ihres Lehrers, Herr Michel, regelmäßig Wasserproben aus der Lutschine entnahmen und gleichzeitig Temperaturmessungen ausführten.

Vor allem aber gilt unser Dank der Schweizerischen Geotechnischen Kommission und speziell ihrem Präsidenten, Herrn Prof. Dr. F. de Quervain. Durch die großzügige finanzielle Unterstützung wurden unsere Untersuchungen erst ermöglicht. Zudem nahm sich Herr Prof. de Quervain die Mühe, in seinem Institut einige Filterproben hinsichtlich Korngrößenverteilung untersuchen zu lassen (siehe S. 16).

Verschiedene größere Auslagen für Instrumente und Gerätschaften konnten aus Krediten, für die sich der Direktor des Geographischen Institutes der Universität Bern, Herr Prof. Dr. F. Gyax, tatkräftig einsetzte, gedeckt werden. Ihm sei hierfür speziell gedankt.

Dem Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung des Wissenschaftlichen Nachwuchses schulde ich Dank für ein Stipendium, das mir erlaubte, mich während einigen Wochen an meinem normalen Arbeitsplatz vertreten zu lassen, um mich in dieser Zeit ganz meinen Untersuchungen zu widmen.

II. Topographisch-morphometrische Angaben über den Brienzersee und sein Einzugsgebiet

Geogr. Breite (Mittel)	48° 43' n. B.	Mittlere Breite	2,12 km
Geogr. Länge	7° 58' ö. L.	Uferentwicklung	1,7
Mittlere Seespiegelhöhe	563,82 m	Größte Tiefe	259,4 m
Oberfläche	29,66 km ²	Mittlere Tiefe	174 m
Länge	14 km	Volumen	5,16 km ³
Größte Breite	2,75 km		

Tab. 1. Die Einzugsgebiete des Brienzersees

Einzugsgebiet	Fläche	Firn und Gletscher
Aare von den Quellen bis zum Brienzersee	553,81 km ²	147,44 km ² = 28,5%
Lutschine v. d. Quelle bis zum Brienzersee	379,67 km ²	76,57 km ² = 19,7%
Rechtsseitige Zuflüsse des Sees	57,03 km ²	0 km ²
Linksseitige Zuflüsse des Sees	106,81 km ²	0,27 km ² = 0,3%

Tabelle 2 enthält Vergleichszahlen über das Verhältnis Einzugsgebiet: Seearéal sowie über die mittlere Höhe des Einzugsgebietes einiger Seen. Die erste Angabe liefert einen Anhaltspunkt für den Durchflutungsgrad des Sees, die zweite für das Gefälle der Zuflüsse.

Tab. 2

Gewässer	Einzugsgeb.: Seearéal	mittlere Höhe des Einzugsgeb.
Brienzersee	49 : 1	1950 m
Bielensee	60 : 1	1130 m
Murtensee	25 : 1	630 m
Zürichsee	13 : 1	805 m
Bodensee	21 : 1	—

Abb. 3 veranschaulicht in einem hypsographischen Diagramm die außerordentliche Steilheit der Ufer und die verhältnismäßig große Tiefe des Brienzersees.

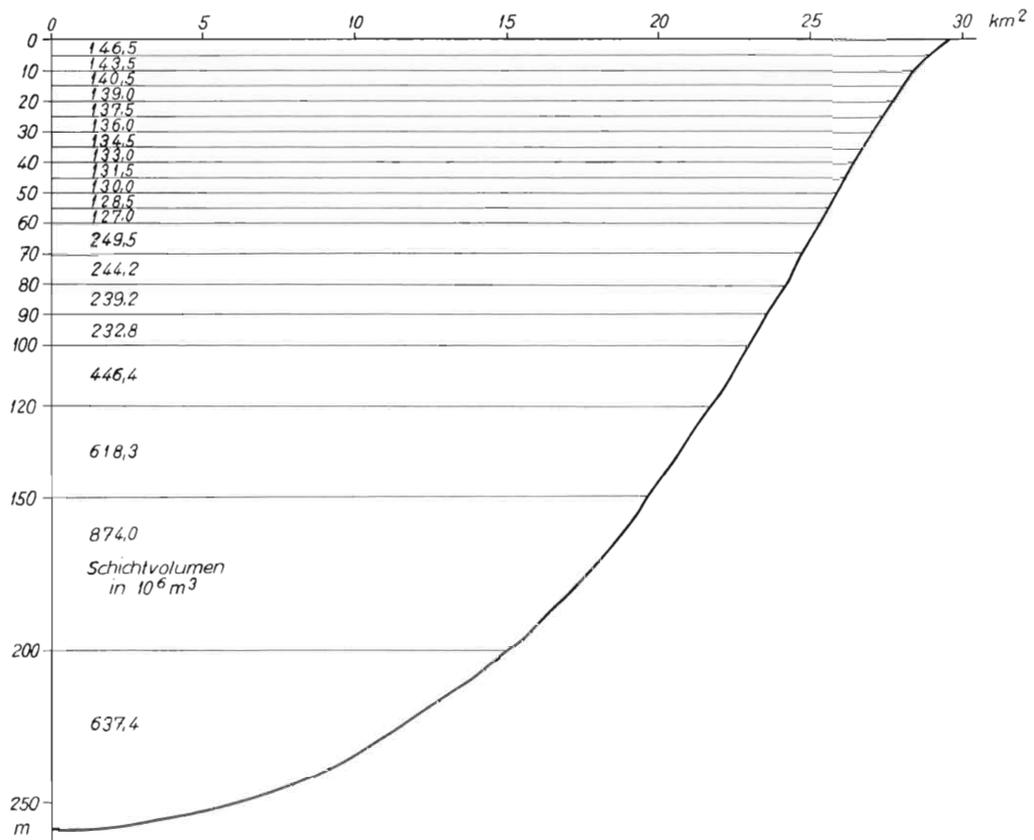


Abb. 3. Hypsographisches Diagramm des Brienzersees.

I. Teil

Schwebestoffführung von Aare und Lütschine

I. Zum Begriff „Schwebestoff“

In [14] finden wir die „Schwebestoffe“ von 0—2,4 mm in 5 Kategorien zerlegt (nach Prof. Schaffernack), dagegen schlägt BURZ [6] vor, nur Körner mit $d < 0,2$ mm als Schwebestoffe zu bezeichnen und Partikel mit $d \geq 0,2$ mm der Sohlenfracht zuzuordnen. Diese Beispiele zeigen, daß der Begriff „Schwebestoff“ nicht scharf abgegrenzt werden kann und eigentlich für jede Fließgeschwindigkeit und jeden Charakter eines Gewässers festgelegt werden sollte. Weil die Trübungsstoffe größtenteils mineralischen Ursprungs, also 2,5—2,9mal so schwer wie Wasser sind, fällt jedes Teilchen mit der ihm eigenen Geschwindigkeit abwärts. Das Schweben kommt durch eine Vertikalbewegung von Wassermassen, die ihren Ursprung in der Turbulenz hat und durch welche ständig Körner aus Gebieten größerer Konzentration (Sohlennähe) in solche geringerer Konzentration (Oberflächennähe) transportiert werden, zustande. Weil die Turbulenz bekanntlich mit der Rauigkeit des Flußbettes und mit der Fließgeschwindigkeit zunimmt, muß parallel dazu auch eine Zunahme des Austausches und damit eine gleichmäßigere Verteilung irgend einer Korngröße über den gesamten Flußquerschnitt zu beobachten sein.

Als Abgrenzung zwischen Schwebestoff und Sohlenfracht hat HYAMI [6] den Wert

$$\frac{w}{\sqrt{9tJ_e}} = 0,3 \quad \text{angegeben.}$$

Dabei bedeuten w die Sinkgeschwindigkeit der Teilchen, g die Erdbeschleunigung, t die Wassertiefe und J_e das Energiegefälle. Nach diesen Angaben berechnete BURZ [6] die in Tab. 3 aufgeführten Werte.

Tab. 3. Angaben nach Burz [6]

t m	J ‰	v m/sec	d mm	
0,50	2,50	1,24	0,25	Grenzkorngröße d in Funktion von t (Wassertiefe) und J_e (Energiegefälle) v = Geschwindigk.
1,00	2,00	1,57	0,35	
2,00	1,50	1,92	0,40	
3,00	1,50	2,35	0,45	
4,00	1,25	2,48	0,50	
5,00	0,50	1,75	0,37	

In der Versuchsanstalt für Erd- und Wasserbau an der ETH in Zürich wurden zur Klärung der Schwebstoffführung im alten Rhein Modellversuche durchgeführt, um die Grenzkorngröße in Funktion der Fließgeschwindigkeit des Wassers zu ermitteln. Es ergaben sich die Werte der Tab. 4 [15].

Tab. 4. Grenzkorngröße d in Funktion der Fließgeschwindigkeit

v in m/s	d in mm
0,30	0,01
0,50	0,05
0,65	0,10
1,30	1,00

Unter Grenzkorngröße ist jene Korngröße zu verstehen, die bei einer bestimmten Fließgeschwindigkeit des Wassers gerade noch mitgeführt wird. Alle größeren Partikel bleiben liegen. Die Werte aus Tab. 4 finden sich in Abb. 15 graphisch aufgetragen.

II. Problemstellung und Untersuchungsmethoden

Es lag uns daran qualitative und quantitative Angaben über die dem offenen See zugeführten und hier zur Sedimentation gelangenden Feststoffe zu erhalten.

1958 waren dem See an zahlreichen Stellen und aus verschiedenen Tiefen Proben von Schwebstoffen entnommen worden. Die Analysen ergaben, daß mineralische Partikel bis zu einem Durchmesser von höchstens 0,07 mm außerhalb des Deltas einige Zeit in Schwebelage gehalten werden können.

Wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird, nimmt der mittlere Durchmesser der Schwebstoffpartikel von der Oberfläche nach der Sohle hin zu (siehe Abb. 4). Andererseits ist die Verteilung einer Fraktion über den ganzen Flußquerschnitt um so gleichmäßiger, je kleiner der Korndurchmesser ist, so daß Körner bis 0,1 mm \varnothing praktisch gleichmäßig verteilt sind. Unsere Probeentnahmen beschränkten sich deshalb auf die Oberfläche des Flusses. 1960—1963 wurden durch Beobachter des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft aus der Aare bei Brienzwiler 85, aus der Aare bei Unterseen 162 und aus der Lütchine bei Gsteig 109 sowie von Schülern der Oberklasse in Bönigen unter Leitung ihres Lehrers, Herrn Michel, 105 Proben entnommen. Die Entnahme geschah, indem knapp unter der Oberfläche eine Literflasche gefüllt wurde. Die Füllzeit betrug im Mittel 16 Sekunden, so daß trotz der bekannten Tatsache, daß sich die Trübungstoffe in größeren und kleineren Wolken fortbewegen, mit einer mittleren Konzentration gerechnet werden darf. Gemäß den im Anhang folgenden Ausführungen wurde dann im Eidgenössischen Amt für Wasserwirtschaft durch Filtration und Wägen des Filtrerrückstandes der Feststoffgehalt der betreffenden Proben bestimmt.

Ab 1963 führt das Eidgenössische Amt für Wasserwirtschaft die Probeentnahmen in Brienzwiler, Bönigen und Unterseen sowie an zahlreichen weiteren Stellen des schweizerischen Flußnetzes weiter, und zwar wurde eigens zu diesem Zwecke eine Probeentnahmeflasche mit verhältnismäßig langer Füllzeit entwickelt.

III. Verteilung der Schwebestoffkonzentration über den Flußquerschnitt

Wie bereits erwähnt, gingen wir von der Annahme aus, daß die Fraktion der Schwebestoffpartikel, die für unsere Untersuchungen von Bedeutung ist (0—0,07 mm Durchmesser), annähernd gleichmäßig über den ganzen Flußquerschnitt verteilt vorkommt. Diese Annahme bedarf der Begründung.

Abb. 4 zeigt die im Modellversuch an der Versuchsanstalt für Erd- und Wasserbau an der ETH ermittelte Schwebestoffverteilung und Konzentration in Funktion von Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit [15]. Bei den Wasserentnahmen, die unseren Berechnungen als Unterlage dienten, handelte es sich stets um Fließgeschwindigkeiten $> 0,7$ m/sec (siehe Abb. 14 u. 15). Zudem kann der Anteil an Schwebestoffen mit $d > 0,05$ mm praktisch vernachlässigt werden (siehe Tab. 10).

Somit ist unsere Annahme zweifellos gerechtfertigt. Wir möchten ausdrücklich betonen, daß für größere Körner keine gleichmäßige Verteilung vorliegt, daß vielmehr der Anteil an größerem Material nach der Tiefe hin beträchtlich zunimmt. Wir zitieren aus der bereits erwähnten umfangreichen Arbeit des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft [14] folgende Angaben:

„Der Quotient aus der mittleren Schwebestoffkonzentration über das ganze Profil (c_m) und der Konzentration an der Oberfläche (c_0) ergab sich am 18. Juni 1936 zu 1,19, am 6. Juli 1936 zu 1,96, am 10. Juli 1936 zu 3,35.“

Wir erinnern daran, daß hier als Schwebestoffe Körner bis zu 2,4 mm Durchmesser mitbestimmend waren.

Für unser Problem dürften folgende Überlegungen von KURZMANN [29], worin Gedanken von PRANDTL [44] weiterentwickelt werden, aufschlußreich sein:

Durch die Kontrollfläche f bewegen sich $v_i n_y$ Teilchen nach unten, wobei v_i die Sinkgeschwindigkeit der Teilchen der Fraktion i und n_y die Konzentration im Abstand y von der Sohle bedeuten.

$(1,4 - 2,0) A_J \frac{du_y}{dy}$ charakterisiert die nach oben gerichtete Bewegung, wobei $(1,4 - 2,0)$ der aus Versuchen ermittelte Betrag des Stoffaustausches als Vielfaches des Impulsaustausches A im Gebiete der Kontrollfläche f , $\frac{dn_y}{dy}$ das Konzentrationsgefälle bezeichnen. Für die Fraktion i ergibt sich ein Zustand des Schwebens, wenn gilt

$$\downarrow v_i n_y = \uparrow A_J (1,4 - 2,0) \frac{dn_y}{dy}.$$

Nach PRANDTL [44] beträgt der Impulsaustausch $A = \rho l^2 \frac{d\bar{u}}{dy}$. Hierin bedeuten ρ die Dichte des Mediums, l die Länge des durch Turbulenz bewirkten Mischungsweges, \bar{u} die mittlere Fließgeschwindigkeit. Also

$$\downarrow v_i n_y = \uparrow 1,7 \rho l^2 \frac{d\bar{u}}{dy} \frac{dn_y}{dy}.$$

Aus Versuchen ergab sich für Strömungen längs einer parallelen ebenen Wand $l = x y = 0,4 y$.

Für $l \frac{d\bar{u}}{dy}$ führte PRANDTL [44] den Begriff der Schubspannungsgeschwindigkeit v_* ein. v_* wird als über den ganzen Strömungsquerschnitt gleichbleibend vorausgesetzt, und es ergibt sich

$$v_i n_y = 0,65 \rho v_* y \frac{dn_y}{dy}.$$

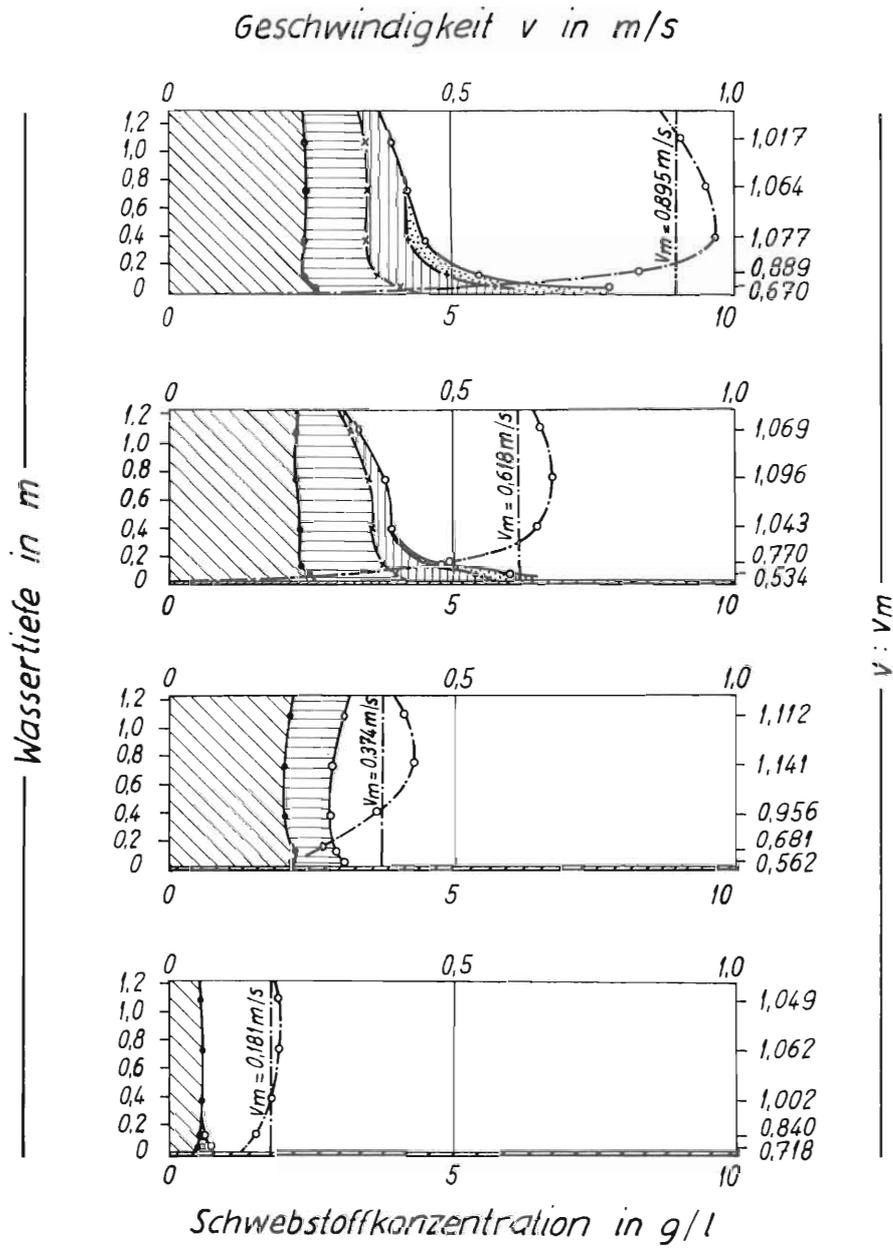


Abb. 4. Schwebstoffverteilung in Funktion von Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit (Modellversuch an der ETH [15]).

Nach der Stokeschen Formel gilt für kugelförmige Teilchen bis zu Korndurchmesser $d_i \leq 0,16$ mm

$$v_i = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18 \mu_w} d_i^2 = a d_i^2.$$

Es bedeuten darin:

- γ_s = spez. Gewicht des Schwebstoffes
 γ_w = spez. Gewicht des Wassers
 μ_w = Zähigkeit des Wassers (stark temperaturabhängig)
 d_i = Korndurchmesser der Fraktion i

Damit wird

$$n_y a d_i^2 = -0,65 \rho v_* y \frac{dn_y}{dy}$$

oder

$$\frac{dn_y}{n_y} = -\frac{dy}{y} \frac{a d_i^2}{0,65 \rho v_*} = -\frac{d_i^2}{\beta v_*} \frac{dy}{y},$$

wenn

$$\beta = \frac{0,65 \rho}{a}.$$

Durch Auflösung dieser Differentialgleichung finden wir

$$n_y = n_s \left(\frac{y}{y_s} \right)^{-\frac{d_i^2}{\beta v_*}},$$

wenn mit n_y die Schwebstoffkonzentration im Abstand y von der Sohle und mit n_s diejenige in Sohlennähe (Abstand = y_s) gemeint ist.

Der Quotient y/y_s strebt gegen 1, wenn der Exponent $-\frac{d_i^2}{\beta v_*}$ gegen 0 strebt und damit strebt auch n_y gegen n_s , d. h. die Konzentration im beliebigen Abstand y von der Sohle nähert sich der Sohlenkonzentration, was soviel wie gleichmäßige Schwebstoffverteilung über die ganze Tiefe eines Flusses bedeutet. Der Exponent $-\frac{d_i^2}{\beta v_*}$ strebt aber um so mehr gegen 0 je kleiner der Korndurchmesser d wird.

Um auch bei geringer Fließgeschwindigkeit, also bei schwach ausgebildeter Turbulenz, Anhaltspunkte über die Schwebstoffverteilung im Flußquerschnitt zu erhalten, zeigte sich das Eidg. Amt für Wasserwirtschaft¹⁾ bereit am 13. 10. 1964 eine entsprechende Erhebung in der Aare bei Brienzwiler durchzuführen. Zu diesem Zwecke wurde mit einem Transmissionsmeßgerät vom Typ Abb. 17 in verschiedenen Vertikalen und verschiedenen Tiefen die Lichtdurchlässigkeit bestimmt. Im Gegensatz zu Typ gem. Abb. 1 mit einem Lichtweg von 50 cm, betrug derselbe hier nur 25 cm. Die Transmissionswerte wurden auf Transmission in der Meterschicht umgerechnet und finden sich in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tab. 5

Vertikale	Oberfläche		33 cm Tiefe		67 cm Tiefe		100 cm Tiefe	
	Skalenteile	% p. m	Skalenteile	% p. m	Skalenteile	% p. m	Skalenteile	% p. m
21	3,27	6,07	3,20	5,51	3,17	5,31	3,07	4,70
24	3,15	5,14	3,07	4,70	2,98	4,17	2,90	3,72
27	3,17	5,31	3,03	4,46	2,98	4,17	2,90	3,72
30	3,23	5,72	3,10	4,87	3,03	4,46	2,92	3,82
33	3,20	5,51	3,05	4,56	3,02	4,40	2,92	3,82 *

* 88 cm Tiefe.

¹⁾ Besondern Dank schulden wir dabei Herrn Sektionschef Kohler vom Eidgenössischen Amt für Wasserwirtschaft.

Um den Zusammenhang zwischen Extinktion und Schwebstoffkonzentration zu ermitteln, wurde jeweils unmittelbar hinter dem Transmissionsmeßgerät und gleichzeitig mit der Lichtmessung in ca. 15 cm Tiefe eine Wasserprobe entnommen und der Feststoffgehalt im Amt für Wasserwirtschaft später gravimetrisch bestimmt.

Es gilt
$$J_x = J_0 e^{-\epsilon_x}$$

wobei J_x die Lichtintensität nach Durchlauf des Lichtweges von der Länge x , J_0 die Intensität am Anfang des Lichtweges und ϵ_x den Extinktionskoeffizienten für die Schichtdicke x bedeutet. Bei geringer Konzentration, wie sie in Flüssen meist anzutreffen ist, besteht lineare Abhängigkeit zwischen dem Extinktionskoeffizienten und dem Schwebstoffgehalt pro Volumeneinheit (siehe [33]). Wird daher J_x auf logarithmisch geteilter Abszisse und die Schwebstoffkonzentration linear auf der Ordinate eines Koordinatensystems aufgetragen, so müssen die Punkte, die je einem Wertepaar entsprechen, auf einer Geraden liegen. Abb. 5 zeigt die gefundene Beziehung zwischen der Transmission

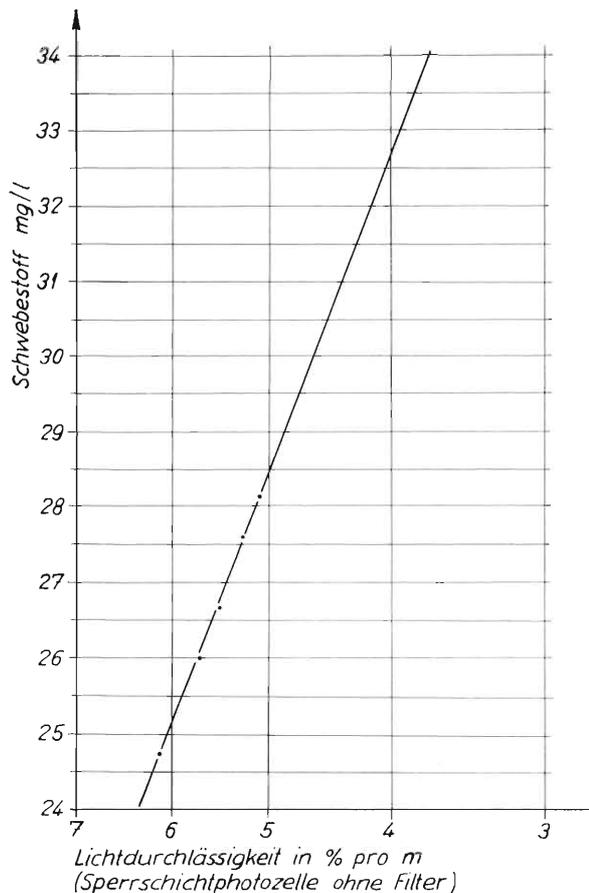


Abb. 5. Lichtdurchlässigkeit in Abhängigkeit von der Schwebstoffkonz. (Aare, Brienzwiler).

und den gravimetrisch bestimmten Schwebstoffkonzentrationen in Oberflächennähe am 13. 10. 1964. Es muß erwähnt werden, daß die geringe Streuung zweifellos auf einer Zufälligkeit beruht, namentlich wenn man bedenkt, daß bei der gravimetrischen Schwebstoffbestimmung bedeutende Fehler möglich sind. Andererseits spricht das Ergebnis für die Genauigkeit, mit welcher im Eidg. Amt für Wasserwirtschaft die Schwebstoffanalysen durchgeführt wurden. Die Abb. 5 diente uns nun als Eichkurve gemäß welcher die Werte

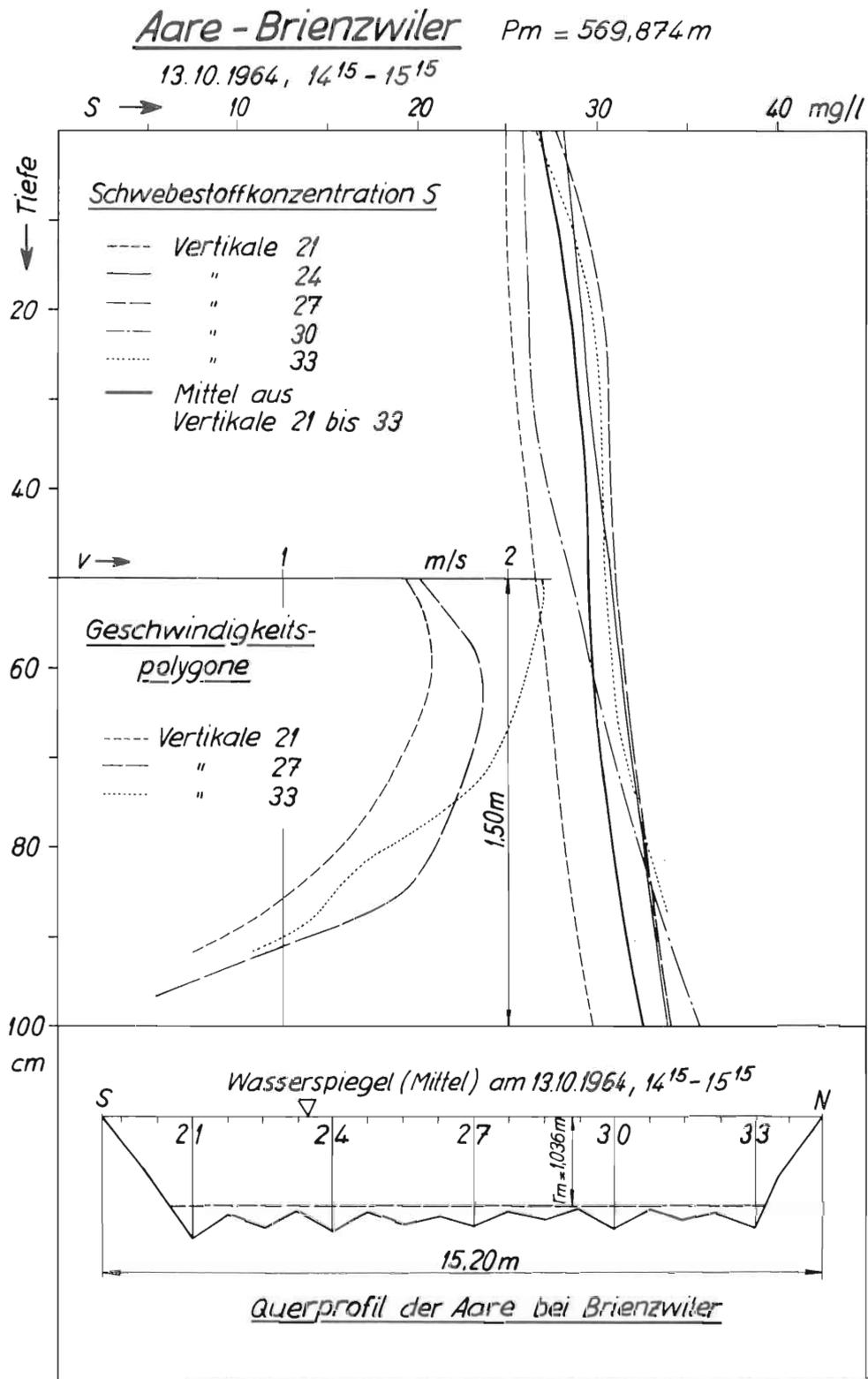


Abb. 6. Schwebestoffverteilung im Querprofil (Aare, Brienzwiler).

für alle Vertikalen und Tiefen in Abb. 6 aufgetragen wurden. Gleichzeitig enthält Abb. 6 die Geschwindigkeitspolygone, die im gleichen Flußquerschnitt unmittelbar vor unseren Messungen aufgenommen wurden. Erstaunlich ist die geringe Schwebestoffkonzentration trotz verhältnismäßig großer Fließgeschwindigkeit in Vert. 21. Es muß aber berücksichtigt werden, daß Vert. 21 am inneren Rande einer mäßigen Flußbiegung liegt, und daß namentlich die größeren Körner durch Zentrifugalwirkung eine Verschiebung in Richtung des äußeren Bogenrandes (Vert. 33) erfahren dürften. Immerhin ist die gleichmäßige Schwebestoffverteilung über den Querschnitt, wenn man bedenkt, daß alle sich in Schwebefindenden Partikel mitbestimmend waren, beachtlich.

IV. Korngrößenverteilung

Aus einzelnen Fluß- und Seewasserproben (Filterrückstände, siehe S. 34) ließ Herr Professor de Quervain vom Lehrstuhl für technische Petrographie der ETH in verdankenswerter Weise die prozentuale Korngrößenverteilung mikroskopisch ermitteln. Die Körner wurden nach dem kleinsten Durchmesser ausgemessen und in folgende Fraktionen eingeteilt: 2—5 μ , 5—10 μ , 10—20 μ , 20—50 μ , 50—100 μ . Die Summe der ausgemessenen Körner schwankt bei den einzelnen Proben zwischen 350 und 500.

Tab. 6. Prozentuale Verteilung (Zahlprozente) der Durchmesser d und Kornverteilung in Volumprozenten v von Seewasserproben

Probe	2—5 μ		5—10 μ		10—20 μ		20—50 μ		50—100 μ	
	d	v	d	v	d	v	d	v	d	v
3	39,0	1,1	45,2	11,2	13,6	26,5	2,2	61,2	—	—
4	37,0	0,8	46,9	8,4	12,5	17,6	3,6	73,2	—	—
5	53,0	4,5	42,7	31,8	3,4	19,7	0,5	44,0	—	—
6	40,0	2,1	49,1	22,2	10,1	35,7	0,7	40,0	—	—
14	45,4	2,7	43,0	22,2	11,1	44,8	0,5	30,3	—	—

Zur Kornverteilung in Volumprozenten wurde ein mittlerer Kornradius \bar{r} berechnet.

$$\bar{r} = \sqrt[3]{\sum_{n=a}^b \frac{n^3}{b-a+1}}$$

a und b sind Anfangs- und Enddurchmesser des Fraktionsintervalls. Die Summation von a bis b erfolgte in Intervallen von einem μ . Es wurde angenommen, daß jeder Punkt des Intervalles $|ab|$ gleichmäßig belegt ist.

Tab. 6 und Abb. 7—8 geben eine Übersicht über die Korngrößenverteilung in Seewasserproben vom 6. Juni 1960, und zwar wurden Proben 3 und 4 500 m vor der Aare-mündung in 10 m Tiefe, Proben 5 und 6 1200 m vor der Aare-mündung ebenfalls aus 10 m Tiefe, Probe 14 400 m vor der Lüttschinemündung aus 8 m Tiefe gefaßt. Die Tiefe richtete sich nach Lage der Sprungschicht.

Tab. 7 und 8 und Abb. 9 und 10 zeigen Beispiele für die Kornverteilung in Aare und Lüttschine und lassen erkennen, daß die Kornzusammensetzung an der Oberfläche nur

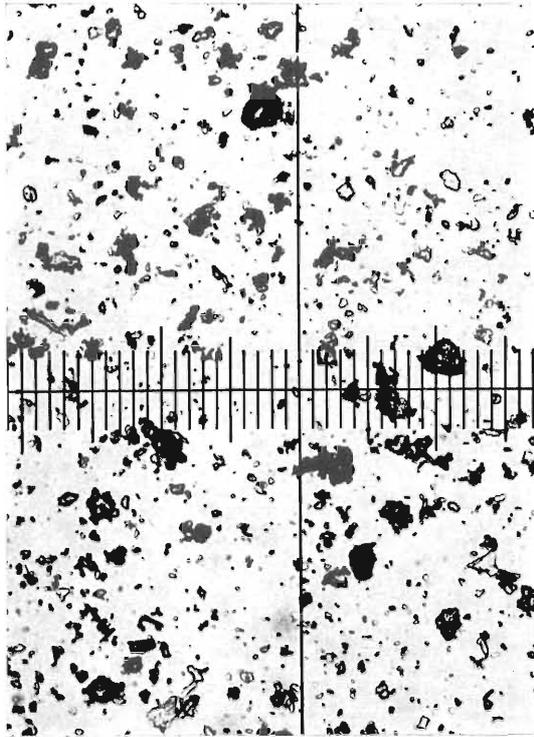


Abb. 7. Schwebstoffprobe 4 (siehe Abb. 11) aus dem Brienzensee (1 Teilstrich = 0,016 mm). (Abb. 7—11 stammen aus Aufnahmen und Darstellungen vom Lehrstuhl für technische Petrographie der ETH.)

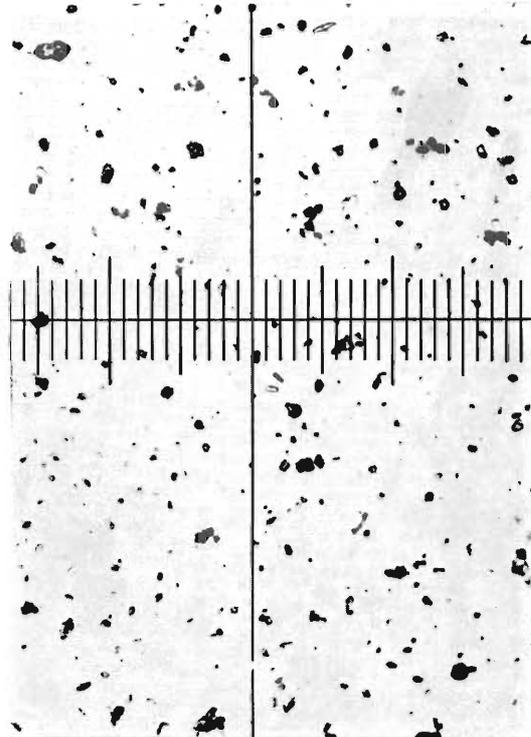


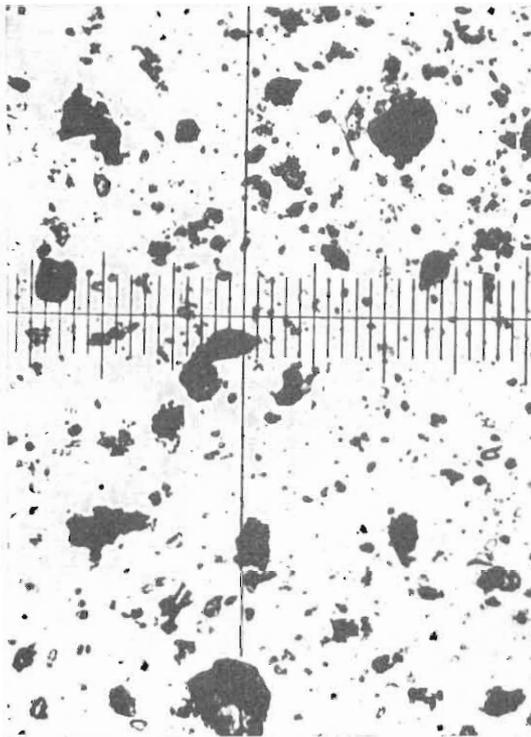
Abb. 8. Schwebstoffprobe 14 aus dem Brienzensee (siehe Abb. 11) (1 Teilstrich = 0,016 mm).

Tab. 7. Kornverteilung Aare Brienzwiler

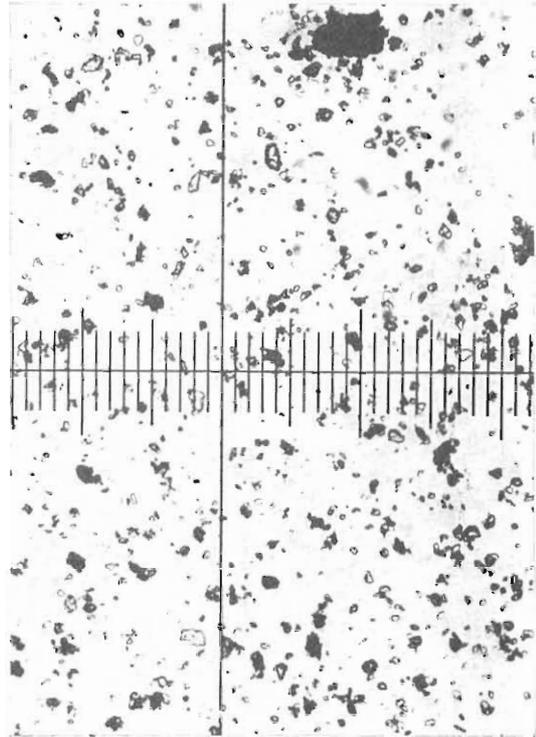
Datum	Probe	2—5 μ		5—10 μ		10—20 μ		20—50 μ		50—100 μ	
		<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>
14. 5. 60	33	20,9	1,0	64,8	27,6	13,8	46,0	0,5	25,4	—	—
8. 7. 60	20	31,4	0,6	56,9	9,8	8,2	11,1	3,0	58,3	0,5	20,2
10. 8. 60	22	30,2	1,1	56,2	17,6	12,2	30,1	1,4	51,2	—	—
21. 9. 60	25	39,6	1,7	50,8	19,5	8,4	25,2	1,2	53,6	—	—
22. 10. 60	17	34,5	0,9	48,3	10,7	14,4	25,3	2,5	63,1	—	—

Tab. 8. Kornverteilung Lütchine Gsteig

Datum	Probe	2—5 μ		5—10 μ		10—20 μ		20—50 μ		50—100 μ	
		<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>
12. 4. 60	29	37,5	2,6	54,9	31,9	7,1	32,3	0,5	33,2	—	—
25. 4. 60	31	42,7	1,6	45,5	15,0	10,3	26,7	1,5	56,7	—	—
10. 5. 60	21	24,4	0,4	57,2	8,6	14,4	17,0	3,7	63,1	0,3	10,9
19. 5. 60	34	38,4	1,2	49,5	14,2	10,5	23,5	1,4	44,4	0,2	16,7
29. 5. 60	35	21,7	0,2	53,3	4,4	17,5	11,4	6,5	61,7	1,0	22,3

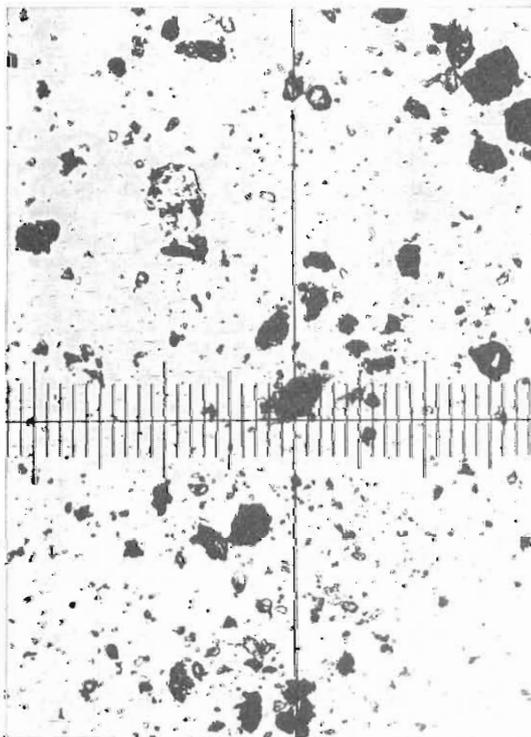


Probe 25 (Konzentration 149 mg/l)

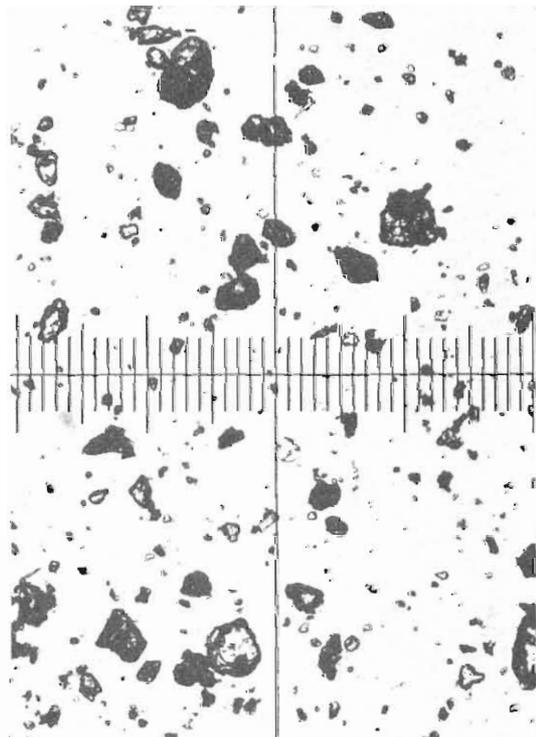


Probe 33 (Konzentration 54 mg/l)

Abb. 9. Schwebstoffproben aus der Aare bei Brienzwiler (1 Teilstrich = 0,016 mm) (siehe Abb. 11).



