

Bericht Nr. 15

**Strömungsverhältnisse im
Bodensee–Untersee
und der Wasseraustausch zwischen
den einzelnen Seebecken**

Bearbeiter: R. Schröder

Landesstelle für Gewässerkunde und wasserwirtschaftliche Planung
Baden-Württemberg

Inhaltsübersicht

Vorwort	1
I Zielsetzung	1
II Gliederung und Form der Seebecken	1
III Windverhältnisse	3
IV Methode	4
V Ergebnisse	5
VI Der Reststrom	14
VII Der Wasseraustausch zwischen den einzelnen Seebecken	17
VIII Schlußfolgerungen	22
Literatur	24

Abbildungen

1 Untersee in nordwestlicher Richtung mit Insel Reichenau und Halbinsel Mettnau	2
2 Driftkörper	4
3 Seeströmungen Bodensee-Untersee, Richtungsverteilung	7
4 Seeströmungen Bodensee-Untersee, Geschwindigkeit	9
5 Relative Häufigkeit mittlerer Strömungsgeschwindigkeiten der Seeteile in 0-15 bzw. 20 m Tiefe	10
6 Relative Häufigkeit mittlerer Strömungsgeschwindigkeiten nach Tiefen und Seeteilen	11
7 Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit vom Abfluß bei Rheinklingen	13
8 Seeströmungen Bodensee-Untersee, Reststrom	15
9 Drehgeschwindigkeit und Drehsinn des Zeller Sees	16
10 Strömungsgeschwindigkeit und Richtungshäufigkeit	18
11 Querschnitte durch Verbindungsstellen	20
12 Schnitte durch Abwasserwolke	23

Vorwort

Die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee hat sich mit der Frage der Einführung von Abwassereinleitungen in den See befaßt und die in dieser Hinsicht vorliegenden Kenntnisse in die Richtlinien für die Reinhaltung des Bodensees vom 1. Juni 1967 aufgenommen. In diesen Richtlinien heißt es unter Ziffer 1.3 „Einführung von Abwassereinleitungen in den See: Das gereinigte Abwasser ist unterhalb der sommerlichen Sprungschicht einzuleiten. Die Einleitungsstelle ist aufgrund sorgfältiger Untersuchungen der örtlichen Verhältnisse festzulegen“. Um in diesem Sinne geeignete Vorschläge für die Wahl der Einleitungsstelle gereinigter Abwässer vorlegen zu können, hat die Untersuchungsstelle Bodensee der Landesstelle für Gewässerkunde und wasserwirtschaftliche Planung Baden-Württemberg in den vergangenen Jahren unter Leitung von Dr. Roland Schröder eingehende Untersuchungen über die Strömungsverhältnisse im Bodensee-Untersee angestellt. Wegen der Bedeutung der Untersuchungsergebnisse für Maßnahmen des Gewässerschutzes hat die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee beschlossen, diese in der Reihe der Berichte der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee zu veröffentlichen.

I Zielsetzung

Die im folgenden beschriebenen Strömungsuntersuchungen im Bodensee-Untersee hatten daher zum Ziel, mit einfachen und wenig kostspieligen Mitteln langfristige Mittelwerte von Strömungsrichtung und -geschwindigkeit in den einzelnen Seeteilen festzustellen und hieraus ein Gesamtbild abzuleiten. Selbstverständlich können zu einzelnen Zeiten davon abweichende Situationen eintreten. Untersuchungsmethodik und Form der Darstellung der Ergebnisse entsprechen diesen allgemeinen Zielsetzungen.

Aus verschiedenen Gründen ist es derzeit nicht möglich, umfassende Untersuchungen über das Strömungssystem des Bodensees durchzuführen. Hierzu wäre insbesondere erforderlich, Wasserströmungen über längere Laufzeiten hinweg mit der nötigen Präzision an hinreichend vielen Örtlichkeiten und zugleich in verschiedenen Wassertiefen, zusammen mit jenen Faktoren, wie z. B. Wassertemperatur und Wind, die den momentanen Ablauf des Strömungsgeschehens stark beeinflussen, zu registrieren. Bei Entscheidungen über die Festlegung von Einleitungsstellen gereinigter Abwässer in den See ist in erster Linie die Kenntnis des durchschnittlichen langzeitigen Verhaltens der Strömung wichtig.

II Gliederung und Form der Seebecken

Die den Bodensee allgemein beschreibende Literatur ist sehr umfangreich. Ein großer Teil des naturwissenschaftlichen Schrifttums ist von KIEFER [1] zusammenfassend behandelt; eine bis 1965 vollständige Sammlung enthält die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft erstellte Literaturkartei. Somit mögen hier einige skizzenhafte Bemerkungen genügen.



Abb. 1. Untersee in nordwestlicher Richtung mit Insel Reichenau und Halbinsel Mettnau bei Niedrigwasser.
 (Photo: Thorbecke-Luftbild, Lindau/Bodensee, freigegeben: Luftamt Südbayern G - 5/5916).

Der Bodensee gliedert sich in zwei Hauptbecken, die durch den Seerhein bei Konstanz verbunden sind. Das rheinabwärts gelegene Becken, der Untersee, ist Gegenstand unserer Untersuchung. Der Untersee ist stark gegliedert. Die einzelnen Becken werden durch die Halbinseln Höri und Mettnau und durch die Insel Reichenau voneinander getrennt. An den Nahtstellen der einzelnen Teilbecken ist das Wasser flach und von einem schmalen Graben geringerer Tiefe durchzogen. Dadurch ist der Wasseraustausch begrenzt und den einzelnen Teilseen die Möglichkeit zur Ausbildung einer gewissen limnischen Individualität gegeben.

Das weiche Ufermaterial führte zur Ausbildung einer relativ breiten Uferbank („Wysse“), die den Ufern aller Seeteile vorgelagert ist (Abb. 1). Ihre Tiefe ist gering im Bereich der im Windschatten gelegenen Ufer, sie ist größer in den Brandungszonen, wie an der Südseite der Insel Reichenau und zwischen Allensbach und Markelfingen.

Da der Böschungswinkel der Uferbank sehr flach ist, bedingt der jeweilige Wasserstand ihre Breitenausdehnung. Von der seeseitigen Isobathe^{*)}, welche die obere Grenze der Halde bildet, bis zur Mittelwasserlinie mißt sie durchschnittlich 193 m. Bei mittlerem Niedrigwasser geht sie auf 170 m zurück, bei mittlerem Hochwasser vergrößert sie sich auf 282 m. Obgleich sie als

^{*)} (393,00 m ü. NN nach Bad. Landesnivellement, 393,44 m ü. Schweiz. Horizont)

Fläche einen beträchtlichen Anteil am Gesamtsee ausmacht (Mittelwasser 28%, mittleres Niedrigwasser 25%, mittleres Hochwasser 38%), ist das anteilige Volumen des über ihr stehenden Seewassers wegen seiner geringen Tiefe verhältnismäßig gering (Mittelwasser 2,1%, mittleres Niedrigwasser 1,2%, mittleres Hochwasser 4,0%).

Die Uferlänge des Untersees beträgt 90 km [1]. Da ein Kreis mit der Fläche des Untersees von 62,7 km² (Mittelwasser) einen Umfang von nur 28,1 km hat, beträgt der Faktor für die Uferentwicklung 3,21 : 1. Den Wasserständen wurden die Mittelwerte der Jahre 1930 bis 1969 zugrunde gelegt. Die Flächenbemessungen basieren auf der Grundkarte 1 : 5000, wobei der Seerhein und das unter Sonderbedingungen stehende Ermatinger Becken nicht berücksichtigt wurden. Die relativ große Länge des Ufers und die große Breite der Uferbank einerseits, wie die zur Messung der Strömungen verwendete Methode mit Driftkörpern andererseits, engen die untersuchte Fläche auf 45 km², d. h. auf den wirklich pelagischen Bereich, ein. Die Strömungs- und Austauschverhältnisse auf der Uferbank, die im Sommer mehr als ein Drittel der Seefläche einnimmt, konnten aus methodischen Gründen nicht berücksichtigt werden.

Die Seebecken haben langgestreckte Formen. Die des Gnadensees und des Zeller Sees sind nordwest-südöstlich orientiert und messen ca. 10,7 × 1,5 bzw. 7,0 × 2,0 km. Der Rheinsee (16,8 km lang und 0,5 bis 2,5 km breit) weist an seinem nördlichen Ende eine Krümmung nach Osten auf; der größte Teil des Seebeckens zieht nordost-südwestlich. Die maximalen Tiefen der Seeteile sind unterschiedlich: Gnadensee 21 m, Zeller See 25 m, Rheinsee 46 m.

Die Entstehung der Seebecken geht teilweise auf jungtertiäre tektonische Einsenkung zurück, die im Falle des Zeller Sees zwischen den Halbinseln Höri und Mettnau etwa 200 m beträgt. Eiszeitliche Seesedimente und Moränen füllten das Becken bis zu seiner jetzigen Tiefe weitgehend auf. Die Ufer des Untersees liegen in den weichen oberen Süßwassermolassen und sind deshalb weniger steil als jene des benachbarten Überlinger Sees, die zum Teil schroff abfallen und aus dem harten Sandstein der Meeresmolassen gebildet werden [2].

III Windverhältnisse

Leider bestehen keine für den Untersee repräsentativen Aufzeichnungen der Windverhältnisse, so daß man auf Messungen an ähnlich gelegenen Beobachtungsstationen, z. B. Konstanz, zurückgreifen muß. Die Hauptwindrichtung, nach Häufigkeit und Stärke, liegt südwestlich und damit auch in der Längsachse des Rheinsees. Heftige Stürme können deshalb an den Brandungszonen an der Südseite der Insel Reichenau und westlich von Allensbach am Gnadensee zerstörende Wirkung ausüben. Die übrigen Seeteile sind gegen SW-Winde durch die Abschattung der Halbinseln Höri und Mettnau und der Insel Reichenau weitgehend geschützt, zumal die geringe Seebreite von ihnen quer bis schräg getroffen wird und die Bildung großer Wellen nicht ermöglicht. Nicht selten liegt z. B. der Zeller See in völliger Windstille (maximale Erhebung der Höri bis zu 300 m über Seespiegel), während in der Längsachse des Rheinsees ein SW-Wind mit Stärke 2-3 blasen kann. Die abschattende Wirkung der Insel Reichenau (maximale Erhebung über Seespiegel 45 m) und der Mettnau (10-20 m) sind geringer. Etwas weniger häufig und auch weniger stark sind Winde aus NO. Ihr Einfluß auf den Wasserkörper ist deshalb geringer. Winde aus NW und SO, d. h. in der Längsachse vom Zeller See und Gnadensee sind relativ selten und dürften als Schubkraft für Strömungen kaum ins Gewicht fallen.

IV Methode

Durch die Lage und Windverhältnisse des Untersees mußte mit sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten gerechnet werden. Der von AUERBACH [3] verwendete Ekman-Merz-Strommesser und selbst moderne Geräte mit Savonius-Rotoren haben ihre untere Empfindlichkeitsgrenze bei $2 \text{ cm/s} \approx 72 \text{ m/h}$. Wie sich später zeigte, hätte mit diesen Geräten nur ein Teil der vorkommenden Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt werden können: Im Rheinsee 73%, im Zeller See 50% und im Gnadensee nur 22%. Man entschied sich deshalb für die umständliche, doch in diesem Falle günstigere Driftkörpermethode, die bereits von PASSLACK [4] für Untersuchungen in den Jahren 1965–1967 am Bodensee verwendet wurde.

