

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 72 (1980)
Heft: 9

Artikel: Physikalisch-limnologische Untersuchungen in Schweizer Seen
Autor: Horn, Wilfried
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941409>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Physikalisch-limnologische Untersuchungen in Schweizer Seen

Wilfried Horn

Zusammenfassung

In den grossräumig angelegten mehrmonatigen Messprogrammen im Zürichsee und im Lago di Lugano gelangten jeweils etwa 40 selbstregistrierende Temperatur- und Strömungsmesser in 12 bzw. 7 Unterwasserverankerungen sowie je 3 schwimmende meteorologische Messstationen zum Einsatz. Im Vordergrund der begonnenen Forschungsarbeiten stehen zwei Fragen: Wie ändern sich Schichtung und Strömung in Seen aufgrund der meteorologischen Verhältnisse, und welchen Einfluss hat die physikalische Seedynamik auf biologische und chemische Prozesse, insbesondere die Spurenstofftransporte?

Résumé: Recherches de limnologie physique dans les lacs suisses

Des campagnes de mesures en appliquant des procédés océanographiques dans les Lacs de Zurich et de Lugano devraient fournir une réponse à deux questions prédominantes:

- Les réactions du lac aux influences météorologiques
- L'influence de l'hydrodynamique lacustre sur les procès biologiques et chimiques (en particulier le transport de matière nutritive)

Summary: Physical-limnological research in Swiss lakes

For about two months subsurface moorings were launched at 12 resp. 7 positions together with 3 meteorological buoys. The explorations should enable two prominent questions to be answered:

- the response of the lake due to meteorological forcing
- the influence of lake hydrodynamics on biological and chemical processes, especially on nutrient transport.

1. Einführung

Die verschiedensten Fachrichtungen der Geo- und Ingenieurwissenschaften befassen sich mit dem für viele gewöhnlichen und dennoch aussergewöhnlichen Medium

«Wasser». Drei davon erscheinen im Namen der jetzt 50jährigen Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie, Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (VAW). Seit 1977 ist auch die Seenforschung mit ihrer Unterdisziplin physikalische Limnologie als weiterer Forschungszweig in der VAW vertreten. Im Rahmen des nationalen Forschungsprogramms «Grundlegende Probleme des schweizerischen Wasserhaushalts» werden zurzeit in Zusammenarbeit mit anderen Institutionen wie der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), der Wasserversorgung Zürich, dem Istituto Cantonale Tecnico-Sperimentale, Lugano und der Abteilung Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Schichtungs- und Strömungsverhältnisse in Seen in Abhängigkeit von meteorologischen Faktoren erfasst sowie der Einfluss von Transportvorgängen im Innern des Sees auf den Nährstoffhaushalt erforscht. Die Forschungsarbeiten wurden dankenswerterweise u. a. vom Bundesamt für Umweltschutz, vom Bundesamt für Messwesen (Abt. Thermometrie), vom Amt für Wasserbau und Gewässerschutz des Kantons Zürich, der kantonalen und städtischen Seepolizei, Zürich sowie von den Städten Neuenburg und Lugano unterstützt.

Seit der Antike befassen sich Forscher damit, Probleme wie die ausreichende Wasserversorgung der Menschheit, die Fruchtbarmachung der ariden und semiariden Räume der Erde unter Speicherung von Oberflächenwasser und Hebung von Grundwasser, der Be- und Entwässerung, der Reinhaltung des Wassers und der Abwasserbeseitigung zu lösen bzw. Grundlagen für die Lösung zu erarbeiten. Vom Wasservorrat der Erde entfallen rund 97,2% auf die Ozeane, weniger als 1/10 000 – es sind 0,009% – ist der Anteil der binnenländischen Süsswasserseen. Dennoch kommt dem «Mikrokosmos» See eine gleiche Bedeutung zu wie dem «Makrokosmos» Meer. Dieser Bedeutung ist seit Mitte des letzten Jahrhunderts sowohl in der Meeresforschung (Ozeanographie) als auch in der Seenforschung (Limnologie) Rechnung getragen worden. Beide haben sich seither als selbständige Wissenschaften entwickelt. Dabei wandte man in der Limnologie die gleichen Mittel und Methoden wie in der Ozeanographie an, so dass sich ein Aufschwung in der Meeresforschung auch in der Seenforschung auswirkte. Als Beispiel sei dafür Wyville Thomsons (Lord Kelvins) Werk «The Depths of the Sea» angeführt (1873), dem die umfassende Monographie des Schweizer Arztes F. A. Forel über den Genfer See («Le Lé-