Probe 34 (Konzentration 224 mg/l)



Probe 35 (Konzentration 81 mg/l)

Abb. 10. Schwebstoffproben aus der Lüttschine bei Gsteig (1 Teilstrich = 0,016 mm) (siehe Abb. 11).

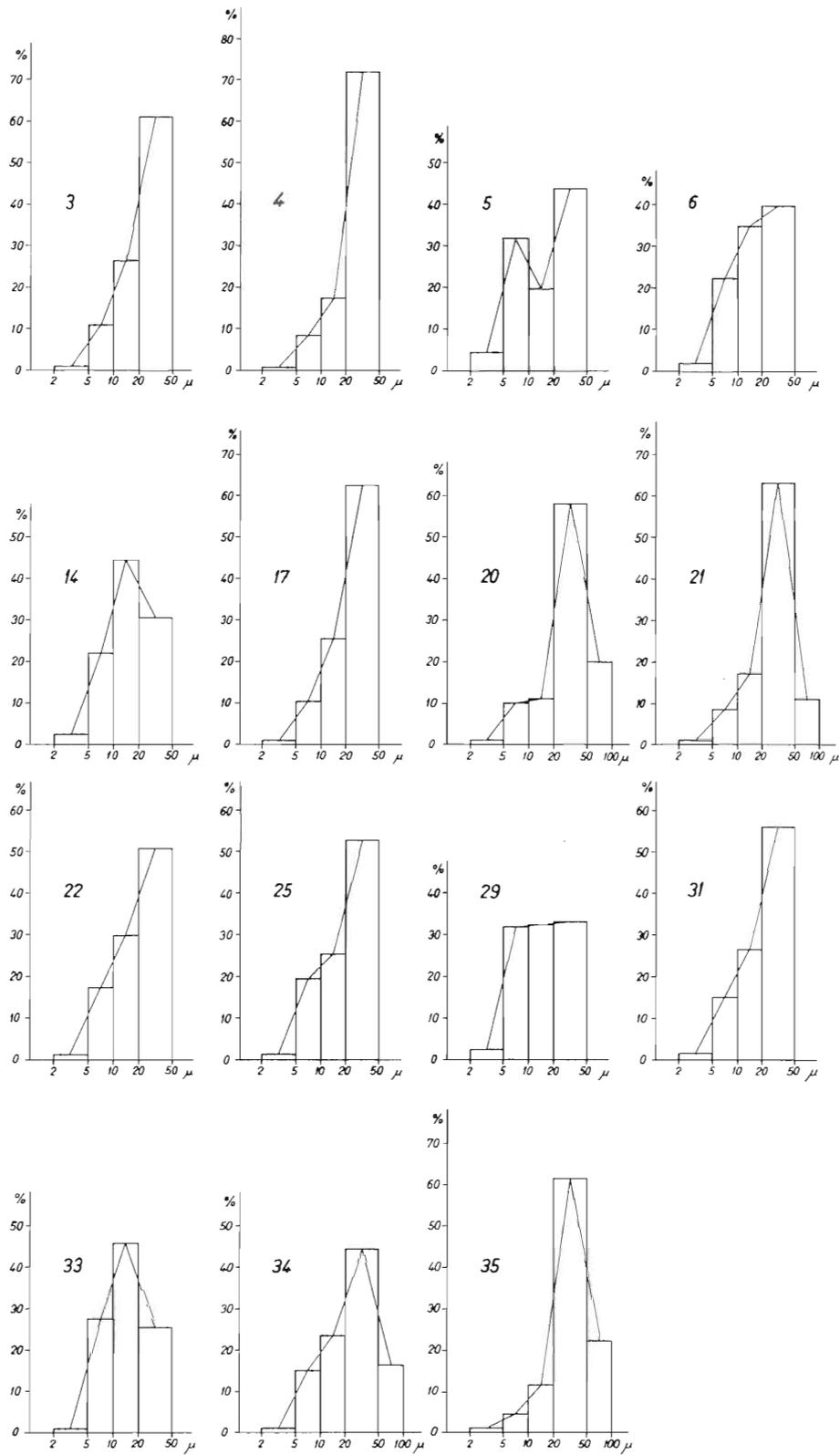


Abb. 11. Prozentuale Verteilung der Korngrößen bei Schwebestoffproben (siehe Abb. 7—10).

bei Hochwasser von derjenigen im See merklich abweicht, und daß der prozentuale Anteil an Partikel $> 50 \mu$ auch dann noch nicht wesentlich ins Gewicht fällt (siehe Tab. 9). Abb. 11 zeigt die graphische Darstellung der Kornverteilung in Volumprozenten aus Tab. 6—8, wobei auf der Abszisse der Korndurchmesser in logarithmischem Maßstab aufgetragen wurde.

Tab. 9. Mittel der prozentualen Volumverteilung aus Tabellen 6—8

Fraktion	2—5 μ	5—10 μ	10—20 μ	20—50 μ	50—100 μ
See	2,2	19,5	28,7	49,8	0
Aare	1,1	16,6	27,5	50,0	4,0
Lütschine	1,2	14,8	22,2	51,8	10,0

Tab. 9 zeigt, daß die Fraktion mit Korndurchmesser 20—50 μ die Hälfte der gleichmäßig über den Flußquerschnitt verteilten und dem offenen See zugeführten Schwebestoffpartikel ausmacht. Diese Tatsache wurde an über 80 weiteren Proben, die wir auszählten, bestätigt. Immerhin bringen wir in Tabelle 10 eine Zusammenstellung von extremen Abweichungen.

Tab. 10. Extreme Abweichungen in der Kornverteilung Aare-Brienzwiler und Lütschine-Bönigen aus den Jahren 1962—1963 (Zahlprozente)

Fluß	Datum	Konz. mg/l	2—5 μ	5—10 μ	10—20 μ	20—50 μ	50—100 μ	100—250 μ	Tagesmittel Abfl. m ³ /s
Aare	23. 8. 63	15,3	98,0	2,0	—	—	—	—	6,56
Aare	8. 12. 62	34,7	97,9	2,1	—	—	—	—	15,5
Aare	16. 6. 62	112,4	72,3	26,1	1,6	—	—	—	59,2
Aare	17. 8. 63	240,9	9,1	10,9	35,6	24,8	15,2	4,4	77,2
Aare	20. 10. 62	227,6	82,3	5,5	7,4	3,7	1,1	—	26,7
Lütschine	30. 3. 62	13,8	72,5	22,0	5,5	—	—	—	5,10
Lütschine	8. 4. 63	43,1	56,8	32,0	8,0	3,2	—	—	23,3
Lütschine	26. 10. 63	4,16	44,4	26,7	17,8	11,1	—	—	5,60
Lütschine	14. 8. 63	418,8	51,7	21,6	15,4	7,7	3,6	—	42,3
Lütschine	12. 7. 62	627	26,8	9,1	18,1	27,1	9,0	9,9	43,0
Lütschine	6. 8. 62	1407	24,3	19,2	38,5	12,0	4,8	1,2	52,3

Eindeutig ist ein Zusammenhang zwischen Korngröße und Abflußmenge zu erkennen, indem der Anteil an größeren Körnern mit Zunahme der Abflußmengen wächst, jedoch niemals in dem von uns erwarteten Umfang. Bei geringer Wasserführung, namentlich in den Wintermonaten, fehlen in der Aare die Körner mit $d > 10 \mu$, während die Lütschine noch einen verhältnismäßig großen Anteil der Fraktion 20—50 μ zeigt. Dies ist wohl auf die Wirkung der Stauseen im Grimselgebiet, die die Funktion von Klärbecken für größere Partikel ausüben, zurückzuführen. Am 17. 8. 1963 finden wir einen außerordentlich großen Anteil an groben Körnern im Aarewasser, was mit dem Abklingen einer durch Gewitter im Grimselgebiet verursachten Hochwasserspitze zusammenfällt (am 16. 8. Monatsmaximum mit 88,8 m³/s). Dies ist aber der einzige von uns festgestellte Fall, bei welchem die Schwebestoffproben der Aare Körner mit $d > 100 \mu$ aufweisen. Anders verhält es sich

bei der Lütschine. Es zeigte sich, daß der Anteil an Partikeln mit $d > 100 \mu$ bei Hochwasserspitzen meist bedeutend ist. Dies wird im zweiten Teil dieser Arbeit bei Untersuchungen über die Einschichtungstiefe von Lütschine und Aare von Bedeutung sein. Am 12. 7. 1962 (siehe Tab. 10) fanden wir in den Schwebestoffproben aus der Oberfläche sogar Körner bis zu 1 mm Durchmesser.

Während in der Aare aus 53 ausgezählten Proben nur 4, d. h. ca. 8%, Körner mit Durchmesser 50—100 μ aufwiesen, waren es bei der Lütschine aus 36 Proben deren 20, oder rund 55%. Auch aus der Aare bei Unterseen wurden Proben entnommen und filtriert. Wir werden aber weiter unten sehen, daß der Feststoffanteil, verglichen mit den dem See zugeführten Mengen nicht ins Gewicht fällt (siehe Tab. 23). Beim Auszählen der Korngrößen zeigte sich zudem, daß der Feststoffanteil zum größten Teil aus organischen Partikeln bestand. Dies bestätigt die Tatsache, daß der Abfluß eines Sees diesem, solange er geschichtet ist, nur Wasser aus einer wenig mächtigen Oberflächenschicht zu entziehen vermag.

V. Zeitliche Schwankung der Schwebestoffkonzentration

Die Wasserführung der Aare und namentlich der Lütschine ist außerordentlich großen täglichen und jährlichen Schwankungen unterworfen (siehe Tafeln V und VI). Weil ein Anwachsen des sekundlichen Abflusses eine Zunahme der Fließgeschwindigkeit und somit auch eine Zunahme der Schleppkraft des Flusses im Gefolge hat, muß auch die Schwebestoffkonzentration große zeitliche Änderungen zeigen.

Wir versuchten einen Zusammenhang zwischen Abflußmenge pro Sekunde und Feststoffkonzentration (mg/l) zu finden. In Abb. 12 und 13 wurden deshalb 88 Wertepaare aus Aareproben und 105 aus Lütschineproben als Punkte im Koordinatensystem aufgetragen, wobei sich überraschenderweise zeigte, daß für die Abszisse (Schwebestoffkonzentration) am besten ein logarithmischer Maßstab gewählt wird. Wie zu erwarten, ergab sich eine verhältnismäßig große Streuung. Dies wohl deshalb, weil die Ursachen der Schwemmstoffführung mannigfachster Art sind. Der wichtigste Faktor wird in unserem Fall die Schneeschmelze im Hochgebirge während den Sommermonaten sein.

Diese führt dem Fluß vor allem Abriebmaterial aus Moränenschutt zu und bewirkt ziemlich regelmäßige tägliche und jahreszeitliche periodische Schwankungen. Gewitterregen und Wolkenbrüche dagegen verursachen eine sprunghafte und zufällige Zunahme der Trübung und bilden wohl vorwiegend die Ursache der geringen Korrelation zwischen Abflußmenge und Schwebestoffkonzentration. Ferner ist zu bedenken, daß länger dauernde Niederschlagsperioden ein „Auswaschen“ des Flußbettes mit nachfolgender Schwemmstoffverarmung zur Folge haben können. Diese Schwemmstoffverarmung an der Flußsohle kann aber durch Ufer- und Hanganbrüche mehr als aufgewogen werden. So ist nicht verwunderlich, wenn BURZ [7] auf Seite 16 ausführt:

„Die Problematik der Schwebestoffmessung liegt eher darin, daß sich die Konzentration innerhalb kurzer Zeit ändern kann (hauptsächlich bei Anschwellungen), sowie in der Tatsache, daß es keinen funktionellen Zusammenhang zwischen Schwebestoffgehalt und Abfluß gibt. Deshalb ist es in jedem Fall notwendig, eine große Zahl von Messungen durchzuführen.“

Und in einem Referat der Bayrischen Landesstelle für Gewässerkunde über Erforschung der Geschiebebewegung [19] lesen wir bezüglich des Zusammenhanges zwischen Abflußmenge und Schwemmstoffführung:

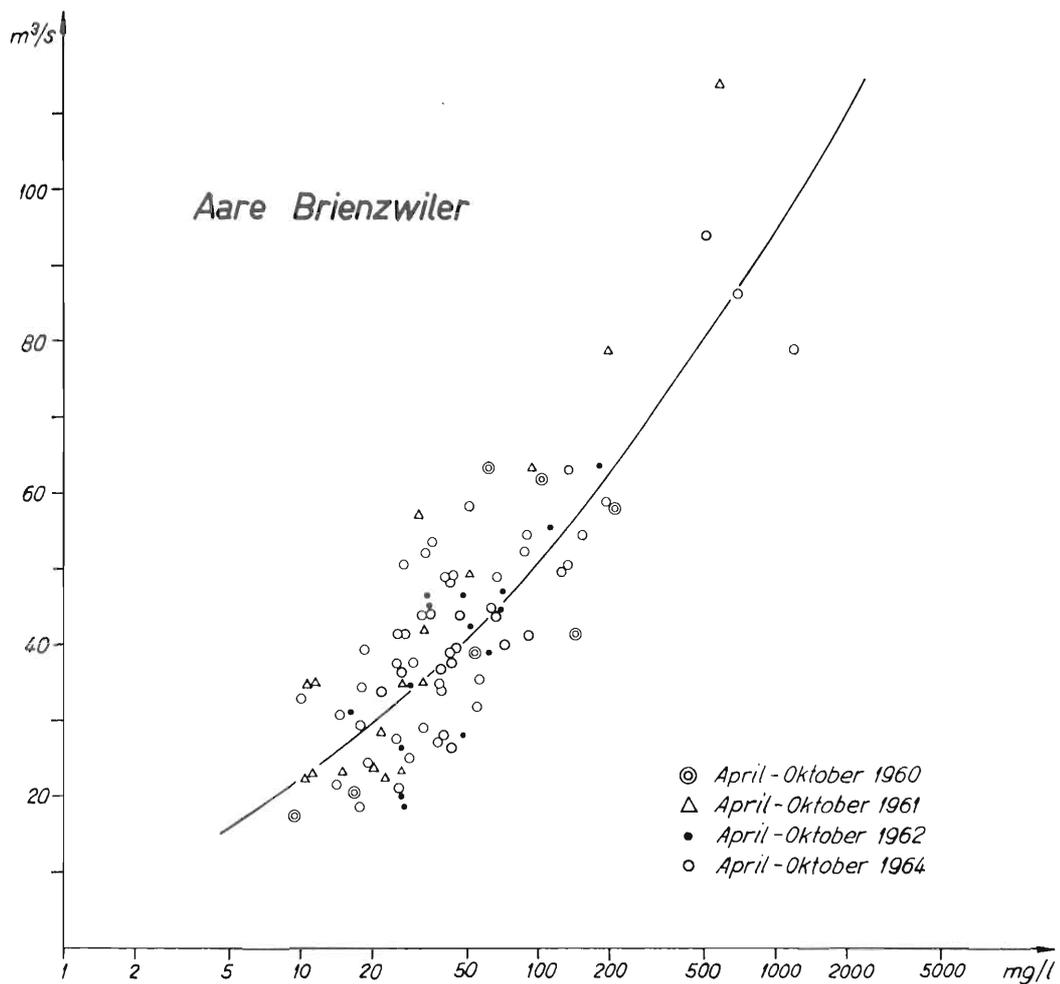


Abb. 12. Schwebestoffkonzentration (mg/l) in Abhängigkeit von der Wasserführung (m³/sec).

„Bei dieser Vielfältigkeit der Verhältnisse kann eine allgemeingültige Gesetzmäßigkeit nicht bestehen“ (S. 600).

Andererseits erwähnt JAKUSCHOFF [25] mehrere Versuche von verschiedenen Forschern den Schwebestofftrieb formelmäßig festzuhalten. Dabei wird meist vom Geschiebetrieb ausgegangen, und die Ausführungen von JAKUSCHOFF münden in die auf Seite 15 zu findende Schlußfolgerung:

„Gemäß diesem Ansatz ist die Schwebestoffförderung proportional der fünften Potenz der Strömungsgeschwindigkeit.“

Diese Annahme konnten wir in unseren Beobachtungen nicht bestätigt finden.

Es hieße den Rahmen unserer Problemstellung (Ermittlung der Menge der dem offenen See zugeführten feinsten Schwebestoffe) sprengen, wollten wir weiter in den hier berührten Fragenkomplex eindringen. Wir verweisen diesbezüglich auf die genannte Literatur und erwähnen in diesem Zusammenhang noch die von GIULIO GALLI und LEONARDO ROTUNDI veröffentlichten und von BURZ [7] ins Deutsche übersetzten Untersuchungen.

Weil zahlreiche Forscher für die Beurteilung des Schwebestofftriebes von Geschiebetriebformeln ausgehen, möchten wir hier auf einen, wie uns scheint, sehr wesentlichen

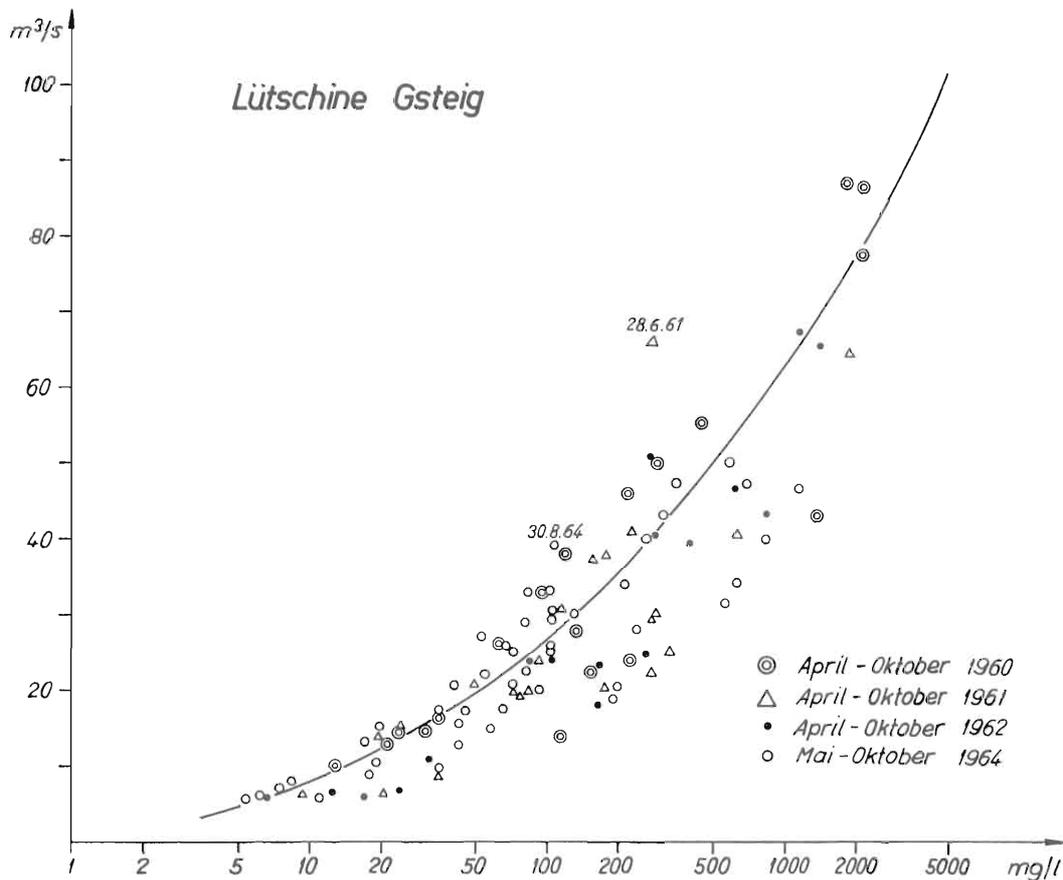


Abb. 13. Schwebestoffkonzentration (mg/l) in Abhängigkeit von der Wasserführung (m³/sec).

Unterschied in den beiden Feststofftransportarten aufmerksam machen. Während für den Geschiebetrieb die Fließgeschwindigkeit an der Sohle ausschlaggebend ist, und während Sohlenrauigkeit den Geschiebetransport zu hemmen scheint, ist für den Schwebestofftransport der Turbulenzgrad von entscheidender Bedeutung, und dieser ist abhängig von den Geschwindigkeitsschwankungen in der Flußlängsrichtung und wird deshalb durch Sohlenunebenheiten gefördert. Außerdem wagen wir die Vermutung auszusprechen, daß die Fließgeschwindigkeit in einer evtl. Schwebestofftriebformel nicht als Basis irgend einer Potenz, sondern als Exponent auftritt. Darauf lassen vor allen die graphischen Darstellungen in Abb. 14—15 schließen, in welcher die Fließgeschwindigkeit auf der Ordinate in linearem und die Schwebestoffkonzentration auf der Abszisse in logarithmischem Maßstab aufgetragen wurden und wo die entsprechenden Punkte, allerdings mit beträchtlicher Streuung, entlang einer Geraden gruppiert erscheinen. Es handelt sich dabei um die in Abb. 12 und 13 angegebenen Werte, wobei die mittlere Fließgeschwindigkeit als Funktion der Abflußmenge²⁾ ermittelt wurde. Es muß erwähnt werden, daß die in Abb. 12—15 dargestellten Beziehungen nur ab Abflußmengen von ca. 5 m³/s bei der Lütschine und 18 m³/s bei der Aare, resp. ab Fließgeschwindigkeiten von 0,8 m/s und 1,3 m/s festgestellt werden konnten. Es scheint für jeden Fluß eine kritische Fließge-

²⁾ Die entsprechenden Diagramme wurden in verdankenswerter Weise vom Eidgenössischen Amt für Wasserwirtschaft zur Verfügung gestellt.

schwindigkeit zu existieren, unterhalb welcher für den Schwebestofftrieb andere Gesetzmäßigkeiten als oberhalb derselben gelten. In Abb. 15 sind außerdem die auf Seite 10 erwähnten und von der Versuchsanstalt für Erd- und Wasserbau an der ETH festgestellten Grenzkorngrößen in Funktion der Fließgeschwindigkeit aufgetragen worden, und der annähernd parallele Verlauf ab Fließgeschwindigkeit 0,5 m/s ist auffallend. Es sei nochmals erwähnt, daß es sich um Untersuchungen im Versuchskanal handelt [15]. Im folgenden seien noch einige Werte aus Abb. 14—15, die ausgesprochen „aus der Reihe tanzen“, in Tab. 11 und 12 kommentiert (vgl. auch Tafeln V und VI).

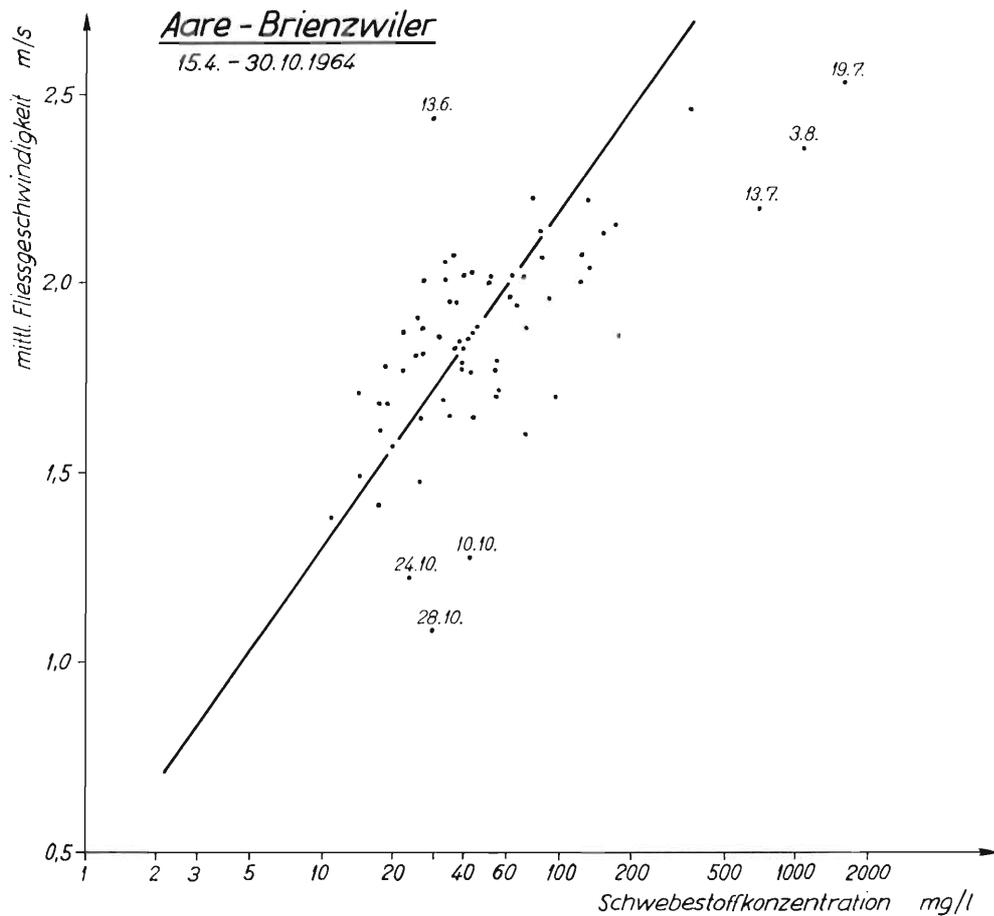


Abb. 14. Schwebestoffkonzentration in Abhängigkeit von der mittleren Fließgeschwindigkeit.

Tab. 11. Abweichende Werte aus graph. Darstellung Abb. 14 (Aare)

Datum	Besonderheit	Ursache der Abweichung
13. 6. 64	Unterdurchschnittl. Konzentration	„Ausgewaschenes“ Flußbett nach Hochwasser am 8. 6. 64
13. 7. u. 3. 8. 64	Überdurchschnittl. Konzentration	Ausgesprochene Spitzen im Tagesmittel nach längerer Niedrigwasserperiode (75.5 m ³ /s)
10., 24., 28. 10. 64	Überdurchschnittl. Konzentration	Werte unterhalb der „kritischen Geschwindigkeit“ von 1,3 m/s

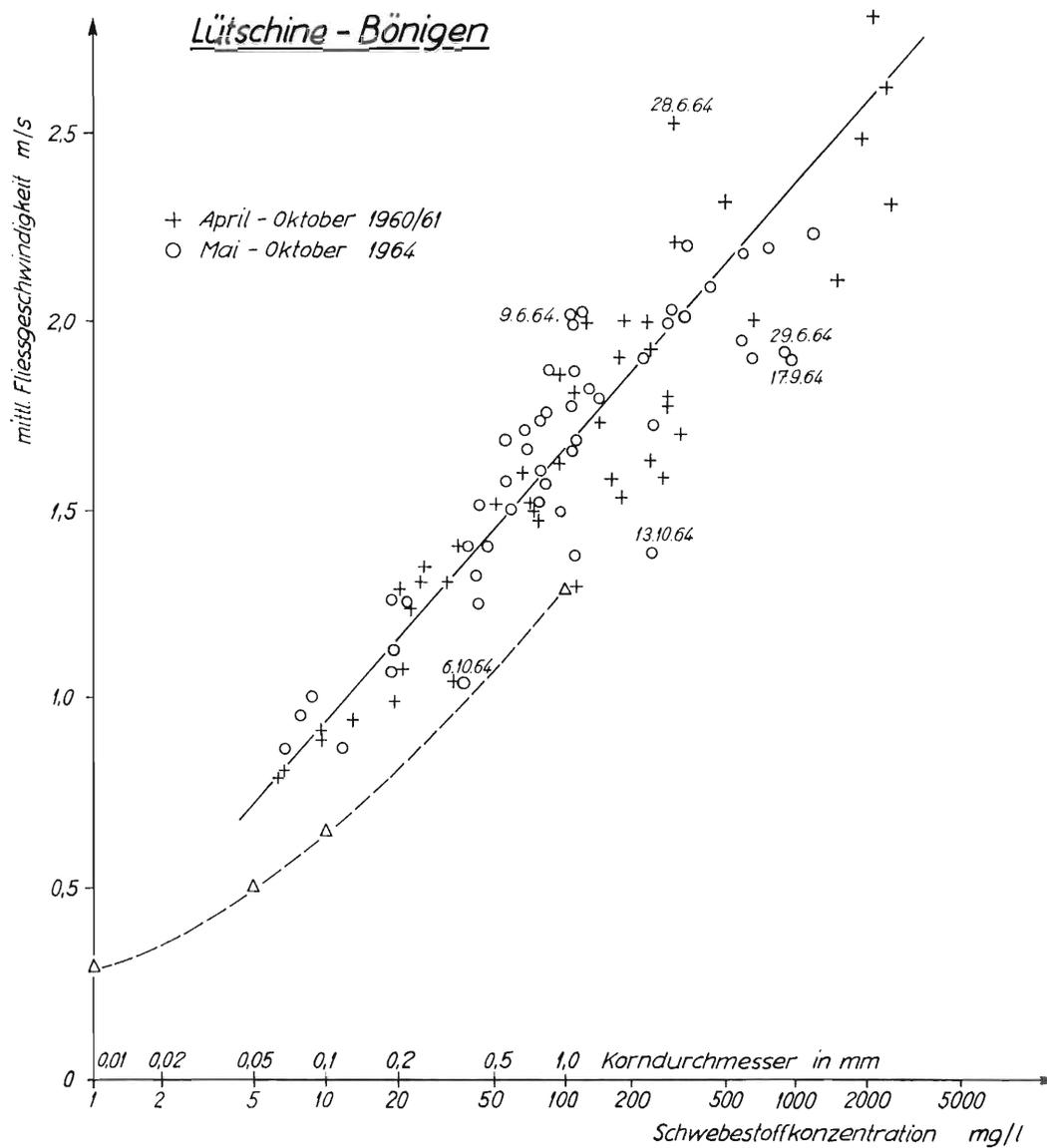


Abb. 15. Schwebestoffkonzentration (obere Kurve) und Grenz Korngrößen (gestrichelte Kurve, aus [15]) in Abhängigkeit von der mittleren Fließgeschwindigkeit.

Tab. 12. Abweichende Werte aus graph. Darstellung Abb. 15 (Lütschine)

Datum	Besonderheit	Ursache der Abweichung
28. 6. 61 u. 9. 6. 64	Unterdurchschnittl. Konzentration	Abschwellen eines Hochwassers nach Monatsmax. (69,7 m ³ /s) am 27. 6. 61, resp. 48,2 m ³ /s am 8. 6. 1964
29. 6. u. 17. 9. 64	Überdurchschnittl. Konzentration	Wesentliche Steigerung des Abflusses v. 29,8 m ³ /s am 26. 6. auf 38,1 am 29. 6. 64 und von 25,0 m ³ /s am 15. 9. auf 45,2 m ³ /s am 17. 9. 64

Tab. 11 und 12 zeigen, daß eine Abflußsteigerung im allgemeinen eine überdurchschnittliche, ein Abflußrückgang eine unterdurchschnittliche Schwebestoffkonzentration im Gefolge hat, was zu erwarten war. Allerdings finden sich auch Abweichungen für die wir keine Erklärungen geben können, so z. B. am 6. und 13. 10. 1964. Ganz allgemein konnten wir aber im Oktober auch bei mäßiger Wasserführung fast immer eine verhältnismäßig große Schwebestoffkonzentration feststellen.

VI. Jahrestotal der Schwebestoffe

1. Allgemeine Betrachtungen

Im folgenden sei der Versuch gewagt, die Gesamtmenge der dem offenen See zugeführten und in demselben zur Sedimentation gelangten Suspensionen abzuschätzen. Aus dem umfangreichen Material der Jahre 1958—1965 wählen wir dasjenige der Jahre 1959, 1961 und 1963 aus, und zwar aus folgenden Gründen:

1959 brachte der Alpennordseite ein sehr hohes Temperaturjahresmittel, das in den letzten 2 Jahrhunderten nur von demjenigen der Jahre 1947 und 1949 übertroffen wurde (siehe [53]). Die Niederschläge blieben weit unter dem Durchschnitt und die Sonnenscheindauer zeigte einen Überschuß von 10—15% gegenüber anderen Jahren. 1961 brachte ebenfalls überdurchschnittliche Temperaturen und unterdurchschnittliche Niederschläge. Während aber Mai und Juli 1959 ausgesprochen warm und trocken waren, finden wir für diese Monate 1961 niedrige Temperaturen (siehe [53]). 1963 zeichnete sich durch außerordentlich kühlen Jahresbeginn („Seegfrörni“ auf fast allen Schweizerseen) und durch reichliche Niederschläge im Sommer, namentlich im Juni und im August aus (siehe [53]). Es handelt sich also um drei charakteristische und, bezüglich Witterung, unterschiedliche Jahre. In Tafel V und VI finden wir den Abfluß- (Tagesmittel bei Brienzwiler und Gsteig) und den Temperaturverlauf in den betreffenden Jahren von März bis Oktober graphisch dargestellt.

2. Berechnungsmethode

a) April bis Oktober. Die Kurven der Abb. 13—14 dienten uns als Grundlage für die Berechnungen. Die aus den Hydrographischen Jahrbüchern abgelesenen Tagesmittel des Abflusses wurden mit den betreffenden Schwebestoffkonzentrationen und mit der Zahl der Sekunden eines Tages multipliziert, woraus sich die in Tab. 13—18 eingetragenen täglichen Schwebestoffmengen ergeben.

b) Wintermonate. Wie bereits erwähnt (S. 23/24) besteht der auf Abb. 13 und 14 dargestellte Zusammenhang zwischen Abflußmenge und Schwebestoffkonzentration bei geringem Abfluß, wie er in den Wintermonaten vorherrschend ist, nicht. In Tab. 19 und 20 wurden die Monatsmittel aus allen zur Verfügung stehenden Schwebestoffproben der Wintermonate der Jahre 1962—1966 eingetragen und das Monatsmittel aus 4 Jahren als Berechnungsgrundlage gewählt. Die Multiplikation dieser Konzentrationen mit den Abflußmengen der Monate ergibt die in Tab. 21 und 22 aufgeführten Monatssummen des Schwebestofftransportes.