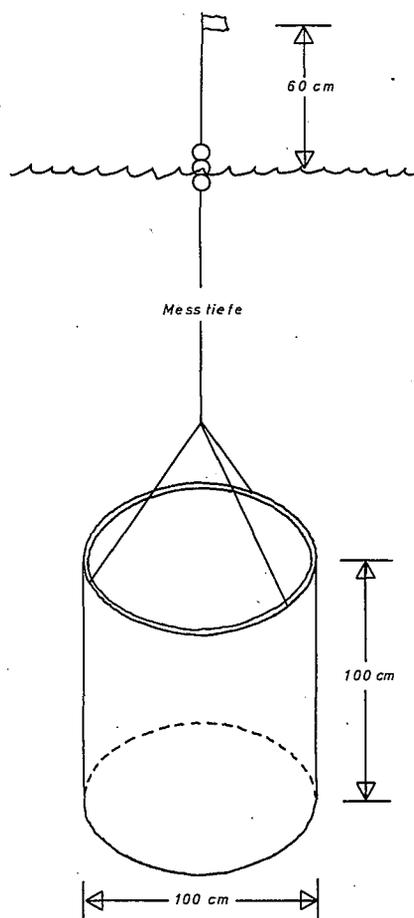


Abb. 2. Driftkörper.

Der Driftkörper besteht aus einem Zylinder von 1 m Höhe und 1 m Durchmesser (Abb. 2). Der Zylinder ist aus Nesseltuch, in dessen oberen Saum ein druckfester Gummischlauch ringförmig eingenäht ist. Im unteren Saum befindet sich eine Bleischnur, deren Gewicht so bemessen ist, daß das Zylindertuch gespannt ist und den Auftrieb des Schlauches bis zu einem Übergewicht von etwa 250 p kompensiert. Vom Zylinder, der in der zu messenden Tiefe treibt, führt eine 5 mm starke Perloneine an die Oberfläche zur tragenden Boje aus Schaumplastik (Styropor). Sie hat ein Volumen von 1000 cm^3 und verdrängt wegen des geringen Zylindergewichtes nur etwa 250 cm^3 . Ihr Strömungswiderstand gegenüber jenem des Zylinders ist somit vernachlässigbar klein. Die Boje trägt ein dünnes, der Entfernungsmessung dienendes 60 cm langes Stahlstäbchen mit einer kleinen Fahne von ca. 8 cm^2 .

Am Meßort wird eine Boje mit möglichst kurzer Leine gesetzt, die den Startpunkt einer Gruppe von Driftkörpern markiert. Die Leinen der Driftkörper sind auf die entsprechenden Tiefen, meist 1, 5, 10 und 15 m, eingestellt. Gemessen wird die Laufzeit des Driftkörpers nach einer Laufstrecke von max. 200 m. Die Entfernung wird mit einem 10 × 50 Fernglas abgelesen, das mit einer kalibrierten Okularskala versehen ist. Die Laufrichtung wird mit dem Kompaß bestimmt.

Die Genauigkeit der Einzelmessung ist nicht allzu groß, besonders bei Wellengang. Sie dürfte unter günstigen Bedingungen bei $\pm 5\%$, unter ungünstigen bei $\pm 10\%$ für die Geschwindigkeit und bei $\pm 5^\circ$ für die Richtung liegen. Die Geschwindigkeit und Richtung einer Strömung können ziemlich inkonstant sein. Vor allem schwache Strömungen verlaufen oft in geschlängelter Bahn, wobei sie beschleunigen und verlangsamen und sogar kurzfristig rückläufig sein können. Deshalb liegt die Genauigkeit des Ergebnisses weniger in der Präzision der Einzelmessung als vor allem in der Mittelwertbildung möglichst vieler Meßdaten, die zu Zeiten unterschiedlicher Situationen (Wetter, Wasserstand) gewonnen werden.

Die Untersuchungen wurden in den Jahren 1965 bis 1973 während der Monate Mai bis Oktober, d.h. am geschichteten See durchgeführt. Aus methodischen Gründen konnte nur bei relativ ruhiger Seefläche gearbeitet werden, da bei Windstärken über 2 das Einmessen der Driftkörper vom schwankenden Boot aus zu erheblichen Ablesefehlern geführt hätte.

Voruntersuchungen an Meßorten mit verschiedenen Entfernungen vom Ufer zeigten, daß eine Strömung umso geringer und in ihrer Richtung undeutlicher wird, je näher sie bei der Längsachse des Sees liegt. Die maximale Geschwindigkeit wurde in der Regel in der Nähe der Halde gemessen. Alle zu untersuchenden Tiefen mit gleichzeitig relativ hohen Geschwindigkeiten waren deshalb über der 20 m-Isobathe zu erwarten, wo schließlich auch die meisten Meßorte festgelegt wurden. Bei tieferem Wasser, wie teilweise im Rheinsee, wurde auf der 25 m-Isobathe ausgesetzt, um noch einen Driftkörper in 20 m Tiefe exponieren zu können. AUERBACH [3] führte 1931 Strömungsmessungen hauptsächlich in den Seeteilen durch, wo Geschwindigkeiten über der Empfindlichkeitsgrenze des Ekmann-Merz-Strommessers zu erwarten waren, d. h. im Rheinsee und Zeller See. Die Messungen konzentrierten sich deshalb auf den Gnadensee und den Zeller See sowie auf die Nahtstellen der einzelnen Seeteile, damit Ermittlungen über den Wasseraustausch zwischen den einzelnen Seebecken angestellt werden konnten.

Die Strömungsmessungen im Ermatinger Becken, einem Flachwassergebiet zwischen der Insel Reichenau, Ermatingen und Gottlieben, wurde mit Fluoreszin (Uranin AP, Merck) durchgeführt. Die vom Rhein angetriebene Strömung ist sehr richtungskonstant, so daß der Farbstoff am oberen Zulauf bei Gottlieben eingegeben und seine Verteilung in Richtung Insel Reichenau in zwei-stündigen Abständen kartiert werden konnte.

V Ergebnisse

1. Richtung der Seeströmungen

Um die Übersicht zu erleichtern, wurden nicht alle gemessenen Tiefen gesondert dargestellt, sondern entsprechend dem Schichtungsaufbau des Sees die Werte aus geringen Tiefen, wie die der größeren zusammengefaßt. Da die thermische Sprungschicht im Untersee während der Sommermonate zwischen 5 und 10 m liegt, wurden die Richtungsdaten von 1 und 5 m und jene

von 10 und 15 m (mit 20 m im Rheinsee) in jeweils zwei Richtungsdiagrammen für die einzelnen Meßstationen vereinigt (Abb. 3). Die Anzahl der epi- bzw. hypolimnischen Daten einer Station ($n = 20 - 70$) sind anteilmäßig auf sechs Richtungssektoren zu je 60° zusammengefaßt (vektorielle Mittelung) und veranschaulichen somit die statistische Häufigkeitsverteilung über die Windrose. Wären alle Richtungen gleichermaßen vertreten, ein hypothetischer Fall minimaler Richtungskonstanz, würde sich ein regelmäßiges Sechseck ergeben. Maximale Richtungskonstanz, im Rheinsee und Ermatinger Becken auftretend, ist als gerade Linie vermerkt, deren Richtung den Strömungsverlauf am Meßort angibt.

Die Richtungsvariabilität der Strömungen in den einzelnen Seeteilen ist sehr unterschiedlich. Der Durchfluß des Rheins durch den Rheinsee, der im Monatsmittel je nach Jahreszeit zwischen 230 und 550 m^3/s (im Meßzeitraum 1965-1973: 250-680 m^3/s) beträgt, formt das Strömungsbild deutlich. Dieser Seeteil hat fast den Charakter eines langsam fließenden Stromes. Wie schon von AUERBACH [3] beschrieben, fließt der Strom stetig von Gottlieben kommend durch das Ermatinger Becken am Südufer der Insel Reichenau entlang. Mit zunehmender Verbreiterung des Seebeckens bildet er gegen Süden Strömungswalzen, so daß zwischen den schweizerischen Ortschaften Ermatingen und Berlingen rückläufige Strömungsrichtungen entstehen (Station 34 und 36). Nach NW richtet sich ein epilimnischer, doch vor allem ein hypolimnischer Zweig auf den Zeller See zu (Station 35). Dieser Strom trifft mit relativ hoher Geschwindigkeit bei Station 31 auf einen Wasserkörper geringer Geschwindigkeit. Die östliche Begrenzung des unterseeischen Grabens behindert ein Ausweichen des hypolimnischen Wassers und bedingt ein Abbremsen der Strömung auf etwa halbe Geschwindigkeiten. Im Richtungsdiagramm 31 verdeutlicht sich der Aufprall besonders. Vermutlich wird an dieser Stelle ein Teil der hypolimnischen Strömung nach SW abgelenkt und über die Station 32 wieder in den Rheinsee zurückgeleitet. Mit verminderter Geschwindigkeit, doch relativ richtungskonstant, setzt die Rheinströmung ihren Weg über Station 29, 27, 25, 23 und 21 an der Südseite der Halbinsel Mettnau fort und wird erst vor Radolfzell in ihrer Richtung unbest. Sie wendet sich am See-Ende nach Süden und ihr hypolimnischer Teil erscheint vor Iznang (Station 20) mit SO-Kurs, der bis vor Gundholzen (Station 24) beibehalten wird. Der epilimnische Teil weist ähnliche Richtungstendenzen auf; da er jedoch stark von den jeweiligen Windverhältnissen beeinflusst wird, ist seine Richtung schwankend. Bei Station 26 beginnt die unterseeische Engstelle, so daß ein Teil der Strömung nach Norden abbiegt, sich dem in den Zeller See einströmenden Zweig einfügt und den Kreisstrom des Sees damit schließt. Bei Station 30 liegt im Hypolimnion wieder eine klare SO-Strömung vor, die als Ausfluß aus dem Zeller See in den Rheinsee angesehen werden kann.

So einfach es ist, den Verlauf der Strömungen im Rheinsee und Zeller See zu verfolgen, so schwierig ist dies im Gnadensee. Seine Verbindung zu den südlichen Seebecken ist praktisch nur epilimnisch, so daß nicht mit hypolimnischer Strömungsenergie des Rheins gerechnet werden kann. Und selbst wenn durch den unterhalb der 3m-Isobathe nur wenige Meter breiten Verbindungsgraben ein schmaler Zweig Einlaß fände, würde er - wenn überhaupt - bei Station 6 frontal auf das Ufer treffen und so viel Energie verloren haben, daß er für das hypolimnische Strömungsbild ohne Bedeutung wäre. Vielleicht sind die quer zum Uferverlauf gerichteten Vektoren des Richtungsdiagrammes der Station 6 Ausdruck dieser Möglichkeit. Mit großer Wahrscheinlichkeit ist jedoch das Strömungsgeschehen im Gnadensee hauptsächlich auf die direkte Wirkung des Windes zurückzuführen.

Während im Zeller See ein überwiegend gegen den Uhrzeigersinn drehender epi- sowie hypolimnischer Wasserkörper vorherrscht, ist die Rotationsrichtung im Gnadensee - soweit man davon sprechen kann - wechselhaft. Die Strömungsrichtung verläuft im allgemeinen parallel zum Ufer, doch ist kein bevorzugter Drehsinn erkennbar. Je mehr die Stationen an den Enden des Seebeckens liegen, desto größer ist die Variabilität in der Strömungsrichtung.