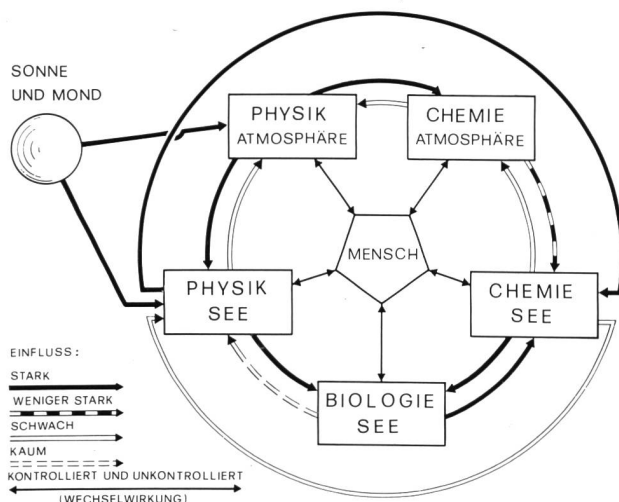


Bild 1. Das Ökosystem See.

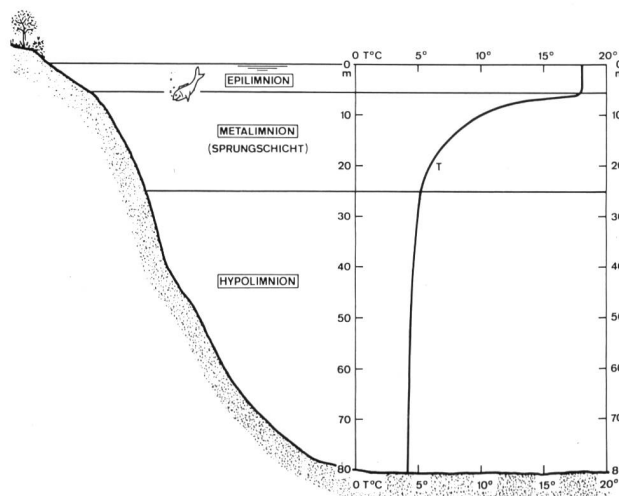


Bild 2. Geschichteter See im Spätsommer (Schema).

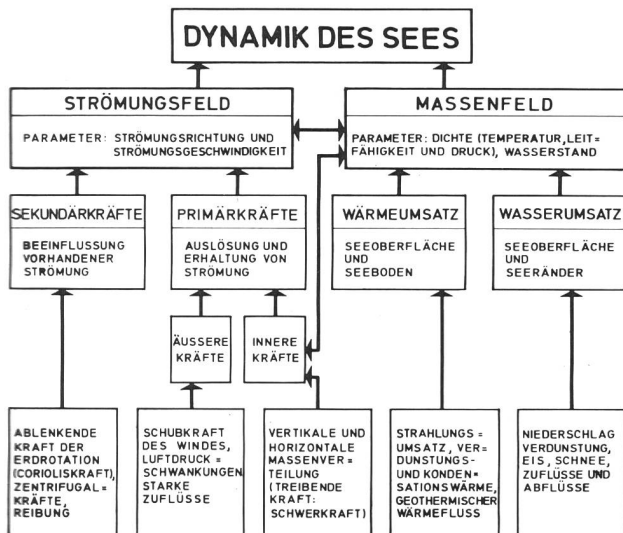


Bild 3. Komponenten der Seedynamik.

man») folgte (1892-1901). Forel bezeichnete die Ozeanographie als grosse Schwester der Limnologie, deren Forschungsergebnisse oft für die Seen benutzt wurden; nichtsdestoweniger konnte die kleine Schwester auch an der Weiterentwicklung der grossen beitragen. Nach Abschluss der fast alle naturwissenschaftlichen Disziplinen umfassenden Arbeiten Forels verlagerte sich der Schwerpunkt der Seenforschung aus der Schweiz in andere Regionen Europas, insbesondere nach Grossbritannien: Hier wurden viele wesentliche theoretische Grundlagen geschaffen, um die physikalischen Vorgänge in den Seen mathematisch zu beschreiben. Dann trat in der physikalischen Limnologie ein «dynamischer Stillstand» ein: biologische und chemische Arbeiten standen seitdem im Vordergrund. Erst im Laufe der Jahre gewann die physikalische Seite wieder an Bedeutung – dies wiederum parallel mit dem Aufschwung in der Ozeanographie. Gründe dafür lagen zum einen in der Weiterentwicklung der messtechnischen Voraussetzungen, zum anderen im wachsenden