Tab. 13. Tagessumme der Schwebstoffe in t, Aare bei Brienzwiler, 1959

	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt.
1	24,7	19,3	220,0	1032,9	441,0	168,4	47,6
2	26,8	17,3	181,0	592,2	127,9	136,5	46,2
3	30,7	7,2	187,2	516,1	734,0	127,1	37,5
4	24,3	54,4	296,0	251,4	668,8	136,5	14,6
5	15,8	102,6	545,1	251,4	633,6	102,3	67,8
6	41,8	86,1	266,2	726,5	655,5	34,9	72,3
7	71,5	28,3	214,6	689,4	687,4	77,7	67,8
8	40,8	131,2	558,0	620,0	442,0	102,8	59,8
9	32,2	72,2	599,0	922,7	97,6	106,7	67,8
10	38,7	78,0	1144,5	941,5	626,1	106,7	45,9
11	19,3	226,8	367,1	1247,6	1080,0	99,7	10,7
12	20,3	361,2	275,8	962,2	899,5	62,7	51,8
13	29,4	263,1	66,4	1283,6	491,5	29,3	44,0
14	61,4	179,2	93,3	1221,0	510,7	76,0	49,7
15	77,7	190,8	405,1	8350,0	948,6	99,3	38,0
16	121,9	55,0	441,0	2458,6	132,0	72,4	28,7
17	98,8	33,0	428,2	702,9	367,1	319,1	20,1
18	34,1	75,5	634,4	303,7	424,8	71,8	9,9
19	23,2	302,2	671,3	210,3	479,3	33,7	28,0
20	44,2	359,4	576,8	489,2	421,9	20,1	29,3
21	51,0	431,6	300,7	553,2	373,1	43,9	18,9
22	32,0	409,4	764,5	489,2	186,1	64,7	20,1
23	25,8	300,0	851,5	620,1	62,5	64,7	17,6
24	25,8	210,9	730,5	621,4	241,2	61,8	12,3
25	17,4	315,1	877,2	307,2	533,6	54,0	5,7
26	12,7	409,4	680,4	252,7	356,1	34,1	24,8
27	35,2	388,5	1521,0	489,2	319,0	22,3	24,2
28	48,6	160,0	486,0	1590,4	422,9	43,8	27,8
29	38,7	326,4	2934,8	1971,2	163,5	33,9	16,0
30	70,2	168,9	2078,3	1530,0	98,8	32,1	14,2
31		62,7		2412,8	185,6		8,9
	1235,0	5825,9	19375,9	34610,6	13811,7	2439,0	1028,0

Tab. 14. Tagessumme der Schwebstoffe in t, Lütschine bei Bönigen, 1959

	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt.
1	4,1	33,2	51	904	199	136	40,7
2	4,1	25,0	49	734	199	104	32,6
3	5,1	16,3	7,9	649	199	62	25,6
4	6,8	20,2	254	649	171	119	15,7
5	9,9	30,8	553	1105	183	104	12,2
6	13,4	41,0	680	1999	242	86,3	9,2
7	17,1	65,2	1251	1898	369	73,2	9,2
8	9,2	161	1120	2280	641	62,8	7,7
9	9,7	187	878	3490	708	73,2	7,8
10	7,0	172	1118	4370	1028	104	7,0
11	5,1	283	243	5510	742	118	9,2
12	3,4	383	113	4220	961	123	7,0
13	5,7	207	83,1	4110	383	154	4,1
14	10,8	247	146	2730	399	169	3,2
15	21,0	94,0	277	16100	3180	130	3,1
16	24,1	6,3	411	4070	582	108	3,1
17	24,1	6,0	453	1336	299	406	3,0
18	15,3	94,0	710	1067	319	118	2,3
19	40,0	138	870	1067	422	91,7	2,2
20	24,0	234	938	1067	433	81,0	2,8
21	11,3	338	1170	1067	273	62,8	2,3
22	8,7	290	1092	1067	321	81,3	2,8
23	9,0	411	922	1145	452	149	2,8
24	10,7	462	922	1035	578	142	2,1
25	13,4	352	812	1198	799	138	2,0
26	17,2	289	898	877	852	112	1,9
27	17,2	247	4080	549	962	249	2,0
28	22,7	222	1590	1209	1820	132	2,5
29	22,2	199	4190	1770	660	67	2,2
30	44,4	182	2182	852	279	54,8	2,0
31		7,2		455	183		2,0
	436,7	5443,2	28064,0	70579	18838	3611,1	232,3

Tab. 15. Tagessumme der Schwebestoffe in t, Aare bei Brienzwiler, 1961

	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt.
1	20,4	23,2	156	1635	227	346	60,3
2	12,2	173	192	1668	854	261	53,4
3	18,0	164	66,4	3230	1083	208	46,4
4	54,7	176	53,4	2820	572	328	45,4
5	82,3	196	215	2640	387	336	46,4
6	107	161	300	920	630	215	46,4
7	127	142	300	902	1248	139	62,2
8	63,6	212	300	564	1343	152	26,2
9	91,4	121	46,1	493	1420	127	23,0
10	84,9	119	660	1248	1855	96,2	28,8
11	56,1	37,3	2288	1888	4780	119	25,6
12	43,2	104,6	395	1635	9400	124	23,4
13	48,2	98,6	547	5680	5810	170	24,6
14	60,3	57,5	784	388	2162	182	17,6
15	51,0	287	324	173	854	291	15,8
16	27,4	336	257	139	1580	212	29,2
17	27,4	168	255	346	2820	152	35,2
18	45,4	137	295	358	2330	218	38,2
19	35,2	98,6	547	406	2420	114	29,2
20	51,0	54,7	1101	1248	1224	104,6	24,2
21	54,7	28,4	985	432	950	81,6	25,6
22	26,5	47,6	1056	116	1155	62,2	9,1
23	32,3	202	1029	98	1370	41,2	23,4
24	57,5	161	547	196	1420	60,3	18,6
25	49,2	182	854	250	1029	129	19,4
26	47,6	186	1756	192	406	139	16,4
27	43,2	117	4200	182	206	173	21,5
28	38,2	86,6	5080	416	421	80,8	18,0
29	37,3	218	2420	2990	399	111	6,3
30	38,2	228	1822	228	444	152	15,0
31		255		265	480		13,4
	1531,4	4578,1	28830,9	33746	51279	4924,9	888,2

Tab. 16. Tagessumme der Schwebestoffe in t, Lütschine bei Bönigen, 1961

	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt.
1	5,2	42,4	202	2812	352	492	99,3
2	9,6	40,0	183	4426	1222	557	60,5
3	11,6	42,4	175	4562	1536	670	43,1
4	11,0	67,1	139	5276	634	610	33,7
5	15,8	133	127	2024	944	393	30,2
6	24,8	352	249	880	1710	281	30,2
7	48,1	352	393	616	1536	180	123
8	74,4	288	522	522	2140	105	20,2
9	175	220	992	472	4302	65,9	8,7
10	121	151	1293	408	4834	47,2	7,1
11	109	93,6	723	634	25400	44,5	7,1
12	70,0	63,5	537	1452	21900	44,5	6,0
13	74,4	61,5	1046	3346	3022	49,9	5,3
14	67,1	80,8	1202	574	816	79,6	5,3
15	80,8	175	800	451	426	271	4,5
16	44,5	205	723	211	426	252	4,2
17	34,4	168	744	168	737	271	4,2
18	42,2	151	1019	151	652	199	3,9
19	34,4	93,6	1912	237	380	141	2,8
20	34,4	67,1	3814	912	716	129	2,7
21	30,9	55,5	7452	364	71	111	2,2
22	42,4	42,4	4402	220	226	89,8	2,2
23	50,8	42,4	3398	168	190	95,5	2,1
24	63,5	61,5	2672	237	147	99,3	2,1
25	55,5	84,4	4302	277	135	79,6	3,1
26	70,0	103	6049	288	147	60,5	3,5
27	55,5	202	8900	376	252	57,5	3,9
28	46,3	203,7	7052	702	332	89,8	3,7
29	48,1	175	2812	4834	344	95,5	3,0
30	55,5	163	2612	574	426	208	2,2
31		193		312	426		2,1
	1606,2	4172,9	66446	38486	76381	5869,1	532,1

Tab. 17. Tagessumme der Schwebestoffe in t, Aare bei Brienzwiler, 1963

	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt.
1	15,6	213	708	760	160	73,8	34,6
2	13,4	162	476	896	134	213	39,4
3	8,8	173	291	1191	150	318	20,9
4	8,1	77,7	465	860	419	263	16,6
5	6,4	44,3	635	584	830	541	22,3
6	12,4	109	461	213	1092	399	7,3
7	1,8	257	551	440	1668	381	234
8	13,8	324	447	2050	1734	86,6	150
9	16,6	410	194	1307	1191	399	49,8
10	32,6	230	436	1146	778	296	43,2
11	65,0	121	842	1668	584	95,1	39,4
12	16,2	48,7	950	1635	2260	58,2	16,6
13	11,8	151	537	564	830	48,7	10,9
14	7,6	308	1569	253	605	56,8	28,4
15	5,5	173	374	564	992	62,9	39,4
16	24,6	194	144	635	9400	160	42,4
17	47,9	253	182	501	2900	501	29,2
18	65,0	98,6	527	576	1240	318	23,8
19	42,4	66,4	1888	465	584	277,5	5,0
20	52,8	226	3780	527	129	291	1,8
21	44,3	150	2480	584	296	160	20,4
22	86,6	173	2375	1470	182	65	20,9
23	116	95,1	3000	1380	234	230	19,0
24	166	173	1536	1602	182	436	17,4
25	69,4	141	1264	2050	144	182	12,4
26	62,9	182	1264	2218	488	95,1	2,4
27	60,3	576	2176	1216	932	141	0,8
28	65,0	650	9500	399	1723	49,8	15,0
29	173	978	1547	708	436	14,6	25,0
30	188	1536	842	1470	253	49,8	20,9
31		1013		2580	144		23,8
	1499,8	9306,8	41441	32512	32694	6262,9	1033,0

Tab. 18. Tagessumme der Schwebestoffe in t, Lüttschine bei Bönigen, 1963

	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt.
1	2,3	388	1608	1172	1282	113	19,6
2	2,2	380	1202	1282	1282	196	16,2
3	2,2	348	840	1304	2140	125	18,7
4	2,7	111	808	1102	4106	89,8	13,3
5	2,9	62,5	730	1102	1897	256	26,0
6	3,3	56,5	586	730	1658	131	11,9
7	3,9	84,4	944	1262	1524	175	31,2
8	4,2	153	1282	4302	1440	119	231
9	5,4	246	730	1440	646	101,2	50,8
10	16,6	246	689	944	332	82,0	28,9
11	89,8	147	1152	1162	384	78,4	19,5
12	40,0	89,8	2024	864	4364	78,4	15,0
13	27,8	86,8	1608	522	1524	68,4	12,5
14	24,8	217	4550	689	1212	89,8	9,3
15	20,2	107	1392	646	3132	155	7,8
16	20,8	95,5	552	1282	1852	231	6,8
17	53,5	68,4	441	1392	952	161	6,5
18	76,0	79,6	848	1912	497	137	6,0
19	49,0	95,5	4797	1392	205	168	5,3
20	76,0	79,6	10050	1658	205	229	5,1
21	89,8	84,4	8350	2672	249	196	4,5
22	117	196	9110	3502	125	161	4,2
23	111	308	10170	7502	304	113	4,0
24	107	226	4190	4986	417	119	3,6
25	76,0	284	2980	3710	398	231	3,4
26	65,9	552	2208	6960	604	52,6	3,0
27	101,2	760	3398	3320	992	52,6	2,7
28	135	1202	10265	2024	646	45,4	2,4
29	208	1912	3580	1326	187	24,2	2,2
30	308	2536	1645	1142	113	21,2	2,1
31		2140		1212	78		2,1
	1842,5	13342,0	92729	64515	34747	3800,0	856,5

Tab. 19. Schwebestoffkonzentration (mg/l) der Lütschine in Gsteig (Monatsmittel)

Jahr	Jan.	Febr.	März	Nov.	Dez.
1962				7,30	8,21
1963	5,76	6,99	16,37	18,24*	4,35
1964	2,61	3,50	20,04		3,06
1965	3,99	15,90	33,80	6,34	21,60
1966	10,00	32,30	9,80		
Mittel aus 4 Jahr.	5,59	14,67	20,00	10,63	9,30

Tab. 20. Schwebestoffkonzentration (mg/l) der Aare in Brienzwiler (Monatsmittel)

Jahr	Jan.	Febr.	März	Nov.	Dez.
1962				24,7	27,4
1963	35,2	26,1	17,1	16,7	23,7
1964	24,7	25,9	26,2	40,9	24,7
1965	35,5	32,7	26,3	26,1	25,0
1966	38,5	30,4	27,0		
Mittel aus 4 Jahr.	33,5	26,3	24,1	27,1	25,2

Tab. 21. Monatssumme des Schwebestofftransportes der Lütschine bei Gsteig in t während den Wintermonaten

Jahr	Jan.	Febr.	März	Nov.	Dez.
1959	59,0	127,1	318,4	120,0	88,7
1961	46,4	180,0	426,1	108,5	241,8
1963	40,1	89,8	223,5	182,5	82,7
Mittel der 3 Jahre	48,5	132,3	322,7	137,0	137,7

Tab. 22. Monatssumme der Schwebestoffe der Aare bei Brienzwiler in t während den Wintermonaten

Jahr	Jan.	Febr.	März	Nov.	Dez.
1959	1750,6	1476,6	1356,3	1305,7	1222,4
1961	1651,9	1190,2	1524,4	1305,7	1708,7
1963	1373,5	821,1	775,1	1151,1	1188,6
Mittel der 3 Jahre	1592,0	1162,9	1218,9	1254,2	1373,2

3. Diskussion der Ergebnisse

a) Die Tabellen 13—22 und die graphische Übersicht in Abb. 16 zeigen mit aller Deutlichkeit, daß für die Schwebestoffführung von Aare und Lütschine nur die Sommermonate, die Zeit der Schneeschmelze im Hochgebirge und der Gewitterregen, von Bedeutung sind. Auf die Monate Juni bis August entfallen in den Jahren 1959, 1961 und 1963 von der Jahressumme an Schwebestoffen 79%, 81 % und 77% bei der Aare, 92%, 93% und 91% bei der Lütschine. Der größere Prozentsatz bei der Lütschine läßt sich gut durch den gleichmäßigen, über das ganze Jahr verteilten Abfluß der Aare infolge der Staubecken im Grimselgebiet erklären.

b) Erstaunlich erscheint, daß im außerordentlich warmen Sommer 1959 von der Aare bloß eine Jahresfracht von 85438 t, von der Lütschine eine solche von 127912 t dem See zugeführt wurden, während die entsprechenden Zahlen für die Jahre 1961 und 1963 133160 t und 130058 t für die Aare, 194496 t und 212450 t für die Lütschine ergeben. Es scheint also, daß ein überdurchschnittlich warmer Sommer mit einem Überschuß an Sonnenscheindauer nicht wesentlich mehr Schnee im Hochgebirge zum Abschmelzen zu bringen vermag als ein normaler. Im Gegenteil zeigt das feuchte Jahr 1963 für die Lütschine das Maximum der Schwebestofffracht aus den drei Vergleichsjahren.

Andererseits könnte die Erklärung dieser Erscheinung auch darin liegen, daß der Abfluß 1959 regelmäßiger erfolgte als 1961 und 1963 und daß, wie wir gesehen haben, vor

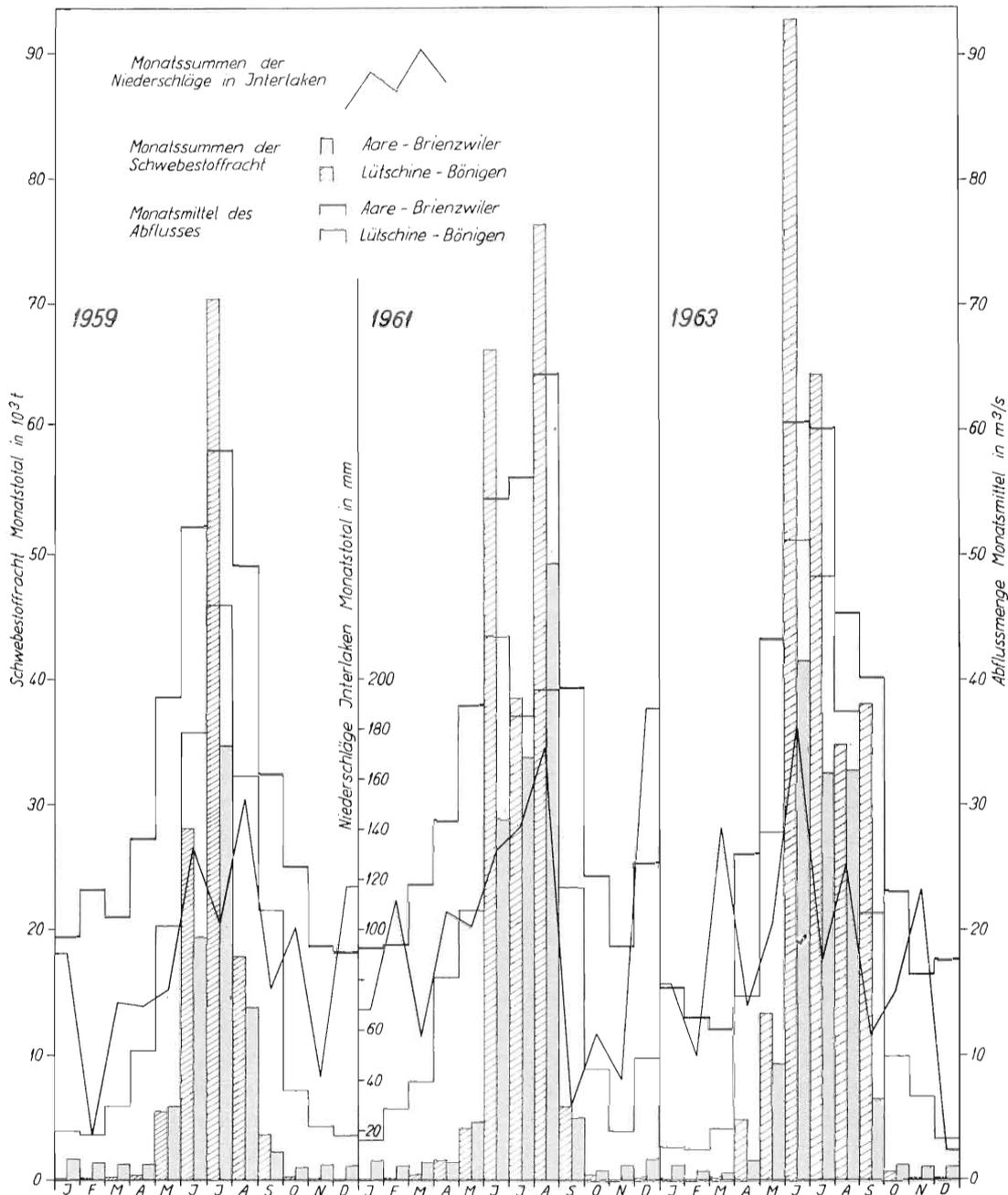


Abb. 16. Monatstotal der Niederschläge in Interlaken sowie des Abflusses und der Schwebstofffracht von Aare und Lüttschine 1959, 1961 und 1963.

allem die Hochwasserspitzen für den Schwebestofftransport ins Gewicht fallen. Die mittlere sekundliche Abflußmenge für das Jahr 1959 beträgt nämlich bei der Aare 32,0 m³/s, also gleichviel wie 1963.

c) Vergleichen wir noch die Jahressummen der Schwebestofffracht von Aare und Lüttschine und die Jahresmittel der sekundlichen Abflußmengen. Im Mittel unserer drei Vergleichsjahre zeigte die Aare ein Abflußmittel von 32,4 m³/s, die Lüttschine ein solches

von 17,8 m³/s. Überraschen muß deshalb die Tatsache, daß die Lüttschine eine viel größere Schwebstofffracht aufweist als die Aare, nämlich im Mittel 177 955 t gegenüber 116 219 t pro Jahr. Neben der größeren Steilheit des Einzugsgebietes der Lüttschine liegt hier die Ursache zweifellos in der Wirkung der Aarestauseen als Klärbecken für Schwemmmaterial. Auch mag die größere Verwitterungsanfälligkeit des Gesteinsmaterials aus dem Einzugsgebiet der Lüttschine eine Rolle spielen.

d) Untersuchungen des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft [14] ergaben für die Jahre 1905—1928, also vor Inbetriebnahme der Grimselstaubecken, eine mittlere Schwebstofffracht von 257 269 t und von 1929—1932 185 328 t bei Anwendung eines konstanten Faktors $c_m/c_0 = 1,39$ (c_m = mittlere Konzentration des Schwebstoffes über das ganze Profil, c_0 = Konzentration an der Oberfläche). Wurde ein variabler Koeffizient c_m/c_0 , der bei Abflußzunahme ansteigt, verwendet, so lauten die entsprechenden Zahlen 306 802 t und 224 640 t. Hier muß erwähnt werden, daß bei den genannten Untersuchungen Material mit Korngrößen von 0—2,4 mm als Schwebstoff betrachtet wurde, während unsere Erhebungen nur die feinsten Schwebstoffe zu erfassen trachteten, nämlich diejenigen, die außerhalb des Flußdeltas zur Sedimentation gelangen. Wie wir zeigten, machen diese den fast ausschließlichen Schwebstoffanteil an der Oberfläche aus und sind dank ihrer Feinheit über den ganzen Flußquerschnitt ziemlich gleichmäßig verteilt. Messungen des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft vom 18. 6., 6. 7., 10. 7. 1936 und vom 21. 5. 1937 (siehe [14], S. 97) hatten ergeben, daß der Koeffizient c_m/c_0 im Mittel bei 2,27 lag. Vergleichen wir nun die vom Amt für Wasserwirtschaft ermittelten mittleren Schwebstoffmengen der Aare pro Jahr (224 640 t) mit unseren Erhebungen (116 219 t), so ergibt sich das Verhältnis 1 : 1,9. Das Mittel von $c_m/c_0 = 1,39$ und $c_m/c_0 = 2,27$ ergibt 1,83.

Berücksichtigen wir noch die 9% feinsten Materials, die nach Angaben [14, S. 100] durch die Filtermaschen schlüpfen, die aber bei den von uns verwendeten Membranfiltern mitbestimmend waren, so ergäbe sich sogar ein Koeffizient von ca. 2. Wir finden also eine gute Übereinstimmung der Messungen von 1936/37 mit den unsrigen bezüglich der Jahresfracht feinsten Schwebstoffpartikel in der Aare.

e) Bedeutung der weiteren Zuflüsse. Wollen wir die Gesamtmenge der dem See zugeführten Schwebstoffe abschätzen, so muß auch die Rolle der Nebenbäche mitberücksichtigt werden. Beidseits des Sees finden wir vorwiegend Wildbäche, die bei Gewitterregen plötzlich anschwellen und dem See bei dieser Gelegenheit gewaltige Schuttmassen zuführen; doch handelt es sich meist um ziemlich grobes Material, das rasch absinkt und nur zum geringsten Teil dem offenen See zugeführt wird. Eine Ausnahme macht in dieser Beziehung der Gießbach, der auf längerer Strecke wenig Gefälle zeigt und sich gegenüber den andern Bächen durch eine verhältnismäßig regelmäßige Wasserführung auszeichnet. Das Einzugsgebiet von 164 km² der Nebenbäche macht zirka 15% des gesamten Einzugsgebietes des Sees aus. Wir werden also zur Berechnung der Gesamtmenge der dem See zugeführten Schwebstoffe diesen Prozentsatz zurechnen, sind uns aber der verhältnismäßig großen Unsicherheit bewußt.

f) Schwebstoffabtransport durch die Aare bei Interlaken. Wie im zweiten Teil dieser Arbeit gezeigt wird, schiebt sich das Zuflußwasser in bestimmten, jahreszeitlich wechselnden Tiefen des Sees ein. Die feinsten Schwebstoffe werden mitgeführt und in der betreffenden Tiefe einigermaßen gleichmäßig über die ganze Schichtfläche des Sees verteilt. Der Abfluß vermag dem See nur das wärmste und meist schwebstoffarme Oberflächenwasser zu entziehen (siehe NYDEGGER [42], S. 52). Es ist deshalb nicht verwunderlich, wenn wir in Tab. 23 finden, daß im Mittel aus drei Jahren der jährliche Schwebstoffabtransport durch die Aare in den Thunersee nur 7015 t oder ca. 2% der Zufuhr ausmacht.

Stellt man demgegenüber die Unsicherheit der zur Verfügung stehenden Untersuchungsmethoden, so dürfen diese 2% vernachlässigt werden, und wir können behaupten, daß praktisch die gesamte, dem See zugeführte Schwebestoffmenge in diesem zur Sedimentation gelangt.

Tab. 23. Schwebestoffkonzentration (mg/l) und Monats-Summe (in t) der Aare bei Interlaken (Mittel aus den Jahren 1961—1963)

	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni
Konzentration	1,84	1,76	1,83	2,33	4,24	5,22
Monatssumme	118,2	110,1	105,7	238,7	716,5	1666,2
	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Konzentration	6,54	4,38	3,22	1,98	2,20	3,34
Monatssumme	1624,9	1212,6	572,6	163,1	162,6	327,1

g) Schlußbetrachtung. Im Mittel der Jahre 1959, 1961 und 1963 wurden also dem offenen See folgende Feinstschwebestoffmassen zugeführt:

Aare	116 219 t
Lütschine	177 955 t
Nebenbäche (15% v. Aare und Lütschine)	44 125 t
Total	338 299 t

Über das „Raumgewicht“ der sedimentierten Feststoffe ist schon viel diskutiert worden. Wir verweisen diesbezüglich auf die Ausführungen von KRAPP [31] sowie vor allem auf die ausführlichen Untersuchungen in Lit. [43] und legen unseren Berechnungen die Zahlen, die vom Eidg. Amt für Wasserwirtschaft [14] auf S. 106, wonach 1 m³ Trockengeschiebe 2,1 t trockenes Material und 1 m³ Deltaschwebestoff, welcher seit längerer Zeit abgelagert ist, 1,58 t trockenes Material enthält, zugrunde. Die dem See pro Jahr zugeführte und abgelagerte Schlammmenge beträgt also $\frac{338 \cdot 10^3 \text{ t}}{1,58 \text{ t/m}^3} = 214 \cdot 10^3 \text{ m}^3$.

Verteilen wir also in Gedanken diese Schwebestoffmenge gleichmäßig auf eine Fläche von 17 km² (Horizontalfläche in mittlerer Tiefe), so ergibt sich eine Sedimentschicht von $\frac{214 \cdot 10^3 \text{ m}^3}{17 \cdot 10^6 \text{ m}^2} = 12,6 \text{ mm}$ Dicke.

Nach Angaben des Amtes für Wasserwirtschaft [14, S. 106] wurden 1908 vor Iseltwald Schlammkästen versenkt und folgende Schlammablagerungen gefunden: 22. April bis 5. Dez., während 227 Tagen, 20 mm. 11. Dez. 1908 bis 4. Mai 1909, während 144 Tagen, 2 mm. 4. Mai bis 15. Nov. 1909, während 144 Tagen, 18 mm. 15. Nov. 1909 bis 2. Juni 1910, während 199 Tagen, 4 mm. Die Abweichung von unseren Berechnungen (22 statt 12,6 mm) ist verhältnismäßig groß, läßt sich aber teilweise erklären durch die Schlammablagerung in den seither im Grimselgebiet errichteten Stauanlagen.

Daß der Schlamm im übrigen ziemlich gleichmäßig auf den Seeboden verteilt wird, kann anhand jeder Tiefenkurvenkarte des Brienersees an der Flachheit des Seebodens festgestellt werden. Die Ursache dieser gleichmäßigen Verteilung werden wir im dritten Teil dieser Arbeit finden.

Anhang zum I. Teil

Auszug aus der „Anleitung für die Bestimmung des Schwebestoffgehaltes im Wasser 1966“ der Unterabteilung für Landeshydrographie des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft

1.8. Membranfilter gewichtskonstant, Typ MF 100

Sartoriuswerke AG, Göttingen BRD.

Die Membranfilter haben eine runde Form von 50 mm \varnothing .

Porendurchmesser: Maximalwert 1 μ (0,001 mm).

Mittelwert 0,6 μ (0,0006 mm).

Trockengewicht: 60—100 mg.

Schichtdicke: ca. 120 μ (0,12 mm).

Temperaturbeständigkeit: kurzzeitig bis 130° C.

Wasserdurchlässigkeit (dest. Wasser): ca. 1,5 l/min mit Vakuumpumpe.

Gewichtsverlust: ca. 1,5 mg nach Filtration von 1 l dest. Wasser.

2.3. Volumenbestimmung der Wasserproben

Das Volumen der Proben wird durch Wägung bestimmt. Alle Flaschen werden vor dem Gebrauch einmal abgewogen, numeriert und gemäß ihrem Gewicht in Gruppen eingeteilt. Die Gewichte der Flaschen der gleichen Gruppe unterscheiden sich um weniger als 2 g (ca. 2⁰/₁₀₀ des Flaschengewichtes mit Inhalt). Für jede Gruppe wurde ein Tariergewicht angefertigt, mit welchem die Sartoriuswaage jeweils vortariert wird. Diese Tariergewichte und die dazugehörigen Flaschen tragen spezielle Kennzeichen (Punkte, Kreuze usw.). Da wir nicht reines Wasser mit 4° C abwägen, entsteht ein Volumenfehler, der jedoch in unsern Fällen 5⁰/₁₀₀ im Extremfall nicht überschreitet.

2.4. Aufbereitung der Filter

Die Membranfilter, die in erster Linie für chemische Analysen und medizinische Untersuchungen hergestellt werden, bedürfen für die gewichtsmäßige Bestimmung von Schwebstoffen einer Aufbereitung. Versuche vor mehreren Jahren mit verschiedenen Filtertypen haben ergeben, daß beim erstmaligen Durchlassen von dest. Wasser erhebliche Gewichtsverluste von ca. 19 mg (20%) entstehen können. Durch nachträgliches Trocknen und wiederholtes Durchlassen von dest. Wasser entstand noch einmal ein Gewichtsverlust von 13 mg. Beim dritten Prozeß betrug der Gewichtsverlust nur noch 2 mg. Normale Filter enthalten einen Weichmacher, der dem Filter Geschmeidigkeit verleiht, der aber beim Filtrieren ausgewaschen wird und somit einen Gewichtsverlust verursacht. Nach Rücksprache mit dem Lieferwerk konnten wir weichmacherfreie und somit annähernd

gewichtskonstante Filter erhalten. Diese Filter verlieren beim ersten Durchlauf von dest. Wasser im Mittel noch 1,5 mg oder 1,8% ihres Trockengewichtes. Im zweiten Prozeß stellten wir nur noch einen Gewichtsverlust von 0,1 mg fest, so daß wir die Aufbereitung der neuen Filter auf einen Prozeß reduzieren können.

2.5. Trocknung der Filter und der Schwebestoffe

Vor jeder Wägung müssen die leeren Filter oder die Filter mit dem Rückstand gut getrocknet werden. Wir haben Versuche mit verschiedenen Verfahren, nämlich mit Wärmelampe und mit Trockenschrank angestellt. Die Gegenüberstellung der beiden Verfahren hat ergeben, daß die Trocknung mittels Wärmelampe für uns aus folgenden Gründen vorteilhafter ist: Die nötige Trockenzeit mit der Wärmelampe ist kürzer, 45 Min. statt ca. 1 Stunde und 30 Min. mit dem Trockenschrank. Ferner verursacht die Wärmelampe eine Oberflächentemperatur von nur ca. 75° C, wogegen beim Trockenschrank an die für die Membranfilter zulässige Grenze von über 100° C gegangen werden muß. Der Trocknungseffekt im Schrank scheint gemäß Versuchen etwas besser zu sein; die Differenz übersteigt in der Regel 2⁰/₁₀₀ des Gesamtgewichtes nicht, so daß diese in der Größenordnung der Meßtoleranz bleibt.

Beim Trocknungsvorgang werden die nassen Filter auf der Aluminiumplatte unter die Trockenlampe gelegt. Der Abstand Lampe-Platte muß ca. 25 cm betragen, damit der Strahlenkegel die ganze Platte trifft. Nach einer Trocknungszeit von 45 Min. werden die Filter vor der Wägung an freier Luft abgekühlt. Die Filter nehmen dabei von der Außenluft wieder etwas Feuchtigkeit auf; nach ca. 20 Min. Abkühlzeit jedoch bleiben die Gewichte konstant. Es ist zu beachten, daß Türen und Fenster geschlossen bleiben, um eine möglichst konstante Luftfeuchtigkeit im Raum beibehalten zu können. Eine Abkühlung im Exikator hat sich nachteilig erwiesen, da die Waage wegen der Feuchtigkeitsaufnahme der Filter nicht genau abgelesen werden kann.

II. Teil

Untersuchungen über Einschichtung und Ausbreitung des Zuflußwassers mit einem Transmissionsmeßgerät

I. Meßmethodik und Untersuchungsgeräte

Es ist bekannt, daß das Zuflußwasser sehr bald nach seinem Eintritt in einen See bis in jene Tiefe absinkt, in welcher die entsprechende Dichte vorherrscht, und daß es sich dann in dieses „Dichteniveau“ einschichtet. Dabei wird diese Schicht gewissermaßen „aufgebläht“, die überliegenden Wassermassen werden gehoben und kommen zum Abfluß. Um den horizontalen Verlauf des eingeschichteten Wassers zu verfolgen, wurden schon verschiedene Methoden angewendet, die alle davon ausgehen, daß sich das Zuflußwasser zu gewissen Jahreszeiten in seinem Elektrolytgehalt resp. seiner Härte vom Seewasser unterscheidet. Wir erinnern an die Untersuchungen von AUERBACH und SCHMALZ [1], NÜMANN [41], DUSSARD [10] usw., auf die wir im dritten Teil dieser Arbeit näher eintreten werden. Diese Methoden haben alle den Nachteil, daß der Unterschied zwischen Zufluß- und Seewasser verhältnismäßig gering ist und zudem durch verschiedene Einflüsse (z. B. „biogene Entkalkung“) zustande kommen kann. Zudem ist ein gewaltiger Zeit- und Arbeitsaufwand notwendig, die Wasserproben an zahlreichen Stellen und aus verschiedenen Tiefen zu holen, in Flaschen abzufüllen und im Laboratorium zu analysieren. Um so erstaunlicher sind die Ergebnisse, die die genannten Forscher bereits vorlegen konnten.

Nachdem wir festgestellt hatten, daß die Trübungsstoffe, die dem See durch seine Zuflüsse zugeführt werden, monatelang im gleichen Niveau in Schwebelag bleiben, entschlossen wir uns mit Hilfe eines Transmissionsmeßgerätes den Verlauf des Zuflußwassers im Brienersee zu verfolgen. Diese Methode hat folgende Vorteile:

1. Der Unterschied in der Transmission des Zuflußwassers und des Seewassers ist in den meisten Seen außerordentlich groß.
2. Durch Verwenden von Farbfiltren kann leicht festgestellt werden, ob es sich um organische oder anorganische Trübungspartikel handelt (siehe [42]).
3. Die Vertikale an irgend einer Untersuchungsstelle des Sees kann gewissermaßen kontinuierlich „abgetastet“ werden. Mikrotrübungsschichten, Maximas und Minimas von Trübungshorizonten werden einwandfrei getroffen; während bei Probeentnahmen in bestimmten Abständen (meist alle 5 oder 10 m) dem Zufall überlassen bleibt, ob die wichtigsten Tiefen wirklich erfaßt werden.

4. Die Handhabung des Gerätes ist verhältnismäßig einfach und kann nach einiger Übung auch von einem Laien beherrscht werden.
5. Die Anwendung ist außerordentlich zeitsparend verglichen mit den bisherigen Methoden.

Alles Wesentliche über das verwendete Gerät zeigt Abb. 17.

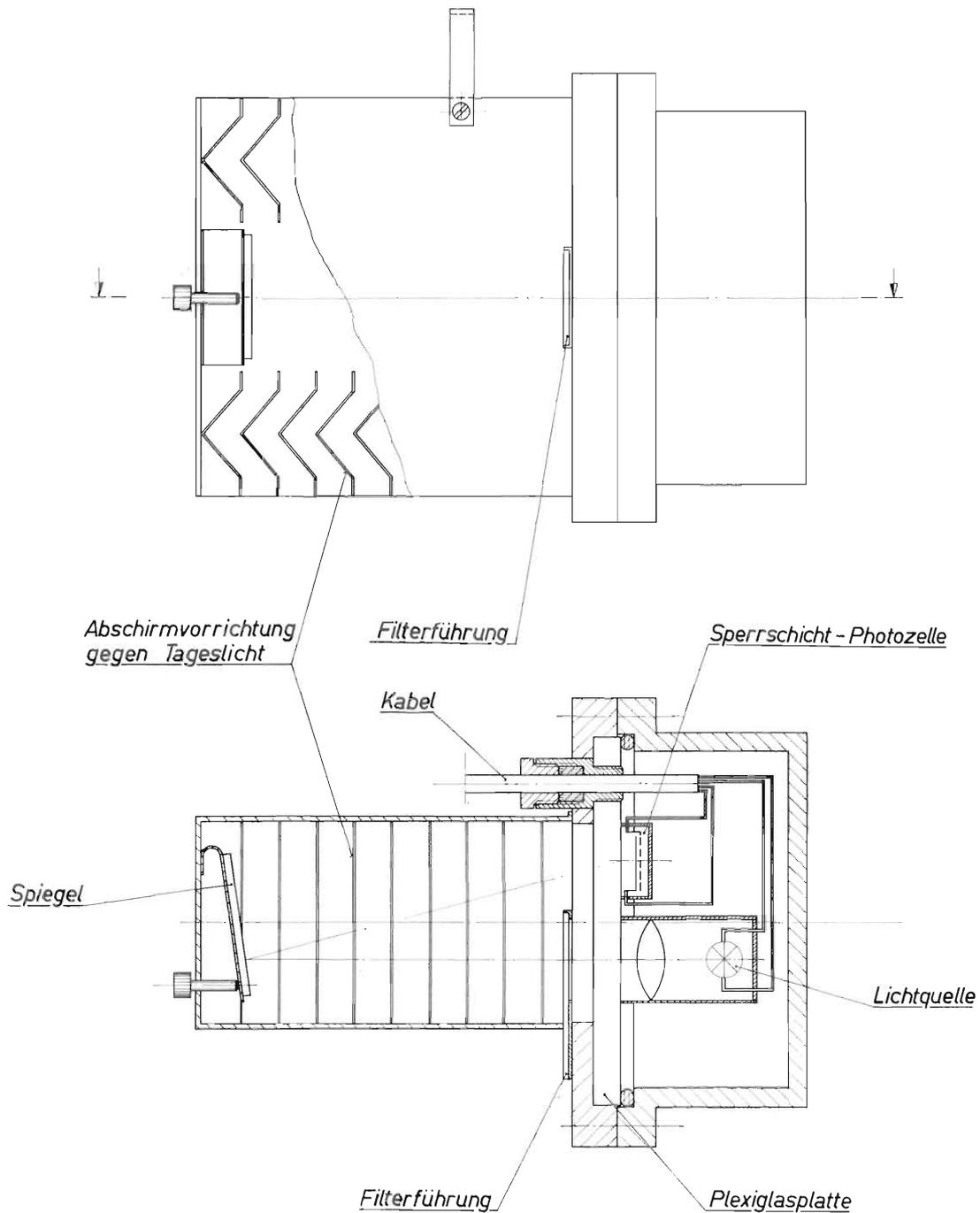


Abb. 17. Längsschnitte durch das verwendete Transmissionsmeßgerät.

Winkelförmig geknickte Blechstreifen gestatten dem Wasser beim Hinunterlassen des Gerätes ungehindert Durchtritt, während durch entsprechende Anordnung das Tageslicht abgeschirmt wird. Zuerst wurde mit einem selbstgebastelten Gerät, das einen Lichtweg von 1 m Länge aufwies, gearbeitet. Es darf dankend erwähnt werden, daß der auf Abb. 17 skizzierte Apparat auf Geheiß von Herrn Prof. Geiß und unter Leitung von Herrn Wolf in der mechanischen Werkstätte des Institutes für exakte Wissenschaften der Universität Bern angefertigt wurde. Der Lichtweg beträgt 50 cm und die Transmission wurde jeweils auf 1 m Lichtweg umgerechnet. Die genannte Konstruktion wurde später leicht abgeändert, indem wir die Lichtquelle in die Mitte der Plexiglasplatte rückten. Es hatte sich nämlich gezeigt, daß sich die betr. Platte durch den enormen Druck in größeren Tiefen, trotzdem sie durch Querverstrebungen verstärkt worden war, nach innen krümmte, wodurch die Richtung der austretenden Lichtstrahlen geändert und eine Extinktionszunahme vorgetäuscht wurde. Zu Beginn unserer Untersuchungen wurde die elektrische Energie für die Lichtquelle aus Trockenbatterien, die im dicht verschlossenen Gehäuse des Gerätes untergebracht waren, geliefert. Es zeigte sich aber, daß der Spannungsabfall der Batterien durch Abnutzung und vor allem durch die in größeren Tiefen vorherrschenden tiefen Temperaturen des Sees zu groß war. So entschlossen wir uns, der Lichtquelle den Strom durch ein Kabel aus einem Bleiakкумуляtor, der im Boot untergebracht war, zufließen zu lassen. Die auf den Tabellen und Abbildungen angegebenen Transmissionswerte sind in Prozenten der Lichtdurchlässigkeit in Luft zu betrachten.

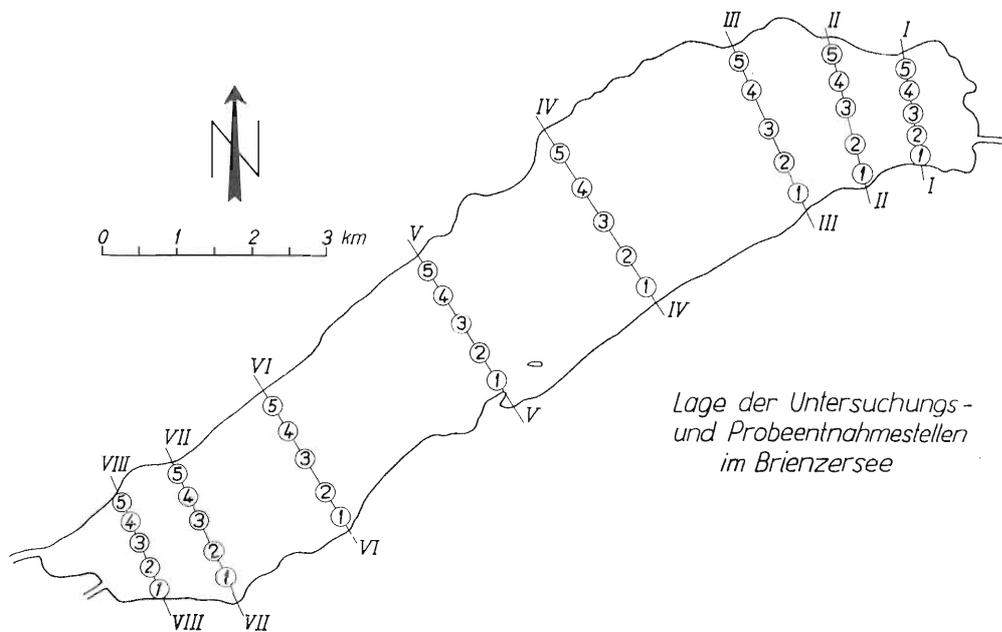


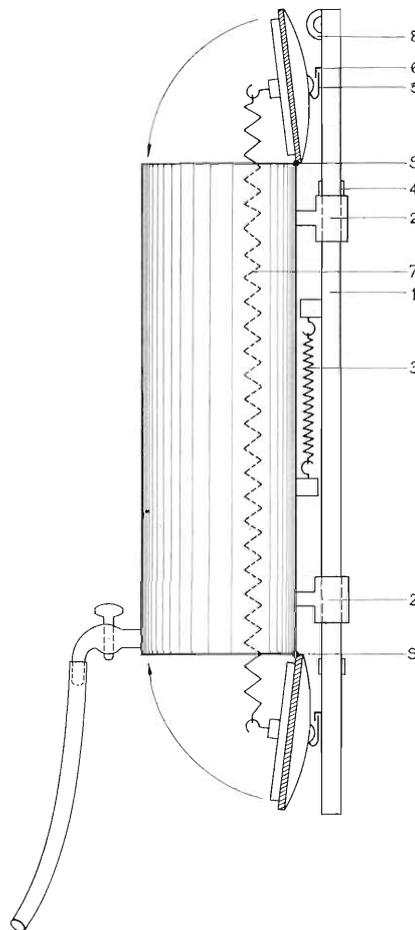
Abb. 18.

Unsere ersten Messungen führten wir in bestimmten Abständen in der Längsachse des Sees von der Aare- bis zur Lütschinemündung durch. Später zeigte sich, daß die Zahl der Untersuchungsstellen erweitert werden mußte, und es wurde das auf Abb. 18 ersichtliche Netz von 40 Punkten gelegt. Für die Ortsbezeichnungen der ersten Messungen wird dieses Netz aus praktischen Gründen auch verwendet, trotzdem es erst später entstand. Die Abweichungen in der genauen Lagebezeichnung, die dadurch entstehen, sind gering. Die

betreffenden Stellen ergaben sich jeweils als Schnittpunkte zweier Geraden, die durch markante Erhebungen in Ufernähe festgelegt werden konnten.