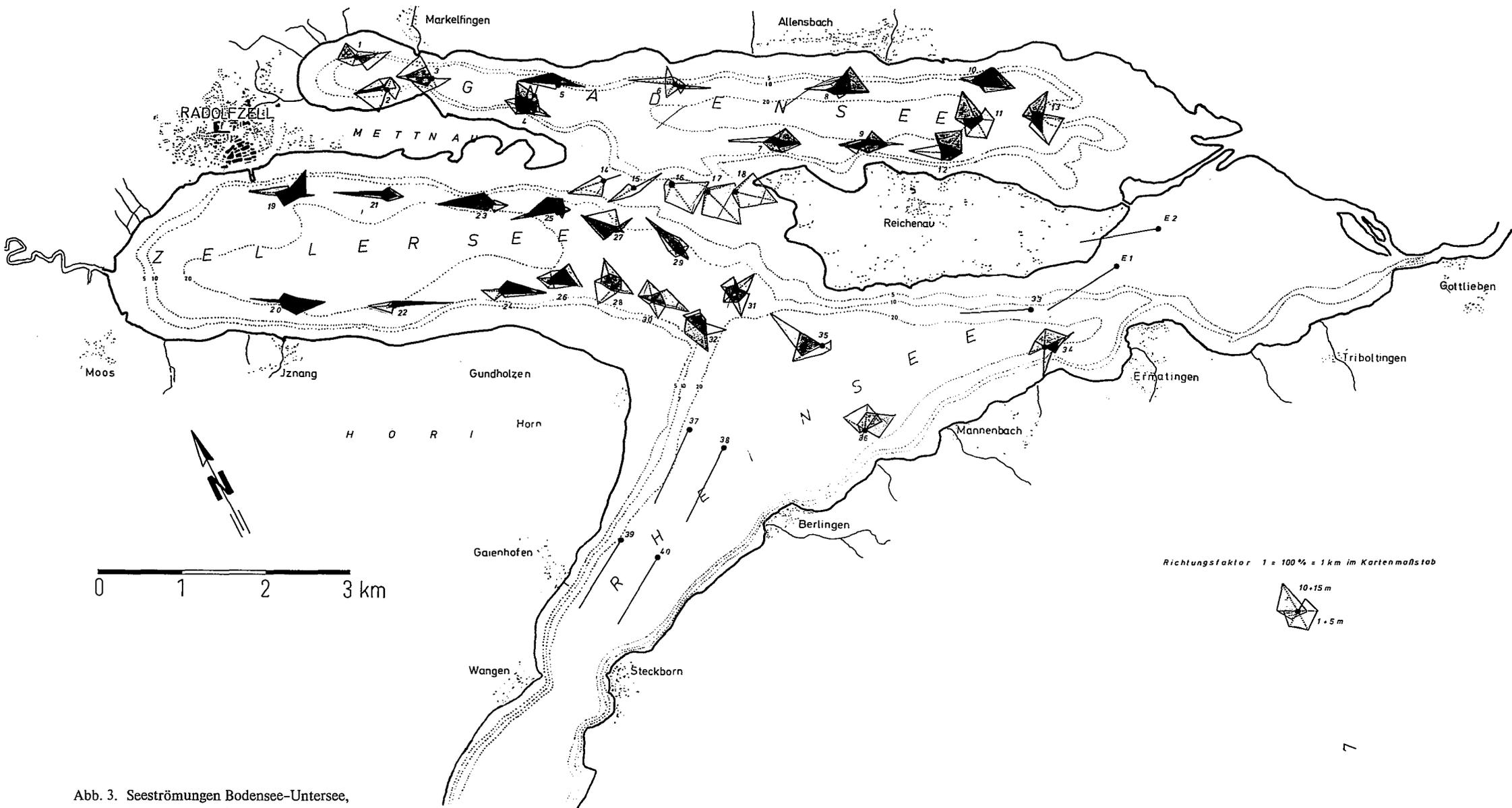


Abb. 3. Seeströmungen Bodensee-Untersee, Richtungverteilung.

Die Driftkörpermethode vermag statistisch auswertbare Angaben über räumlich nur schwach veränderliche, stationäre Strömungsfelder zu vermitteln. Sie ist jedoch kaum geeignet, den Weg der Wasserteilchen im zeitlichen Ablauf mit hinreichender Auflösung festzuhalten, wenn räumlich und zeitlich starke Variabilität das Strömungsgeschehen beherrscht. Gerade im Falle des Gnadensees wäre im Zusammenhang mit dem Stofftransport interessant zu erfahren, ob in seinem östlichen Teil zwischen der Insel Reichenau und Allensbach Wasserschichten wirklich rotieren oder ob sie sich in der Längsrichtung nur hin- und herverschieben. Da die Strömungsgeschwindigkeiten nicht nur klein, sondern auch sehr wechselhaft sind, bräuchte die synchronisierte Messung mit Driftkörper an der Nord- und Südseite des Sees keine Lösung dieser Frage. Aus den gleichzeitig gewonnenen Meßdaten der 10 m-Schicht am 6. 8. 1971 geht zum Beispiel hervor, daß die Strömungsrichtung an Station 7 255°, an Station 8 95° und an Station 9 310° betrug. Man kann daraus auf eine Drehung im Uhrzeigersinn schließen. Am 26. 7. 1971 wurde die Richtung in der gleichen Schicht bei den 3 Stationen mit 190°, 130° und 120° gemessen, woraus sich eher das Bild einer Verschiebung der gesamten Schicht parallel zur Längsachse des Sees ergibt. Es könnte jedoch auch täuschen, wenn die Messung an Station 8 (130°) zufälligerweise in eine kurze rückläufige Phase gefallen wäre und die Strömungsrichtung vor- und nachher bei etwa 300° gelegen hätte; die Schicht rotierte dann im Prinzip gegen den Uhrzeigersinn und wäre bei Station 8 zur Zeit der Messung z. B. durch einen systemfremden Strömungsschub kurzfristig durchbrochen gewesen. Aufschluß über das Strömungssystem in seinem zeitlichen Ablauf kann also nur die zeitlich engabständige Registrierung bringen, deren Anströmempfindlichkeit im Falle des Gnadensees jedoch bei etwa $0,5 \text{ cm/s} = 18 \text{ m/h}$ liegen sollte, so daß damit noch etwas mehr als 80% der dort auftretenden Strömungen gemessen werden könnten.

2. Geschwindigkeit der Seeströmungen

In Abb. 4 sind die Strömungsgeschwindigkeiten an den einzelnen Meßorten als Mittelwerte aller Messungen nach Tiefen getrennt aufgetragen. Dabei wurde außerdem grob nach der Strömungsrichtung getrennt, indem jeweils Halbkreise zusammengefaßt werden, die diesseits bzw. jenseits einer senkrecht auf die Uferlinie gerichteten Geraden liegen. Gestrichelte Linie bedeutet, daß nur ein einziger Meßwert vorliegt.

An der Eintrittsstelle des Rheins bei Gottlieben wurden naturgemäß die höchsten Geschwindigkeiten gemessen. Besonders im Flachwassergebiet des Ermatinger Beckens bestehen flußähnliche Verhältnisse. Es sind dort in der Nähe des Rheinbettes $1500 \text{ m/h} = 42 \text{ cm/s}$ Fließgeschwindigkeit nicht ungewöhnlich und können bei Hochwasser sicherlich erheblich höher sein. Die Schubkraft des Rheins ist so groß, daß jene des Windes sich nur auf die obersten 10 bis 20 cm auswirken kann. Tiefere Schichten werden nur bei stürmischen Westwinden beeinflusst.

Im Rheinsee ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit höher als im Zeller See und Gnadensee, zweifellos als Folge der Schubwirkung des Rheins. Südlich der Insel Reichenau treten hohe Geschwindigkeiten auf (Station 33 und 35), die besonders in 5 und 10 m Tiefe die treibende Kraft des Rheins erkennen lassen. So lagen bei Station 33 auf 5 m Tiefe von sechs Messungen drei über $500 \text{ m/h} (= 14 \text{ cm/s})$. Vor der Halbinsel Höri zwischen Station 32 und 35 wird diese Strömung teils nach NW, teils nach SW umgelenkt und dabei stark abgebremst. Bei den Stationen 37 und 38 ist die Fließgeschwindigkeit erheblich reduziert und erhöht sich erst wieder bei enger werdendem Querschnitt des Seebeckens bei Gaienhofen.

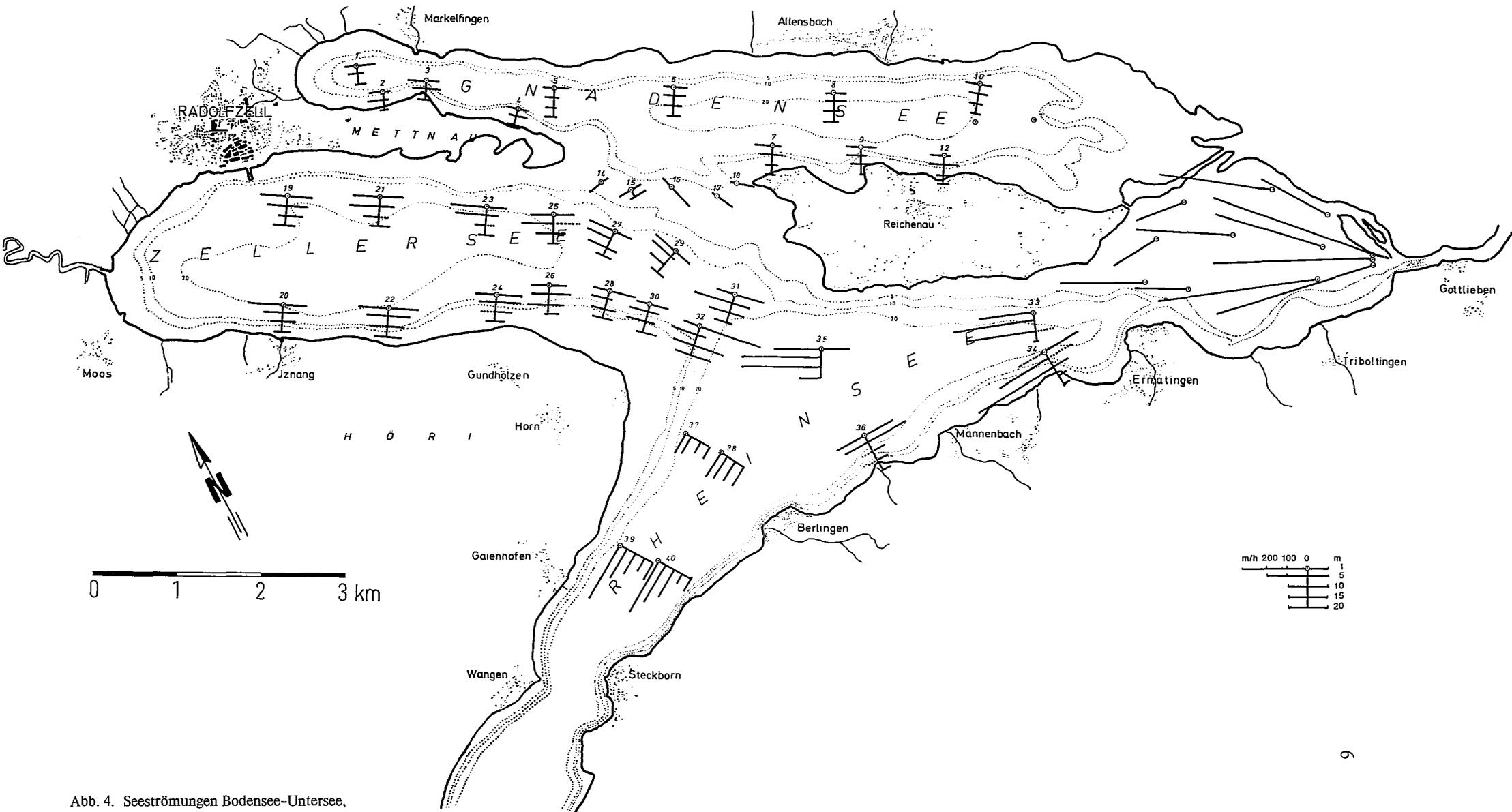


Abb. 4. Seeströmungen Bodensee-Untersee, Geschwindigkeit.