Verständnis für die Bedeutung der physikalischen Prozesse in einem See. Dies mag das Schema in Bild 1 verdeutlichen, das die Hierarchie der physikalischen, chemischen und kosmischen Einflüsse aufzeigt. Dem Menschen wird dabei eine zentrale Rolle zuteil, da er am Ablauf der Wechselwirkungen der jeweiligen Systeme passiv oder aktiv beteiligt sein kann. Dazu sei ein Beispiel angeführt:

Dient ein See als Unterbecken für ein Pumpspeicherwerk, so wird ihm periodisch Wasser entnommen und wieder zugeführt. Dabei entstehen Wasserspiegelschwankungen in der Grössenordnung von mehreren Zentimetern. Die Fassung und Rückgabe des Wassers erfolgt meist im Epilimnion (vgl. Bild 2) und erzeugt eine starke Strömung im Nahbereich. Die im Sommer ausgeprägte natürliche Temperaturschichtung kann damit zerstört werden. Die Auswirkungen auf die chemischen und biologischen Prozesse des gesamten Sees sind hier wie in vielen andern Fällen nicht unmittelbar vorherzusehen; erst systematische physikalisch-limnologische Untersuchungen können die nötigen Voraussetzungen liefern, um Modelle und Methoden zu erarbeiten, die einer sinnvollen Nutzung des Sees Rechnung tragen. Folgende Einzelphänomene werden seit 1977 an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie untersucht:

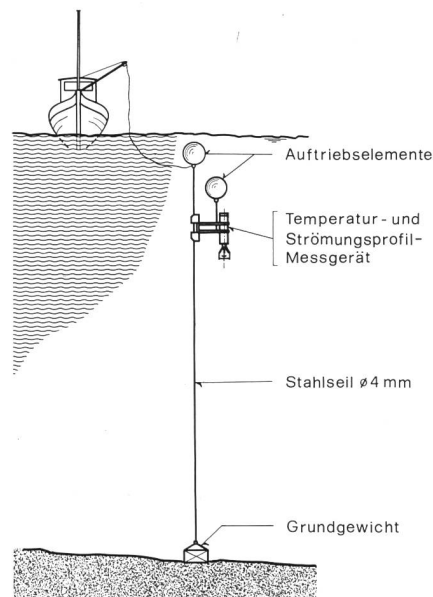
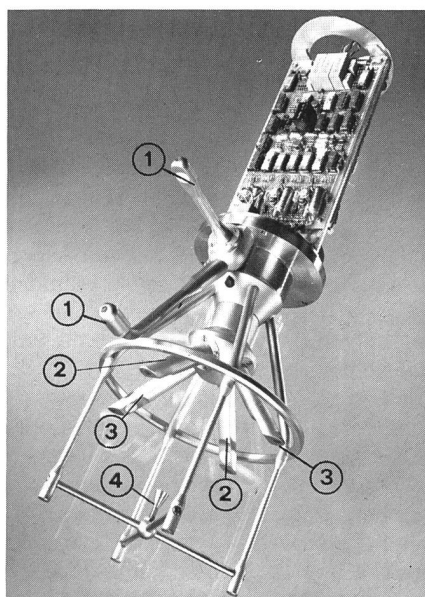
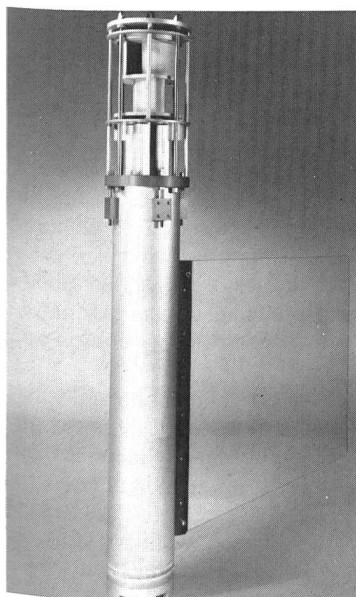
1. Wärme- und Impulsfluss von der Atmosphäre in den See
2. Wärme- und Impulsfluss im See
3. Spurenstofftransporte im See.