Wie LAUSCHER [33] theoretisch begründet hat und wie in Abb. 5 und auf S. 14 dieser Arbeit gezeigt und ausgeführt wurde, ist der Extinktionskoeffizient ϵ_x in der Formel $J_x = J_0 e^{-\epsilon_x}$ einer bestimmten Schichtdicke bei nicht allzugroßer Konzentration, wie sie in unserem Fall vorlag, direkt proportional der Menge der Trübungsstoffe. (Es bedeuten J_0 Lichtintensität bei Konzentration 0, z. B. dest. Wasser, J_x bei Konzentration x und e die Basis des natürlichen Logarithmensystems.) Um aus unseren Transmissionskurven auch quantitative Angaben über die in einem bestimmten Niveau vorhandenen Schwebstoffe zu finden, wurden zahlreiche Wasserproben, meist aus der Tiefe maximaler Extinktion, entnommen und ihr Schwebstoffgehalt, gemäß den Ausführungen auf S. 34/35, im Eidg. Amt für Wasserwirtschaft bestimmt. Die Entnahme geschah mit Hilfe der am Geogr. Institut der Universität Bern entwickelten Schöpfflasche (siehe Abb. 19).

- Abb. 19.
- S Scharniere
 - 1 Führungsschiene
 - 2 Führungsnuten
 - 3 Feder zum Emporziehen der Flasche
 - 4 Anstellnocken
 - 5, 6 Einklinkvorrichtung zum Offenhalten der Deckel
 - 7 Feder zum Schließen der Deckel
 - 8 Befestigungsring



Weil die Flasche durch einen energischen Ruck statt durch Fallgewicht geschlossen werden kann, wurde sie auch oft am Transmissionsmeßgerät befestigt und beim Hinunterlassen desselben in beliebiger Tiefe die Schließung ausgelöst, wodurch eine Korrelation von 100% in den Meß- und Entnahmetiefen erreicht wurde. Dies war namentlich bei

leichter Windabtrift wesentlich. Bei starker Abtrift wurde wenn möglich nicht gemessen, oder ein geübter Ruderer hielt das Boot bei genauer Beobachtung der Geraden, die den betreffenden Schnittpunkt der Entnahmestelle bildeten, an Ort. Dieses Anorthalten des Bootes ist sehr schwierig und gelingt erst nach langer Übung. Ein Verankern des Bootes, wie wir das z. B. im Murten- und Bielersee oft praktizierten, wäre im Brienersee, infolge seiner großen Tiefe, zu zeitraubend und zu umständlich.

Die Temperaturen wurden jeweils nur an einzelnen Stellen des Sees, oft nur an einer einzigen, gemessen. Dies ist zu bedauern, und wir wissen heute, daß der Verlauf der Isothermen ebenfalls weitgehende Rückschlüsse auf evtl. Strömungsverlauf in einem See erlauben würde. Die Messung geschah zuerst mit Hilfe des von uns auf Seite 31 der Publikation [42] angegebenen Elektrothermometers. Später verwendeten wir Thermolemente

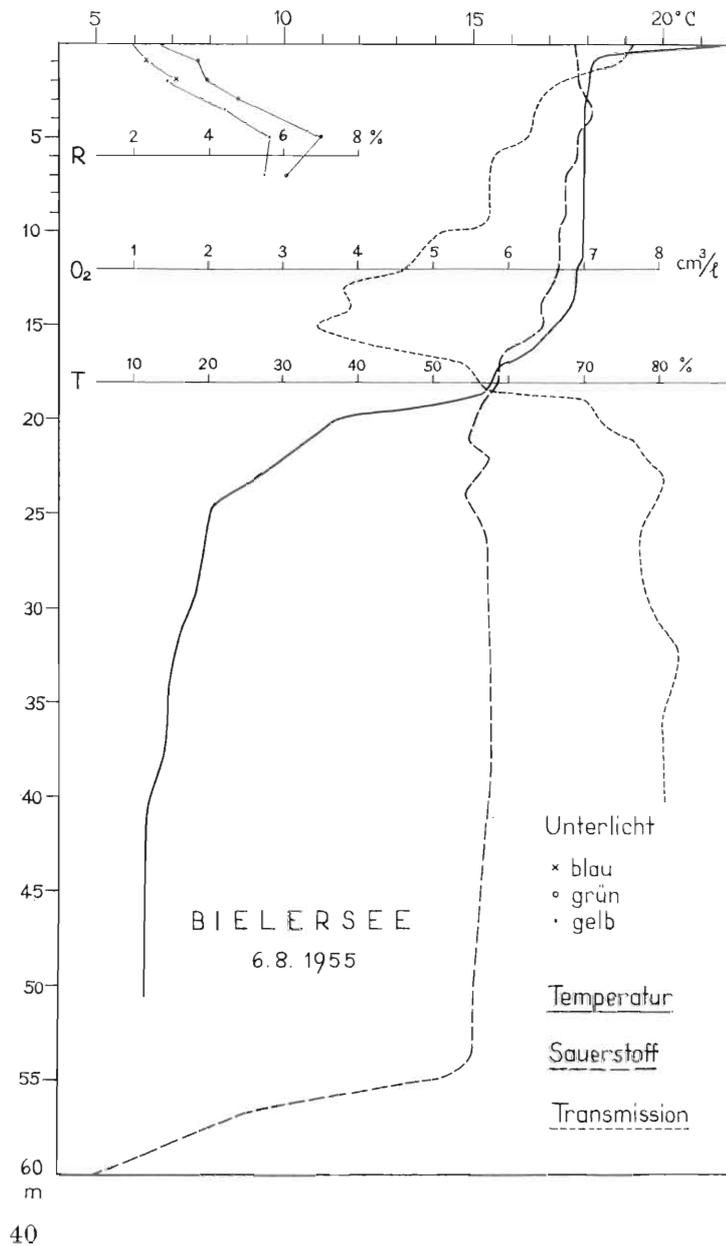


Abb. 20. Temperatur-, Transmissions- und Sauerstoffschichtung im Bielersee am 6. 8. 1955.

der Kombination Kupfer-Konstantan, wobei acht Lötstellen frei ins Wasser ragten, während die acht andern in einem mit Holz eingefassten Paraffinblock steckten und so während längerer Zeit konstante Temperatur zeigten. Um die Temperatur des Paraffinblockes derjenigen des Wassers anzupassen, wurde derselbe zu Beginn unserer Arbeiten an der Bootwand hängend dem Oberflächenwasser ausgesetzt. Die Messung geschah dann meist erst nach 1—2 Stunden, nachdem nämlich der betreffende Körper und damit die eingeschlossenen Lötstellen die Temperatur des Oberflächenwassers angenommen hatten. Eine solche Messung ist natürlich absolut betrachtet nicht sehr zuverlässig, läßt sich aber sehr rasch ausführen und zeigt auch die geringsten Temperaturveränderungen in der Vertikalen augenblicklich an. Um diese Temperaturkurve in besonderen Fällen zu eichen, wurden mit dem Kippthermometer jeweils die Temperaturen zweier Extrempunkte bestimmt. Meist aber genühten relative Werte für unsere Problemstellung. Wenn in unseren folgenden Kurvenbildern die Temperaturmaßstäbe nur Zahlen zeigen, so stimmen sie bloß ungefähr mit den Absolutwerten überein. Bei Angabe „°C“ dürfen sie als absolut betrachtet werden.

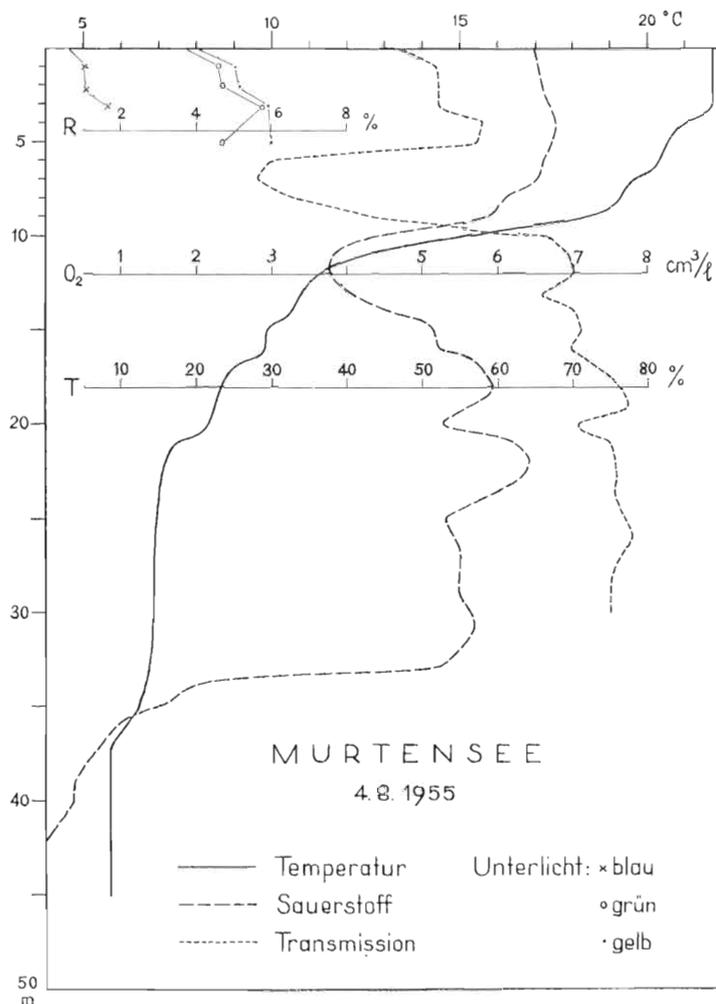


Abb. 21. Temperatur-, Transmissions- und Sauerstoffschiebung im Murtensee am 4. 8. 1955.

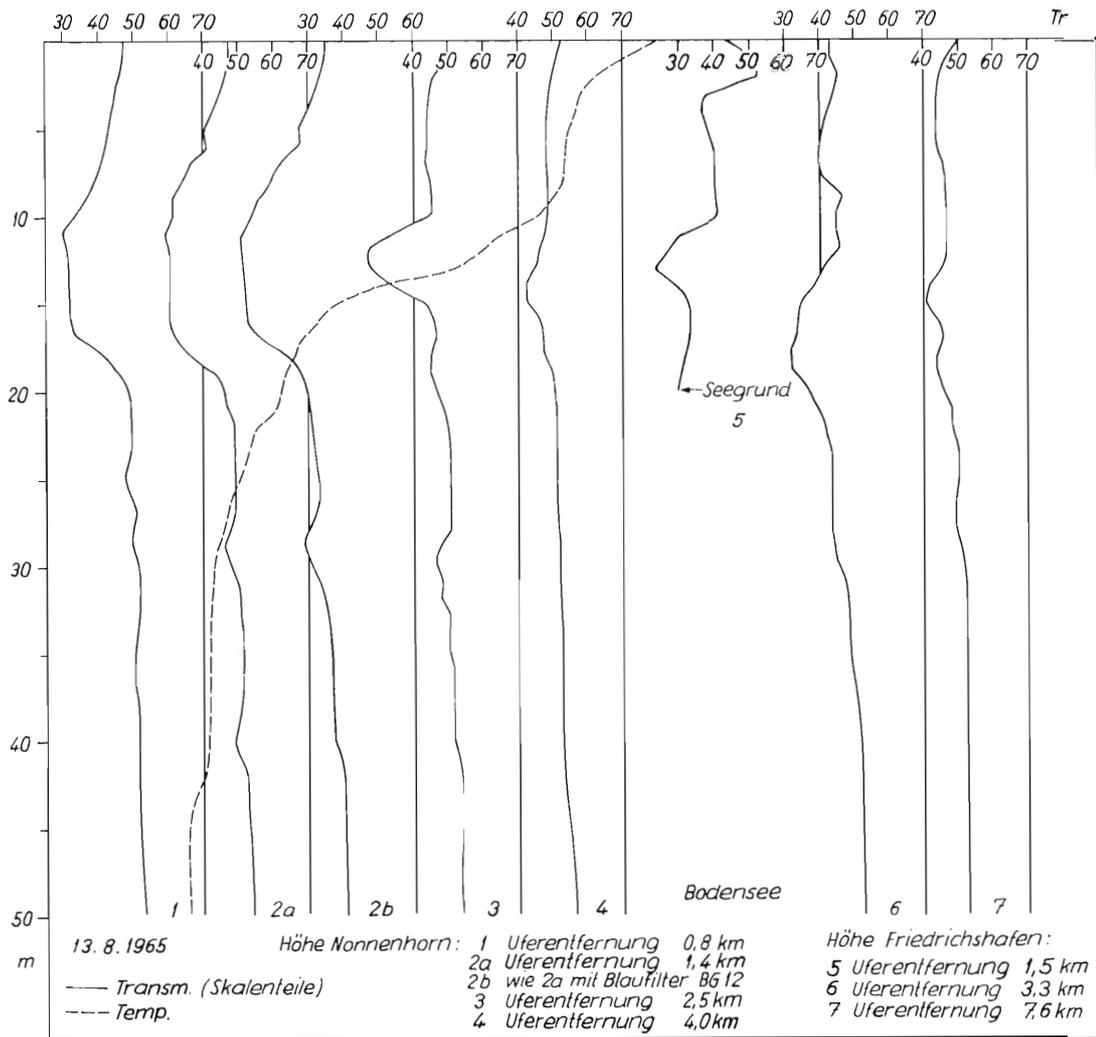


Abb. 22. Transmissionsschichtung vor Nonnenhorn und Friedrichshafen und Temperaturverlauf (Seemitte) im Bodensee am 13. 8. 1965.

II. Demonstration der Verwendbarkeit des Transmissionsmeßgerätes in verschiedenen Seen

Die Abb. 20—23 zeigen die Ermittlung von Trübungshorizonten mit Hilfe des genannten Transmissionsmeßgerätes im Bieler-, Murten-, Boden- und Luganersee. Abb. 22 und 23 enthalten in der gleichen Vertikale sowohl Transmissionskurven ohne Filter und mit Blaufilter BG 12. Wir finden, daß sich beim Bodensee praktisch gleicher Kurvenverlauf ergibt, beim Luganersee aber Abweichungen zu erkennen sind. Dies läßt auf einen größeren Anteil an organisch gelösten oder suspendierten Stoffen im Trübungshorizont des Luganersees schließen (siehe hierüber weiteres in [22]). Um festzustellen, ob es sich um gelöstes oder suspendiertes Material handelt, müßten Trübungsmessungen die Extinktionsmessungen ergänzen.

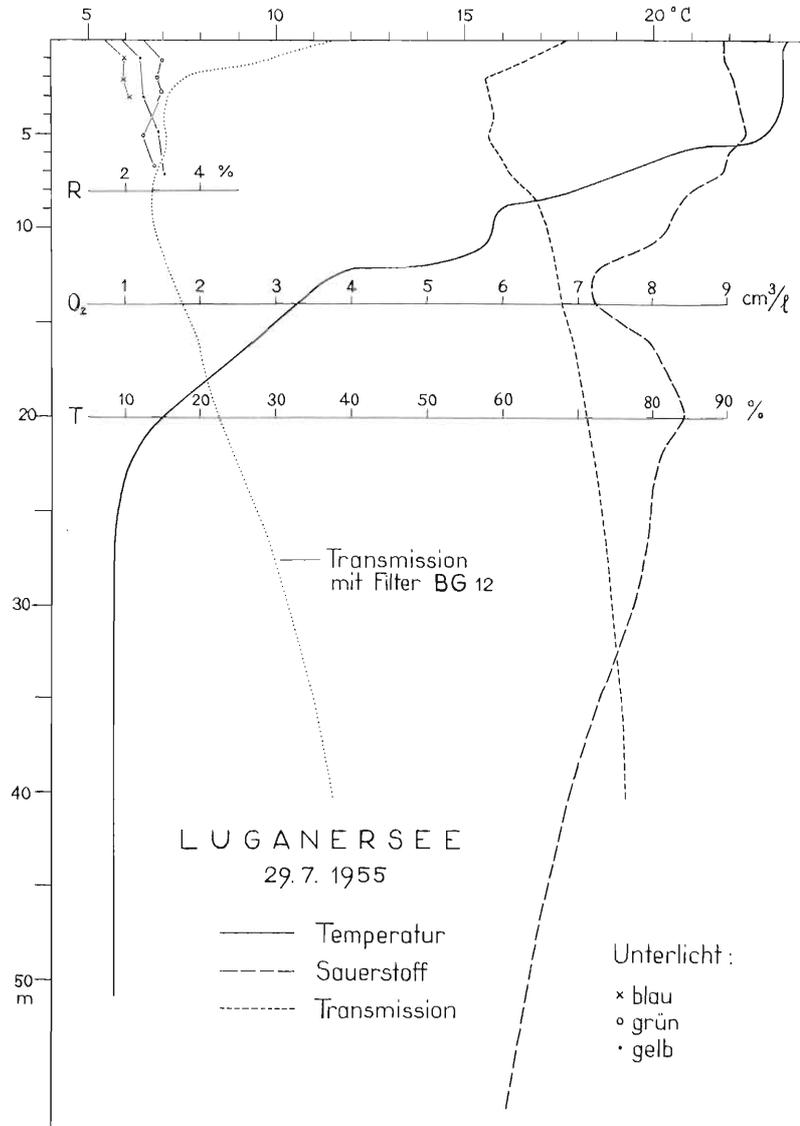


Abb. 23. Temperatur-,
 Transmissions- und
 Sauerstoffschiebung
 im Luganersee am
 19. 7. 1955.

III. Jahreszeitlich bedingte Variation der Einschichtungstiefen

1. Allgemeine Betrachtungen

Wollen wir die jahreszeitlich bedingten Unterschiede in der Einschichtungstiefe des Zuflußwassers verstehen, so müssen wir uns über den Vorgang der Erwärmung und Abkühlung während den Sommer- und Wintermonaten im klaren sein. Wir verweisen diesbezüglich auf die ausführlichen allgemeinen Erörterungen bei RUTTNER [46] und auf die speziellen Temperaturuntersuchungen im Brienersee von HOFER [24]. Hier sei lediglich erwähnt, daß der See im Sommer bezüglich Temperatur von der Oberfläche bis zu einer bestimmten „Durchmischungstiefe“ verschieden temperierte und deshalb verschie-

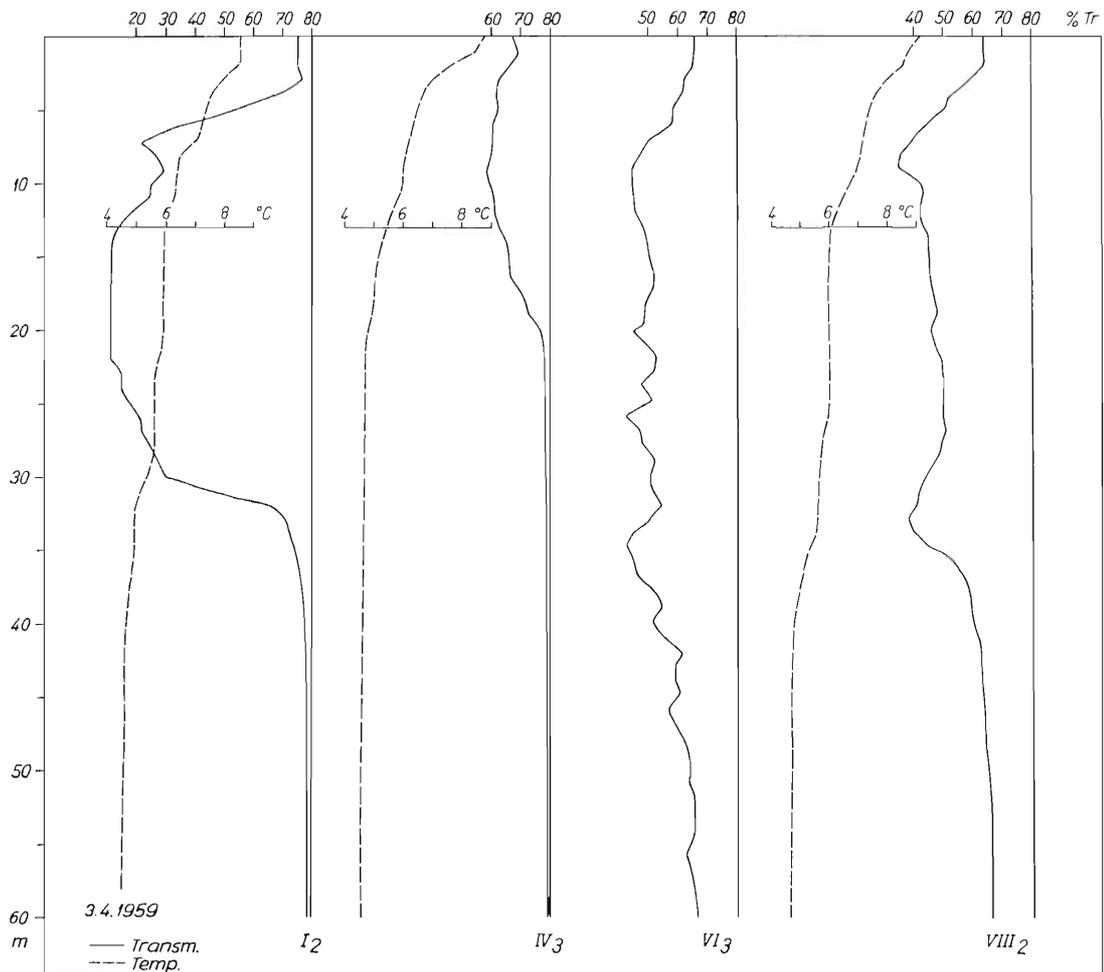


Abb. 24. Transmissions- und Temperaturschichtung im Brienzensee am 3. 4. 1959.

den dichte, blattförmig übereinandergelagerte Schichten zeigt, wobei die Dichte selbstverständlich nach unten zunimmt. Unterhalb dieser Schichten zeigen die Wassermassen des Hypolimnions der Seen unserer Breite eine Temperatur, die meist etwas über 4°C liegt. Wie bereits einleitend erwähnt, senkt sich das Zuflußwasser bis in jene Schichttiefe, in welcher gleiche Dichte herrscht und schiebt sich dort horizontal ein.

Dabei ist zu beachten:

- a) Die Temperaturen der Zuflüsse sind rascheren Schwankungen unterworfen, als die Temperaturen in bestimmten Seetiefen. Es kann deshalb zu mehreren übereinanderliegenden, zuflußbedingten Trübungshorizonten kommen (siehe z. B. Abb. 29), je nachdem die Lufttemperatur und die Sonnenscheindauer und damit die Erwärmung des Zuflußwassers Schwankungen ausgesetzt ist.
- b) Durch das windbedingte Hinunterarbeiten der zugestrahlten Wärme verschiebt sich die Zone des ausgeprägtesten Temperaturgefälles (die Sprungschicht) während des Sommers nach unten, wodurch ein Absinken des Trübungshorizontes gegen den Herbst zu beobachtet werden kann (siehe Abb. 24—30).

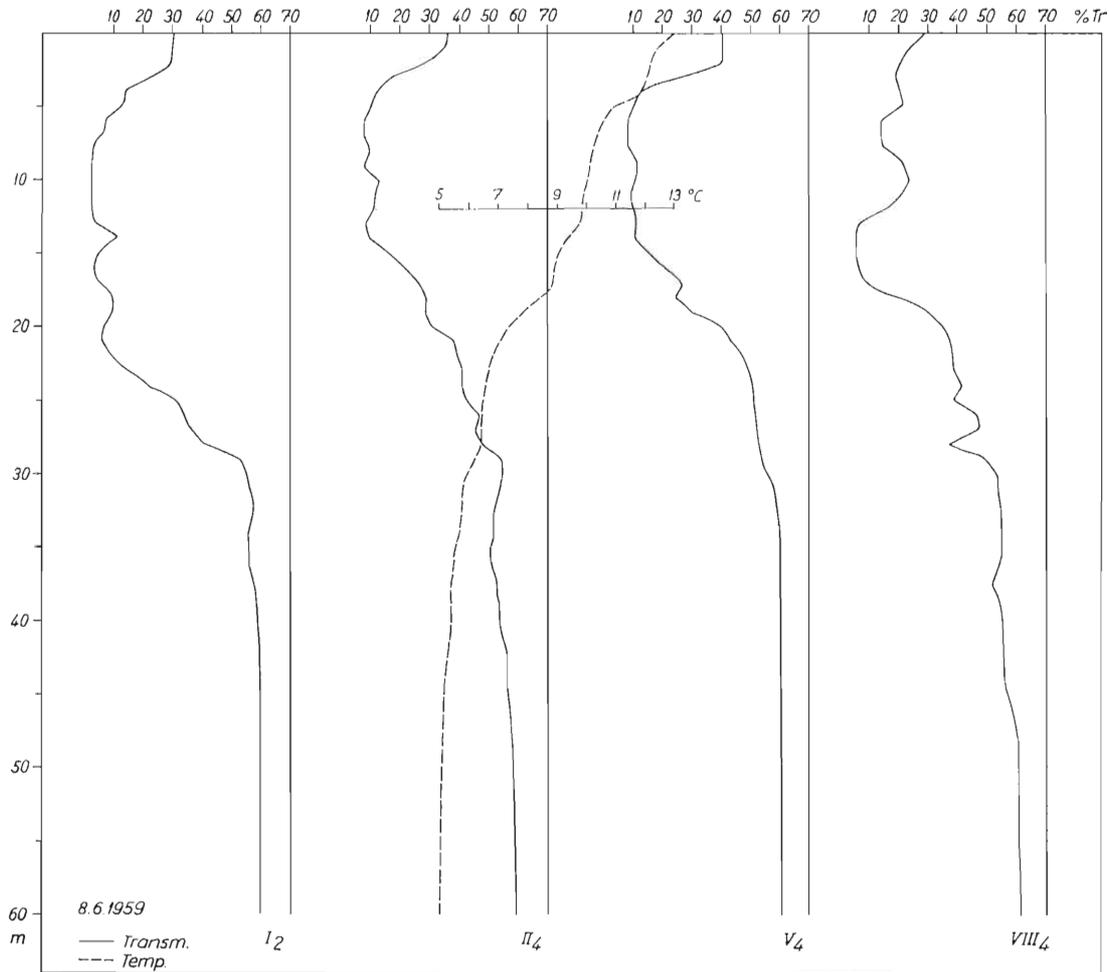


Abb. 25. Transmissions- und Temperaturschichtung im Brienersee am 8. 6. 1959.

- c) Während des Winters ist das Zuflußwasser meist kälter als das Seewasser und schichtet sich entsprechend tief, oft bis zum Seegrund, ein. Plötzliche Erwärmungen bringen aber auch im Winter oberflächliche Trübungsschichten. Im ganzen kann gesagt werden, daß der Verlauf des Zuflußwassers im Winter schwierig zu verfolgen ist, und daß namentlich bei Homothermie kein deutlicher Trübungshorizont mehr festgestellt werden kann.

2. Meßergebnisse

Aus dem außerordentlich umfangreichen Beobachtungsmaterial mehrerer Jahre sei an demjenigen des Jahres 1959 das Absinken des Trübungshorizontes (Abb. 24—30) gezeigt. Der Verlauf des Absinkens zeigt in den folgenden Jahren einen derart mit 1959 übereinstimmenden Verlauf, daß wir auf eine Veröffentlichung weiterer ganzer Jahresserien verzichten.

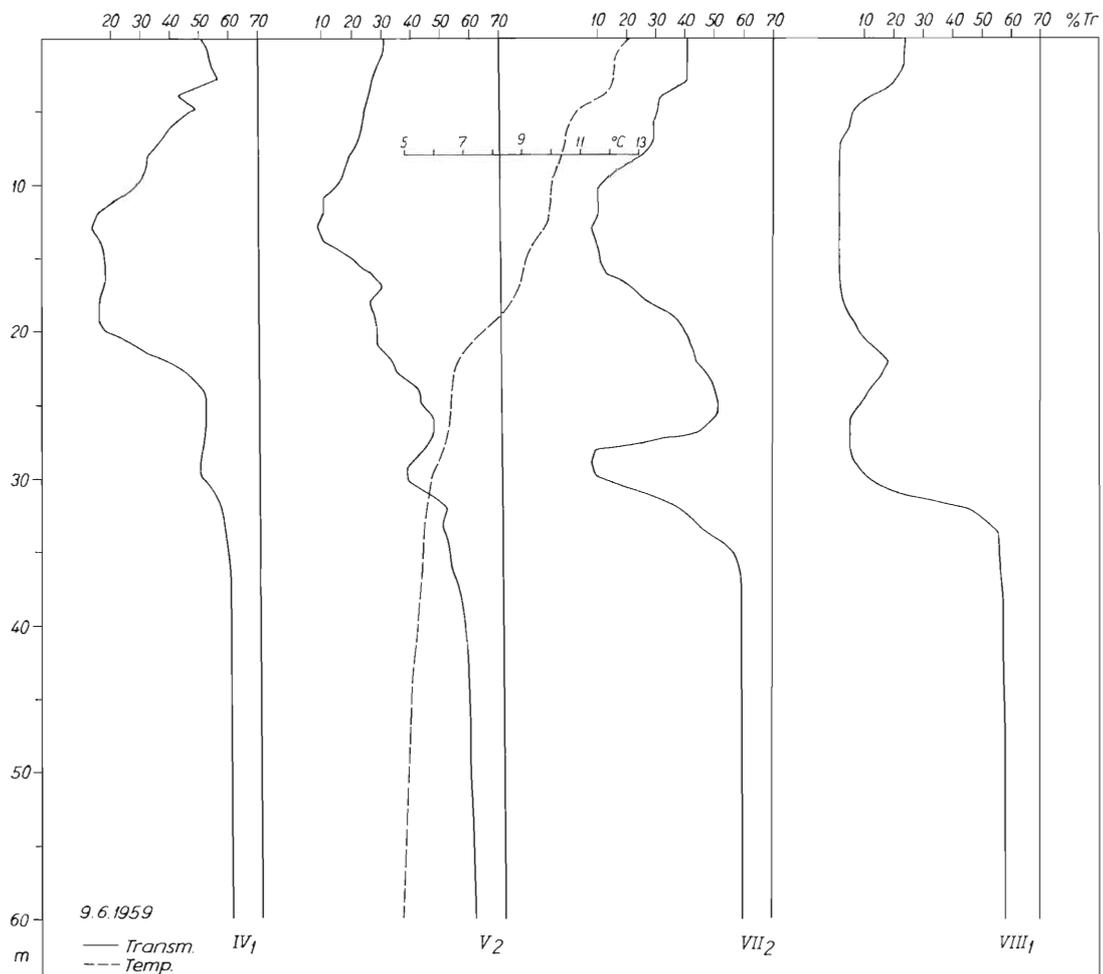


Abb. 26. Transmissions- und Temperaturschichtung im Brienzensee am 9. 6. 1959.

3. Kommentar

(vergleiche hierbei Tafel V)

3. April 1959 (Abb. 24): Die Anschwellung der Aare vom 24. März (Monatsmax. mit $27,1 \text{ m}^3/\text{s}$) fand bei hoher Temperatur statt und ist in 7 m Tiefe vor der Aaremündung als oberster Trübungshorizont festzustellen. Aber auch bis Punkt IV_3 hat sich das Zuflußwasser bereits geschoben, wobei ein Turbulenzaustausch den Trübungshorizont von ca. 2—20 m Tiefe, mit einem Maximum in 9 m Tiefe, ausweitete. Am 31. März erfolgte ein weiteres Anschwellen mit Maximum am 3. April ($26,1 \text{ m}^3/\text{s}$), und verhältnismäßig tiefe Lufttemperatur bewirkte bei Punkt I_2 (unmittelbar vor Aaremündung) eine Ausweitung einer ausgeprägten Trübungsschicht von 10—30 m. Zu beachten ist, daß in jedem Fall die untere Begrenzung einer Trübungsschicht mit einem Temperatursprung zusammenfällt.

Vor der Lüttschinemündung (Pkt. $VIII_2$) zeigen sich ebenfalls zwei Trübungshorizonte in 8 und 34 m Tiefe, deren Erklärung sich vermutlich mit derjenigen bezüglich des Aarezuflusses deckt. Schon hier fällt auf, daß sich das Lüttschinewasser meist tiefer einschichtet

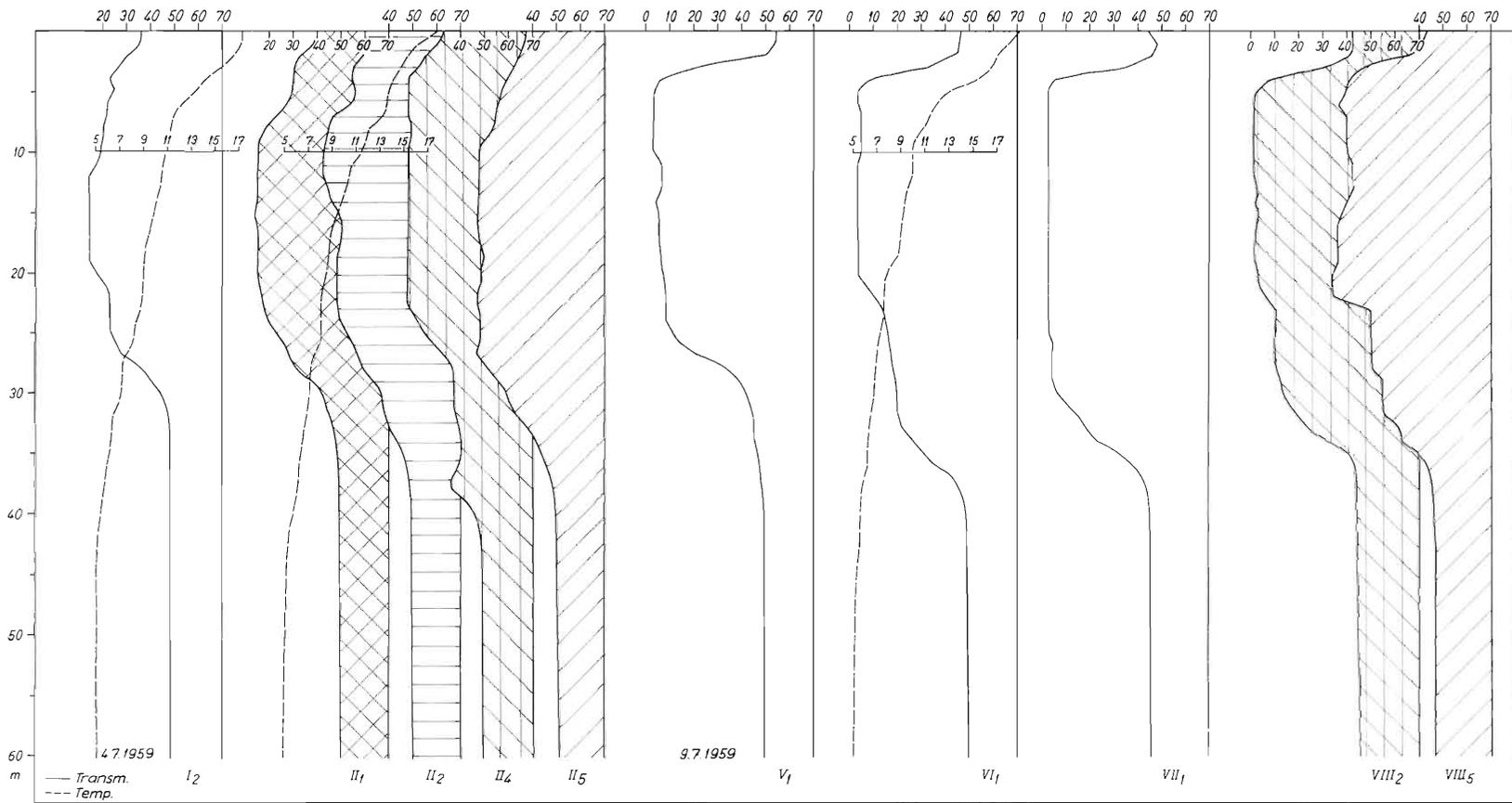


Abb. 27. Transmissions- und Temperaturschichtung im Brienzersee am 4. 7. 1959.

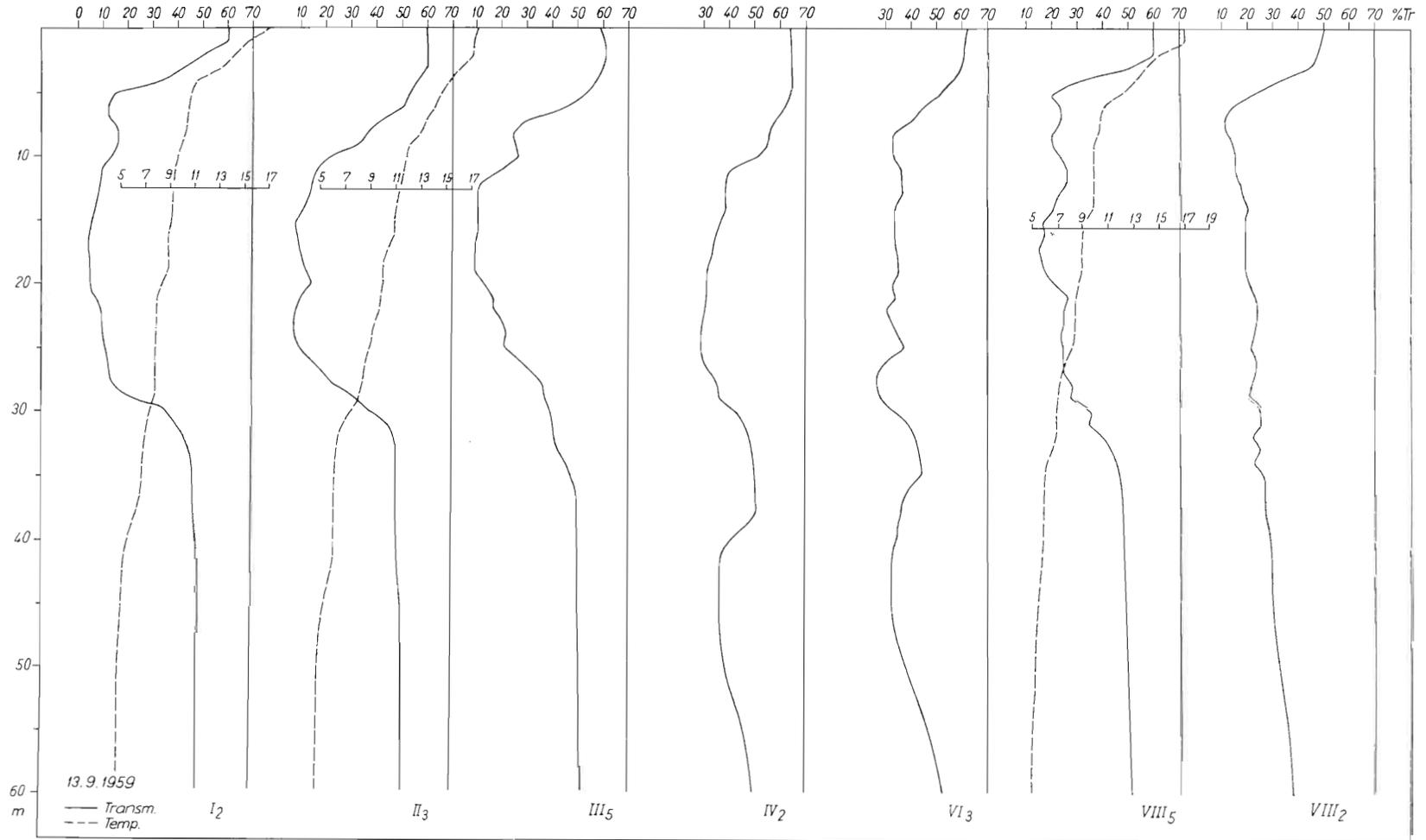


Abb. 28. Transmissions- und Temperaturschichtung im Brienzensee am 13. 9. 1959.