Im Zeller See sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen geringer als im Rheinsee. Man erkennt die relativ hohe Geschwindigkeit des in den Zeller See einfließenden Stromes aus dem Rheinsee über die Stationen 29, 27, 25, 23 und 21 an der längeren Ausbildung des gegen den Uhrzeigersinn gerichteten Astes im Geschwindigkeitsdiagramm. Die Gegenrichtung ist zwar vertreten, doch nur mit minimalen Geschwindigkeiten. In Station 19 ist die Schubkraft des Rheins offenbar aufgezehrt, ebenso auf der Südseite des Sees. Der Rückfluß erfolgt hier nicht mehr mit erhöhter Geschwindigkeit, sondern nur noch mit erhöhter Richtungsstabilität. Die Strömungsverhältnisse an der Station 32 (60 Messungen) scheinen etwas komplizierter Natur zu sein, da hier der Ausstrom aus dem Zeller See auf die Strömung aus dem Rheinsee trifft. Die Strömungsgeschwindigkeiten unterliegen dort sehr starken Schwankungen (1 m: 8-1000 m/h, 5 m: 6-320 m/h, 10 m: 0-320 m/h, 15 m: 0-210 m/h), so daß man auf raschen Richtungs- und Geschwindigkeitswechsel an der Nahtstelle zwischen den beiden sehr unterschiedlichen Seeteilen schließen kann. Außerdem ist zu vermuten, daß ein derartig labiler Strömungszustand auch von der Seespiegellhöhe und von der Wasserführung des Rheins beeinflußt wird. Auch hier würden empfindliche Registriergeräte weitere Aufschlüsse liefern können.

Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Gnadensee sind sehr niedrig und von geringen Unterschieden an den einzelnen Meßstationen. Im nordwestlichen Seeteil, dem durch eine kleine Verengung und Schwelle abgetrennten Markelfinger Winkel, ist die mittlere Geschwindigkeit (Stationen 1, 2 und 3: 54,5 m/h = 1,5 cm/s) ähnlich dem des mittleren (Stationen 5, 6 und 7: 43,7 m/h = 1,2 cm/s) und östlichen Seeteiles (Stationen 10, 11, 12 und 13: 48,1 m/h 1,3 cm/s), woraus wieder hervorgeht, daß der Rheinschub im Gnadensee nicht erkennbar ist.

3. Statistische Verteilung der Geschwindigkeiten

Betrachtet man die Verteilung der relativen Häufigkeit der mittleren Geschwindigkeitsbereiche der einzelnen Seeteile (Abb. 5), so zeigt der Rheinsee die höchsten Werte, doch auch die größte Streuung. Im Gnadensee sind die Geschwindigkeiten geringer und konzentrieren sich auf den Bereich von 21 bis 50 m/h (= 0,6-1,4 cm/s). Der Zeller See liegt hinsichtlich Geschwindigkeit und Streuung der Werte dazwischen. Zum Vergleich wurden die entsprechenden Aufstellungen auch für den Bodensee-Obersee vorgenommen, wofür die Meßwerte aus 2, 10, 20 und 40 m Tiefe von PASSLACK [4] herangezogen wurden.

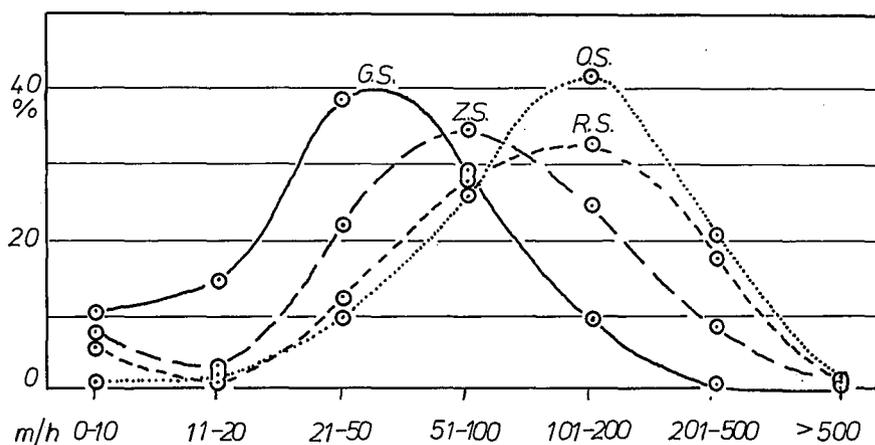


Abb. 5. Relative Häufigkeit mittlerer Strömungsgeschwindigkeiten der Seeteile in 0-15 bzw. 20 m Tiefe (GS = Gnadensee, ZS = Zeller See, RS = Rheinsee, OS = Obersee).

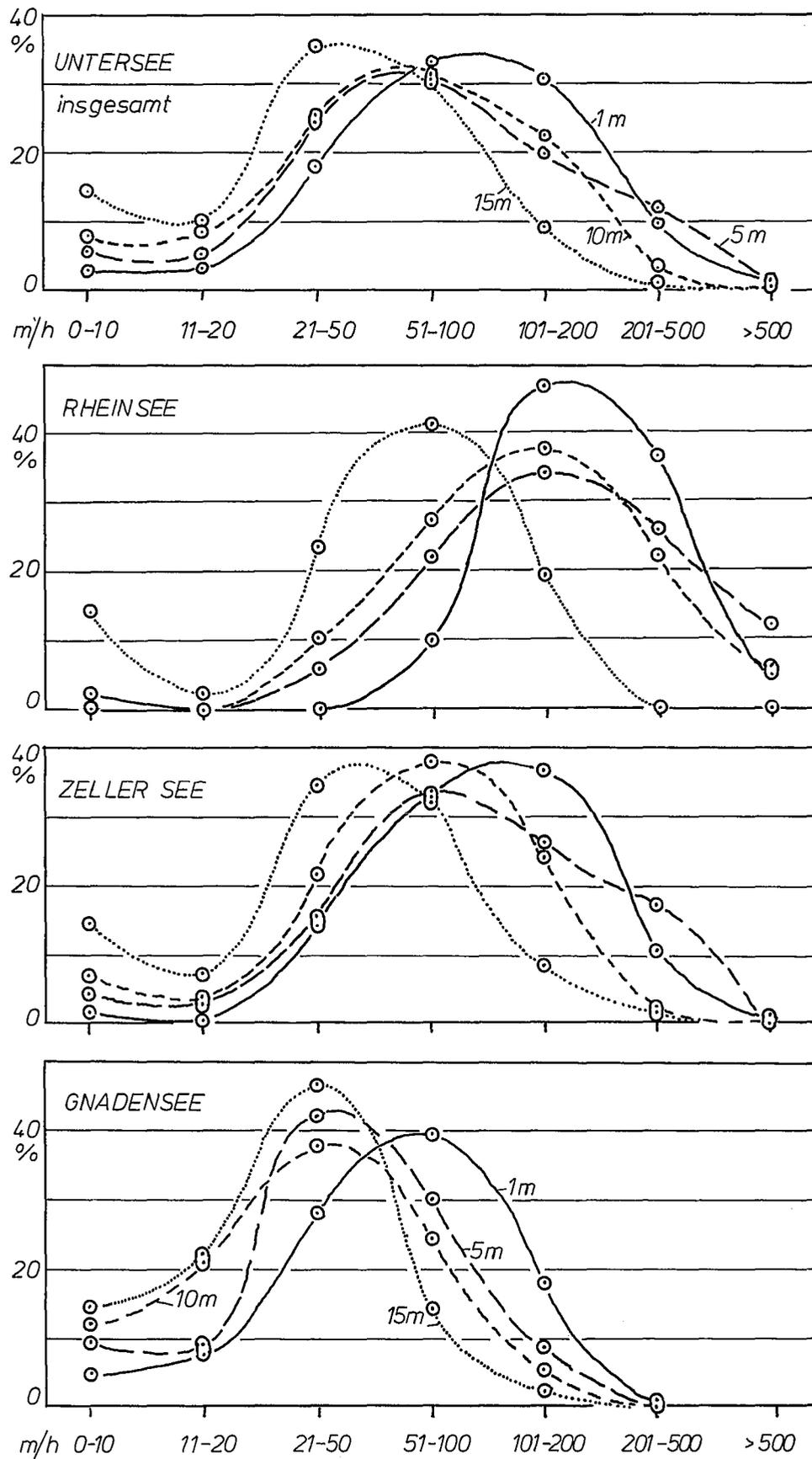


Abb. 6. Relative Häufigkeit mittlerer Strömungsgeschwindigkeiten nach Tiefen und Seeteilen.

Da die energetische Wirkung des Windes bei bevorzugter Richtung aus SSW mit Stärken über 3 auf alle drei Seeteile praktisch gleich sein dürfte und da die Geschwindigkeitsverteilung der Strömungen des Gnadensees als rein windinduziert angesehen werden kann, muß die Erhöhung der Geschwindigkeiten und die Vergrößerung ihrer Streubreite in den anderen Seeteilen auf den Einfluß des Rheins zurückzuführen sein. Danach nimmt der Zeller See nicht genau die Mittelstellung zwischen den anderen beiden Seeteilen ein, sondern zeigt mehr Ähnlichkeit mit dem Rheinsee.

Dieses Bild bleibt auch erhalten bei Aufgliederung der Geschwindigkeitsbereiche in die einzelnen Tiefenstufen (Abb. 6). Wie zu erwarten, nimmt die mittlere Geschwindigkeit in allen drei Seeteilen mit der Tiefe ab, doch werden die höchsten Geschwindigkeiten im Rheinsee ($500 \text{ m/h} = 14 \text{ cm/s}$) und Zeller See ($201\text{--}500 \text{ m/h} = 5,6\text{--}14 \text{ cm/s}$) von der 5 m-Schicht erreicht. Die Schubwirkung des Rheins macht sich vor allem in dieser Tiefe bemerkbar und wird nur in abgeschwächter Form auch auf die darunter liegenden Schichten übertragen.

Aus dem Kurvenverlauf wäre zu erwarten, daß die Häufigkeit im Geschwindigkeitsbereich $0\text{--}10 \text{ m/h}$ beim Rheinsee und Zeller See geringer ist. Dies beruht vermutlich auf der Tatsache, daß die Meßdauer bei Anwendung der Driftkörper-Methode (1 Stunde) größer ist als der Wechsel in der Geschwindigkeit und vor allem in der Richtung der Strömung. So wurde bei niederen Geschwindigkeiten beobachtet, daß der Driftkörper nach einer bestimmten Laufstrecke nahezu wieder an seinen Ausgangspunkt zurückkehrte. So ist das Ansteigen der Verteilungskurve im Bereich $0\text{--}10 \text{ m/h}$ weniger ein Maß für die Geschwindigkeit wie vielmehr Ausdruck der inneren Unruhe des Sees.

4. Strömungsgeschwindigkeit und Seeabflußrate

Die Geschwindigkeit der Seeströmung im Untersee erhält ihre Antriebsimpulse von zwei Kräften: Dem mit unregelmäßigem Schub auftretenden Wind und dem weitgehend jahreszeitlich abhängigen Durchfluß des Rheins. Während im Gnadensee die windinduzierte Strömung überwiegt und im Zeller See noch einen modifizierenden Einfluß ausübt, kann sie sich im Rheinsee gegen die Rheinströmung nicht mehr merklich durchsetzen. Hier wird das Strömungsgeschehen von der Durchflußmenge des Rheins geprägt. Diese beläuft sich auf etwa $10000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ jährlich und erreicht somit das 20fache des Rheinsee-Volumens (etwa $500 \cdot 10^6 \text{ m}^3$). Bei diesem starken Wasseraustausch war zu erwarten, daß die jahreszeitlich wechselnden Abflußmengen sich auf die Strömungsgeschwindigkeiten auswirken und die einzelnen Tiefenstufen unterschiedlich stark betroffen sein würden.

Die jahreszeitliche Schwankungsbreite des Abflusses bei Rheinklingen reichte während der Jahre 1945 bis 1967 von minimal $108 \text{ m}^3/\text{s}$ im Januar 1949 bis maximal $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ im Juni 1965 (Monatsmittel [5]). In der Zeit der Strömungsmessungen variierten die Abflußmengen hingegen nur zwischen 368 und $782 \text{ m}^3/\text{s}$ (29. April und 5. Juli 1967).

Bei den Stationen 39 und 40 ist die Strömung des Sees besonders richtungskonstant. In Abb. 7 werden die dort ermittelten Geschwindigkeiten der Tiefenstufen 5, 10 und 15 m den Tagesabflußwerten gegenübergestellt. Auf die Darstellung der 1 m-Schicht wurde verzichtet, da sie von den jeweiligen Windverhältnissen stark beeinflusst wird.