Dazu mussten in erster Linie die gross- und kleinräumigen meteorologischen Verhältnisse ermittelt, die räumliche Verteilung der Wassertemperatur und der Leitfähigkeit zur Bestimmung der Dichteschichtung des Sees gemessen sowie die Seeströmungen erfasst werden. Parallel dazu wurden numerisch-mathematische Modelle entwickelt, die die physikalischen und biochemischen Prozesse in ihrem Ablauf simulieren, um nach sinnvoller Anpassung und Eichung durch Messungen – ähnlich wie beim Wetter – den Wärme-, Wasser- und Stoffhaushalt des untersuchten Sees abgesichert vorherzusagen.

Bild 4, links. Seeströmungsmesser der VAW.

Bild 5, Mitte. Sensorkopf eines akustischen Strömungsmessers (Gytre-Sonde) mit Elektronik. 1 Schallgeber und Empfänger der vertikalen Strömungskomponente; 2 und 3 Schallgeber für die horizontale Komponente; 4 akustischer Spiegel.

Bild 6, rechts. Strömungs- und Temperaturprofilmessung (Schema).



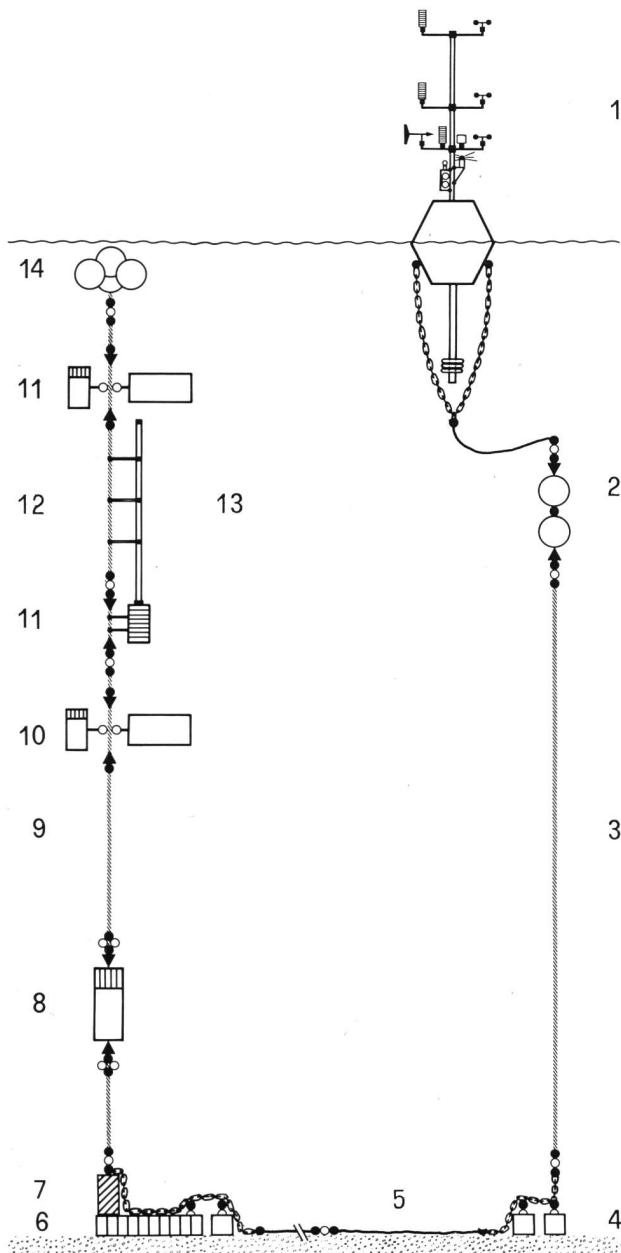


Bild 7. «U»-Verankerung mit meteorologischer Boje. 1 Meteorologische Boje, 2 Auftriebskörper, 3 Bojenkörper (Stahl, Durchmesser 10 mm), 4 Bojenkörper, 5 Grundlinie (Stahl, Durchmesser 10 mm), 6 Grundanker, 7 Wasserstandsmessgerät (Pegel), 8 Strömungsmessgerät (VAW), 9 Messkettenseil (Stahl, Durchmesser 8 mm, drallfrei), 10 Strömungsmessgerät mit Druck- und Temperatursensoren, 11 Registrierungseinheit, 12 Briden (Halterungen), 13 Messkabel mit 11 äquidistanten Temperatursensoren (Termistorkabel), 14 Auftriebskörper