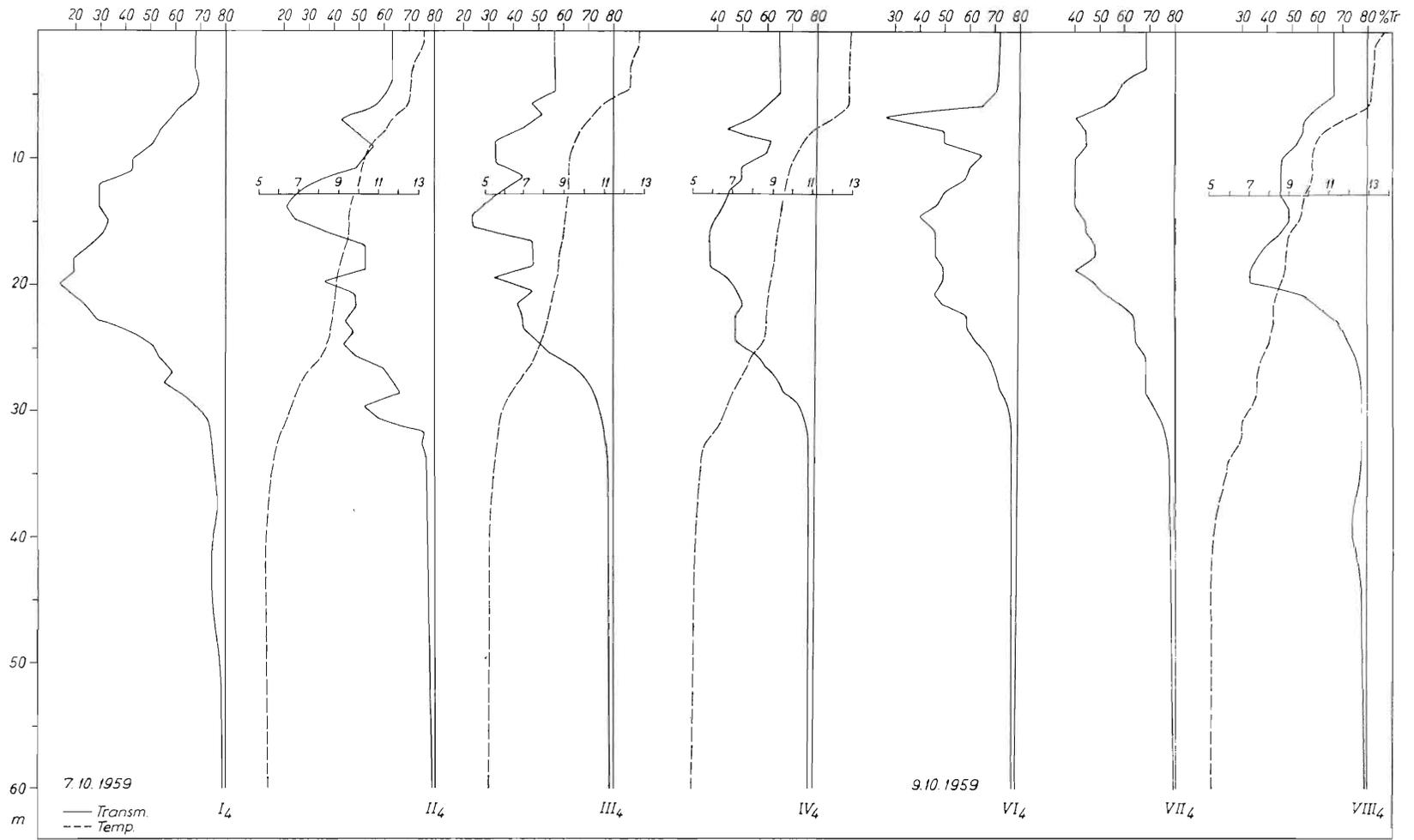


Abb. 29. Transmissions- und Temperaturschichtung im Brienzensee am 7. 10. 1959.

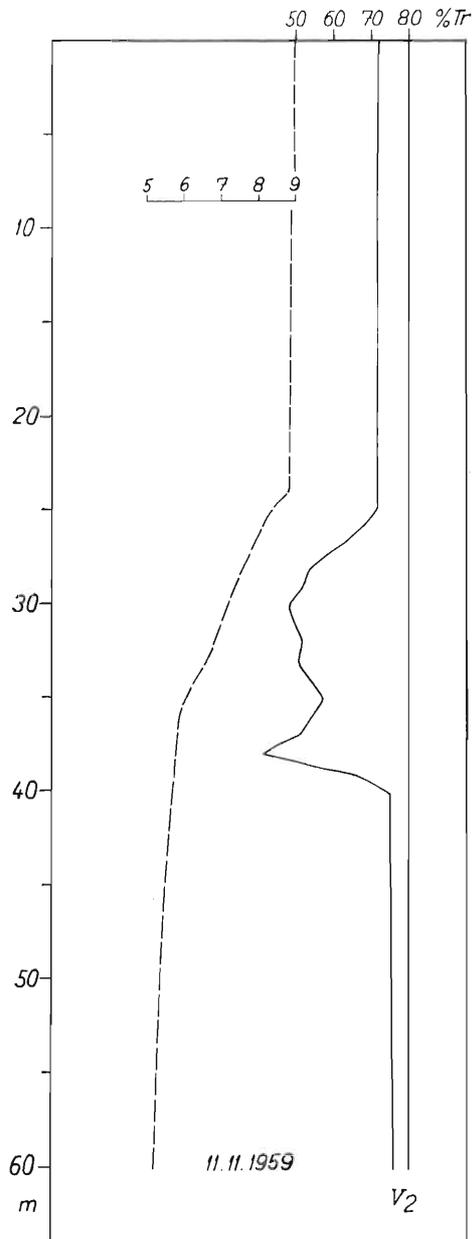


Abb. 30. Transmissions- und Temperaturschichtung im Brienzsee am 11. 11. 1959.

als das Aarewasser. Die Erklärung hierzu folgt in Abschnitt IV dieses Teils. Punkt IV₃ liegt ungefähr in der Mitte der oberen Seehälfte, und die zahlreichen aber unbedeutenden Trübungshorizonte sind wahrscheinlich auf den Einfluß des sehr starken Temperatur- und Trübungsschwankungen unterworfenen Gießbachs zurückzuführen.

8./9. Juni 1959 (Abb. 25 u. 26): Die Erhebungen begannen am 8. 6. vor Oberried und wurden dann in ca. $\frac{2}{3}$ Seebreite dem rechten Ufer entlang bis zum Seeende fortgesetzt. Am 9. 6. wurde auf der Südseite des Sees von Bönigen bis Aaremündung gemessen. Das Aarewasser hat sich in mehreren, nicht sehr differenzierten Trübungshorizonten eingeschichtet, wobei zu beachten ist, daß eine Abflußspitze am 5. 6. und ein beträchtliches Anschwellen ab 8. 6. vorliegt. Es zeichnet sich hier bereits ab, was aber von uns damals

noch nicht erkannt wurde, daß sich das Aarewasser dem nördlichen, das Lüttschinewasser dem südlichen Ufer entlangschiebt. Das Anschwellen der Lüttschine begann etwas später (siehe Tafel V) und zeigte eine erste Monatsspitze am 7. 6. Der Trübungshorizont in ca. 30 m Tiefe ist wahrscheinlich auf den Kälteeinbruch von Ende Mai bis Anfang Juni zurückzuführen.

4. und 9. Juli 1959 (siehe Abb. 27): Die Trübungshorizonte haben sich bis 30 m Tiefe im oberen und bis 35 m Tiefe im unteren Seeteil ausgeweitet. Die ausgesprochene Warmwetterperiode hat aber auch den oberflächennahen Schichten immer wieder Trübung gebracht, so daß eine Trübungszone von rund 30 m Mächtigkeit vorliegt.

13. Sept. 1959 (Abb. 28): Neben langsamem Absinken der mächtigen Trübungsschicht fällt vor allem die Trübung in großen Tiefen vor der Lüttschinemündung und bei Punkt IV₂ und VI₃, also vor Iseltwald und Niederried auf.

Diese „Trübungswolken“ in ca. 50 m Tiefe lassen sich aber durch heftige Gewitter erklären, die kurz vorher im Faulhorn- und Brienergratgebiet niedergingen und die ein mächtiges Anschwellen des Mühlebaches und Hauetenbaches auf der Südseite sowie des Laui- und Fahrlaubaches auf der Nordseite des Sees brachten. Die Schuttmassen, die diese Wildbäche bringen, enthalten verhältnismäßig viel grobes Material, das in der Sprungschicht trotz heftiger Turbulenz nicht in Schwebelage gehalten werden kann und deshalb in Trübungswolken absinkt. Ein analoges Beispiel zeigt die Erhebung vom 6. 9. 1961, die wir deshalb in Abb. 31 folgen lassen. Vom 3.—6. 9. 1961 waren über die ganze Schweiz heftige Gewitter niedergegangen, die beispielsweise Bern am 5. 9. einen Tagesniederschlag

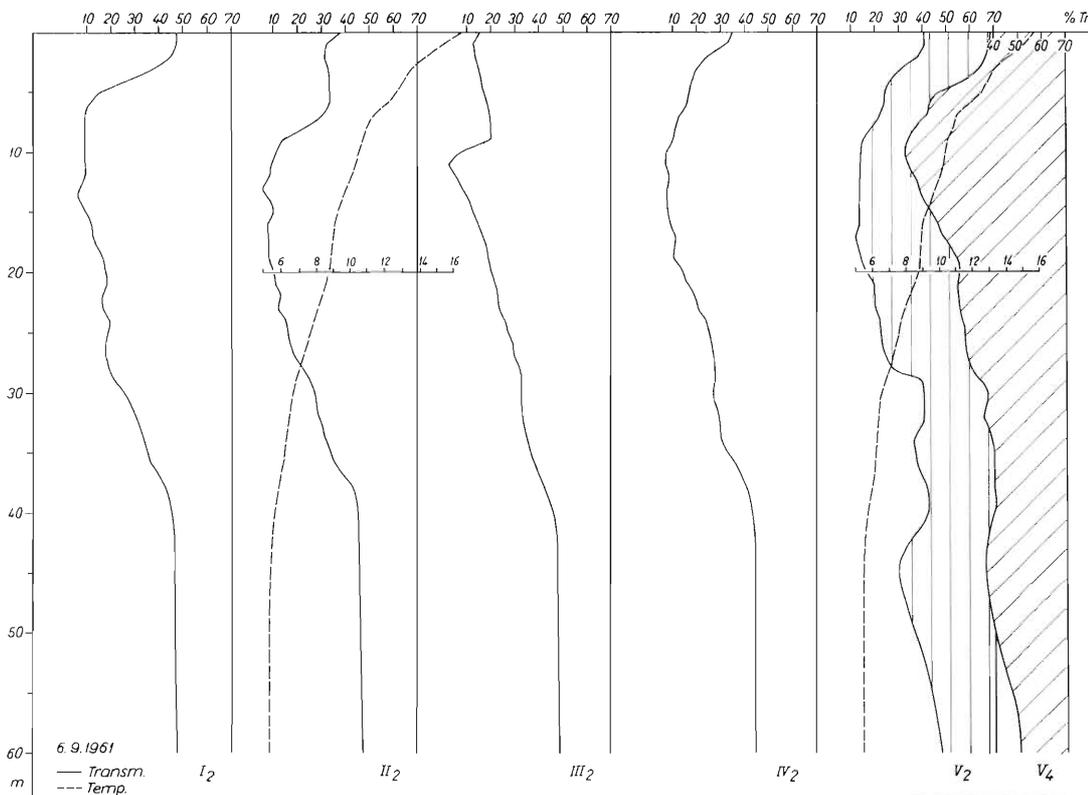


Abb. 31. Transmissions- und Temperaturschichtung im Brienzsee am 6. 9. 1961.

von 9,1 mm und im Gotthardgebiet von 12,4 mm und ein gewaltiges Anschwellen der Lütschine am 3. 9. und der Aare bei Interlaken am 5. 9. brachten.

7./9. 10. 1959 (Abb. 29): Zahlreiche Trübungshorizonte im oberen Seeteil entsprechen den zahlreichen gleichmäßigen Schwankungen im Aareabfluß Ende September bis Anfang Oktober (vorwiegend zwei Horizonte entsprechend den Spitzen am 17. und 27. 9.).

11. 11. 1959 (Abb. 30): Absinken des Trübungshorizontes auf 30—40 m Tiefe zufolge Homothermie oberhalb 30 m. Diese Homothermie ist die Folge von winterlicher Abkühlung und Konvektionsströmungen infolge Absinken der abgekühlten obersten Wasserteilchen.

IV. Unterschiede in der Einschichtungstiefe von Aare und Lütschine

Es zeigte sich sehr bald, daß sich das Lütschinewasser im Mittel 8—10 m tiefer einschichtet als das Aarewasser. Dies stellen Abb. 32 und 33 sehr deutlich dar.

Weil mit der tieferen Einschichtung auch immer ein Absinken der Sprungschicht vom oberen nach dem unteren Seeende zu beobachten war, lag die Vermutung nahe, daß das Wasser der Lütschine meist eine tiefere Temperatur zeige als dasjenige der Aare. Dies wird aber durch die Darstellungen auf Tafel VI und Abb. 34 widerlegt.

Die Darstellungen zeigen, daß das Lütschinewasser ähnliche, im Sommer meist sogar höhere, im Winter aber tiefere Temperaturen als das Aarewasser aufweist. Wir sind überzeugt, daß der Grund der größeren Einschichtungstiefe der Lütschine in der größeren Schwebestoffkonzentration liegt. Denn der Gehalt an Suspensionen, deren spezifisches Gewicht von demjenigen des Wassers abweicht, verändert auch das spezifische Gewicht des Wasser-Schwebestoffgemisches. Überlegen wir, daß die Lütschine bei einem mittleren sekundlichen Abfluß von 17,8 m³/s (aus 3 Beobachtungsjahren), die Aare bei Brienzwiler einen solchen von 32,4 m³/s zeigt, so ergibt sich für die Lütschine mit einem mittleren Schwebestofftransport von 178 · 10³ t pro Jahr, eine Schwebestoffkonzentration von 317 mg/l, für die Aare mit einer Schwebestofffracht von 116 · 10³ t eine solche von 113 mg/l im Jahresmittel.

Das Verhältnis der Schwebestoffkonzentration verhält sich also wie 3 : 1, was ohne weiteres für die Sommermonate gesetzt werden kann, weil, wie wir gesehen haben, die Wintermonate gar nicht ins Gewicht fallen.

Eine Konzentrationsdifferenz von 200 mg/l entspricht aber bei Annahme eines spezifischen Gewichtes von 2,6 p/cm³ einer Dichtedifferenz von 16 · 10⁻⁵ g/cm³. Nach KOHLRAUSCH entspricht dies ca. einer Dichtedifferenz von Wasser mit Temperaturen von 8 und 10° C (Dichtedifferenz genau 14,9 · 10⁻⁵ g/cm³) oder 6 und 9° C (Dichtedifferenz 15,9 · 10⁻⁵ g/cm³). Diese Temperaturen und Temperaturdifferenzen entsprechen größtenteils denjenigen, die in Tiefen von 20—30 m und in Niveauabständen von 10 m im Sommer jeweils festgestellt werden. Indem sich das Lütschinewasser tiefer einschichtet als seiner Temperatur entspricht, ist natürlich damit auch eine Wärmezufuhr in größere Tiefen verbunden, was in den Abb. 32 und 33 deutlich zum Ausdruck kommt. Es muß sich eine Sprungschichtneigung von Brienz in Richtung Bönigen ergeben und, weil sich das Lütschinewasser dem südlichen, das Aarewasser dem nördlichen Ufer entlang bewegt, eine weitere Neigung der Isothermen in südlicher Richtung. Aus HOFER [24] und aus teilweise unveröffentlichten Messungen des Autors, finden wir im folgenden einige Angaben. HOFER führte Juli-August 1946 Temperaturmessungen quer über den See mit

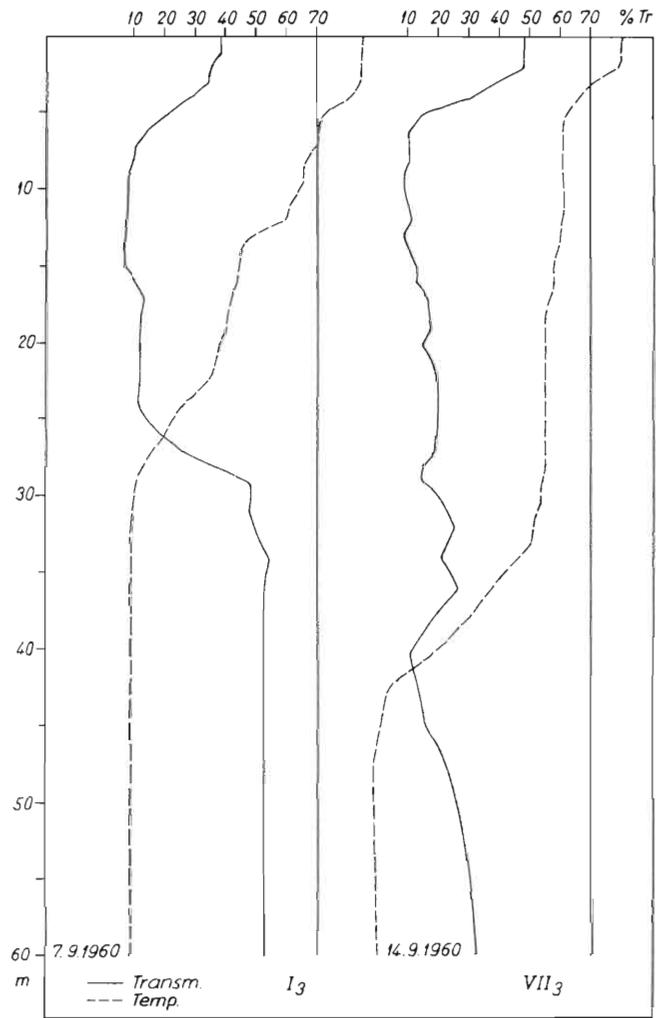


Abb. 32. Transmissions- und Temperaturschichtung im Brienzersee am 7. 9. 1960.

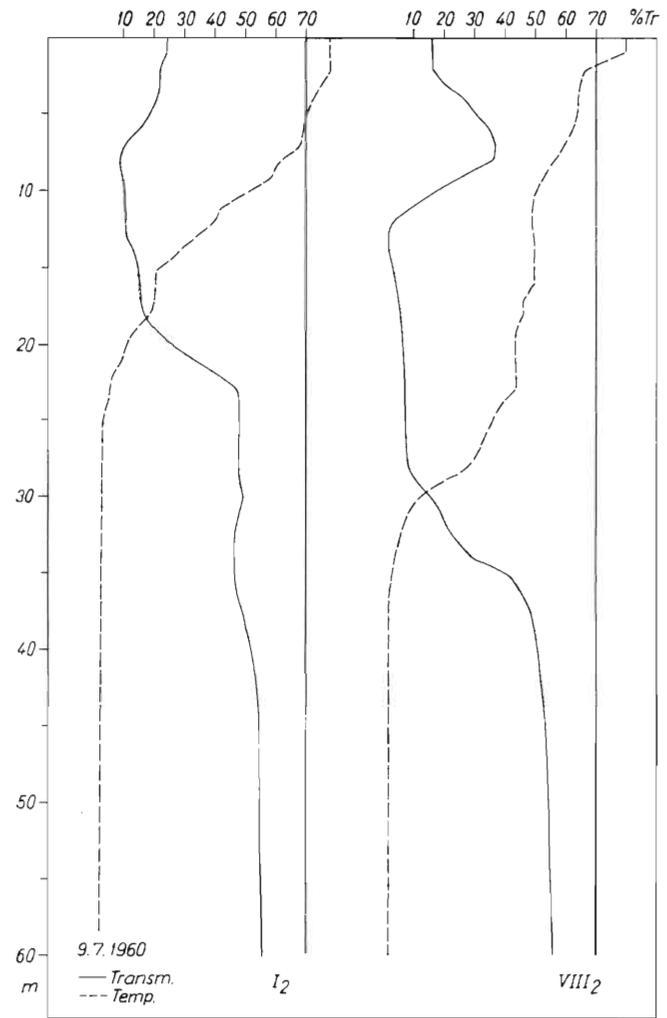


Abb. 33. Transmissions- und Temperaturschichtung im Brienzersee am 9. 7. 1960.

dem Kippthermometer durch und fand dabei die in Tab. 24 angegebenen Werte (siehe auch Abb. 49 und 50).

Unsere Vermutungen werden durch diese Angaben im großen und ganzen bestätigt. Es zeigt sich, daß die tiefsten Temperaturen (in den Tiefen der Zuflußeinschichtungen) in der Seemitte liegen, die höchsten meist am Südufer, während das Nordufer gegenüber der Seemitte wieder einen Temperaturanstieg zeigt (Aarewasser). Zum Schluß sei noch erwähnt, daß natürlich auch der größere Anteil an Schwebestoffkörnern mit $d > 20 \mu$, wie er in der Lütchine gegenüber der Aare festgestellt wurde (siehe Tab. 10), für das tiefere Einschichten des Lütchine-Wassers mitbestimmend sein kann, indem durch die größere Sinkgeschwindigkeit Wassermassen vermehrt in die Tiefe gewirbelt werden. Diesen Einfluß abzuschätzen dürfte schwierig sein.

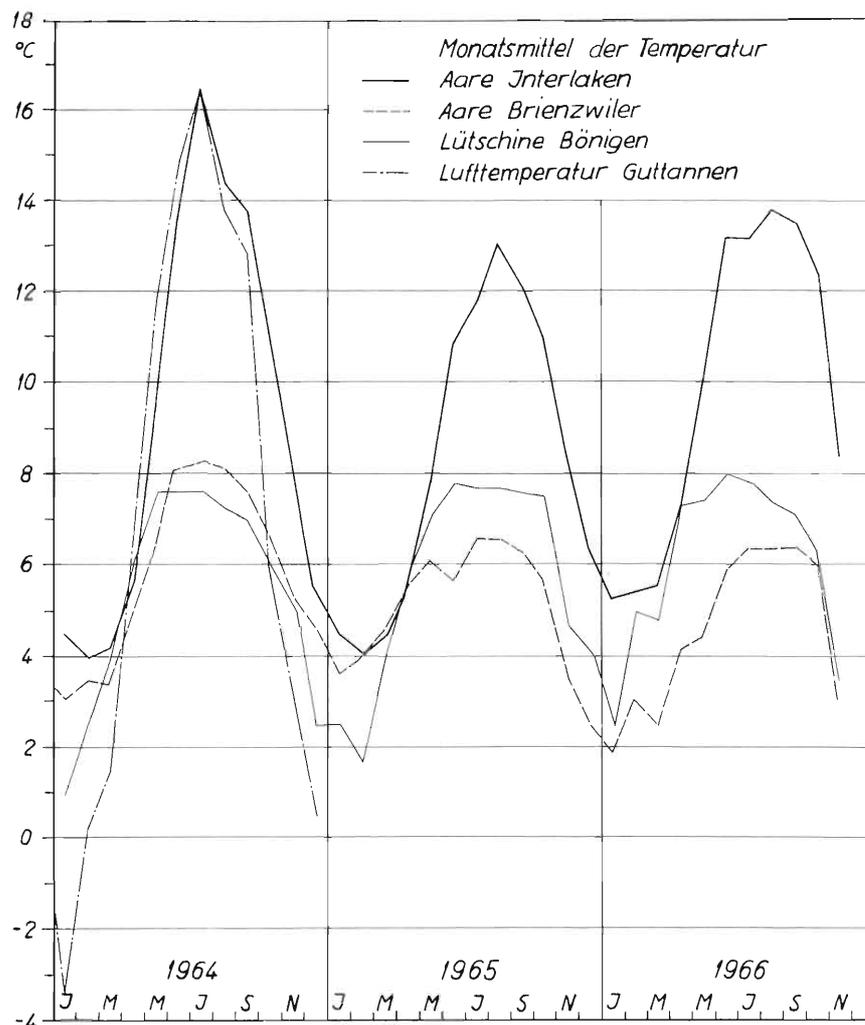


Abb. 34. Monatsmittel der Temperatur von Aare und Lütchine und der Lufttemperatur in Guttannen.

Tab. 24. Temperaturen im Querprofil des Brienzersees nach Hofer

Datum	Höhe	Tiefe m	Südufer	Mitte	Nordufer
19. 7. 1946	Erschwanden	10	11,8° C	11,2° C	12,0° C
		20	10,2	9,8	10,0
		30	8,4	7,0	7,8
		40	5,6	5,0	5,2
22. 7. 1946	Iseltwald	10	11,0	11,0	11,2
		20	10,0	9,9	9,8
		30	8,8	8,1	7,6
		35	8,0	6,9	—
23. 7. 1946	Gießbach	40	5,3	5,0	5,0
		10	10,9	11,2	11,4
		20	8,3	9,5	9,8
		30	7,1	6,9	7,6
21. 8. 1946	Erschwanden	40	5,1	5,2	5,2
		50	4,7	4,6	4,7
		10	11,9	11,7	11,5
		20	10,5	10,3	10,2
		30	8,1	6,9	7,3
		40	5,3	5,1	5,2

V. Horizontale Verteilung des Zuflußwassers und der Trübungsstoffe

1. Problemstellung

Um die horizontale Verteilung der Trübungsstoffe zu verfolgen, begannen wir 1964 mit regelmäßigen Transmissionsmessungen über Querprofile des Sees. Nachdem wir festgestellt hatten, daß sich die Lutschine im Mittel ca. 10 m tiefer einschichtet als die Aare, sollte es möglich sein, aus der Tiefenlage der Trübungsschicht auf die Herkunft derselben zu schließen. AUERBACH und SCHMALZ [1] und andere hatten festgestellt, daß sich das Rheinwasser im Bodensee auf große Strecken dem nördlichen Ufer entlang schiebt. Dies wurde erklärt mit der Zuflußrichtung, die den Strom gegen das schwäbische Ufer lenkt. Wir vermuteten, daß dies aber ein Effekt der Erdrotation, der Corioliswirkung sei, ein Effekt, der in der Ozeanographie längst bekannt ist, und durch welchen bewegte Massen oder Körper auf der Nordhalbkugel nach rechts, auf der Südhalbkugel nach links abgelenkt werden. Dadurch würde das Zuflußwasser eines Sees gegen das rechte Ufer gedrängt, und da der See allseitig begrenzt ist, ergäbe sich ein Umlaufen der Peripherie des Beckens, wodurch eine Linksrotation zustande käme. (Dies im Gegensatz zu den Rechtsrotationen, wie sie in der Ozeanographie bekannt sind.) Wir werden im dritten Teil dieser Arbeit zeigen, daß diese Linksrotation tatsächlich ein für Seen der nördlichen Halbkugel allgemein gültiges Phänomen ist, und wir werden diese Erscheinung auch theoretisch begründen und in ihrem Ausmaß an Beispielen berechnen.

2. Ergebnisse der Trübungsmessungen über Querprofile

Gemäß Abb. 18 wurde über den See ein Netz von 40 Beobachtungspunkten gelegt. Zusammenfassend seien die Folgerungen aus einigen Messungen während der Sommer 1964 und 1965 gezogen, wobei wir uns auch hier auf die Veröffentlichung einiger charakteristischer Beispiele beschränken. Zum besseren Verständnis sind die Angaben über Abfluß von Aare und Lüttschine sowie über die Lufttemperatur in Tafel V und VI zu beachten.

7. 7. 1964 (Abb. 35): Profil V verläuft ca. in Seemitte. Die arabischen Indexzahlen geben die Punkte des Profils von Süd nach Nord (siehe Abb. 18) an. Ein Kommentar ist sozusagen überflüssig. Am Nordufer finden wir Aarewasser, am Südufer das sich tiefer einschichtende und mehr Trübungsstoffe enthaltende Lüttschinewasser. Selbstverständlich findet in horizontaler Richtung ein durch Turbulenz bewirkter Massenaustausch statt, der um so intensiver verläuft, je größer die Fließgeschwindigkeit des eingeschichteten Wassers ist. Wie wir später sehen werden, liegt dieselbe um diese Jahreszeit bei ca. 120 m/h. Dieser Austausch bewirkt die blätterförmige Struktur, die für die Mittelvertikalen fast immer charakteristisch ist. Sie entsteht, indem einmal mehr Aarewasser, einmal mehr Lüttschinewasser seitlich eingeschoben wird.

8./9. August 1964 (Abb. 36—40).

a) Profil II und III unterscheiden sich im wesentlichen nur in 30 m Tiefe, indem bei Profil II die kurzfristige Trübungsperiode der Lüttschine vom 3. 8. 1964 noch sichtbar ist, während sie bei Profil III bereits passiert hat (ca. 12 km Verschiebung in 6 Tagen).

b) Auf der Höhe von Profil VI beginnt sich der regelmäßige und verhältnismäßig intensive Lüttschineabfluß ab 7. 8. auszuwirken.

c) Die geringe Trübung bis 8 m Tiefe auf der Nordseite des gleichen Profils kann vermutlich mit der etwas tieferen Einschichtung der Aare infolge eines Temperaturrückganges am 3. 8. erklärt werden.

d) Punkt VIII₂ liegt direkt vor der Lüttschinemündung. Daß Punkt VIII₁ zwischen 30 und 40 m Tiefe die stärkere Trübung zeigt, bestätigt, daß der Fluß sofort nach Eintritt in den See nach rechts abgelenkt wird.

5./6. 8. 1965 (Abb. 41—46).

a) 1965 war gekennzeichnet durch einen außerordentlich nassen und kühlen Sommer. Abb. 34 zeigt, daß die Temperatur des Aarewassers von Juni bis September mehr als 1°C unter derjenigen der Lüttschine lag. Damit ist wohl die verhältnismäßig tiefe Einschichtung der Aare zu erklären.

b) Die Temperaturschichtung war in diesem Sommer sehr wenig ausgeprägt. In ca. 40 m Tiefe zeigte sich während des ganzen Sommers ein verhältnismäßig gut erfaßbarer Temperatursprung. Deshalb erstreckte sich die Trübungszone stets bis in jene Tiefe.

c) Entsprechend dem Temperaturverlauf waren auch die einzelnen Trübungshorizonte wenig ausgeprägt und differenziert. Deutlich war stets ein krasses Überwiegen des Trübungsanteils der Lüttschine gegenüber demjenigen der Aare zu erkennen.

d) Interessant ist die Feststellung, daß die Fischer in jenem Sommer über außerordentlich schlechten Fischfang klagten und darüber, daß ihre Netze verfilzt und verschmutzt wurden, gleichgültig in welcher Tiefe sie ausgesetzt worden waren.

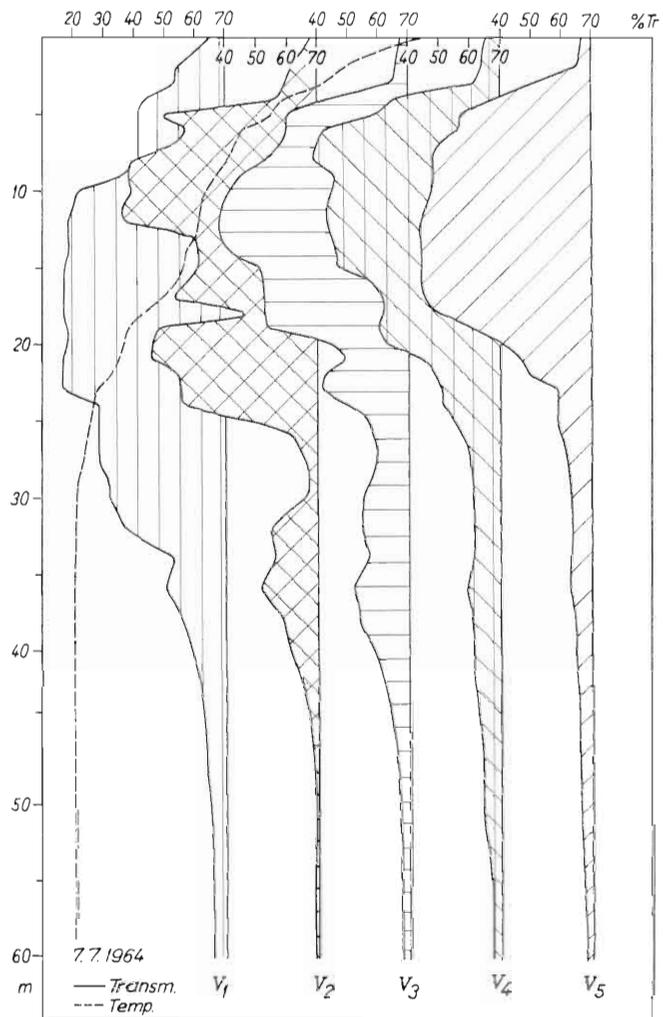


Abb. 35. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil V im Brienzsee am 7. 7. 1964.

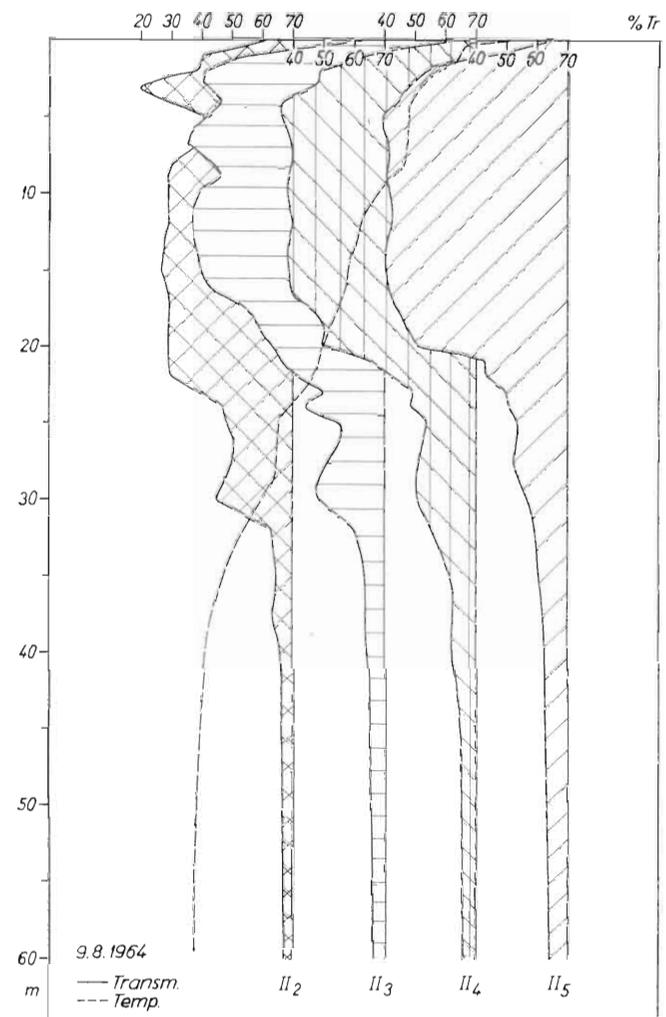


Abb. 36. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil II im Brienzsee am 9. 8. 1964.

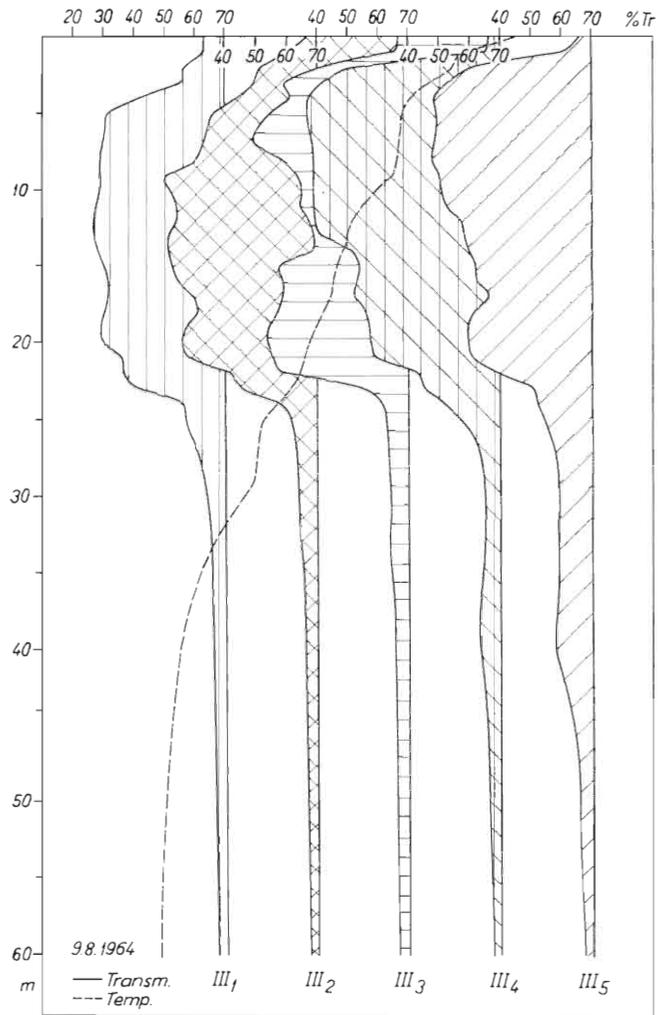


Abb. 37. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil III im Brienzersee am 9. 8. 1964.

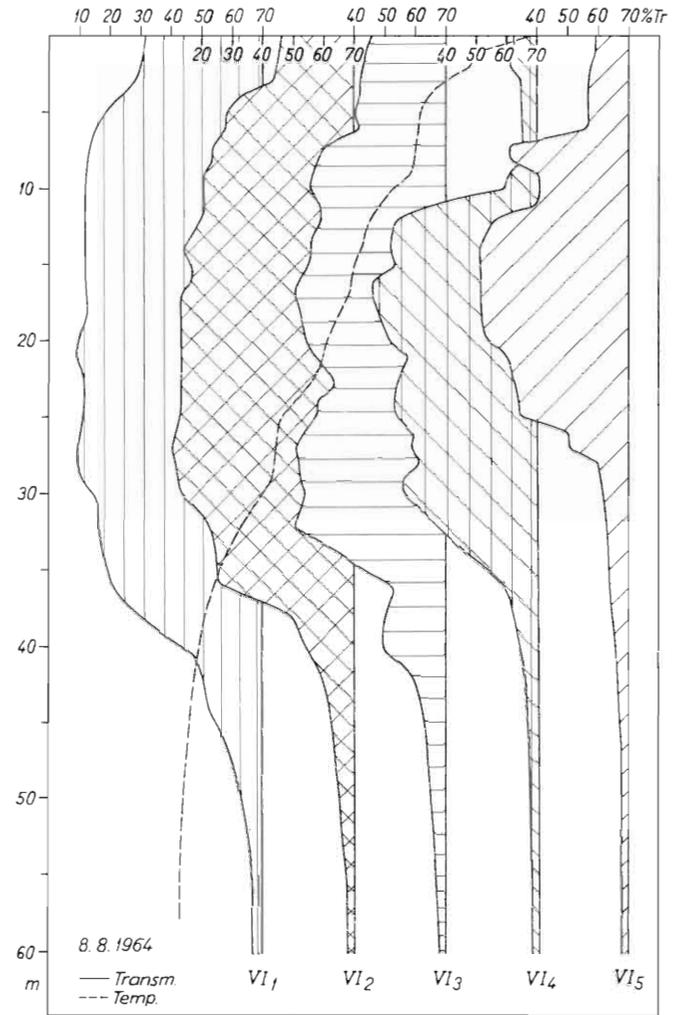


Abb. 38. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil VI im Brienzersee am 8. 8. 1964.

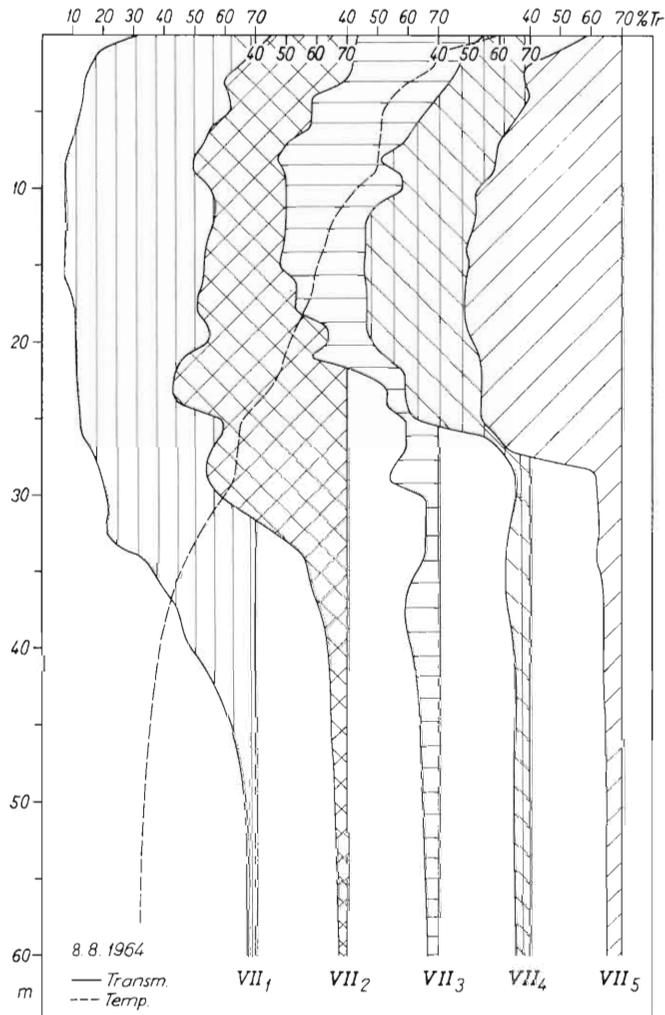


Abb. 39. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil VII im Brienzsee am 8. 8. 1964.



Abb. 40. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil VIII im Brienzsee am 8. 8. 1964.