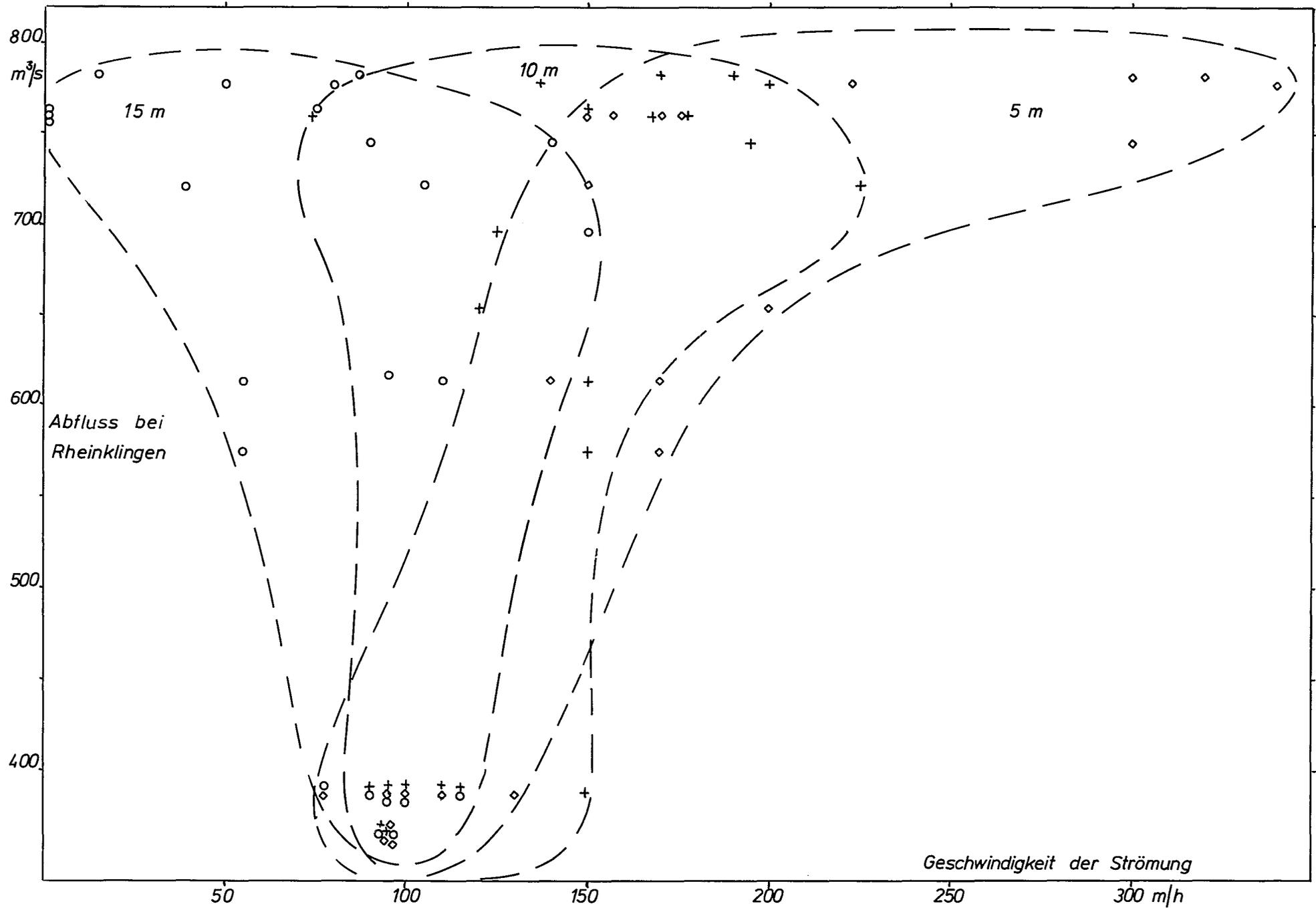


Abb. 7. Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit vom Abfluß bei Rheinklingen
 (○ = 15 m-, + = 10 m-, ◇ = 5 m-Wolke).

Obgleich die Streuung der Geschwindigkeiten bei den einzelnen Abflußmengen beträchtlich ist, fällt auf, daß die 5 m-Schicht deutlich von der Menge des ablaufenden Wassers beeinflusst wird. Die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten entspricht größenordnungsmäßig der Zunahme des Abflusses. Die Geschwindigkeit der 10 m-Schicht ist nicht oder nur undeutlich vom Abfluß abhängig, während die 15 m-Schicht durch hohe Abflußmengen eher gebremst wird.

Es ist anzunehmen, daß die örtlichen Gegebenheiten, insbesondere die Gestaltung des Seebeckens, von Einfluß auf die Strömungsgeschwindigkeiten der Tiefenschichten bei verschiedenen Abflußraten sind. Die umgekehrte Proportionalität bei der 15 m-Schicht beruht zumindest teilweise auf der 2 km unterhalb liegenden Engstelle bei Wangen, wo der Querschnitt auch vertikal vermindert wird. Da bei der Station 40 in 20 und 25 m Tiefe einige Male auch nach NO, d.h. flußaufwärts gerichtete Wasserbewegungen festgestellt wurden, kann auf eine gelegentlich auftretende Strömungswalze im Tiefenbereich vor Gaienhofen geschlossen werden, deren Achse horizontal und quer zur Längsachse des Sees liegt. Diese Strömungswalze wird vermutlich durch die mit relativ großer Geschwindigkeit dahingleitenden Oberflächenschichten angetrieben und durch die Engstelle bei Wangen am Abfließen gehindert.

Für diese Annahme sprechen auch die bei Station 40 verhältnismäßig niederen Sauerstoffkonzentrationen des Tiefenwassers während des Sommers, die bei höheren Austauschraten nicht erklärbar wären.

Hohe Abflußmengen fallen zeitlich mit einem thermisch inhomogenen Wasserkörper zusammen, während geringe Abflußraten mit Homothermie niederer Temperatur gekoppelt sind. Da die zeitlich miteinander verknüpften Faktoren gleichsinnig wirken, kann die starke Divergenz in den Geschwindigkeiten der einzelnen Tiefenschichten sowohl durch die hohe Abflußmenge bedingt sein, die wie im Fluß strömungsarme Räume und rückläufige Stromzweige erzeugt, als auch durch den Aufbau des Wasserkörpers in Schichten unterschiedlicher Dichte, die ebenfalls zu unterschiedlichem Bewegungsverhalten führen können. Umgekehrt bewirkt eine geringere Abflußrate wie auch Homothermie eine Vereinheitlichung im Bewegungsverhalten des Wasserkörpers, die sich schließlich in nahezu gleichartigen Geschwindigkeiten in den verschiedenen Tiefenbereichen ausdrückt. Es ist somit anzunehmen, daß die 15 m-Schicht nicht allein durch die Engstelle bei Wangen mit steigender Abflußrate langsamer fließt, sondern auch durch die bei höheren Geschwindigkeiten auftretende Gliederung des Wasserkörpers in Schichten mit unterschiedlichem Verhalten.

Unabhängig von den Ursachen für die mehr oder weniger starke Divergenz in den Strömungsgeschwindigkeiten kann festgestellt werden, daß das ablaufende Wasser des Untersees im Sommer vor allem aus dem Epilimnion stammt, während es sich im Winter aus allen gemessenen Schichten gleichermaßen zusammensetzt.

VI Der Reststrom

In Zusammenhang mit wasserwirtschaftlichen Maßnahmen stellt sich häufig die Frage nach der Wassererneuerung an bestimmten Stellen im See. Wo gereinigte Abwässer eingeleitet werden, sollten diese rasch und in der Richtung möglichst konstant von der Seeströmung weggetragen werden und sich nicht am Einleitungsort anreichern können. Günstige Bedingungen sind dann gegeben, wenn hohe Strömungsgeschwindigkeit und große Richtungskonstanz örtlich zusammenreffen und damit einen starken Reststrom bilden. Die Größe des Reststroms an einer Station errechnet sich aus der mittleren Geschwindigkeit über alle Tiefenstufen, multipliziert mit der

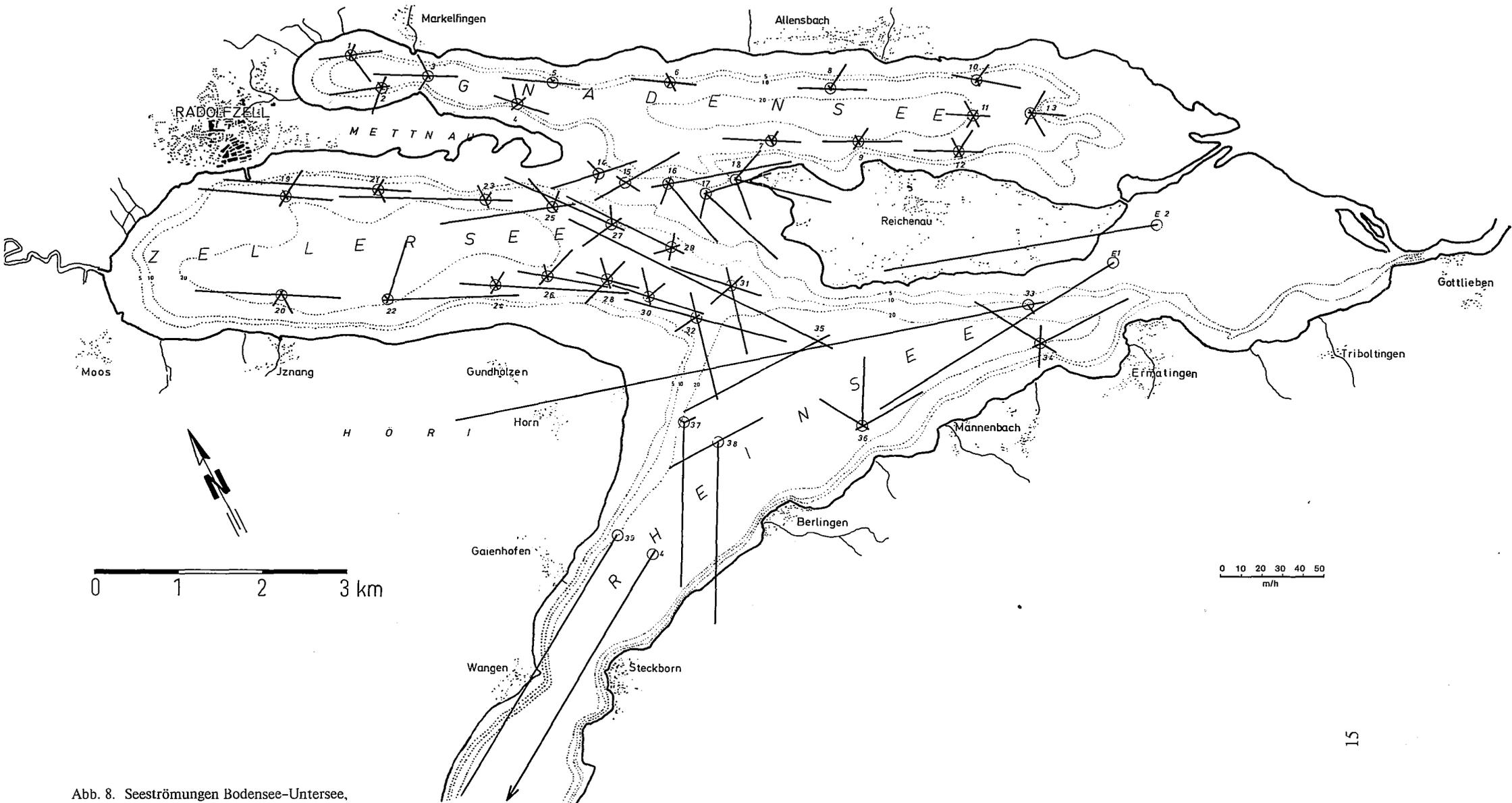


Abb. 8. Seeströmungen Bodensee-Untersee, Reststrom.

relativen Häufigkeit, mit der er innerhalb eines bestimmten Richtungssektors auftritt. Die Summe aller Häufigkeitsanteile der Richtungssektoren einer Meßstelle (= 100%) sei 1; bei gleichen Anteilen ergäbe sich für die Richtung eines der sechs Sektoren der Faktor $1:6 = 0,167$. Mit der Darstellung des Reststroms können auch nur hin und wieder auftretende und in ihrer Richtung wechselnde Strömungen in Form einer statistischen Geschwindigkeit dimensioniert werden (Abb. 8).