Symbole

● Schäkel, ○ Ring, ○○ Drehwirbel, ▲ Geräteanschluss

2. Messtechnische Voraussetzungen

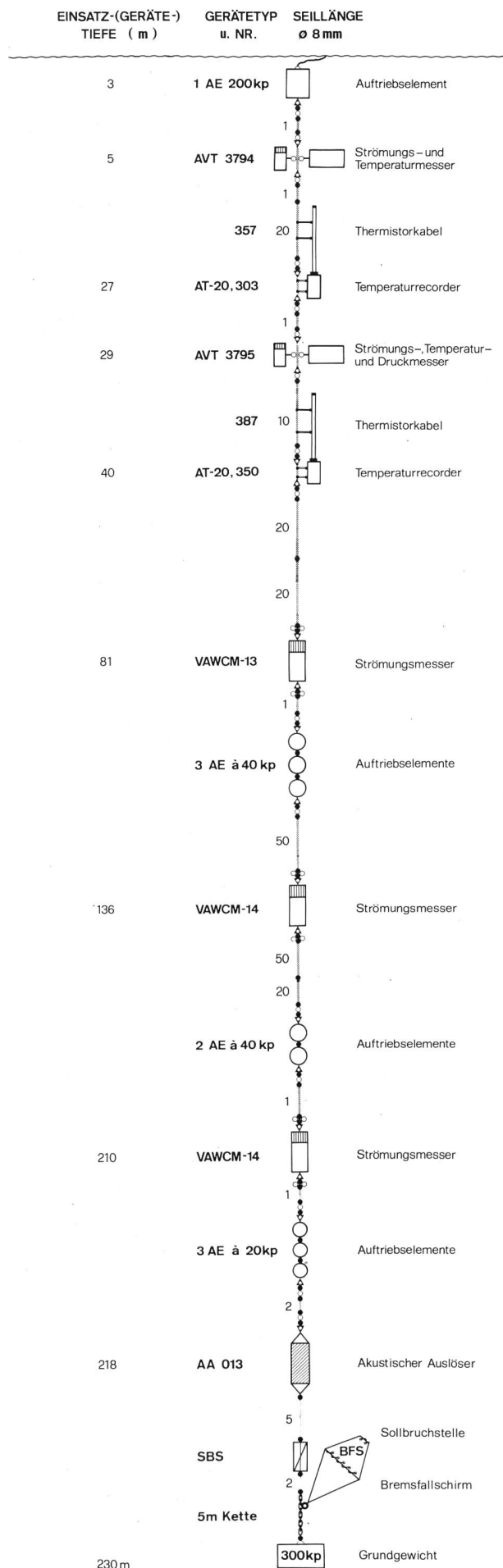
Noch vor wenigen Jahren konnte sich der Wissenschaftler bei der Seenforschung nur auf eine geringe Zahl von Beobachtungen stützen. Dennoch sollte er die komplexen physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse im See deuten und ihre räumliche und zeitliche Veränderlichkeit erfassen. Die Formulierung von Gesetzmässigkeiten zur Erklärung der Zusammenhänge gelang zwar in manchen Fällen, jedoch sind neben den stichprobenhaften und sporadischen Messungen – gekoppelt mit theoretischen Überlegungen – möglichst umfangreiche und je nach Problem gezielt angelegte Untersuchungen in Seen

unumgänglich geworden. In Bild 3 sind diejenigen Komponenten zusammengefasst, die im wesentlichen die Dynamik eines Sees ausmachen: dabei sind sowohl die wesentlichen zu messenden Parameter der treibenden Kräfte – insbesondere die der Atmosphäre – als auch das resultierende hydrodynamische «Gleichgewicht» zwischen Strömungs- und Dichteverteilung dargestellt. Die Vielfalt der zu messenden Parameter im Innern des Sees wie Temperatur, Leitfähigkeit, Druck, Gehalt an gelöstem und suspendiertem Material; an seiner Oberfläche wie Strahlung, Niederschlag und Verdunstung; am Ufer und am Seeboden wie Zu- und Abflüsse, geothermischer Wärmefluss und über dem See wie Wind und Luftdruckschwankungen, erfordern den Einsatz einer entsprechenden Anzahl von Instrumenten. An ihre Genauigkeit, Zuverlässigkeit und nicht zuletzt an ihre Robustheit müssen hohe Anforderungen gestellt werden.