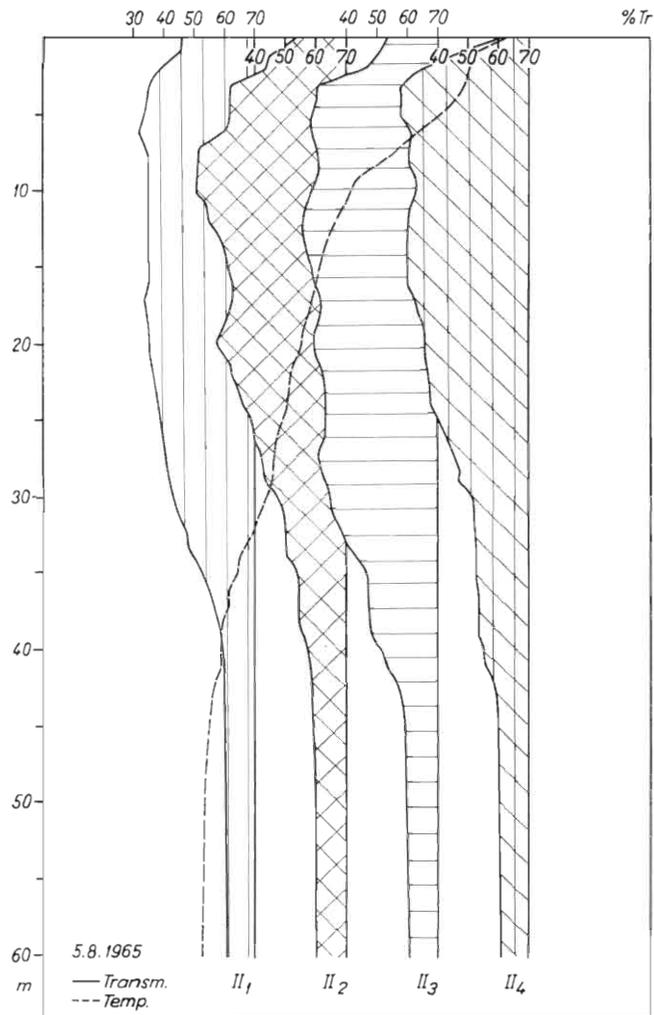


Abb. 41. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil II im Brienzersee am 5. 8. 1965.

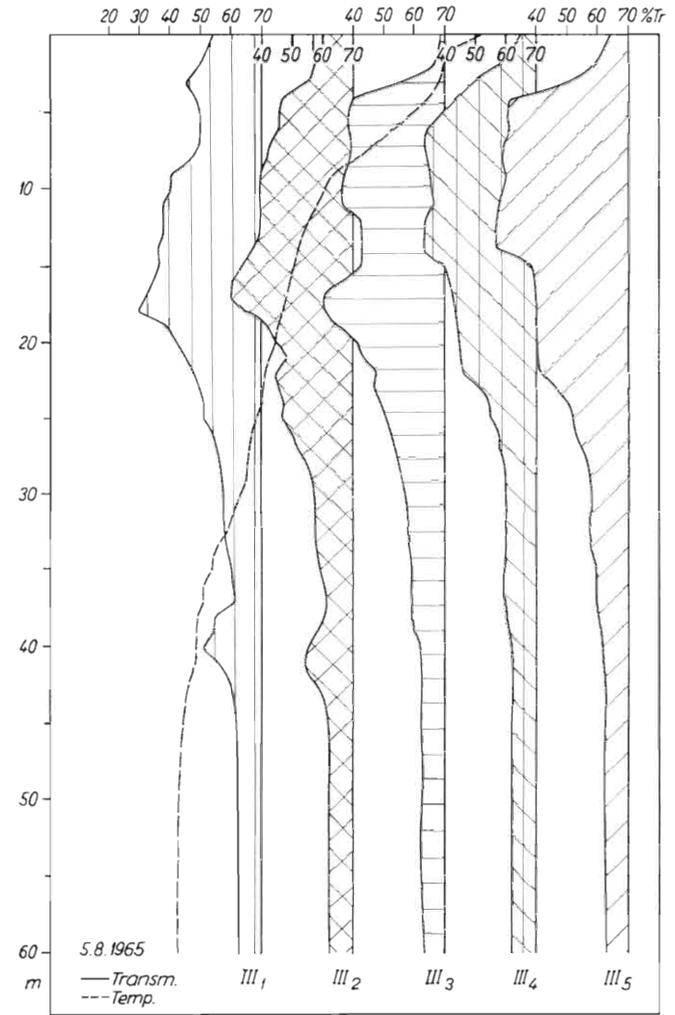


Abb. 42. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil III im Brienzersee am 5. 8. 1965.

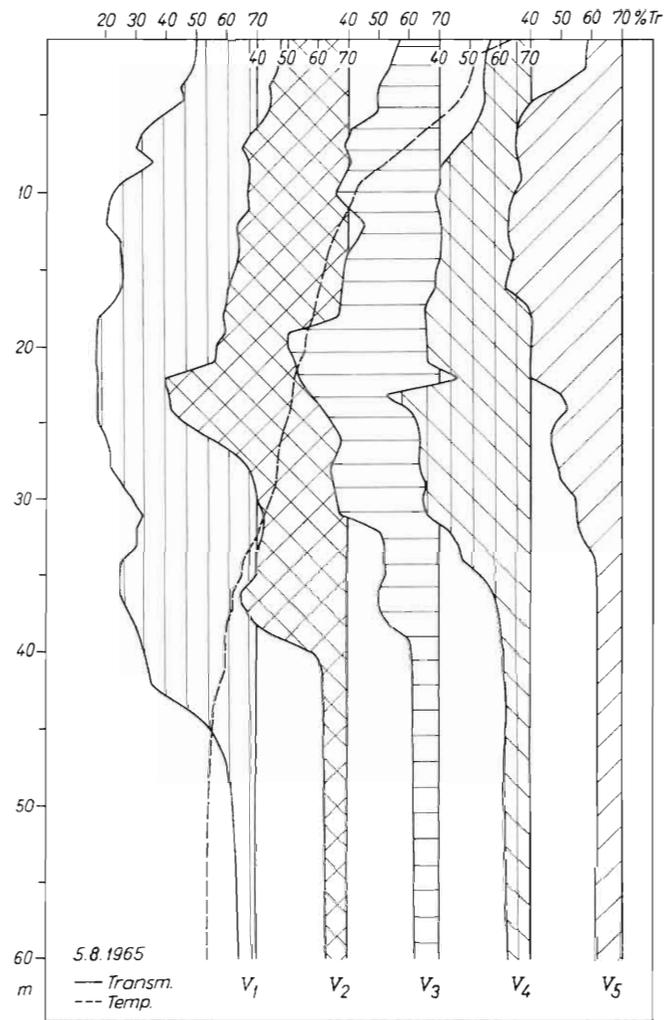


Abb. 43. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil V im Brienzersee am 5. 8. 1965.

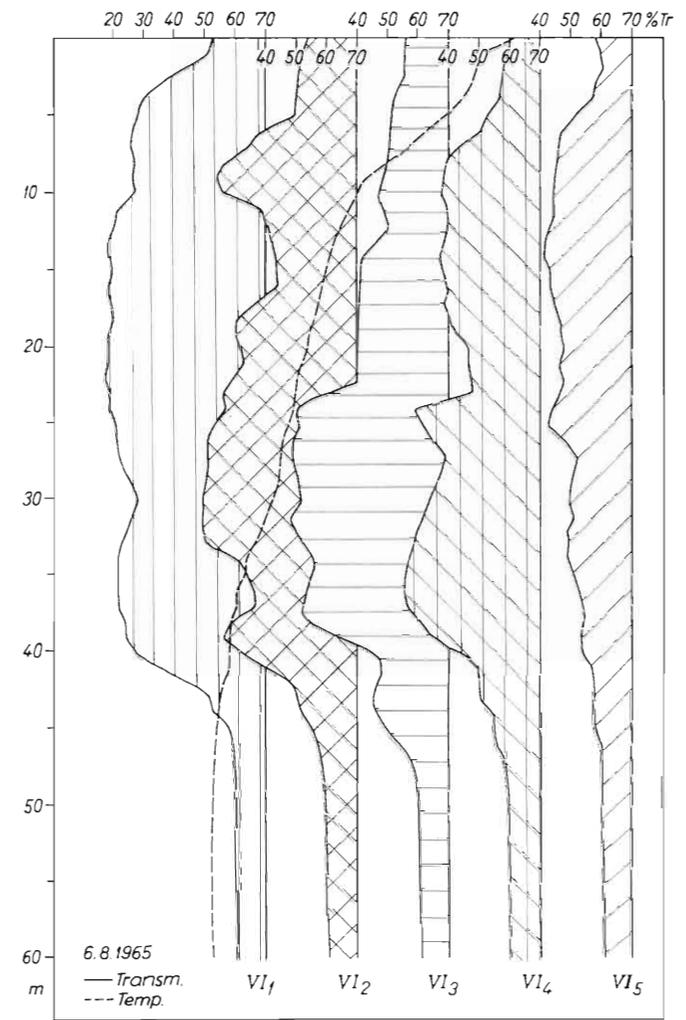


Abb. 44. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil VI im Brienzersee am 6. 8. 1965.

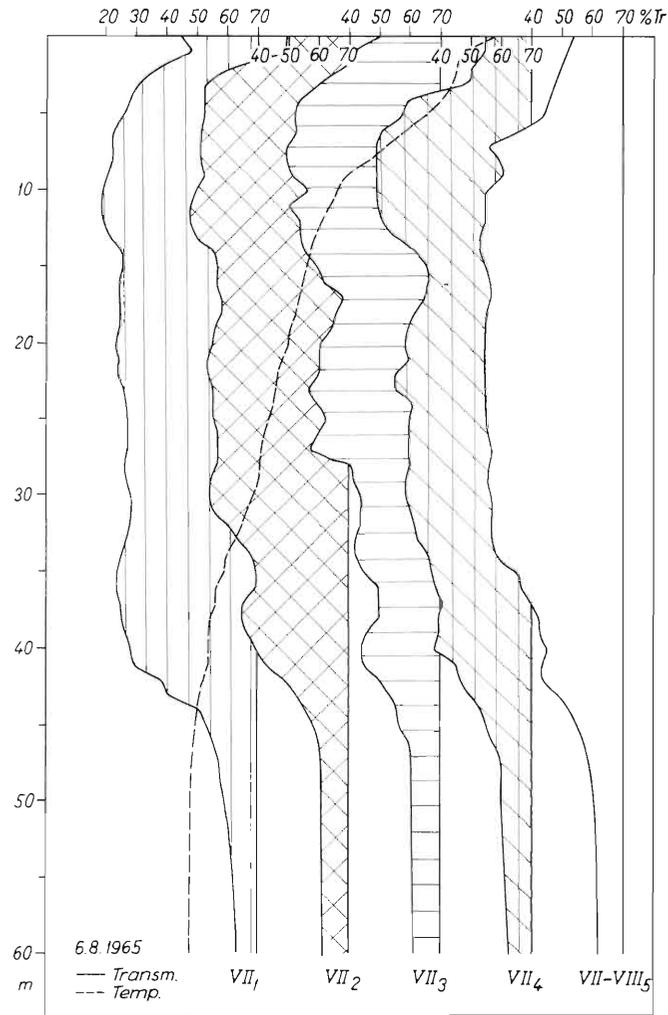


Abb. 45. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil VII, resp. VII—VIII am 6. 8. 1965.

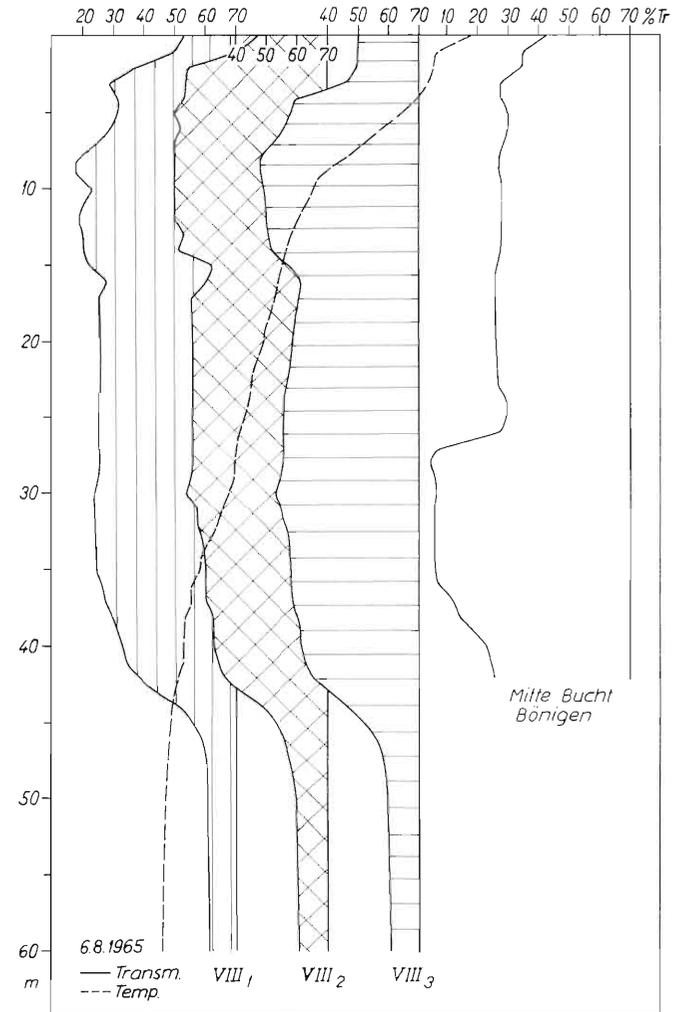


Abb. 46. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil VIII, resp. in der Bucht von Bönigen am 6. 8. 1965.

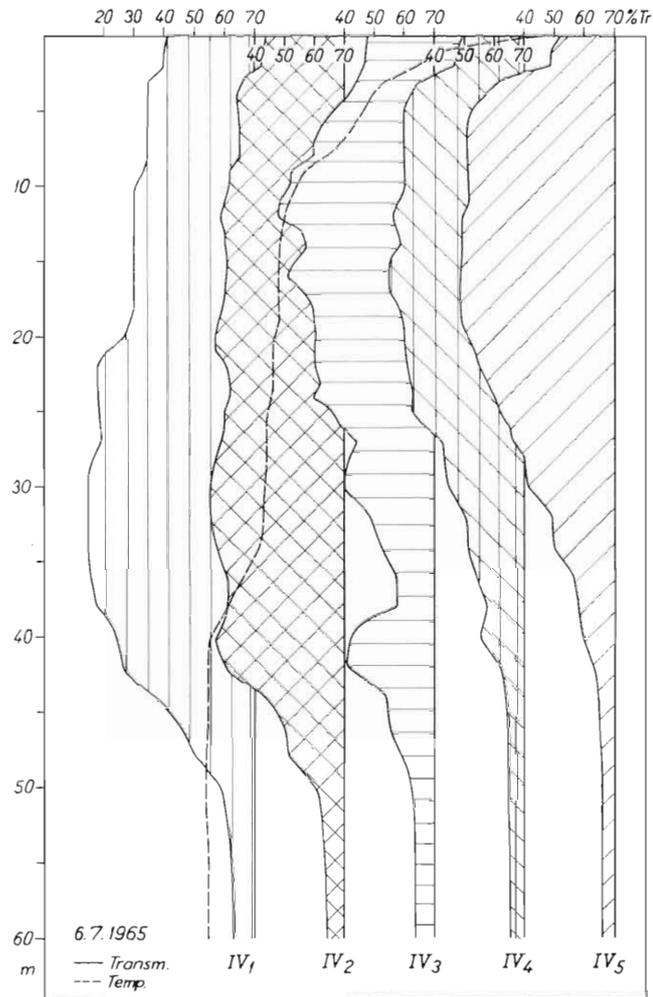


Abb. 47. Transmissions- und Temperaturschichtung bei Profil IV am 6. 7. 1965.

VI. Überlegungen und Untersuchungen über die Ursache des Schwebens

I. Allgemeines

6. 7. 1965: Abb. 47 ist recht instruktiv, wenn man sie mit Abb. 35 vergleicht. Hier wie dort tiefe Einschichtung der Lutschine gegenüber der Aare; aber entsprechend der kühlen Witterung reicht die Trübungszone der Lutschine im Sommer 1965 ca. 10 m, diejenige der Aare ca. 15 m tiefer hinab als im Sommer 1964.

Die Tatsache, daß feinste Partikel sehr langsam absinken ist bekannt; daß sie aber monatelang im gleichen Niveau in Schweben gehalten werden und bleibende Trübungshorizonte bilden, trotzdem es sich um Materialien, die zweieinhalbmal so schwer wie Wasser sind, handelt, versetzt uns stets in Staunen. Betrachten wir die Abbildungen über Trübungshorizonte, z. B. Abb. 35—47, so fällt auf, daß die untere Begrenzung eines Trübungshorizontes stets mit einer Zone eines mehr oder weniger ausgeprägten Tempera-

tursprunges zusammenfällt. In einer Temperatursprungschicht kann wohl die Absinkgeschwindigkeit eines Teilchens abnehmen weil die Viskosität des Wassers mit abnehmender Temperatur zunimmt. Diese Tatsache genügt aber keinesfalls um die Anhäufung von Trübungsstoffen in dieser Zone zu erklären. Vielmehr muß ein weiterer Faktor dazukommen, nämlich Turbulenz. Diese entsteht, sobald eine bestimmte kritische Geschwindigkeit überschritten wird, die um so kleiner sein kann, je größer der Strömungsquerschnitt ist. Die sogenannte Reynold'sche Zahl, die diese Größen berücksichtigt, zeigt, daß in natürlichen Gerinnen und namentlich in Seen praktisch jede Strömungsbewegung zur Turbulenzerscheinung führt. Laminare Strömung schlägt zudem um so eher in turbulente um, je größer die Geschwindigkeitsschwankungen in der Fließrichtung und somit je rauher die Grenzflächen sind. Durch diese Geschwindigkeitsschwankungen werden Turbulenzelemente losgelöst und bewegen sich quer zur Strömungsrichtung. Nach unseren Überlegungen können für das dauernde Schweben von Teilchen in einer Temperatursprungschicht folgende Faktoren wirksam sein:

a) Wird eine Wassermasse über eine dichtere geschoben, so entstehen im Gebiete der Gleitfläche Schubspannungen. Die Querbewegung wird in diesem Gebiet zudem durch den Dichtesprung gehemmt. Trotzdem können wir beobachten, wie durch das Über-einandergleiten der Temperatursprung allmählich tiefer gedrückt wird, d. h. es findet in diesem Gebiet Durchmischung statt. Diese kann nur so vor sich gehen, indem durch eine bestimmte Kontrollfläche kühlere „Wasserballen“ nach oben, wärmere nach unten durch-treten. Es wäre nun denkbar, daß die aus der Grenzschicht losgerissenen „Wasserballen“ mit größerer Geschwindigkeit nach oben geschleudert, die nach unten sich bewegenden mit kleinerer Geschwindigkeit hinuntergedrückt würden. Die Gesamtmengen der nach oben und nach unten durchtretenden Wassermassen müssen zwar in der Zeiteinheit gleich mächtig sein. Aber weil der Widerstand, den ein fester Körper in einer bewegten Flüssigkeit erfährt, um so eher proportional dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit ist, je vollkommener die Turbulenz ausgebildet erscheint, so wäre denkbar, daß das Absinken feinsten Teilchen durch ein Überwiegen der nach oben gerichteten gegenüber der nach unten gerichteten Beschleunigung ausgeglichen und daß auf diese Weise die betreffende Zone gewissermaßen zu einer „Sinkstoffalle“ würde.

b) Zudem müssen die nach oben wandernden „Wasserballen“, da sie aus einem Gebiet

Tab. 25. Absinkgeschwindigkeit und Fallzeit kleinster mineralischer Teilchen bei verschiedenen Temperaturen

Wasser- temperatur	Teilchen- durchmesser μ	Fallgeschw. $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$	Fallzeit $\text{Min.} \cdot \text{m}^{-1}$
5° C	100	0,593	2,81
	40	0,095	17,56
	20	0,024	70,2
	10	0,006	280,9
	2	0,0002	7022
15° C	100	0,782	2,11
	40	0,126	13,22
	20	0,031	52,9
	10	0,008	211,4
	2	0,0003	5285

niedriger Temperatur und also größerer Viskosität stammen, gegenüber den nach unten sich bewegenden, den absinkenden Teilchen ein Übergewicht an aufwärtsgerichteter Beschleunigung zuführen. Dies würde auch dann gelten, wenn die durchschnittliche Geschwindigkeit der sich aufwärtsbewegenden Wasserteilchen derjenigen der absinkenden gleich wäre.

Wie gering im übrigen die Absinkgeschwindigkeit für feinste Teilchen ist, zeigt Tabelle 25, deren Werte für verschiedene Teilchendurchmesser und für mittlere Winter- und Sommertemperatur bei einem spez. Gewicht von $2,65 \text{ p/cm}^3$ (Quarzkörner) nach der Stokesschen Formel berechnet wurden.

2. Experimenteller Nachweis des Existierens einer „Sinkstoffalle“

Um nachzuweisen, daß feinste Mineralpartikel in einer Temperatursprungschicht tatsächlich schwebend verharren können, stellten wir verschiedene Experimente an. Das eindrucklichste sei hier geschildert:

a) Versuchsanordnung. In das eine zweier Standgläser von 1 m Höhe und 8 cm Durchmesser wurde eine elektrische Heizung in bestimmter Tiefe (siehe Abb. 48) eingebaut. Sie bestand aus dünnem Chromnickeldraht und beeinflusste die Wasser- und Sinkstoffbewegung nicht. Nun wurde Leitungswasser in die Standgläser gefüllt und dann die Heizung während ca. 20 Minuten eingeschaltet, so daß die Temperatur, die vorerst $17,2^\circ \text{ C}$ betrug, oberhalb der Heizung auf $21,3^\circ \text{ C}$ stieg. Um jeden Polarisierungseffekt auszuschalten, wurde Wechselstrom verwendet.

b) Verlauf und Ergebnis des Versuchs. Gleichzeitig wurde in beide Standgläser ein kleines Quantum gut dispergierten Sinkstoffmaterials, das aus der Seemitte des Walensees entnommen worden war, vorsichtig zugegeben. (Siehe Abb. 48 b.) Den weiteren Verlauf des Versuchs zeigen die Abb. 48 c—e.

Während ca. 2 Stunden blieb der Zustand wie in Abb. 48 d unverändert. Dann wurde die Heizung ausgeschaltet. Die Temperaturdifferenz blieb praktisch konstant, aber innert einer Viertelstunde ergab sich der Zustand wie in Abb. 48 e ersichtlich.

c) Das Experiment zeigt:

1. Solange die Heizung in Betrieb ist, solange also durch Konvektionsströmung in der Sprungschichtgegend Turbulenz erzeugt wird, wirkt diese als „Sinkstoffalle“.
2. Sobald aber die Heizung ausgeschaltet und die Turbulenz unterbrochen wird, fallen die Partikel durch den betreffenden Horizont hindurch und kommen zur Sedimentation.

Auf die Verhältnisse in Seen angewendet ergibt sich: Trübungshorizonte aus anorganischem Material bilden sich in Gebieten von Temperatursprüngen, aber nur wenn dort gleichzeitig Turbulenz herrscht. Die Turbulenz wird entweder durch wind- oder zuflußbedingte Strömungen verursacht. In stark durchfluteten Seen, wie Brienzer-, Bieler-, Bodensee usw., bilden sich deshalb die ausgeprägtesten Trübungshorizonte.

3. Beobachtungen über Schwebestoffe im Mondsee

Anlässlich des Autobahnbaus Salzburg-Wien wurden mehrere tausend m^3 Schutt in den Mondsee geworfen. Prof. Einsele in Scharfling beobachtete hierauf, daß ein beträchtlicher Teil feinsten Trübungsstoffe während Monaten im See in Schwebelag blieb. Die Fischerei

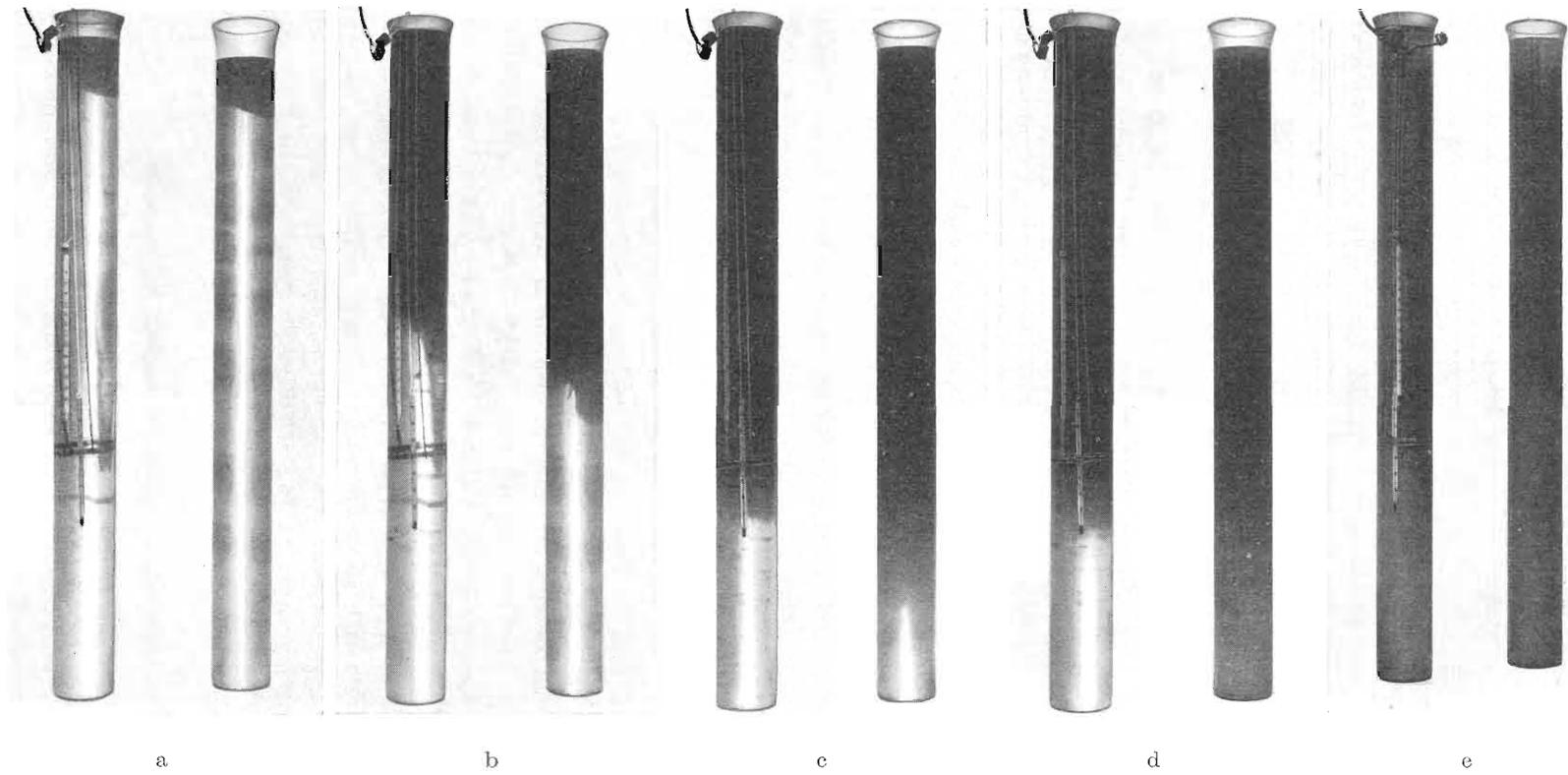


Abb. 48a—e. Experiment zum Nachweis des Existierens einer „Sinkstoffalle“ im Gebiet eines Temperatursprunges.
Erläuterung siehe Text (Seite 65).

erlitt dadurch bedeutenden Schaden, und der österreichische Staat wurde bei einem Prozeß, auf Grund eines Gutachtens von Einsele, zur Zahlung von 600 000 Schilling Schadenersatz an die betroffenen Fischer verurteilt. In einem Versuchsbecken konnte Einsele bei Anfachung einer Strömung von geringer Geschwindigkeit (mit Hilfe eines an der Oberfläche wirkenden Schaufelrades) die gleiche Erscheinung wie im See beobachten. In verdankenswerter Weise hat mich dann Herr Prof. Einsele eingeladen, an seiner Versuchsanordnung in Scharfling Experimente durchzuführen. Einer Wassermasse mit geringer Konzentration wurde eine solche mit einer Kochsalzkonzentration von 3% unterschichtet. Nachdem die obere Wassermasse in Strömung versetzt worden war, wurden aus den Sedimenten des Mondsees stammende Trübungsstoffe beigegeben. Es konnte beobachtet werden, daß diese wohl in der Konzentrationsprungschicht kurze Zeit schwebten; dann aber fielen sie durch diese hindurch, und bald zeigte die gesamte Wassermasse gleichmäßige Trübung. Wir erwähnen diesen Mißerfolg, weil er zeigt, daß Strömung, die an der Oberfläche ihren Ausgang nimmt, z. B. windbedingte, nicht imstande ist Trübungshorizonte in bestimmter Tiefe aufrecht zu erhalten, wohl deshalb, weil die Turbulenzelemente in diesem Fall von oben nach unten wandern.

III. Teil

Untersuchungen über die Bedeutung der Zuflüsse und der Erdrotation für Stömungen und Zirkulationen in Seen

A. Einführung

I. Zielsetzung

Wie wir im II. Teil dieser Arbeit zeigen konnten, sinken die Wassermassen von Aare und Lütchine bis in die Tiefe annähernd gleicher Dichte des Sees und schieben sich von hier aus langsam dem rechten Ufer (von der Flußmündung aus betrachtet) entlang. Weil, wie wir anhand der Schwebestoffkonzentration weiter feststellten, nur die oberflächennahen Schichten zum Abfluß kommen, die zugeflossenen Wassermassen, sobald sie eine entsprechende Tiefe erreicht haben, sozusagen unbeeinflußt vom Sog des Abflusses an diesem vorbeiziehen, muß im See in bestimmter Tiefe eine kontinuierliche Linksrotation zustande kommen. Unser Bestreben war deshalb von 1964—1966 dahin gerichtet, diese Zirkulationsströmungen messend zu erfassen, ihr Zustandekommen zu erklären und mit Beobachtungen in andern Seen, seien es eigene oder solche fremder Autoren, zu konfrontieren. Denn wir sind überzeugt, daß es sich hier um ein allgemeingültiges Phänomen handelt. Wie weit diese Linksrotation auch über- und untergeschichtete Wassermassen zu erfassen vermag, wird Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

II. Allgemeines über Strömungen

In RUTNERS „Grundriß der Limnologie“ [46], in welchem in hervorragender Weise das limnologische Wissen bis 1961 zusammengefaßt zu finden ist, lesen wir auf S. 64:

„Wenn wir uns nunmehr den nichtrhythmischen Wasserbewegungen, den eigentlichen Strömungen, zuwenden, so betreten wir damit ein Wissensgebiet, das wohl in der Meeresforschung einen großartigen Ausbau erfahren hat, in der Limnologie jedoch wegen der Enge der in Betracht kommenden Räume und der sich daraus ergebenden geringen und daher schwer zu messenden Stromgeschwindigkeiten noch wenig erforscht ist.“

Weiter führt der Autor aus, daß nur von wenigen großen Becken, wie dem Bodensee und einigen schottischen Seen Beobachtungen vorliegen, deren Verallgemeinerung noch verfrüht wäre. Wir werden auf diese und weitere Beobachtungen noch zu sprechen kommen. Hier sei vorerst festgestellt, daß sie, mit Ausnahme von AUERBACH und SCHMALZ [1],

vor allem die Windwirkung von der Oberfläche her als treibende Kraft betrachten, und daß die Wirkung der Zuflüsse kaum beachtet wird. Wir glauben, daß diese einseitige Betrachtungsweise sich aus fortwährendem Vergleichen mit den großartigen Forschungsergebnissen in der Ozeanographie ergab. So schrieb KREITMANN in „Etudes des courants du lac Léman“ [30]:

„Dans une masse d'eau aussi considérable que le Léman, dont le volume atteint 89 millions de mètres cubes, la largeur 13 km 800, la longueur 72 kilomètres et la profondeur 153 mètres, l'influence des affluents et de l'émissaire est à peu près nulle, même dans la partie rétrécie du Petit Lac.“

Diesen Ausführungen lag noch die Annahme zugrunde, daß der Fluß sich auf die ganze Breite des Sees mehr oder weniger gleichmäßig verteilt, und so ergab sich auf der Höhe von Ouchy eine Strömungsgeschwindigkeit, wie KREITMANN errechnete, von ca. 27 mm pro Minute. Daß die Zuflüsse für die Meeresströmungen praktisch keine Rolle spielen ergibt sich schon aus der Tatsache, daß das gesamte Einzugsgebiet des Meeres kleiner ist als die Gesamtheit der Meeresoberfläche, während beispielsweise beim Brienersee das Einzugsgebiet 49mal, beim Bielersee sogar 60mal die Fläche des Seereals ausmacht.

KALLE unterscheidet in „Allgemeine Meereskunde“ [11] zwischen primären Kräften, die Strömungen auslösen und erhalten, und sekundären, die lediglich vorhandene Bewegungen beeinflussen. Die primären Kräfte werden in innere und äussere unterteilt. KALLE führt aus:

„Die äußeren Kräfte, welche Meeresströmungen hervorrufen, bestehen in der tangentialen Schubkraft des Windes, in den Gezeitenkräften sowie in den Änderungen des Luftdruckes. Die Schubkraft des Windes spielt dabei die Hauptrolle. Sie erzeugt die Triftströme an der Meeresoberfläche und beeinflusst durch den Anstau der transportierten Wassermassen die inneren Druckkräfte.“

Die genannten Triftströme wurden auch in Seen von verschiedenen Forschern wie WEDDERBURN und in neuerer Zeit von MORTIMER [39] eingehend untersucht, und zwar vor allem in schottischen Seen, was bei deren Windexponiertheit infolge Meeresnähe und Lage der Seelängsachse nicht weiter verwundert.

Zu den sekundären Kräften zählt KALLE die Reibungskräfte, die, wie wir im II. Teil unserer Betrachtungen gesehen haben, eine bedeutende Rolle beim Übereinanderhinweggleiten von Wasserschichten spielen, indem vorwiegend in den „Gleithorizonten“ turbulente Bewegungen ausgelöst werden. Ferner gehört hierher die ablenkende Kraft der Erdrotation, der Coriolis-Effekt.

III. Die ablenkende Kraft der Erdrotation

Wir sind überzeugt, daß die Corioliswirkung, d. h. die Rechtsablenkung, die ein bewegter Körper auf der Nordhalbkugel der Erde erfährt, in unseren Untersuchungen von überragender Bedeutung ist. Deshalb sei auf diesen Effekt näher eingegangen. Die Ableitung der betreffenden Formeln ist recht umfangreich und wir müssen diesbezüglich auf die Lehrbücher der Hydrodynamik und der Physik verweisen. Wir sind gewohnt, alle Bewegungen relativ zu Erde, also in bezug auf ein mit der Erde rotierendes Koordinaten- oder Bezugssystem zu betrachten. Die Bewegungsgesetze, die für ein ruhendes System gelten, behalten ihre Gültigkeit, 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 f_x, f_y, f_z , die jeder bewegte Massenpunkt erfährt. Es gilt dann

1. $f_x = -2 \omega \sin \varphi v - 2 \omega \cos \varphi w$,
2. $f_y = 2 \omega \sin \varphi u$,
3. $f_z = 2 \omega \cos \varphi u$.

Darin bedeuten ω die Winkelgeschwindigkeit der Erde, also $7,29 \cdot 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$, φ die geographische Breite, u, v, w die Geschw. in $x-, y-, z$ -Richtung. f_z ($z =$ Koordinate in Richtung Erdmittelpunkt) kann gegenüber der Erdbeschleunigung vernachlässigt werden; denn eine Überslagsrechnung zeigt, daß sich auch bei einer verhältnismäßig großen Strömungsgeschwindigkeit von beispielsweise 700 m/h in unseren Breiten ein Verhältnis von $2,8 \cdot 10^{-6}$ für $f_z : g$ ergibt ($g =$ Erdbeschleunigung).

Ebenso kann $2 \omega \cos \varphi w$, da w klein gegenüber u ist, in dem Ausdruck für f_x vernachlässigt werden. Betrachtet man nun die Horizontalkomponenten, so spricht man von der ablenkenden Kraft der Erdrotation, die eine Trägheitskraft, also eigentlich eine Scheinkraft ist. Sie wirkt stets senkrecht zur momentanen Bewegungsrichtung, und zwar auf der Nordhalbkugel nach rechts oder nach den Bezeichnungen von V. W. EKMAN „cum sole“, auf der Südhalbkugel nach links oder „contra solem“. Unter dem Einfluß der nach ihrem Entdecker, dem französischen Physiker Coriolis, benannten ablenkenden Kraft muß ein Wasserteilchen mit einer Horizontalanfangsgeschwindigkeit v und auf welches keine weiteren Kräfte einwirken, auf der nördlichen Halbkugel einen Kreis mit dem Radius $r = \frac{v}{2 \omega \sin \varphi}$ im Uhrzeigersinn beschreiben. Die Umlaufzeit $t = \frac{2 \pi r}{v}$ wird daher $t = \frac{\pi}{\omega \sin \varphi}$. Man bezeichnet die Zeit $\frac{2 \pi}{\omega \sin \varphi}$, die ein Foucaultsches Pendel zu einem Umlauf benötigt, als „Pendeltag“. Der Trägheitskreis wird also in einem halben Pendeltag beschrieben, unabhängig von der Anfangsgeschwindigkeit des Wasserteilchens. Auf unsere Untersuchungen angewendet ergibt sich:

1. Die zufließenden Wasserteilchen bilden nach ihrem Absinken in entsprechende Tiefen einen Rechtswirbel. Diese Behauptung wird durch die Abbildung auf Tafel I, auf welcher eine Flugaufnahme der Eidgenössischen Landestopographie über dem Einfluß der Aare in den Bielersee zu sehen ist, eindrucklich bestätigt.

Die Aufnahme wurde aus ca. 4000 m Höhe am 19. Mai 1951, also zu einer Zeit, da sich die Aare noch in geringer Tiefe einschichtete, gemacht. Zahlreiche Aufnahmen von andern Zuflüssen zeigen ein ähnliches Bild.

2. Weil ständig neue Wassermassen nachdrängen, sich aber auf ziemlich großer Fläche fächerförmig ausbreiten, müssen die Wirbel weitergeschoben werden, so daß sich für jedes Wasserteilchen eine zyklonale Bahn ergeben muß (siehe Abb. 55).

3. Weil die Wassermassen auch in ihrer Gesamtheit nach rechts abgelenkt werden, schließlich aber gegen das Ufer prallen, werden sie vom Ufer durch eine Zwangskraft, die gleich der ablenkenden Kraft und zur Bewegungsrichtung senkrecht gerichtet ist, in einer Bahn parallel zum Ufer geführt.

4. Dadurch kommt die im I. Abschnitt erwähnte Linksrotation in Zuflusstiefe zustande.

IV. Strömungsbedingte Grenzflächenneigungen

KALLE zeigt in seinem Lehrbuch „Allgemeine Meereskunde“ [11], daß Strömungen Grenzflächenneigungen senkrecht zur Strömung bewirken. Es sei auf diese ausführliche Begründung und Herleitung der betreffenden Formeln verwiesen und wir wollen daraus lediglich festhalten:

1. In der zweifach geschichteten Wassermasse, in welcher die leichtere Schicht mit Dichte ζ_1 selbstverständlich auf der schwereren mit Dichte ζ_2 ruht und in welcher wir die Strömungsgeschwindigkeit der oberen Wassermasse mit v_1 , diejenige der unteren mit v_2 bezeichnen, zeigt sich eine Neigung der Grenzfläche, wobei gemäß der Grenzflächenformel von Marguets gilt:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{2 \omega \sin \varphi (\zeta_2 v_2 - \zeta_1 v_1)}{g (\zeta_2 - \zeta_1)}.$$

Weil zwischen ζ_1 und ζ_2 meist ein sehr geringer Unterschied besteht und weil v_2 meist sehr viel kleiner als v_1 ist, so wird $\operatorname{tg} \gamma$ negativ, die Schichtgrenze zeigt also eine Neigung nach rechts (in Strömungsrichtung betrachtet).

2. An der Wasseroberfläche zeigt sich eine Neigung senkrecht zur Strömungsrichtung nach der Formel (KALLE [11], S. 264):

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{2 \omega \sin \varphi}{g} v_1.$$

Diese Neigung des Wasserspiegels ist ganz unbedeutend und kann für unsere Betrachtungen vernachlässigt werden.