Der stärkste Reststrom wird erwartungsgemäß im Rheinsee angetroffen und dort besonders bei Station 33 südlich der Insel Reichenau. Die Rheinströmung muß sich durch die Engstelle zwischen Ermatingen und der Insel zwängen. Sie wird außerdem durch die Rückströmung bei Station 34 seitlich getroffen und nach dem Reichenauer Ufer gedrängt, so daß der verfügbare Raum noch stärker eingeengt wird. Daraus ergibt sich der höchste Wert für den Reststrom, der auch bei Station 39 und 40 nicht übertroffen wird, obgleich der Querschnitt dort nicht wesentlich größer ist.

Sehr deutlich kommt zum Ausdruck, daß sich die Rheinströmung bei Station 35 teilt, wobei der auf den Zeller See gerichtete Ast stärker ist als der südliche. Daß die nördliche Strömung nicht vollständig in den Zeller See einfließt, sondern wenig später nach SW abdreht, geht aus dem Verteilungsdiagramm Station 31 hervor. Die nördliche Ausbuchtung der Isobathen und das Fehlen der NO-Vektoren bei Station 32 sprechen dafür, daß die Rheinströmung mit ihrer großen kinetischen Energie bei Station 31 auf einen fast stagnierenden Wasserkörper trifft, seitlich auszuweichen versucht und dabei durch Reibung teilweise ausgezehrt wird. Über die Stationen 29 bis 19 ist der Verlauf ziemlich gleichmäßig bis vor Radolfzell. Die Rückströmung auf dieser Linie ist gering und erst vor Radolfzell von Bedeutung. Sie ist hingegen vorherrschend auf der Südseite des Sees über die Stationen 22 bis 32. Bei den Stationen 30 und 32 macht sich wieder der Aufprall der Rheinströmung bemerkbar, der den Wasserauslauf aus dem Zeller See erschwert und den Kreisstrom unterstützt.

Ein Teil des Wassers befindet sich somit in ständiger rotierender Bewegung, angetrieben größtenteils durch die Rheinströmung, zum geringeren Anteil durch den Schub der Radolfzeller Aach (Abb. 9). Die Umlaufzeit auf der gegen den Uhrzeigersinn verlaufenden Bahn über die Stationen 19 bis 24 beträgt in 5 m Tiefe 6,6 Tage, in 10 m 11,5 Tage, in 15 m 105 Tage. Die windbeeinflusste Oberflächenschicht (1 m Tiefe) dreht rechts mit einer theoretischen Umlaufzeit von 42,5 Tagen.

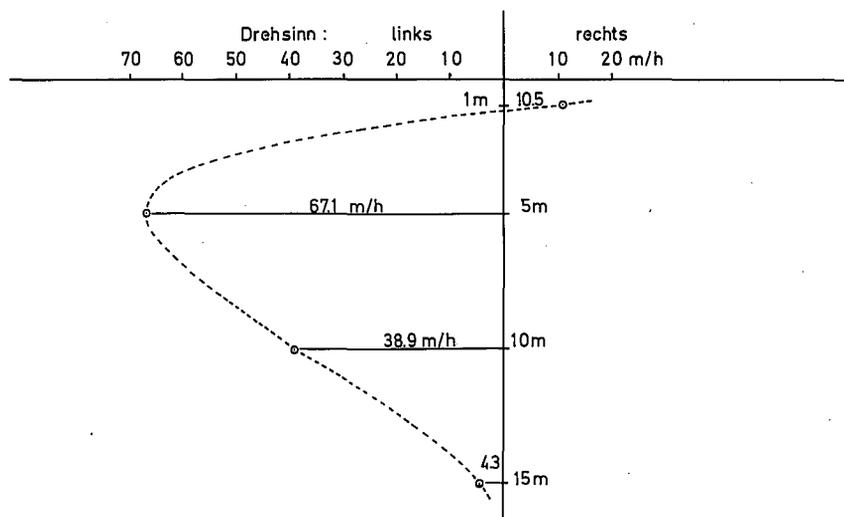


Abb. 9. Drehgeschwindigkeit und Drehsinn des Zeller Sees.

Im Gegensatz zum Rhein- und Zeller See läßt sich ein eindeutiger Wassertransport im Gnadensee nicht festlegen. Die Richtungen parallel zum Ufer sind zwar vorherrschend, doch sind sie nach beiden Seiten hin fast gleich stark ausgebildet. Die Rheinströmung ist hier nicht mehr wahrnehmbar bzw. von der winderzeugten Strömung vollständig überlagert.

Die Abhängigkeit der Richtungshäufigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit wird durch die Korrelation untersucht. In Abb. 10 wurden für die drei Seeteile getrennt die mittleren absoluten Geschwindigkeiten innerhalb der Richtungssektoren ermittelt und gegen deren Richtungshäufigkeit aufgetragen. Sektoren mit weniger als drei Meßwerten wurden nicht berücksichtigt. Die Abhängigkeit ist in dem Maß gegeben, wie sich der Korrelationskoeffizient r dem Wert 1 nähert. Bei $r = 0$ besteht keine korrelierbare Abhängigkeit. Mit p wird die Wahrscheinlichkeit ausgedrückt, inwieweit der korrelierbare Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Richtungshäufigkeit zufällig sein kann. Hierbei wird die Menge der Meßdaten berücksichtigt. Liegt reiner Zufall vor, ist $p = 1$. Bei $p = 0,01$ ist diese Wahrscheinlichkeit praktisch nicht gegeben, so daß eine kausale Verknüpfung beider Parameter angenommen werden kann.

Es zeigen sich wieder die unterschiedlichen Geschwindigkeiten in den einzelnen Seeteilen, doch auch unterschiedliche Größenordnungen für die Richtungshäufigkeit (Rheinsee 0,10 bis 0,95, Gnadensee 0,08 bis 0,40) werden sichtbar. Durch die Regressionsanalyse wird der statistische Zusammenhang zwischen der Ursache (Strömungsgeschwindigkeit) und der Folge (Richtungshäufigkeit) in Form einer Regressionsgleichung beschrieben. Diese ist graphisch als Gerade ausgedrückt, welche die lineare Extrapolation in theoretische Bereiche erlaubt, für die keine Messungen vorliegen. Aufgrund der Extrapolation läßt sich ablesen, daß bei einer hypothetischen Richtungshäufigkeit von 1, d. h. stetigem Fließen in einer Richtung, im Rheinsee eine Geschwindigkeit von 247 m/h (6,8 cm/s), im Zeller See von 151 m/h (4,2 cm/s) und im Gnadensee von 104 m/h (2,9 cm/s) im Mittel nicht überschritten werden kann. Der Grund dafür liegt wieder in den unterschiedlichen Antriebskräften der Strömungen in den drei Seeteilen.

VII Der Wasseraustausch zwischen den einzelnen Seebecken

1. Rheinsee - Zellersee

Die zwischen den einzelnen Seebecken ausgetauschten Wassermengen können nur größenordnungsmäßig ermittelt werden. Zur Berechnung herangezogene Stationen müssen außerhalb der Rotationsströmung des Zeller Sees liegen. Sie dürfen auch nicht vom Aufprall der Rheinströmung betroffen sein. Das Stationenpaar 29 und 30 erfüllt diese Bedingungen. Die Station 29 ($n = 48$) liegt allerdings am Eingang der Rinne zum Gnadensee und könnte somit einen starken nördlichen Vektor haben. Da er jedoch fehlt, kann angenommen werden, daß dort eine Nordströmung besteht, welche die Berechnung wesentlich verfälschen würde.

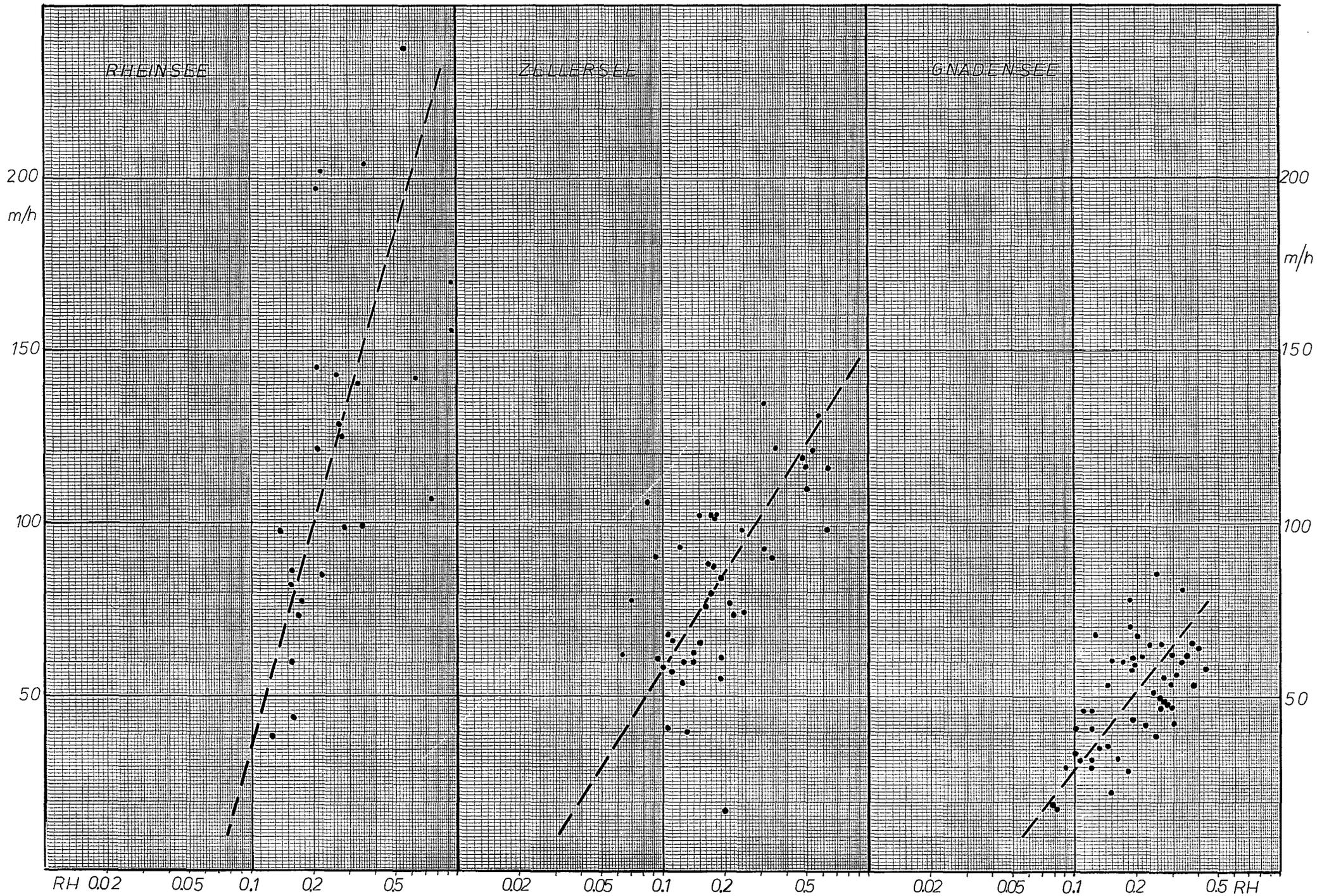


Abb. 10. Strömungsgeschwindigkeit und Richtungshäufigkeit.