3. Bei rotierenden Strömungssystemen ergibt sich zudem eine Verstärkung der Rechtsneigung in der Grenzfläche durch die Zentrifugalwirkung. Die Rotationsgeschwindigkeit der oberen Wassermasse in der Entfernung r von der Rotationsachse sei v' , in der unteren v'' . Dann lautet die Gleichung für die Neigung der Grenzschicht

$$\operatorname{tg} \gamma = -\frac{2 \omega \sin \varphi (\zeta_2 v'' - \zeta_1 v')}{g (\zeta_2 - \zeta_1)} - \frac{1}{r g} \frac{(\zeta_2 v''^2 - \zeta_1 v'^2)}{(\zeta_2 - \zeta_1)}.$$

Am Beispiel des Golfstromes errechnete KALLE $\operatorname{tg} \gamma$ für $r = 100$ km, $\varphi = 36^\circ$, $\zeta_1 = 1,0266$, $\zeta_2 = 1,0276$, $v' = 100$ cm/sec, $v'' = 0$ cm/sec zu $898 \cdot 10^{-5} + 105 \cdot 10^{-5}$. Dies entspricht 12% der unter 1. genannten Grenzflächenneigung bei gleichen Annahmen.

Zusammenfassend dürfen wir sagen, daß wir in Seen, wo die Dichtedifferenz praktisch nur durch die Temperaturdifferenz bewirkt wird und dementsprechend recht klein bleibt, die unter 2. und 3. genannten Einflüsse vernachlässigen dürfen. Eine Überschlagsrechnung für die unter 1. genannte Grenzflächenneigung ergibt, wenn wir für die Temperatur oberhalb des Dichtesprunges 10° C, unterhalb 5° C und als Strömungsgeschwindigkeit $v_1 = 240$ m/h, $v_2 = 0$ m/h annehmen, $\operatorname{tg} \gamma = -3,2 \cdot 10^{-3}$. Dies bedeutet, daß die Grenzschicht pro km um 3,2 m nach rechts fällt. Leider fehlen entsprechende Temperaturmessungen in unseren Erhebungen. Aber HOFER [24] hat 1946, anläßlich ausführlicher Untersuchungen über die Wärmebilanz des Brienersees, Temperaturquerschnitte über den See aufgenommen, und wir zeigen in den Abb. 49 und 50 zwei typische Beispiele aus dem Profil Säge Ringgenberg–Erschwanden. Es ergibt sich ein deutliches Abfallen der Thermoklinen in Sprungschichttiefe von der Seemitte her gegen die Ufer. Das Mittel aus sämtlichen neun vom 12. Mai bis 21. Nov. 1946 zur Verfügung stehenden Profilen ergibt ein Gefälle

von 6,9 m/km nach Norden und von 3,8 m/km nach Süden. Dabei ist zu bedenken, daß eine bestimmte Neigung auch dadurch zustande kommt, daß die Zuflüsse in ihrer Einschichtungstiefe den Temperatursprung infolge turbulenter Durchmischung fortwährend tiefer „drücken“. Dem steht andererseits ein ständiger Austausch mit den Wassermassen der Seemitte gegenüber, welcher bestrebt ist, die instabile Schichtung, die durch Sprungschichtneigung zustande kommt, auszugleichen.

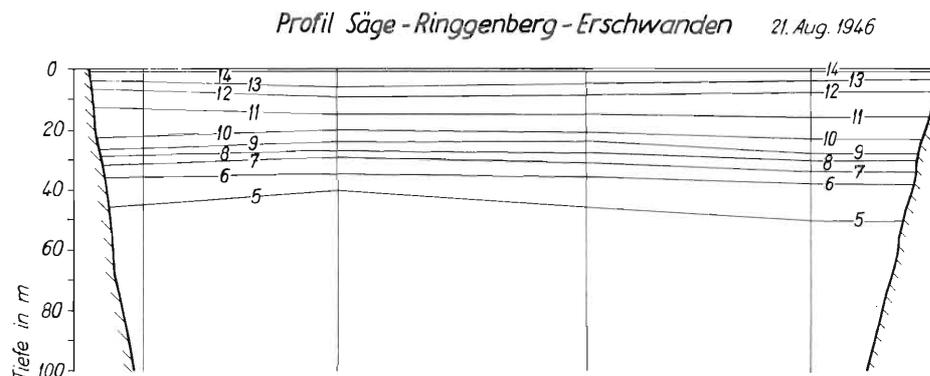


Abb. 49. Strömungsbedingte Neigung der Isothermen im Brienzersee (nach Angaben von HOFER).

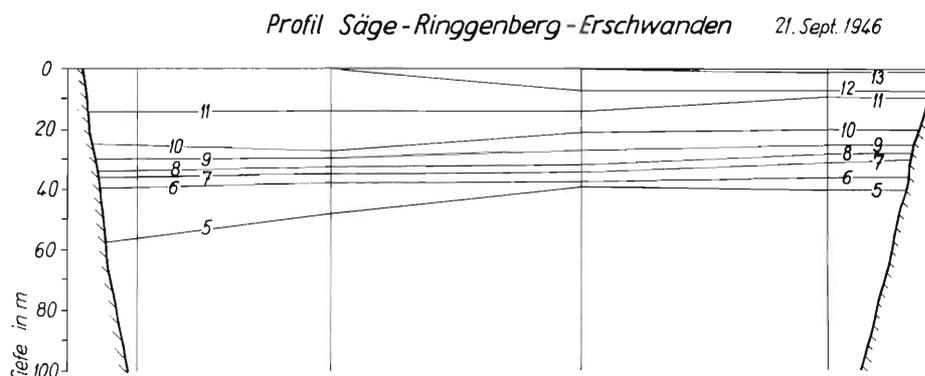


Abb. 50. Strömungsbedingte Neigung der Isothermen im Brienzersee (nach Angaben von HOFER).

Die senkrechten Linien auf den Abb. 49 und 50 zeigen die Lage der vier Lotpunkte. In Abb. 49 erkennen wir eine ausgesprochene Neigung der Thermokline von 5° C gegen Süden (ausgiebige Wasserführung der Lutschine) und eine schwächere gegen Norden (mittlere Wasserführung der Aare). Daß die Thermoklinen in den obersten Wasserschichten nach beiden Längsufern des Sees ansteigen, zeigt, daß die Wasserdecke bis ca. 15 m Tiefe nicht oder zum mindesten langsamer rotiert als die durch Zufluß bewegte Schicht zwischen 15 und 45 m. Denn $\text{tg } \gamma$ muß in der oben angeführten Formel positiv werden, wenn die Geschwindigkeit der überlagernden Schicht kleiner ist als diejenige der tieferen (bei geringen Dichteunterschieden). Abb. 50 zeigt starke Neigung der Thermokline von 5° nach Norden, schwache nach Süden, was, wie das Hydrographische Jahrbuch bestätigt, intensiver Wasserführung bei der Aare (Mittel vom 18.—21. Sept. $49,5 \text{ m}^3/\text{sec}$), geringem Abfluß der Lutschine (Mittel vom 18.—21. Sept. $12,0 \text{ m}^3/\text{sec}$) zuzuschreiben ist.

Ähnlichen Verlauf der Themoklinen in bestimmter Tiefe, wie er von HOFER im Brienzersee festgestellt wurde, fand ELSTER [18] im Bodensee.



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



Brienzsee, Flugaufnahme der Eidg. Landestopographie vom 3. 8. 1946



Murtensee, Flugaufnahme der Eidg. Landestopographie vom 26. 7. 1946



Bielsee, Flugaufnahme der Eidg. Landestopographie vom 26. 7. 1946

Es sei zum Schluß erwähnt, daß heute in der Ozeanographie aus der Neigung der Grenzflächen auf die Strömungsgeschwindigkeit geschlossen wird. Dies wäre aber in Binnengewässern kaum möglich, weil, wie oben erwähnt, hier weitere, schwierig zu erfassende Faktoren mitspielen.

B. Beobachtungen über zuflußbedingte Strömungen im Brienzersee und einigen Vergleichsseen

I. Methodische Bemerkungen

Über Strömungsmessungen führt KALLE [11] auf S. 111 aus:

„Die Bestimmung der Wasserbewegungen im Weltmeer gehört zu den Hauptaufgaben, allerdings auch zu den schwierigsten der Ozeanographie; denn die Bewegungen sind kompliziert und die Meßtechnik erfordert einen erheblichen Aufwand. Unsere Kenntnisse von den Bewegungsvorgängen im Weltmeer sind deshalb noch recht unvollkommen, obwohl man alle erdenklichen Methoden benutzt.“

Diese Ausführungen eines bedeutenden Forschers, der Theorie und Praxis stets vorbildlich zu kombinieren verstand, können wohl auch für Strömungsmessungen in Seen gelten. Wir kennen folgende Möglichkeiten der Strömungsmessung:

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, von der Verteilung der Temperatur, des Salzgehaltes, der Trübungstoffe usw. ausgehen.

2. Direkte Methoden

a) Methoden der Driftmessungen.

b) Methoden der ortsfesten Strommessungen (z. B. vom verankerten Boot aus). Wir zitieren nochmals KALLE [11]:

„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.“

Es mag nützlich sein, sich die wichtigsten Unterschiede zwischen Strömungen im Meer und in Seen kurz zu vergegenwärtigen.

1. Im Meer handelt es sich meist um weltweite Bewegungen, in Seen um räumlich sehr beschränkte, dafür meist gut abzugrenzende Vorgänge.

2. Während wir es in Ozeanen mit großen Geschwindigkeiten von häufig mehreren km/h zu tun haben, sind Wasserbewegungen in Seen meist schleichend und erreichen höchstens Geschwindigkeiten von einigen hundert m in der Stunde.

3. Wie bereits angeführt, spielt im Meer die Windtätigkeit als „Motor“ für Strömungen eine überragende Rolle, während Zuflüsse kaum ins Gewicht fallen. In Seen ist die Windwirkung ebenfalls bedeutend, wenn durch sie auch vorwiegend Seichesbewegungen ausgelöst werden. Daneben spielen aber die Zuflüsse eine wesentliche, bis heute zu wenig beachtete Rolle.

Für unsere Verhältnisse kamen folgende Möglichkeiten der Strömungsmessung in Betracht:

1. Als indirekte Methode müssen die im zweiten Teil dieser Arbeit genannten Trübungsmessungen bezeichnet werden. Sie ergaben im wesentlichen, daß die durch Zuflüsse zugeführten Wassermassen in bestimmter Tiefe dem rechten Ufer entlang geschoben werden.

2. Weil in Seen die Strömungsgeschwindigkeiten zu gering sind, um die gebräuchlichen Flügelmeßapparate (z. B. Merz-Eckmannsches Gerät) anzuwenden, wählten wir andere Methoden der direkten Messung:

a) Aus Eisenstäben von 6—8 mm \varnothing wurden Rahmen gebildet, die rasch ausgelegt und zusammengeklappt werden konnten. Sie wurden mit dünnem Plastikstoff bespannt, wodurch zwei Flächen von 1—2 m² zustande kamen, die gegenseitig einen horizontalen Winkel von ca. 60° bildeten. Diese Flächen wurden an einer dünnen Nylonschnur hängend in die betreffende Beobachtungstiefe (Einschichtungstiefe des Zuflußwassers) versenkt. An der Wasseroberfläche befestigten wir an der Schnur eine Plastikflasche von 8 l Inhalt. Dieser Schwimmkörper bot dem Wind und der Oberflächenströmung nur geringen Widerstand, der, wie durch zahlreiche Experimente überprüft wurde, gegenüber dem Widerstand der Plastikflächen in den Meßtiefen vernachlässigt werden darf. Immerhin werden hier nur Beobachtungen, die bei Windstille oder bei mäßigem Wind gemacht wurden, veröffentlicht. (Ausnahme siehe Kommentar zu Abb. 53.) Durch Beobachtung der Verschiebung der Plastikflaschen an der Oberfläche konnte auf die Strömungsbahnen in den betreffenden Tiefen geschlossen werden. Ähnliche Vorrichtungen wurden von MERCANTON [35], STÄDLER [55], KELLER [28] und HOFER [24] verwendet. Die jeweilige Lage der Schwebkörper bestimmten wir meist durch Rückwärtseinschnitt. Gelegentlich wurde mit Theodoliten vom Land aus die Verschiebung der „Bojen“ durch Vorwärtseinschnitt ermittelt. Zu diesem Zweck wurde ein Stab mit einer dreieckigen Flagge von ca. 0,2 m² Fläche so an der Plastikflasche befestigt, daß die Lage des Schwebkörpers vom Ufer aus gut zu erkennen war.

b) Meines Wissens wurde von uns erstmals folgende Methode der ortsfesten Strömungsmessung angewendet: Möglichst gleichzeitig mit dem Aussetzen des Schwebkörpers wurde eine Boje in unmittelbarer Nähe so verankert, daß die Ankerschnur vollständig straff gespannt war. Die betreffende Boje ergab einen Fixpunkt, und jetzt konnte die Bewegung des Schwebkörpers mit außerordentlicher Genauigkeit nach Richtung und Geschwindigkeit ermittelt werden. Im Durchschnitt wurde während einer Viertelstunde beobachtet. Oft wurden zwei bis drei Schwebkörper in verschiedenen Tiefen gleichzeitig verfolgt. Die Methode eignet sich aus Zeitgründen nur in Seen mit geringer Tiefe. Sie wurde von uns beispielsweise im Murten- und im Bielersee angewendet. Sie erlaubt aber, jede noch so kleine Strömungsgeschwindigkeit festzustellen.

II. Beobachtungen im Brienersee

Systematische Beobachtungen wurden erst 1965/66 durchgeführt. Sie sollten unsere These, daß das Zuflußwasser gegen das rechte Ufer prallt, den See diesem Ufer entlang durchläuft und dadurch eine Linksrotation zustande bringt, stützen. Die Schwebflächen wurden deshalb 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. 51 und 52 dargestellt. Dabei ist zu beachten, daß die Pfeilspitzen die Strömungsrichtung, die großen Kreise oder Doppelkreise den Ort des Aussetzens des Schwebkörpers, ein kleiner Kreis den Ort des ersten, die Mitte von zwei kleinen Kreisen den Ort des zweiten Rückwärtseinschnittes usw. angeben.

1. Über die Messungen vom 15.—17. Sept. 1965 (Abb. 51, Nummern in einfachen Kreisen) orientiert Tabelle 26.

Aus Abb. 51 und Tab. 26 ergibt sich eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 103 m/h, wobei zu beachten ist, daß die Schwebkörper bei Nr. 1, 3, 4 die Strömungsrichtung von örtlichen Randwirbeln angeben. Ein ganz typischer Randwirbel bildet sich jeweils im Gebiet Schneckeninsel-Glote (siehe auch Abb. 52). 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 Schwebkörper Nr. 8 eine so geringe mittlere Strömungsgeschwindigkeit zeigt, weil er während der Nacht vorübergehend in diesen Randwirbel geriet.

2. Messungen vom 10.—13. Okt. 1965 (Abb. 51, Nummern in Doppelkreisen): Gerät Nr. 1 wurde am 10. Okt. um 11.30 h ausgesetzt und zeigte bis zum Einziehen um 19.30 h eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 55 m/h. Am 11. Okt. wurde es erneut um 14.25 h ausgesetzt und ergab gleiche Strömungsrichtung und bis zum Abend eine Geschwindigkeit von 61 m/h. Am 12. Okt. um 13.45 h wurde es an der Stelle Nr. 3 und am gleichen Tag um 17.15 h bei Nr. 4, am folgenden Tag um 10.10 h 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 h eine Strömungsgeschwindigkeit von 21 m/h in NNW-Richtung; am 11. Okt. um 13.10 h bewegte es sich mit 42 m/h in E-Richtung. Diese Erscheinung 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 herpendelt.

3. Messungen vom 23.—28. Juli 1966 (Abb. 52, einfache Kreise): Die Nrn. von 1—10 zeigen den Lauf eines Schwebgerätes, das wir am 23. Juli um 14.00 h vor der Burg in Iseltwald aussetzten und bis zum 28. Juli 8.00 h morgens ständig verfolgten. Die Punkte wurden alle durch Rückwärtseinschnitt ermittelt. Die geschlossenen Linien zeigen beobachtete, die punktierten maßstäbliche Strömungsbahnen (während der Nacht zurückgelegt). Das Strömungsmeßgerät geriet vorerst in den bereits mehrfach erwähnten Randwirbel hinter der Schneckeninsel und wurde dann überraschenderweise durch einen sehr kräftigen Nordwestwindeinbruch, der bloß während ca. 2 Stunden wirksam war, wieder in die Bahn der Lüttschinerströmung gedrängt.

Die weiteren Stationen und Zeiten sind in Tab. 27 zusammengestellt.

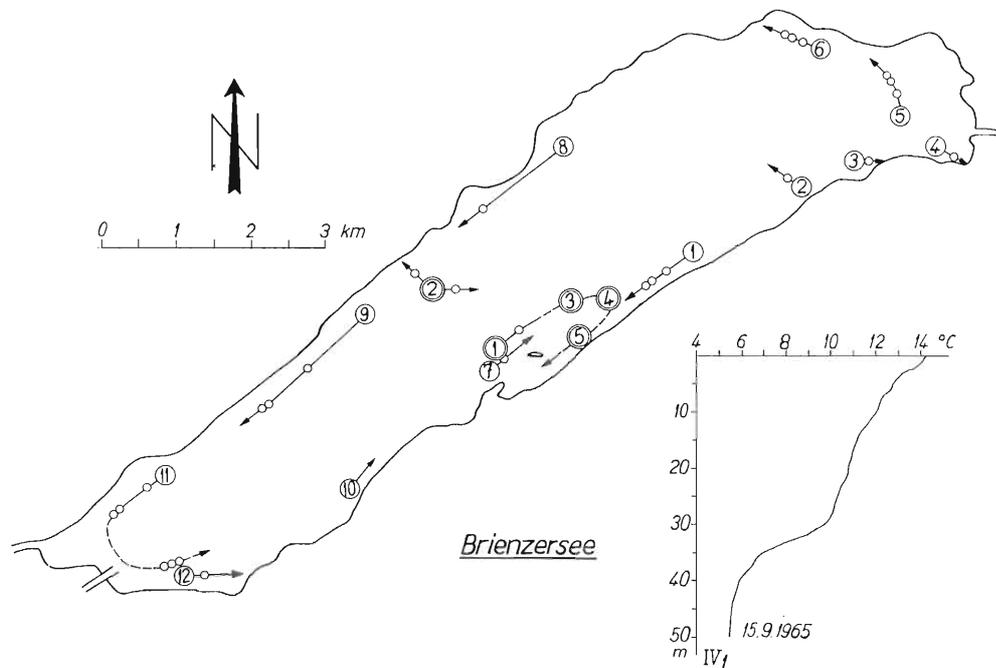


Abb. 51. Ermittlung von Strömungsbahnen im Brienzersee in 25 m Tiefe und Temperaturschichtung am 15. Sept. 1965 bei Punkt IV₁.

Tab. 26. Angaben zu Abb. 51 (einfache Kreise)

Nr.	Aussetzungszeit	Zeit des 1. Rückwärtseinsch.	Zeit des 2. Rückwärtseinsch.	Mittlere Geschw.
1	15. 9., 11.50 h	15. 9., 15.33 h	17.04 h	123 m/h
2	15. 9., 12.08 h	15. 9., 15.45 h		33 m/h
3	15. 9., 12.20 h	15. 9., 15.05 h		90 m/h
4	15. 9., 12.30 h	15. 9., 14.38 h		67 m/h
5	15. 9., 12.40 h	15. 9., 14.22 h	16.20 h	78 m/h
6	15. 9., 12.53 h	15. 9., 14.00 h	16.30 h	135 m/h
7	16. 9., 10.30 h	16. 9., 11.40 h		180 m/h
8	16. 9., 10.47 h	17. 9., 07.50 h		62 m/h
9	16. 9., 11.15 h	16. 9., 18.20 h	17. 9., 08.30 h	95 m/h
10*	16. 9., 11.37 h			
11**	16. 9., 12.20 h	16. 9., 15.50 h	16. 9., 17.40 h	176 m/h
12	16. 9., 13.25 h	16. 9., 15.10 h		100 m/h

*) Beim Aussetzen wurde die auf Abb. 51 eingezeichnete Strömungsrichtung festgestellt. Das Schwebgerät wurde später nicht mehr aufgefunden.

**) Die Stelle mit drei kleinen Kreisen wurde am Morgen des 17. Sept. um 09.20 h ermittelt. Die punktiert gezeichnete Linie gibt die mutmaßliche Strömungsbahn während der Nacht (Strömungsgeschwindigkeit 98 m/h) an.

Die Strömungsgeschwindigkeiten von Nr. 4—6 sind mit Vorsicht zu bewerten, weil das Schwebgerät durch den bereits genannten böigen Sturmwind aus dem Randwirbel abgedrängt wurde und vermutlich längere Zeit zwischen zwei Strömungsbahnen hin- und hergerissen wurde.

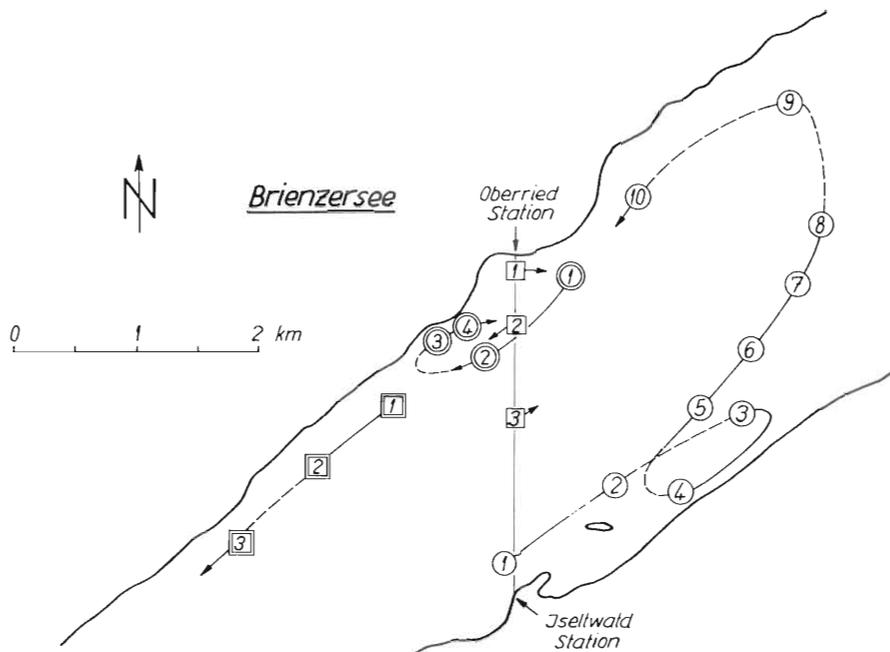


Abb. 52. Ermittlung von Strömungsbahnen im Brienzersee in 19 m Tiefe im Sommer 1966.

Tab. 27. Strömungsbahnen von Schwebgeräten (Abb. 52, einfache Kreise)

Nr.	Zeit	Ungefähre Geschwindigkeit
1	23. 7., 14.00 h	200 m/h
2	23. 7., 20.00 h	115 m/h
3	24. 7., 9.10 h	137 m/h
4	24. 7., 18.40 h	46 m/h
5	25. 7., 19.00 h	36 m/h
6	26. 7., 11.30 h	196 m/h
7	26. 7., 15.00 h	150 m/h
8	26. 7., 19.00 h	75 m/h
9	27. 7., 11.00 h	74 m/h
10	28. 7., 08.00 h	

Am 28. Juli 08.00 h wurde noch beobachtet, wie sich das Gerät in der eingezeichneten Richtung weiterbewegte. Im Verlaufe des Nachmittags mußte es von einem Fischer an Bord genommen werden, weil die Gefahr der Verwicklung mit Fischernetzen bestand.

4. Messung vom 29.—30. Juli 1966 (Abb. 52, Nrn. in Doppelkreisen). Diese Messung war als Fortsetzung der Beobachtungen vom 23.—28. Juli gedacht. Am 29. Juli um 14.00 h wurde das Gerät bei Nr. 1 ausgesetzt, trieb mit einer mittleren Geschwindigkeit von 160 m/h bis Stelle Nr. 2, wo es am Abend des gleichen Tages gesichtet wurde. Am Morgen des 30. Juli fand es sich um 11.00 h an Stelle Nr. 3, geriet also in einen Randwirbel und mußte drei Stunden später bei Nr. 4, wegen Einsetzen eines ziemlich kräftigen Sturmes, an Bord gezogen werden.

5. Beobachtung vom 26. Juli 1966 auf der Geraden zwischen den Stationen Iseltwald und Oberried (Abb. 52, Nrn. in einfachen Quadraten). Auf einer Überfahrt wurden die

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

6. Messung vom 29.—30. Juli 1966 (Abb. 52, Nrn. in Doppelquadraten). Diese Messung wurde gleichzeitig mit Messung 4 durchgeführt. Gerät Nr. 1 wurde am 29. Juli um 12.00 h ausgesetzt, bewegte sich bis um 19.10 h zu Stelle Nr. 2, was mittlere Geschwindigkeit von 160 m/h ergibt. Am Morgen des 30. Juli um 07.30 h 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. Der Punkt Nr. 3 wurde nicht genau bestimmt, und wir möchten deshalb für diese letzte Strecke keine Geschwindigkeitsangaben machen.

Zusammenfassung

Die Beobachtungen zeigen eindeutig am Südufer Strömungsbewegungen in nordöstlicher, am Nordufer in südwestlicher Richtung. Diese Feststellung wird eindrücklich untermauert durch zwei Flugaufnahmen der Eidgenössischen Landestopographie vom 3. 8. 1946 aus ca. 7000 m Höhe. In Tafel II wurden diese Aufnahmen der oberen und unteren Seehälfte zu einem Bild zusammengefügt. Wir erkennen deutlich, wie sich das Lütschinewasser, das bereits auf der rechten Seite des Seeendes einfließt, dem südlichen Ufer entlangschiebt und wie sich in den Buchten rückläufige Randwirbel bilden. Die Wassermassen der Aare, die auf der linken Seite des oberen Seeendes zufließen, bilden vorerst zyklonale Bahnen (siehe auch Abb. 54 und Tafel III) und drängen dann gegen das nördliche Ufer. Die Wirbel füllen den oberen Drittel des Sees sozusagen aus. Deutlich ist die ufernahe Strömung vor Niederried zu erkennen. In der Mitte des Sees findet sich eine unregelmäßige Durchmischungszone, in welche durch turbulente Bewegungen von beiden Seiten Trübungswolken eingewirbelt werden. Weil sich das Zufließwasser um diese Zeit noch in geringer Tiefe einschichtet, ist zu erkennen, wie einzelne Trübungswolken noch in den Sog des Ausflusses gelangen. Dies ist spätestens ab Mitte Juni nicht mehr der Fall.

III. Beobachtungen im Murtensee

1. Begründung der Beobachtungen. Um festzustellen ob es sich bei der zuflußbedingten Linksrotation im Brienersee um ein allgemeingültiges Phänomen handelt, wurden weitere Seen in die Untersuchung einbezogen. Den Murtensee wählten wir, weil er ein ideales Versuchsbecken darstellt und weil nach Lage und Richtung des Einflusses zu erwarten wäre, daß das Brojewasser sich dem linken Ufer entlangschieben und auf diese Weise den See bald wieder verlassen würde. Diese Annahme fand ich als Behauptung bei allen Seeanwohnern, mit denen ich ins Gespräch kam, und sogar bei einigen Fischern. Zwei ältere Fischer aber wußten zu berichten, daß das Brojewasser sich dem rechten Ufer entlang bewege und daß sich bei der Grenchthalbinsel sonderbare und unerklärliche Wirbel bildeten.

2. Messung vom 19. Sept. 1965 in 12 m Tiefe (Abb. 53, Nrn. in einfachen Kreisen). Am Morgen des 19. Sept. setzte ein kräftiger Nordostwind ein, der bis zum 21. Sept.

dauerte, und der die oberflächlichen Wasserschichten gegen Südwesten trieb. Am Mittag hatte sich bereits eine leichte Sprungschichtneigung in südwestlicher Richtung, welche durch die Temperaturschichtung in Môtier und Foug (siehe Abb. 53) zum Ausdruck kommt, gebildet. Bezüglich Sprungschichtneigung verweisen wir auf MORTIMER [39], RUTNER [46] und THOMAS [57]. Hier sei lediglich erwähnt, daß die bewegten Wassermassen durch den Anstau am Seeende in die Tiefe gedrängt und knapp oberhalb der Sprungschichttiefe zurückgetrieben werden. Dadurch wird natürlich die zuflußbedingte Strömung in dieser Tiefe auf der einen Seite des Sees beschleunigt, auf der andern abgebremst. Dementsprechend finden wir für Nr. 1 auf der Südostseite eine Strömungsgeschwindigkeit von 170 m/h in nordöstlicher Richtung, auf der Gegenseite eine Wasserbewegung in südwestlicher Richtung mit nur 41 m/h Geschwindigkeit. Die Schwebkörper waren am Nachmittag ausgesetzt worden und wurden vor dem Abend wieder eingezogen, um nicht durch den kräftigen Wind zerstört zu werden. Die kleinen Kreise geben durch Rückwärtseinschnitt ermittelte Punkte an; die Pfeillänge ist ungefähr der festgestellten Geschwindigkeit proportional. Gleichzeitig bestätigt das Beispiel, daß die Schwebkörper der Bewegung in der Tiefe folgen und vom Wind sozusagen unbeeinflusst bleiben.

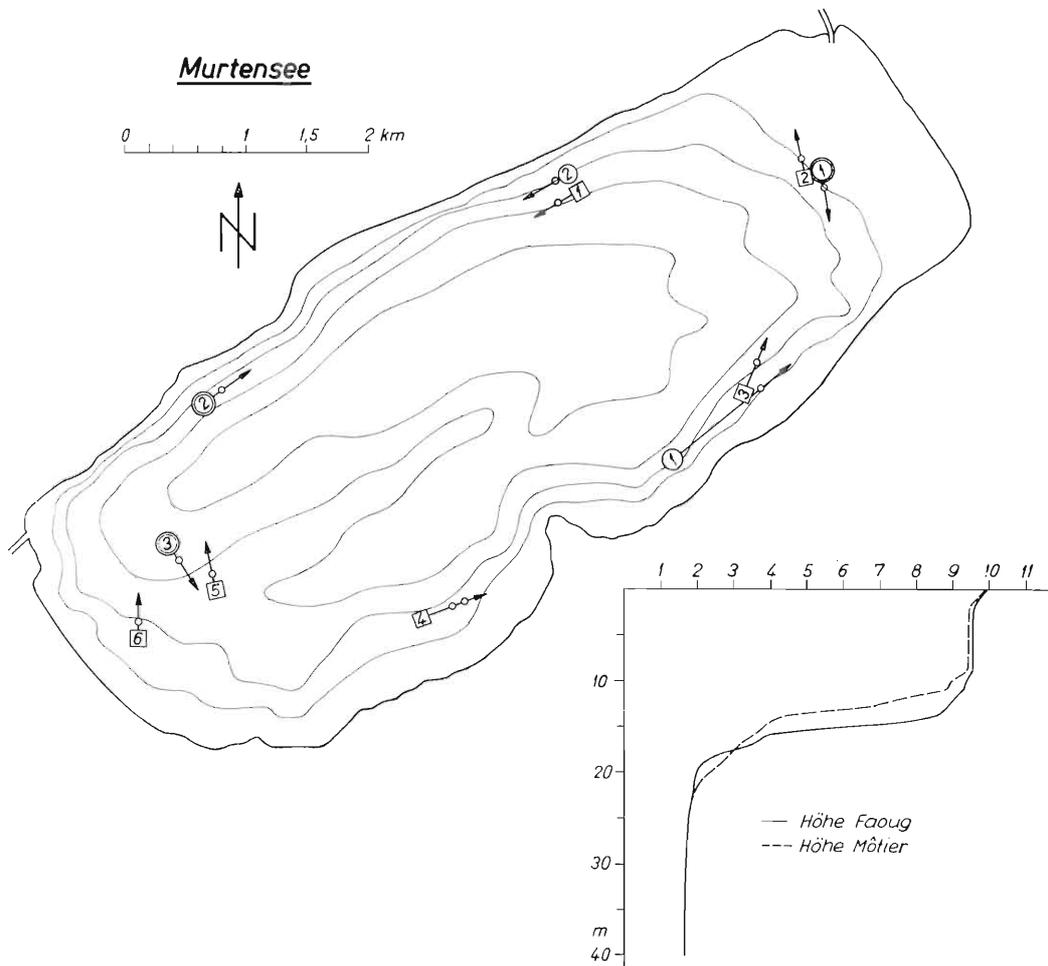


Abb. 53. Strömungsbewegungen in 12 m Tiefe und Temperaturschichtung im Murtensee im Sommer 1965.

3. Messung vom 22. Sept. in 12 m Tiefe (Abb. 53, Nrn. in Doppelkreisen). Nr. 1 wurde um 14.00 h ausgesetzt und bewegte sich entgegen unserer Vermutung. Wir konnten aber bei späteren Messungen feststellen, daß sich in diesem Gebiet sehr unregelmäßige Wirbel bilden und daß die Richtung eines Schwebgerätes meist innert kurzer Zeit oftmals wechselt.

Nr. 2 befindet sich im Strömungsbereich des Zuflusses (siehe Abb. 55). Nr. 3 zeigt das Abwandern der äußersten Zuflußwassermassen nach rechts. Die Geschwindigkeiten lagen für Nr. 1 bei ca. 64 m/h, für Nr. 2 bei ca. 63 m/h und für Nr. 3 bei ca. 75 m/h.

4. Messung vom 24. Sept. 1965 in 12 m Tiefe (Abb. 53, Nrn. in Quadraten). Es ergaben sich folgende Geschwindigkeiten: für Nr. 1 um 13.40 h 120 m/h, für Nr. 2 um 12.40 h 75 m/h, für Nr. 3 um 14.20 h 86 m/h, für Nr. 4 um 15.20 h 160 m/h (drei Stunden später nur noch 75 m/h), für Nr. 5 um 16.30 h 60 m/h und für Nr. 6 um 16.10 h 66 m/h. Die Richtungen der Nrn. 1—4 sind ohne weiteres einleuchtend, diejenigen für Nr. 5 und 6 sind aus Abb. 55 verständlich.

5. Messung vom 30. Mai bis 14. Aug. 1966. Abb. 54 enthält alle Angaben über die betreffenden Beobachtungen, die zum Teil als ortsfeste Messungen, zum Teil als Drift-

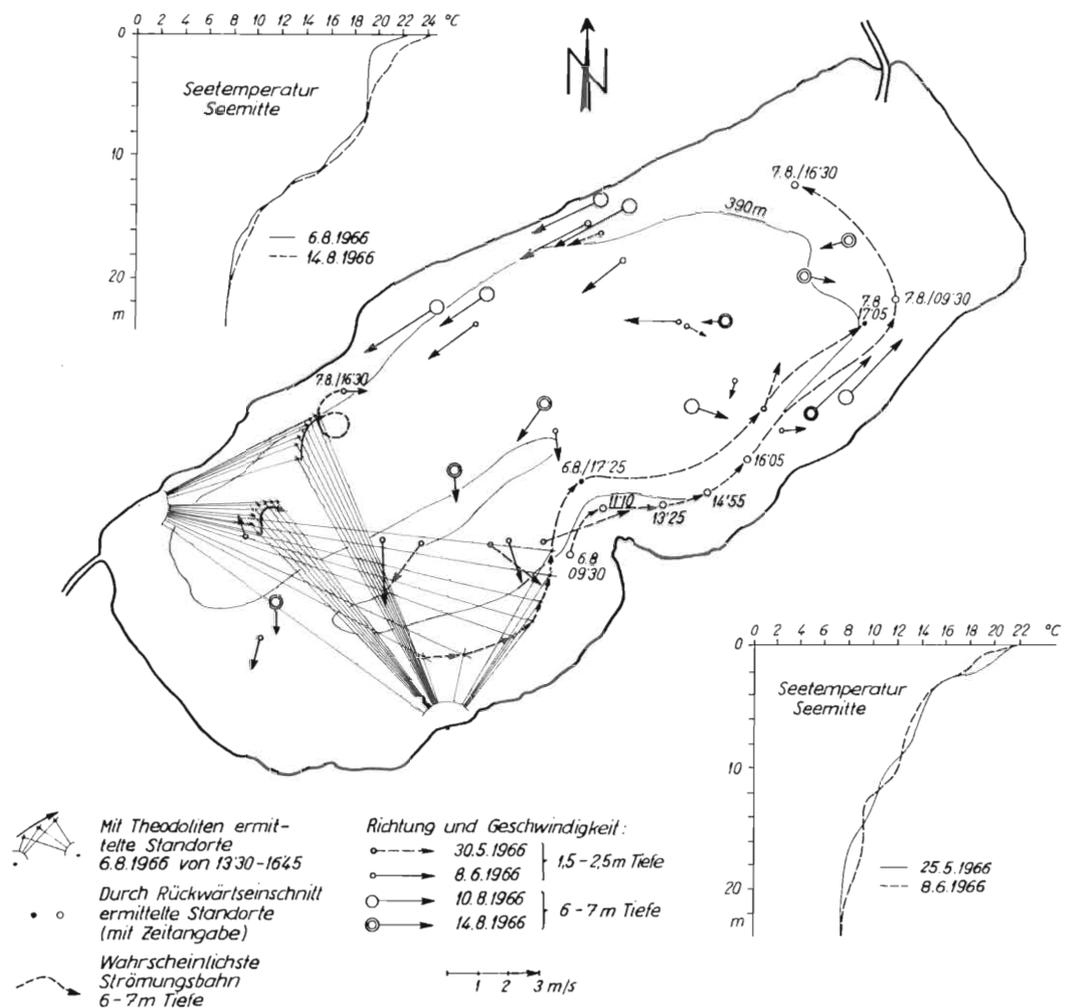


Abb. 54. Strömungsbewegungen im Murtensee im Sommer 1966.

messungen und schließlich am 6. Aug. durch Vorwärtseinschnitt mit Theodoliten vom Land aus durchgeführt wurden¹⁾). Die Pfeillängen zeigen gemäß Legende die Strömungsgeschwindigkeit; die Pfeilrichtungen lassen in den Meßpunkten die Strömungsrichtung erkennen und ergeben in ihrer Gesamtheit ein eigentliches Strömungsbild des Sees. Ganz besonders hervorzuheben sind die beiden parallelen Strömungsbahnen vom 6./7. Aug. 1966 auf der Südostseite des Sees. Die betreffenden Schwebgeräte, die die Strömung in 7 m Tiefe zeigen, bewegten sich mit einer mittleren Geschwindigkeit von 165 m/h.

Die zwei Teilkreise vor der Broyemündung lassen Teile der zyklidalen Bahnen der Wasserteilchen erkennen. Leider konnten diese Messungen, die sehr aufschlußreich zu werden schienen, infolge Erkrankung nicht weitergeführt werden.

6. Vergleich von Strömungsbild und Luftaufnahme des Murtensees. Abb. 55 zeigt ein Strömungsbild des Murtensees in Einschichtungstiefe der Broye, wie es sich aus Beobachtungen und theoretischen Überlegungen ergab. Interessant ist ein Vergleich mit dem Luftbild (Tafel III). Wir erkennen an der Trübung die Rechtsrotation vor der Broyemündung bis fast auf die Höhe der Grenghalbinsel, dann die Strömung in schmalen Band dem rechten Ufer entlang, das Aufbranden auf dem außerordentlich seichten nordöstlichen Seeende und schließlich die Rückwärtsbewegung in ungeordneten, ausgedehnten Trübungswolken auf der Nordwestseite.

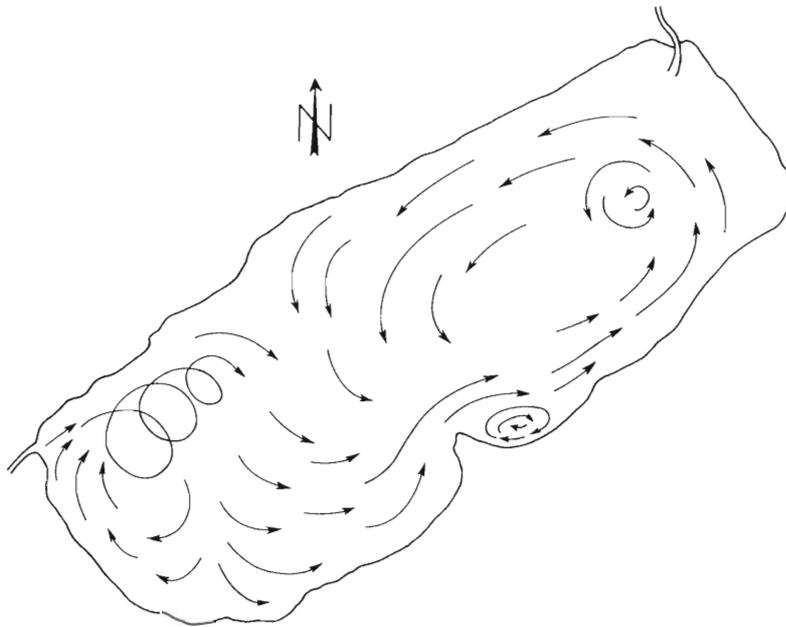


Abb. 55. Strömungsbild des Murtensees in Einschichtungstiefe der Broye.

¹⁾ An dieser Stelle möchte ich den Herren Gebrüder Otz und mehreren Studenten der Universität Bern für ihre wertvolle Mithilfe herzlich danken.

IV. Beobachtungen im Bielersee

In Tafel I wurde bereits eine Aufnahme der Rechtswirbel, die sich bei Einmündung der Aare in den Bielersee bilden, gezeigt. Abb. 56 zeigt an Transmissions- und Temperaturkurven vor Gerolfingen und Twann:

1. Die Tiefenlage der zufließenden Wassermassen ist auch in diesem See sehr deutlich an einem ausgeprägten Trübungshorizont zu erkennen.

2. Auch hier ist die Temperaturschichtung für die Einschichtungstiefe ausschlaggebend.

3. Abb. 56 zeigt ein schönes Beispiel einer windbedingten Sprungschichtschwankung. Der Schwankung der Sprungschicht folgt aber auch eine Schwankung des zuflußbedingten Trübungshorizontes.

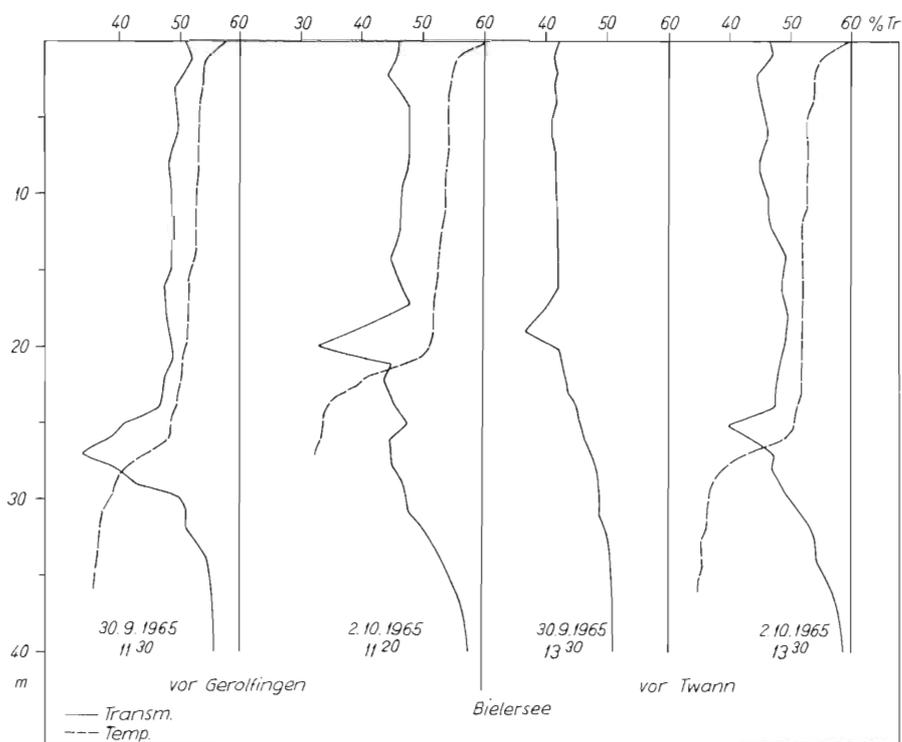


Abb. 56. Transmissions- und Temperaturschichtung im Bielersee am 30. 9. und 2. 10. 1965.

4. Daraus ergibt sich, daß windbedingte und zuflußbedingte Strömungen sich überlagern. Das „Zusammenspiel“ dieser beiden wird Forschungsziel der nächsten Jahre sein. Auf der Flugaufnahme der Eidg. Landestopographie (Tafel IV) erkennen wir:

1. Das Aarewasser schiebt sich nach seiner Einmündung dem rechten Ufer entlang.
2. Am Gegenufer bewegt sich ein Strom, vermutlich Aare- und Schüßwasser, in südwestlicher Richtung.
3. Beim „Zusammenprall“ dieser Strömung mit dem Zuflußwasser aus der Zihl ergibt sich nordwestlich der Petersinsel ein ausgeprägter Wirbel.
4. Das Zihlwasser bewegt sich nach Vorbeistreichen an der Insel in östlicher Richtung und gelangt in den Sog der Aareströmung.

Nach den Aufschlüssen, die uns die Flugaufnahme gibt, brauchen die am 30. Sept. bis 2. Okt. 1965 ermittelten Strömungsrichtungen der Abb. 57 kaum mehr erläutert zu werden. Die Schwebflächen wurden jeweils, nachdem die Tiefenlage des maximalen Trübungshorizontes mit dem Trübungsmeßgerät bestimmt worden war, in 16—28 m Tiefe ausgesetzt. Mit Ausnahme von 1a bis 1b handelt es sich um ortsfeste Messungen der Strömungsrichtung und Geschwindigkeit (siehe hierüber S. 74). Die Nrn. in einfachen Kreisen beziehen sich auf die Messung vom 30. Sept., diejenigen in Doppelkreisen auf den 1. Okt.

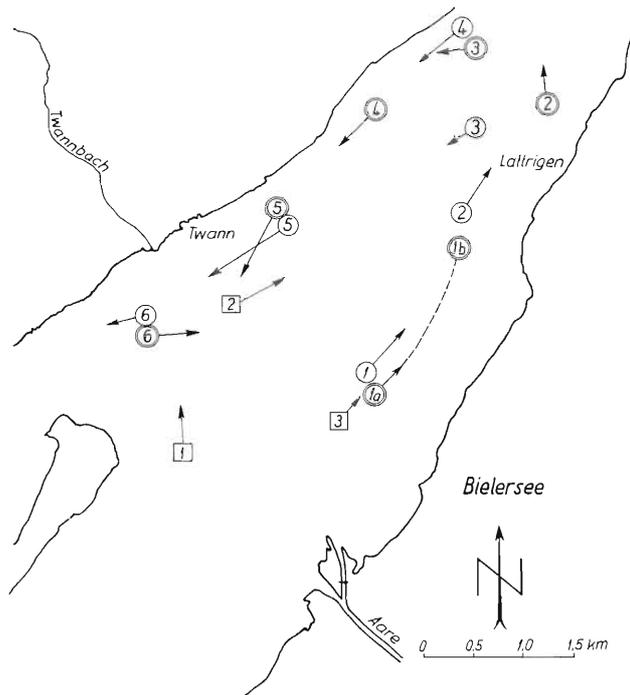


Abb. 57. Strömungsbewegungen im Bielersee (siehe Text).

und diejenigen in Quadraten auf den 2. Okt. 1965. Die Pfeillänge gibt die jeweilige Strömungsgeschwindigkeit an, wobei als Anhaltspunkt gelten mag, daß die minimale Geschwindigkeit 36 m/h, die maximale 104 m/h und die mittlere 58,8 m/h betrug. Ein Schwebgerät wurde am 1. Okt. vor Gerolfingen (1a) in 20 m Tiefe ausgesetzt und am 2. Okt. um 09.20 h an der Stelle 1b gefunden, wobei die Schwebflächen, wie an Schlammrückständen festgestellt werden konnte, den Seegrund berührt hatten, so daß keine zuverlässigen Rückschlüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit möglich sind. Vor Twann wurden später weitere Messungen durchgeführt, um die in dieser Gegend recht verwickelten 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.

C. Vergleiche mit Veröffentlichungen verschiedener Autoren

I. Beobachtungen im Genfersee

Aus den Jahren 1926—1928 liegt je ein Bericht von MERCANTON über „Etude de la circulation des eaux du lac Léman“ [35] und von KREITMANN über „Etude des courants du lac Léman“ [30] vor. MERCANTON arbeitete im Auftrage des Eidg. Departementes des Innern und KREITMANN als Experte „du Service des Eaux et Forêts“ von Frankreich. Es galt die Frage abzuklären, ob es möglich sei, daß am französischen Ufer gegenüber Vevey und Ouchy gesetzte Fischernetze bis in waadtländische Gewässer abgetrieben werden können. Anlaß dazu gab die Beschlagnahme französischer Netze auf Schweizerseite, wobei die französischen Fischer behaupteten, die Netze seien quer über den See in nördlicher Richtung abgetrieben worden. Diese Behauptung stützt unsere These einer zuflußbedingten Linksrotation in Seen in schönster Weise, weshalb hier kurz auf die Untersuchungsergebnisse eingegangen werden soll. MERCANTON führt am Schluß seiner Veröffentlichung aus, daß das Bild verworren und unvollständig sei und daß eine vollständige Abklärung der Frage weitere und umfangreichere Untersuchungen erfordern würde. Auch MERCANTON war von der Idee befangen, daß Strömungen praktisch nur vom Wind ausgelöst würden, und KREITMANN äußert sich dahin, daß die Bedeutung der Zuflüsse für Strömungen ganz unbedeutend sei (siehe Zitat auf S. 69). Beide Forscher setzten je vor dem schweizerischen und dem französischen Ufer Netze („Pics“ und „Lèves“) oder ähnliche Geräte aus, um festzustellen, welche Strömungen in bestimmten Tiefen vorherrschten.

Aus den außerordentlich umfangreichen Ausführungen von MERCANTON entnehmen wir auf S. 266 einer Zusammenstellung die in Tab. 28 zu findenden Angaben. Weitere

Tab. 28. Angaben über Strömungsuntersuchungen von Mercanton im Genfersee im Jahre 1928 [35]

Lieu	Epoque	Vitesse m/h	Direction
Ouchy	8. III.	62	E 29° S
Ouchy		99	W 67° S
Vevey		51	W 51° N
Vevey		177	W 83° N
Vevey		61	W 6° S
Vevey		120	W 57° N
Vevey		34	W 40° S
Vevey		224	W 40° S
Ouchy		26. III.	195
Ouchy	122		E 68° S
Vevey	142		W 14° N
Vevey	85		W 70° N
Vevey	138		W 13° N
Vevey	133		W 9° N
Ouchy	263		E 47° S
Ouchy	153		E 73° S
Vevey	765		W 17° S
Vevey	609		W 25° S

Lieu	Epoque	Vitesse m/h	Direction
Ouchy	19. IV.	63	W 15° N
Ouchy		70	W 5° S
Ouchy		510	W 3° S
Ouchy		550	W 11° S
Vevey		287	W 12° N
Vevey		348	W
Vevey		304	W 8° N
Vevey		446	W 23° S
Vevey		19.—20. IV.	850
Vevey	642		W 32° S
Ouchy	561		W 16° S
Ouchy	515		W 33° S

Angaben liegen vor für die Wintermonate und für den Monat Oktober 1928. Während der Wintermonate ist aber keine eigentliche Dichteschichtung ausgeprägt, und das Zuflußwasser schichtet sich, wie wir auf S. 44 ausführten, in den verschiedensten Tiefen ein, während die Sprungschicht im Oktober im Genfersee so tief liegt, daß die Zuflußströmung die verwendeten Netze und Geräte kaum mehr zu beeinflussen vermochte. Um so eindrucklicher sind die Beobachtungen in den Monaten März und April:

1. 25mal lief die Strömung in westlicher und bloß 5mal in östlicher Richtung.

2. Das Maximum der Strömungsgeschwindigkeit in Westrichtung beträgt 765 m/h, dasjenige in Ostrichtung 263 m/h, während die entsprechenden Mittelwerte 312 und 159 m/h betragen.

Ebenso aufschlußreich wie die Angaben MERCANTONS sind diejenigen KREITMANNs, wobei wir natürlich auch nur die Beobachtungen aus den Sommermonaten berücksichtigen. Die Tab. 29 enthält diese aus dem Ufergebiet von Thonon. Sie zeigt, daß, analog der Westströmung auf der Nordseite des Sees, auf der Südseite Ostströmung vorherr-

Tab. 29. Angaben über Strömungsuntersuchungen von Kreitmann im Genfersee [30]

Dates des tendues	Origine du vent	Vitesse du vent m-sec	Direction de la dérive	Vitesse de la dérive en km-heure	Profondeur d'immersion des filets	Direction approximatif du courant de surface	
21 août	1927	S.S.W.	7,3	W.	0,400	12 m	E.
22 août		S.W. à S.E.	4,4	W.	0,180	12 m	E.
23 août		N. à N.W.	0,9	S.W.	0,130	12 m	E.
24 août		S.W. à S.S.E.	4,8	S.S.E.	0,100	12 m	W.
6 sept.		N.E. à N.W.	1,2	W.N.W.	0,330	13 m	E.
7 sept.		S. à S.S.E.	1,2	S.W.	0,330	13 m	E.
8 sept.		N.W. à N.E.	1,8	N.	0,250	13 m	E.
3 oct.		N.E.	2,9	W.	0,320	20 m	E.
4 oct.		N.E. à N.N.W.	3,1	N.W.	0,215	20 m	E.
5 oct.		N.E.	5	N.W.	0,285	20 m	E.

schend ist. Allerdings beträgt die mittlere Geschwindigkeit nur mehr 271 m/h, und das Maximum liegt bei 400 m/h. Wir erinnern uns des Luftbildes auf Tafel III, welches erkennen läßt, daß sich der Rückstrom auf der Nordwestseite des Murtensees in breiter Bahn bewegt und infolge des größeren Strömungsquerschnittes geringere Geschwindigkeit als auf der Südostseite zeigt.

II. Beobachtungen in verschiedenen Schweizerseen

1. HOFER führte 1947—1949 ausgedehnte Untersuchungen im Brienersee durch [24], wobei auch, gewissermaßen nebenbei, Strömungsuntersuchungen angestellt wurden. HOFER suchte den Grund für Strömungen vor allem in der Windtätigkeit. Er verwendete sogenannte „Strömungskreuze“, ähnliche Vorrichtungen wie wir sie auf Seite 74 beschrieben. Die Beobachtungen liegen zu wenig dicht, um sich von den Strömungsverhältnissen des Sees ein einigermaßen vollständiges Bild zu machen. Immerhin spricht schon

HOFER die Vermutung aus, daß die Wassermassen des Sees eine gewaltige rotierende Wasserwalze bildeten. Wir zitieren:

„Es ist ein gewagtes Unternehmen ein gesamtes Strömungsbild des Brienzersees zu entwerfen auf Grund der besprochenen wenigen Messungen. Doch können diese ergänzt werden durch Beobachtungen von Fischern und Seeanwohnern. Es wurde mir berichtet, daß die Fischer von Iseltwald gelegentlich nach einer Nacht ihre Schwebnetze in der Gegend von Brienz suchen müßten. Grundnetze seien östlich der Schneckeninsel bei Iseltwald öfters verdrillt gefunden worden. Ferner wurde beobachtet: Wenn die südseits ausgesetzten Netze der Iseltwaldner Fischer NE-wärts abgetrieben werden, so werden die nordseits bei Nieder- und Oberried gesetzten Netze meistens nach SW verdriftet und umgekehrt. Rechtsrotation komme weit häufiger vor als Linksrotation.“

Dieser letzten Behauptung müssen wir allerdings widersprechen. Weiter unten lesen wir:

„Nach meinen Beobachtungen und den erhaltenen Mitteilungen ist anzunehmen, daß das ganze Brienzerseebcken von einer großen stehenden Hauptwalze erfüllt sei.“

Wählen wir einige Beobachtungen, die zufälligerweise in Zuflußtiefe fielen, aus, so erkennen wir hier bereits die Linksrotation.

2. 1929—1934 führte STÄDLER [55] im unteren Zürichseebecken Strömungsmessungen aus, um die Frage abzuklären, inwieweit die Gefahr bestehe, daß Abwasser in das Gebiet von Trinkwasserfassungen gelangen könne. Wir empfehlen dem Leser die 10 sehr instruktiv gestalteten Karten der Monate April bis November zu studieren, und er wird feststellen, daß sich eine ausgesprochene Linksrotation (nur der Juni 1929 tanzt aus der Reihe) erkennen läßt.

3. Von KELLER liegt eine wertvolle Dissertation über den Hallwilersee [28] aus dem Jahre 1944 vor, der wir lediglich in bezug auf Strömungsbeobachtungen und deren Deutung nicht ganz folgen können. Auch hier wiederum ist das Bestreben zu finden, für alle Strömungserscheinungen den Wind verantwortlich zu machen. Es sei auf das eindruckliche Beispiel vom 7. Nov. 1942 (S. 84) hingewiesen (Föhnlage): Vor Birrwil wurde eine Südströmung bis 10 m Tiefe mit einem Geschwindigkeitsmaximum von 85 m/h in 5 m Tiefe (bezeichnenderweise nicht an der Oberfläche) festgestellt. Auf der Gegenseite zeigte sich an der Oberfläche und in 20 m Tiefe Südströmung, während in 5 und 10 m Tiefe Nordströmung mit einem Geschwindigkeitsmittel von 13,5 m/h herrschte. Ein analoges Bild ergibt sich bei der Messung am 13./14. Nov. 1942 bei Bise: Vor Birrwil in 10 m Tiefe eine Geschwindigkeit von 240 m/h in Süd-, auf der Gegenseite in 10 m Tiefe eine Geschwindigkeit von 40 m/h in Nordrichtung. Ein weiterer Kommentar ist hier wohl überflüssig.

III. Beobachtungen im Bodensee

Wenden wir uns abschließend den Untersuchungen im „Schwäbischen Meer“ zu, so geschieht dies mit Ehrfurcht. Denn mit der Erforschung der Strömungen in diesem Gewässer haben sich bekannte und bedeutende Forscher wie beispielsweise AUERBACH, SCHMALZ, NÜMANN und WASMUND befaßt. AUERBACH [3] konnte deshalb 1939 schreiben:

„Die Notwendigkeit nach ganz gründlicher und planmäßiger Untersuchung (Anmerkung des Autors: Gemeint sind Strömungsuntersuchungen) kam mir und meinem verstorbenen Mitarbeiter Professor Dr. J. Schmalz aber erst im Fortschreiten unserer anderen Arbeiten voll zum Bewußtsein. So begannen wir denn im Jahre 1925 mit unseren Forschungen, die sich ununterbrochen bis heute

erstreckten, und die ich auch jetzt noch fortsetzen muß. Dadurch ist heute der Bodensee zu dem auf der ganzen Erde in bezug auf seine Strömungsverhältnisse am genauesten untersuchten Binnensee geworden.“

AUERBACH und SCHMALZ begannen 1925 mit Hilfe eines Flügelmeßgerätes in der Nähe des Rheineinflusses Strömungsmessungen auszuführen, mußten aber dann erkennen, daß die Strömungen in größerem Abstand von der Flußmündung zu schwach waren, um mit der genannten Apparatur erfaßt zu werden. Der Lauf des Rheinwassers wurde dann mit Hilfe von Differenzen in der Alkalinität des Rhein- und des Seewassers verfolgt, und aus 15jährigen Beobachtungen entstand das Bild, das einer Veröffentlichung von AUERBACH [3] entnommen und in Abb. 58 wiedergegeben ist. Die Querlinien wurden von uns eingetragen und geben die meistbefahrenen Querprofile an, in welchen aus verschiedenen Tiefen meist Proben entnommen wurden. Wir stellen fest, daß AUERBACH und SCHMALZ eindeutig erkannten, daß sich das Rheinwasser dem nördlichen Ufer entlang schiebt. Dies wurde aber mit der Richtung des Zuflusses begründet, durch welche dieses gegen das schwäbische Ufer gedrängt wird. 1938 schrieben AUERBACH und RITZI [2] allerdings bereits (S. 410):

„Was die Veranlassung zu seinem eigentümlichen Verlauf im See ist, läßt sich heute mit Sicherheit noch nicht sagen. Wir vermuten aber, daß die immer wieder zu beobachtende Ablenkung des Stromes nach Osten mit der Erdrotation zusammenhängen könnte. Auch andere Kollegen haben uns auf diese Möglichkeit hingewiesen.“

Wir stellen auch fest, daß AUERBACH und RITZI erkannten, daß sich im oberen Teil des Sees eine gewaltige linksrotierende Wasserwalze mit senkrechter Achse bildet. Diese läßt sich natürlich auch erklären durch Sogwirkung des Zuflusses und durch „Antrieb“ auf der Nordseite. Ferner wurde festgestellt, daß wenigstens ein Teil des Rheinwassers nach rechts abbiegt und die Bucht von Bregenz durchläuft. Wir haben auf S. 70 festgehalten, daß bei der Rechtsablenkung durch die Erdrotation gilt $r = \frac{v}{2\omega \sin \varphi}$. Die Wasserpartikel werden also einen um so größeren Kreis beschreiben, je größer ihre Geschwindigkeit ist. Es ist selbstverständlich, daß sich die Zuflußwassermassen nach dem Absinken in die ihrer Dichte entsprechende Tiefe fächerförmig ausbreiten, wobei in der Mitte die größte, gegen den Rand zu abnehmende Geschwindigkeit vorherrschen muß. Es ist deshalb verständlich, daß die langsamer bewegten Wassermassen am rechten Rand schärfer nach rechts abbiegen als die zentralen. Es dürfte interessant sein, die oben genannte Formel auf die Geschwindigkeiten, die von AUERBACH und SCHMALZ [1] in den Monaten März und April 1926 mit Flügelmeßgeräten festgestellt wurden, anzuwenden. In ca. 1200 m Entfernung von der Rheinmündung wurde im Hauptstrom eine Strömungsgeschwindigkeit von 912 m/h in 20 m Tiefe festgestellt. Setzen wir diesen Wert in obige Formel ein, so ergibt sich ein Kreisradius von ca. 2,3 km, was, wie leicht nachgeprüft werden kann (Abb. 58), mit der Krümmung, wie sie von AUERBACH eingezeichnet wurde, gut übereinstimmt. Im rechts abbiegenden Nebenstrom fanden die genannten Autoren, kurz nach der Verzweigung, eine maximale Geschwindigkeit von 456 m/h in 10 m Tiefe. Die Rechnung ergäbe also hier einen Kreisradius von ca. 1,15 km. Die Krümmung dieses Kreises stimmt an der genannten Stelle ziemlich gut mit der Biegung der Uferlinie überein. Jede Strömung mit kleinerer Geschwindigkeit müßte also ebenfalls in die Bucht von Bregenz abgelenkt werden und in dem von uns in mehreren Seen gefundenen Sinn dem Ufer entlang laufen.

Die Abb. 58 zeigt nun, daß AUERBACH und SCHMALZ ungefähr ab Friedrichshafen eine allgemeine Strömungsbewegung in Richtung des Ausflusses annahmen. Diese Auffassung

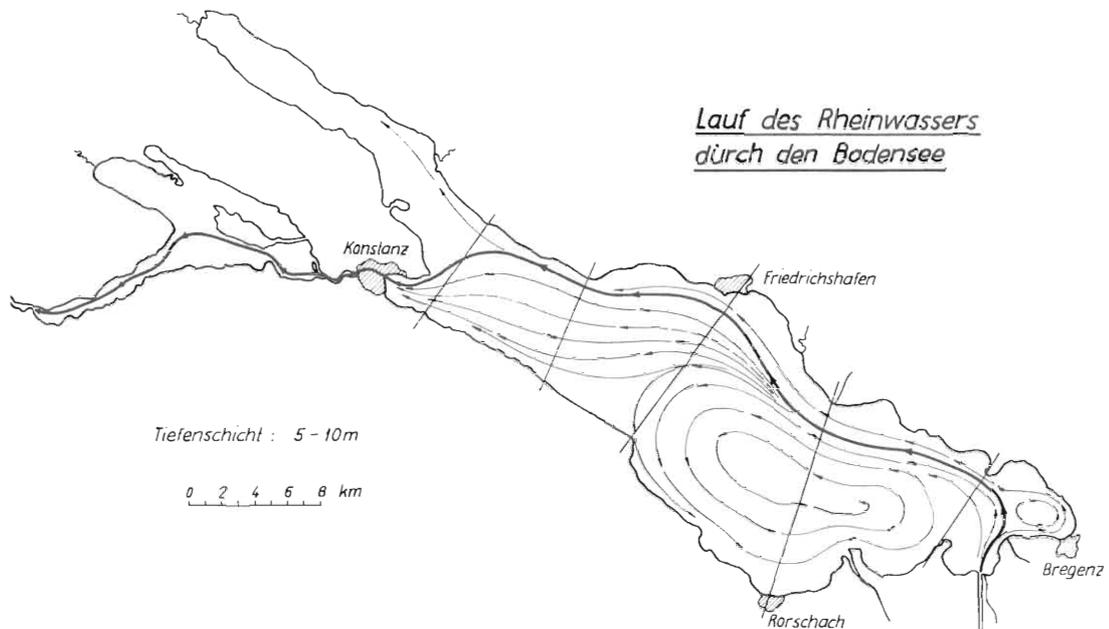


Abb. 58. Angaben über den Lauf des Rheinwassers im Bodensee nach AUERBACH und SCHMALZ [1].

können wir nach unseren Beobachtungen und Überlegungen nicht teilen, und hier ergibt sich eine interessante Kontroverse zwischen AUERBACH und WASMUND. Der letztgenannte Forscher hat sich aus Notizen von zahlreichen schweizerischen, österreichischen und deutschen Fischern über Abtrift der Fischnetze ein Strömungsbild des Bodensees zusammengestellt, das unseren Ansichten über Strömungen unterhalb der Linie Friedrichshafen-Romanshorn weit besser entspricht. WASMUND [72] stellte fest, daß das Rheinwasser zu gewissen Zeiten dem rechten Ufer entlang gegen Überlingen fließt, daß sich aber sehr häufig ca. auf der Höhe von Hagnau ein, die ganze Breite des Sees ausfüllender, Rechtswirbel bildet. WASMUND unterschied deshalb einen West-Oberseekreis im Uhrzeigersinn drehend und einen Ost-Oberseekreis im Gegenuhrzeigersinn drehend. Wir glauben, es sei gut möglich, daß dieser Rechtswirbel bei entsprechender Geschwindigkeit seinen Ausgang entlang dem südwestlich verlaufenden Ufer von Immenstaad bis Kippenhorn nimmt. Ähnliche Beobachtungen konnten wir auch im Brienersee in der Bucht vor Oberried machen. Recht aufschlußreich ist die Aussage, daß die deutschen Fischer ihre Netze jeweils, wenn diese über den Sonntag draußen blieben, am Montagmorgen auf Schweizerseite und umgekehrt suchen mußten. Der See hat bei Hagnau eine ungefähre Breite von 6 km. Nehmen wir an, die Netze würden 1,5 km vom Ufer entfernt gesetzt, so ergäbe sich eine Strömungsgeschwindigkeit von ca. $4700 \text{ m}/30 \text{ h} = 157 \text{ m/h}$, was den beobachteten Geschwindigkeiten recht gut entspricht. Auch die Aussagen von WASMUND, daß die Netze meist an der Stelle des Ausflusses vorbei und in den See zurück laufen, decken sich mit unseren Beobachtungen, weil ja, wie wir gezeigt haben, nur die oberflächennahen Schichten zum Abfluß gelangen. Und die Äußerungen von AUERBACH und SCHMALZ [1, S. 32] sind kaum ernst zu nehmen. Wir zitieren:

„Wenn die Begriffe nicht klar gefaßt sind, so darf man sich auch nicht darüber wundern, wenn uns WASMUND, Internat. Revue 1928, S. 43, eine ‚Schemakarte der typischen Strömungsverteilung und jährlichen Windhäufigkeit im Bodensee‘ vorlegt, in der die Ströme sehr wohl ihren Weg in den See hinein finden und im See allerhand mögliche, vielleicht auch unmögliche Kreisbewegungen ausführen und sich schließlich die Absonderlichkeit leisten, vom Seeausfluß in den See hinein zu streben.“

Weiter fand WASMUND im Überlingersee meist Linksrotation (S. 92 der genannten Veröffentlichung). Dies würde unsere Ausführungen bestätigen und bedarf keines Kommentars. Abschließend sei noch eine Beobachtung von NÜMANN [41], der den Verlauf des Rheinwassers mit Hilfe von Leitfähigkeitsmessungen verfolgte, angeführt, und wir bitten zu beachten, wie auch hier unsere Theorie bestätigt wird (S. 526):

„Am 6. 5. konnte an der Rheinmündung zum erstenmal eine Abnahme der Leitfähigkeit festgestellt werden, und am 9. 5. erfolgte die Einschichtung in 7,5 m. Bereits am 30. 5. wurde vor Bodman in 7,5 m Tiefe mehr Rheinwasser nachgewiesen als in den andern Schichten. Die etwa 65 km lange Strecke wurde in 21 Tagen zurückgelegt, mit einem Stundenmittel von gut 100 m. Am meisten muß man sich hierüber wundern, weil an der Konstanzerbrücke erst am 10. 6. Rheinwasser nachgewiesen wurde.“

Wir wundern uns über diese Erscheinung nicht, weil wir glauben, daß das Rheinwasser dem Ufer von Überlingen entlang und vor Ludwigshafen und Bodman vorbei auf der Gegenseite zurück bis nach Konstanz strömte. Von Bodman bis Konstanz dauerte die Strömungsbewegung also 11 Tage, was bei einer Distanz von ca. 25 km ebenfalls eine mittlere Geschwindigkeit von ca. 100 m/h ergibt. Aufschlußreich ist die Tatsache, daß sich offenbar bei dieser Geschwindigkeit vor Hagnau noch kein Rechtswirbel bildete.

D. Schlußbetrachtung

AUERBACH schreibt [1, S. 193]:

„Die Bezeichnung ‚Stehende Gewässer‘ für Seen, Teiche und Tümpel in der Süßwasserkunde zeigt schön, daß man im allgemeinen ein mehr oder weniger starkes Ruhen ihrer Wassermasse im Gegensatz zu den Strömen, Flüssen und Bächen, den ‚Fließgewässern‘ annimmt. Tatsächlich findet man denn auch in der Hydrobiologie, aber auch in der Technik, vielfach Auffassungen vertreten, die unsere stehenden Gewässer etwa wie große Aquarien betrachten, in denen die Wassermassen, abgesehen von Bewegungen, verursacht durch Winde oder Temperaturunterschiede, sich in Ruhe befinden. So ist es auch erklärlich, daß die Bewegungsstudien des Wassers fast ausschließlich in Fließgewässern oder im Meere vorgenommen wurden.“

Wir betrachten diese Aussagen des Altmeisters in der Strömungsforschung in Seen als Aufforderung zu weiteren Erhebungen und sind stolz einen kleinen Beitrag leisten zu dürfen. Überdenkt man welche Bedeutung Strömungen für die Fischerei, für die Forschungen der Hydrobiologen, für Trinkwasserfassungen und Abwassereinleitungen in Seen und für die Reinhaltung von Gewässern überhaupt spielen, so muß man sich wundern, daß dieser Forschungszweig noch in den Kinderschuhen steckt.

Wir haben uns bei unseren Beobachtungen oft überlegt, ob die Ausbreitung von Trübungshorizonten, die Verfrachtung von feinstem Gesteinsmaterial, indem dieses in Grenzschichten monatelang in Schwebelage gehalten werden kann, nicht von überragender Bedeutung für die Abklärung gewisser Erscheinungen der Sedimentation sei, ob also nicht beispielsweise die Geologen Strömungsforschungen betreiben sollten.

Verwendete Literatur

1. AUERBACH und SCHMALZ:
 - a) Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees I. Schriften des Vereins für Gesch. des Bodensees 1927.
 - b) Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees II. Archiv für Hydrobiologie, 1931.
 - c) Hydrologisch-biologische Bodenseeuntersuchungen III. Zeitschrift für Hydrologie 1932.
2. AUERBACH und RITZI: Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees IV. Die Naturwissenschaften, Heft 44, 1936.
3. AUERBACH M.: Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees. Deutsche Wasserwirtschaft, 34. Jahrgang, 1939.
4. AMBÜHL H.: Die Temperatur- und Sauerstoffverhältnisse des Bodensee-Untersees 1961—1963. Bericht Nr. 5 der Internat. Gewässerschutzkomm. f. d. Bodensee, 1967.
5. BAUER F.: Der Geschiebehauhalt der bayerischen Donau im Wandel wasserbaulicher Maßnahmen. Die Wasserwirtschaft, 55. Jahrgang, Heft 4 u. 5, 1965.
6. BURZ J.: Abgrenzung der Schwebestoff- und Sohlenfracht. Die Wasserwirtschaft, 48. Jahrg., Heft 14, München 1958.
7. BURZ J.: Beitrag zum Feststoffproblem von Giulio Galli und Leonardo Rotundi. Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde, München 1965.
8. BURZ J.: Beitrag zum Feststoffproblem nach Hjulström. Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde, München 1965.
9. BURZ J.: Beitrag zur Klassifikation der Feststoffe. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 1964, Heft 2.
10. DUSSART B.: Température et mouvements des eaux dans les lacs. Extrait des Annales de la Station Centrale d'Hydrobiologie appliquée, Tame V, 1954.
11. DIETRICH G. / KALLE K.: Allgemeine Meereskunde, 1957.
12. Eidg. Amt für Wasserwirtschaft. Deltaaufnahmen mit Situationsplan 1: 5000. Mitteilungen Nr. 34, 1939.
13. Eidg. Amt für Wasserwirtschaft. Hydrographische Jahrbücher der Schweiz, 1946 u. 1958—1965.
14. Eidg. Amt für Wasserwirtschaft. Untersuchungen in der Natur über Bettbildung, Geschiebe- und Schwebestoffführung. Mitteilung Nr. 33, 1939.
15. Eidg. Amt für Wasserwirtschaft. Wasserführung, Sinkstoffführung und Schlammablagerung des alten Rheins. Mitteilung Nr. 31, Bern 1932.
16. Eidg. Amt für Wasserwirtschaft. Die Wasserkräfte der Schweiz. Mitteilung Nr. 25, 1932.
17. EINSELE W.: Flußbiologie, Kraftwerke und Fischerei. Schriften des Österreichischen Fischereiverbandes, Heft 1, 1957.
18. ELSTER H. J.: Beobachtung über das Verhalten von Schichtgrenzen nebst einigen Bemerkungen über die Austauschverhältnisse im Bodensee. Archiv für Hydrobiologie, 1939.
19. Ermittlung der Schwemmstoffführung in natürlichen Gewässern. Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde, Berlin 1929. (Sonderabdruck aus „Bautechnik“, Heft 35 und 38.)
20. GESSNER F.: Hydrobotanik, Bd. 1. Berlin, 1955.
21. GYGAX F.: Zum Wasserhaushalt des schweiz. Hochgebirges, Niederschlag und Abfluß im Einzugsgebiet der Magliasina. Bellinzona 1948.
22. GYGAX F. und NYDEGGER P.: Contributo alle indagini sulle attuali condizioni del Ceresio. Bellinzona 1964.
23. HEUSCHER J.: Thuner- und Brienersee, ihre biologischen und Fischereiverhältnisse. Pfäffikon 1901.
24. HOFER F.: Über die Energieverhältnisse des Brienersees. Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie, Hydrologie, Bern 1952.

25. JAKUSCHOFF P.: Die Schwebstoffbewegung in Flüssen in Theorie und Praxis. „Wasserwirtschaft“, H. 5—6, 7, 8, 11, Jahrg. 1932 (Sonderabdruck).
26. JAAG O.: Die neuere Entwicklung und der heutige Zustand der Schweizerseen. Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie, Verhandlungen 1949.
27. JOSEPH J.: Durchsichtigkeitsmessungen im Meer im ultravioletten Spektralbereich. Deutsche Hydr. Zeitschrift, Bd. 2, Heft 6, 1949.
28. KELLER R.: Limnologische Untersuchungen im Hallwilersee. Aarau 1945.
29. KURZMANN E.: Über die strömungstechnischen Grundlagen der Schwebstoffprobleme. Österreichische Wasserwirtschaft, H. 11, 1953.
30. KREITMANN L.: Etude des courants du lac Léman. Les études Rhodaniennes, Vol. VII, Nr. 2 (juin 1931).
31. KRAPP: Besprechung einiger an fließenden Gewässern vorgenommenen Schwemmstoffmessungen. Die Wasserwirtschaft 1934, Heft 16—21.
32. KUTSCHKE INGE: Die thermischen Verhältnisse im Zürichsee zwischen 1937 und 1963 und ihre Beeinflussung durch meteorologische Faktoren. Zürich 1966.
33. LAUSCHER F.: Optik der Gewässer, Kap. 12, Handbuch der Geophysik, Bd. VIII, Berlin 1955.
34. LEHN H.: Zur Sichttiefenminderung im Bodensee seit 1920. Anstalt für Bodenseeforschung der Stadt Konstanz. Int. Revue ges. Hydrobiologie 1962, S. 523—532.
35. MERCANTON P. L.: Etude de la circulation des eaux du lac Léman. Mém. Soc. Vaud. des sc. nat., N° 27, Vol. 1, 4. Lausanne 1932.
36. MINDER L.: Untersuchungen am Bielersee. Zürich 1936.
37. MORTIMER C. H.: A review of temperature measurement in limnology. Aus Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie. Stuttgart 1953.
38. MORTIMER C. H.: Water movement in stratified lakes, deduced from observations in windermere and model experiments. Freshwater Biological Association, Nr. 216. Bruxelles 1952.
39. MORTIMER C. H.: Same effects of the earth's rotation and water movements in stratified lakes. Verhandlungen der Intern. Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie, 1955.
40. NEUMANN G.: Über Seegang, Dünung und Wind. Deutsche Hydr. Zeitschrift, Bd. 3, Heft 1 und 2, 1950.
41. NÜMANN W.: Die Verbreitung des Rheinwassers im Bodensee. Internat. Revue der gesamten Hydrobiologie u. Hydrographie 1937.
42. NYDEGGER P.: Vergleichende limnologische Untersuchungen an sieben Schweizerseen. Beiträge zur Geologie der Schweiz 1957.
43. OEXLE: Raumgewicht der Schwemmstoffe. Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde. „Wasserkraft und Wasserwirtschaft“ 1934, H. 6.
44. PRANDTL: Strömungslehre. Verlag Vieweg & Sohn. Braunschweig 1965.
45. RIVIER O.: Recherches hydrobiologiques sur le lac de Morat. Neuchâtel 1937.
46. RUTTNER F.: Grundriß der Limnologie. Berlin 1962.
47. RUTTNER F.: Durchsichtigkeit des Wassers und Planktonschichtung. Aus Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie u. Hydrographie, 1933.
48. SAUBERER F.: Bemerkungen über optische Untersuchungen an Gewässern. Aus „Bioklimatische Beiblätter“, Heft 3, 1942.
49. SAUBERER F.: Die Strahlungsverhältnisse der Binnengewässer. Leipzig 1941.
50. SAUBERER und RUTTNER: Die Strahlungsverhältnisse der Binnengewässer. Probleme der Kosmischen Physik 21. Leipzig 1941.
51. SCHMALZ: Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees. Sonderabdruck aus dem 60. Heft der Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung. Konstanz 1932.
52. SCHMIDT W.: Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen. Hamburg 1925.
53. Schweiz. Meteorologische Zentralanstalt. Annalen 1958—1965.
54. SPILLMANN W. G.: Der natürliche Wasserhaushalt im oberen Aaregebiet. Zeitschrift: Wasserkraft und Wasserwirtschaft, München 1936.
55. STÄDLER M.: Untersuchungen über die hygienisch bedeutungsvollen Strömungsvorgänge im Zürichsee. Solothurn 1934.
56. STECK TH.: Die Wassermassen des Thuner- und Brienzensees. Die Denudation im Kandergebiet. Bern 1892.
57. THOMAS E. A.: Sprungschichtneigung im Zürichsee durch Sturm. Schw. Zeitschrift für Hydrologie, 40, 3 u. 4. Basel 1949.

58. THOMAS E. A.: Die Verschmutzung des Zürichsees und die Strömungs- und Durchflußverhältnisse bei Rapperswil 1961. Sonderdruck aus dem Monatsbulletin des Schweiz. Vereins v. Gas- und Wasserfachmänner Nr. 3 u. 4, Jahrg. 1961.
59. THOMAS E. A.: Sturmeinfluß auf das Tiefenwasser des Zürichsees im Winter. Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie, 1941.
60. THOMAS E. A.: Stoffhaushalt und Sedimentation im oligotrophen Ägerisee und im eutrophen Pfäffiker- und Greifensee. Habilitationsschrift, Universität Zürich. Zürich 1955.
70. THIENEMANN A.: Die Binnengewässer in Natur und Kultur. Berlin 1955.
71. Uferschutzverband Thuner- und Brienersee. Jahrbuch vom Thuner- und Brienersee. Thun 1943ff.
72. WASMUND E.: Die Strömungen im Bodensee, verglichen mit bisher in Binnenseen bekannten Strömungen. Intern. Revue der ges. Hydrobiologie, 18 u. 19. Leipzig 1927/28.