Aufgrund der Strömungsverhältnisse verläuft die für die folgenden Berechnungen südöstliche Begrenzung des Zeller Sees von der NW-Spitze der Insel Reichenau (Bürgle) über die Stationen 29 und 30 auf das Ufer der Halbinsel Höri zu. Sie deckt sich also nicht mit den von KIEFER [6] und HAKE und LEHN [7] nach der morphologischen Gestaltung des Seebeckens gezogenen Grenzlinie.

Der den Rheinsee mit dem Zeller See verbindende Graben hat einen Querschnitt von 17000 m^2 und wird durchflossen von einem ein- und einem ausfließenden Wasserkörper, von dem nur die Reststromgeschwindigkeit, nicht die Querschnitte, bekannt sind (Abb. 11).

Für den Einlauf in den Zeller See, der zur Zeit der Messungen im Mai 1968 infolge des steigenden Wasserstandes im gesamten See durch eine Teilströmung verstärkt war, wurde eine Reststromgeschwindigkeit von $50,8 \text{ m/h}$ ermittelt. Der Seespiegelanstieg betrug in dieser Zeit etwa 1 cm/Tag , eine Menge, die im Zeller See einem Volumen von $4450 \text{ m}^3/\text{h}$ gleichkommt. Bei der statistischen Geschwindigkeit von $50,78 \text{ m/h}$ nimmt diese Teilströmung einen theoretischen Querschnitt von 88 m^2 ein.

Der Auslauf mit einer statistischen Geschwindigkeit von $9,33 \text{ m/h}$ enthält neben der eigentlichen Seeströmung den Anteil der in den Zeller See von Westen einfließenden Radolfzeller Aach, die zur Zeit der Messungen eine Wasserführung von $8,8 \text{ m}^3/\text{s} \approx 31680 \text{ m}^3/\text{h}$ hatte. Dieser Menge entspricht bei der gegebenen statistischen Geschwindigkeit ein theoretischer Querschnitt von 3397 m^2 .

Nach Abzug der Querschnitte der Nebenströmungen (88 m^2 , 3397 m^2) verbleibt für die eigentlichen Seeströmungen noch ein Rest-Querschnitt von 13515 m^2 , der umgekehrt proportional ihrer statistischen Geschwindigkeiten ($5,445:1$) aufgeteilt wird. Der Querschnitt des Einlaufs beträgt demnach 2097 m^2 , der des Auslaufs 11418 m^2 . Multipliziert mit ihren statistischen Geschwindigkeiten ergeben sich Volumina von jeweils $106530 \text{ m}^2/\text{h}$, der Austauschgröße zur Zeit der Messungen.

Aus den Ergebnissen der Strömungsmessungen geht hervor, daß der Austausch zwischen den Seebecken von der Wasserführung des Rheins abhängt, die zur Meßzeit 48% über der mittleren gelegen hat. Vermindert um diesen Betrag und auf ein Jahr mit mittleren Wasserständen bezogen, ergäbe sich eine Austauschmenge von $0,614 \text{ km}^3/\text{a}$.

Der Rauminhalt des gesamten Zeller Sees beträgt bei Mittelwasser $0,172 \text{ km}^3$. Gleichmäßige horizontale und vertikale Durchmischung vorausgesetzt, würde er jährlich mit dem $3,56$ fachen Volumen Rheinsee-Wasser versetzt. Da im Verbindungsgraben nur Wasser aus den Tiefen von 0 bis 15 m fließen kann, ist anzunehmen, daß die größeren Tiefen des Zeller Sees vom Rheinsee-Wasser kaum betroffen werden. Seine Sauerstoff- und Phosphorkonzentrationen bestätigen diese Annahme. Das Volumen des Zeller Sees bis 15 m Tiefe ($0,143 \text{ km}^3$) wird demnach etwa viermal jährlich mit Rheinsee-Wasser ausgetauscht.

Aus der Radolfzeller Aach gelangen bei einer mittleren Wasserführung von $9,34 \text{ m}^3/\text{s}$ jährlich $0,287 \text{ km}^3$ Wasser in den See. Das ist das Doppelte seines Volumens in den Tiefenbereichen 0 bis 15 m . Das Strömungsbild spricht dafür, daß das Flußwasser entlang dem Südufer des Sees an Moos, Iznang und Gundholzen vorbei dem Seeausgang zugetrieben wird. Seine mittlere Laufzeit im See beträgt bei Berücksichtigung von Geschwindigkeit und Richtungskonstanz ($41,57 \text{ m/h}$) in 1 und 5 m Tiefe 132 Stunden bzw. $5,5$ Tage.

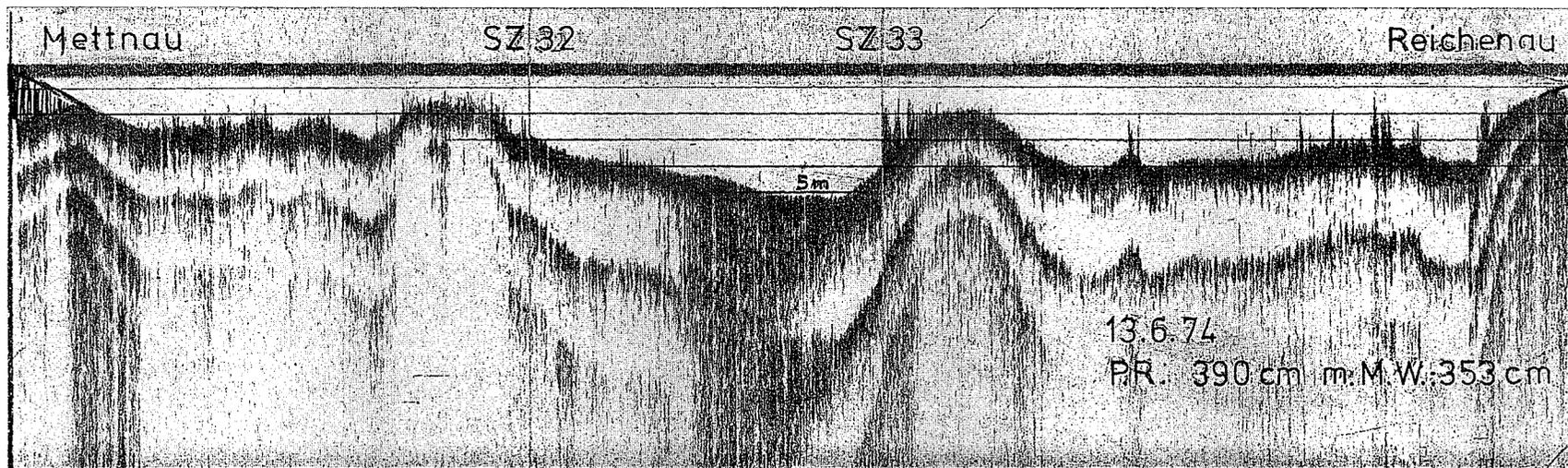
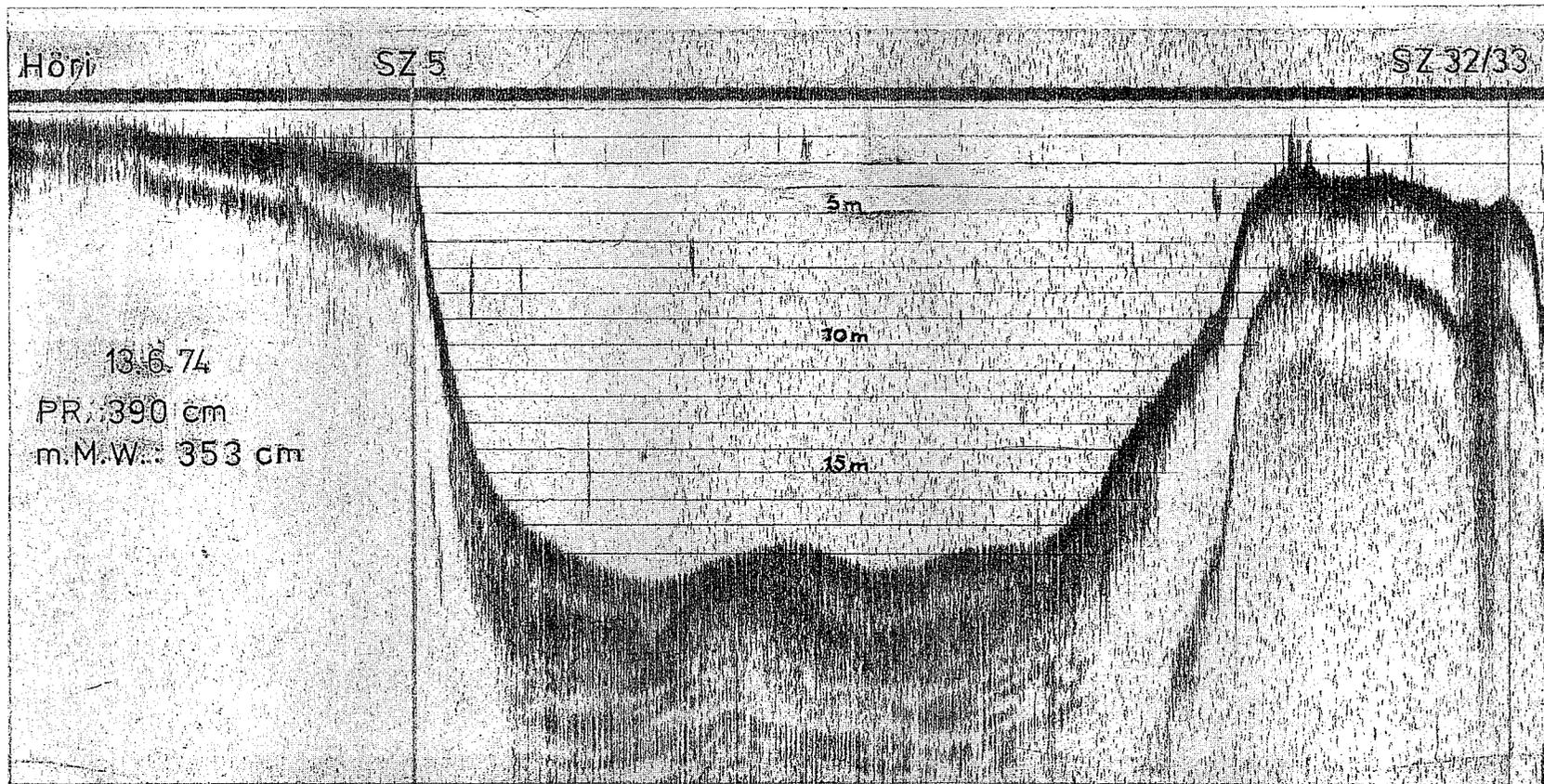


Abb. 11. Querschnitte durch Verbindungsstellen
(oben: Rheinsee - Zeller See; unten: Zeller See - Gnadensee).

2. Gnadensee – Zeller See

Der Wasseraustausch zwischen den beiden Seeteilen kann nur über die sehr flache Linie Insel Reichenau – Halbinsel Mettnau erfolgen. Ihre mittlere Tiefe beträgt bei mittlerem Wasserstand 2,40 m, ihre Länge 2350 m, so daß sich ein Querschnitt von $5\,500\text{ m}^2$ [7] ergibt.

Aus den Richtungsdiagrammen der Stationen 14 bis 18 (Abb. 3) geht hervor, daß in den Gnadensee eindringendes Wasser über die Stationen 14 und 15 laufen, ausströmendes hingegen die Stationen 16, 17 und 18 passieren muß. Aus dem Verlauf der Strömungsrichtung bei Station 14 und 15 einerseits und den Stationen 16 bis 18 andererseits kann geschlossen werden, daß die eindringende Strömung noch auf der flachen, die Reichenau und Mettnau verbindende Barre nach SO abgelenkt und gegen das Westufer der Insel Reichenau abgedrängt wird, d. h. den eigentlichen Gnadensee gar nicht erreicht. Dies wird verständlich bei Berücksichtigung der geringen Strömungsgeschwindigkeiten bei Station 14 und 15 (Abb. 4). Offensichtlich fehlt die Schubkraft, die erforderlich wäre, damit sich eine Strömung mit schwacher Tiefenausdehnung gegenüber einem Wasserkörper mit geringer Strömungsgeschwindigkeit merklich auswirkt. Auch aus der Geschwindigkeitsverteilung über die Stationen 16 bis 18 kann angenommen werden, daß von Westen eindringendes Wasser umgelenkt und dabei auch beschleunigt nach SO weggeführt wird. Dadurch ergibt sich zwar eine Kreisströmung zwischen den Stationen 15 bis 18 im Norden und 31, 29 und 27 im Süden. Von einem Wasseraustausch zwischen Zeller See und Gnadensee kann mithin nicht gesprochen werden. Dieses Ergebnis wird durch den unterschiedlichen Schichtungs Aufbau nach Temperatur und Chemismus der beiden Seeteile bestätigt [3].

Man sollte annehmen, daß sich zumindest bei Westwind mit 3–4 Windstärken eine Strömung mit hoher Geschwindigkeit und deshalb stärkerem Eindringungsvermögen ausbilden würde. Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt zwar beträchtlich zu und kann Spitzenwerte von $360\text{ m/h} = 10\text{ cm/s}$ erreichen, doch an der Richtungsverteilung bei den Stationen 16 bis 18 ändert sich nichts, so daß das Prinzip des Strömungsverlaufes auch bei Westwindlagen erhalten bleibt. Das schließt freilich nicht aus, daß ganz oberflächennahe Wasserschichten in der jeweiligen Windrichtung verschoben werden. Von der Menge her sind sie jedoch unbedeutend.

Auch wenn kein merklicher Wasseraustausch zum Gnadensee hin erfolgt, so werden doch Wassermassen über die Grenzlinie Reichenau – Mettnau verschoben. Die Größen des Reststroms der über die 5 Stationen ein- bzw. ausfließenden Strömungen müßten gleich sein, wenn keine Zuflüsse zum Gnadensee hin bestünden. Aus den vorliegenden Messungen geht jedoch hervor, daß der Reststrom der einfließenden Strömung $12,19\text{ m}^3/\text{h}$ und jener der ausfließenden $16,31\text{ m}^3/\text{h}$ beträgt, mithin eine Differenz von $4,12\text{ m}^3/\text{h}$ entsteht. Daraus ergibt sich über den Querschnitt von $5\,500\text{ m}^2$ ein ständiger Ausstrom aus dem Gnadensee von $22\,600\text{ m}^3/\text{h} = 6\,300\text{ l/s}$. Da die ganz flachen Seeteile, in denen keine Messungen durchgeführt werden konnten, als Durchlaß vermutlich ausfallen, dürfte dieser Wert wahrscheinlich zu hoch liegen. Als Zuflüsse kämen in Betracht: Der Durchstich durch den Damm zur Insel Reichenau, die bei Markelfingen, Allensbach und Hegne mündenden Bäche sowie diverse kleinere Rinnsale und im nördlichen Uferbereich entspringende Quellen.

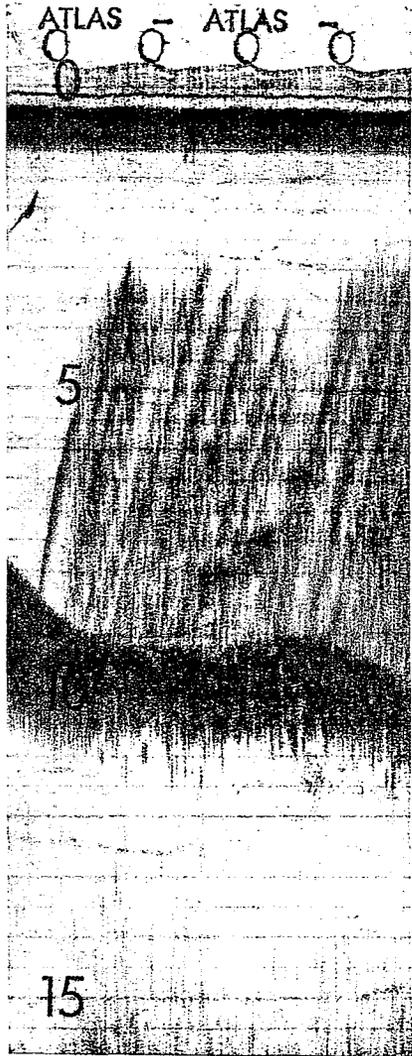
VIII Schlußfolgerungen

Außer der düngenden Wirkung von Abwässern im allgemeinen kann ihre Schädwirkung im See auch auf der Anreicherung von Krankheitskeimen in der Uferzone beruhen. Deshalb ergibt sich bei der Wahl einer Abwassereinleitungsstelle stets die Aufgabe, anfallende Konzentrationen möglichst rasch unter die Schadensschwelle zu führen und den limnologischen Anforderungen anzupassen. Dazu ist die genaue Kenntnis des örtlichen und möglichst auch des allgemeinen Strömungsbildes eines Seeteiles erforderlich.

In den Richtlinien der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee wird empfohlen, das gereinigte Abwasser unterhalb der sommerlichen Sprungschicht einzuleiten. Die hierfür bedeutsame Sommer-Sprungschicht liegt im Untersee in etwa 15 m Tiefe. Damit gelangt das Abwasser in die dem Ufer parallel gerichtete Seeströmung und zugleich in einen Bereich, der aus Lichtmangel keine nennenswerte Assimilationstätigkeit mehr zuläßt. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß durch geeignete technische Vorkehrungen das eingeleitete Abwasser in der vorgesehenen Tiefe zwangsweise eingeschichtet wird [8].

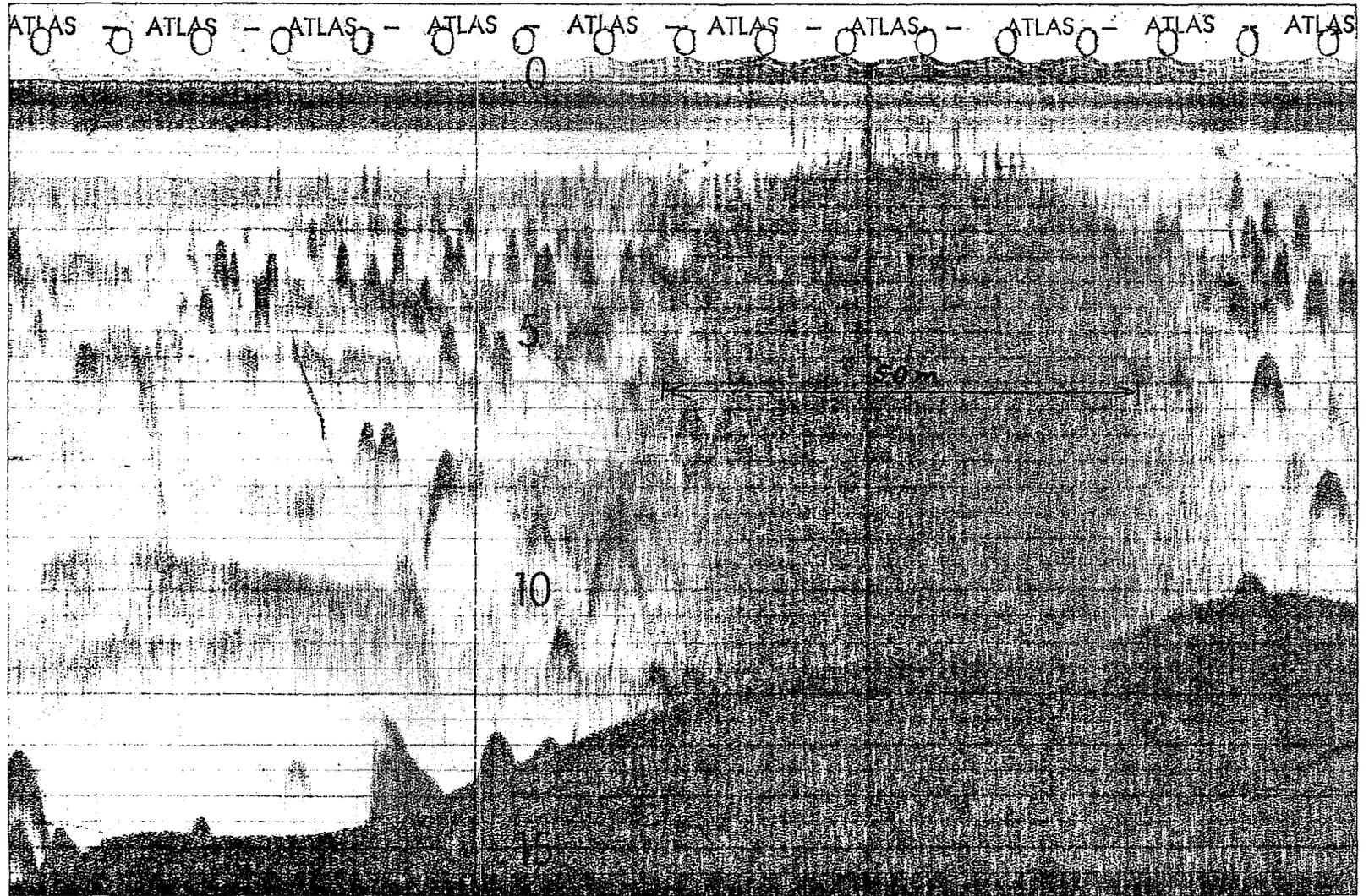
Die Geschwindigkeit der Seeströmung sollte bei möglichst konstanter Richtung mehr als 200 m/h betragen, da Richtung und Geschwindigkeit der Seeströmung die Verteilung des Abwassers maßgeblich bestimmen.

Ist hingegen die Strömung gering oder wechselt sie ihre Richtung kurzfristig, bildet sich ein wolkenförmiges Gebilde um den Mündungsbereich der Ablaufleitung, das bei ungenügender Einleitungshilfe zu Zeiten der Homothermie auch die Oberfläche erreichen kann. Außerdem kann sich dann im Seeboden ein Hof aus sedimentierten Faulstoffen bilden, der auch an der Seeoberfläche durch ständig aufsteigende Methanblasen erkennbar ist (Abb. 12).



Aufsteigende Gasblasen.

Abb. 12. Schnitte durch Abwasserwolke.



Ansammlung von Fischen um Abwasserwolke.

Literatur

- [1] KIEFER, F., 1972: Naturkunde des Bodensees. – 210 S. Thorbecke Verlag Sigmaringen
- [2] SCHREINER, A., 1968: Untersuchungen zur Entstehung des Bodensees. – Schr. VG Bodensee 86, 283–294.
- [3] AUERBACH, M. und G. ROTTENGATTER, 1960: Untersuchungen über den Wasseraustausch der einzelnen Becken des Untersees (Bodensee). – Schweiz. Z. Hydrol. 22, 45–83.
- [4] PASSLACK, G., 1970: Strömungen im Bodensee. – Mitt. Franzius-Inst. d. T.U. Hannover, H. 35, 54 S.
- [5] Hydrographisches Jahrbuch der Schweiz 1967.
- [6] KIEFER, F., 1961: Bemerkungen zur Morphometrie des Bodensee-Untersees aus limnologischer Sicht. – Schr. VG Bodensee 79, 144–148.
- [7] HAKE, G. und H. LEHN, 1973: Tiefenmessungen im Bodensee. – III Zeller See und Gnadensee. – Schr. VG Bodensee 91, 145–156.
- [8] EAWAG: Die Einleitung von gereinigtem Abwasser in Seen. Interner Bericht, unveröffentlicht. 1974.