Erst der in den letzten Jahren sprunghafte Fortschritt in der Entwicklung elektronischer Schaltelemente ermöglichte den Bau entsprechend qualifizierter Geräte. Allerdings beschränkte man zunächst die kommerzielle Fertigung auf die Anforderungen in der Meeresforschung, da hier ein grösserer Absatz zu erwarten war. Die geringen Strömungswerte in Seen (daher «stehende Gewässer») bedeuteten schon seit langem eine Herausforderung an die Seenforscher zur Entwicklung entsprechender Messgeräte; es soll hier nicht vergessen werden, dass bereits in den sechziger Jahren P. Nydegger zur Untersuchung bodennaher Strömungen ein Gerät einsetzte, mit dem Geschwindigkeiten unter 1 cm/s gemessen werden konnten. Für grösser angelegte Untersuchungen war dieses nach dem Pendelprinzip konzipierte Instrument nicht brauchbar, deshalb wurde auch an der VAW ein eigener Seeströmungsmessgerät entwickelt, der auf die Registrierung geringer Strömungsgeschwindigkeiten ausgelegt wurde (Bild 4). Dieses Gerät kann an einer festen Position in einer bestimmten Tiefe (bis zu mehreren hundert Metern) verankert werden, um sowohl die Wasserversetzung in der Horizontalen als auch in der Vertikalen zu messen. Die digitale Aufzeichnung der Strömungsgeschwindigkeit auf eine Magnetbandkassette erfolgt durch Umsetzung der Umdrehungszahl eines speziell geformten Rotors in elektrische Impulse, jeweils integriert über ein vorgegebenes Messintervall, das zwischen 1 Minute und 1 Stunde wählbar ist. Die Strömungsrichtung wird aus der Stellung der Stromfahne («Seitenruder») bezüglich eines im Gerät befindlichen Kompasses bestimmt.

Erst seit kurzem wird versucht, die Strömungen nicht mehr mit Hilfe mechanischer Sensoren (Rotoren), sondern unter Ausnutzung der Frequenzänderung des Ultraschalls in bewegten Medien (Doppler-Effekt) zu messen. Bild 5 zeigt den Messkopf eines «akustischen» Strömungsmessers, der alle drei Strömungskomponenten – bezogen auf ein kartesisches Koordinatensystem – bis in den Bereich von mm/s messen kann. Durch Testmessungen mit diesem Gerät sowie Laborversuchen mit einer ähnlichen Sonde sollen seitens der VAW die Voraussetzungen geschaffen werden, einer neuen Seeströmungsmessergeneration den Weg zu ebnen.

Das Strömungsfeld (Bild 3) in seiner räumlichen und zeitlichen Schwankung ist unmittelbar mit dem Dichtefeld gekoppelt. Vor allem die Wassertemperatur beeinflusst die Dichte des Seewassers. Die Konzentration gelöster und schwebender Substanzen – gemessen über die elektrische Leitfähigkeit und die Trübung – spielt im allgemeinen eine untergeordnete Rolle. Vier Methoden zur Dichtemessung gelangen zur Anwendung:



1. isolierte Einzelmessungen
2. vertikal kontinuierliche Registrierungen
3. Dauermessungen an einer festen Position
4. eine Kombination von 2. und 3.

Die erste und «klassische» Methode bedeutet die Entnahme von Wasserproben mit Hilfe spezieller Wasserschöpfer. Sie wird heute noch zur Ergänzung und zur Eichung der mit Hilfe elektrischer Sonden gewonnenen Daten angewendet. Diese Sonden registrieren über ein Kabel mit Innenleiter beim Herablassen vom Schiff den in der jeweiligen Tiefe herrschenden Druck, die Temperatur, die Leitfähigkeit sowie nach Bedarf weitere physikalische und chemische Parameter wie Schallgeschwindigkeit, Lichtschwächung (Attenuation oder Trübung), den Sauerstoffgehalt und den pH-Wert. Erst durch die kontinuierliche Messung wird die Struktur der gesamten Wassersäule erfasst, wie die Einschichtung von anderen Wasserkörpern (z. B. eine sich ausbreitende Abwasserfahne) oder Zonen starker Vermischung.

Eine Kombination beider oben angeführten Instrumente ist mobil einsetzbar, entweder als Sonde, die an einem Kabel gefiert oder gehievt werden kann oder als freifallende Sonde, die selbstregistrierend abtaucht und nach Erreichen einer vorgegebenen Tiefe wieder aufschwimmt. Als Kompromiss beider Messverfahren hat die VAW zurzeit die in Bild 6 dargestellte Versuchsanordnung verwendet, bei der an einem fest verankerten Seil, unabhängig von störenden Schiffs- und Wellenbewegungen, Vertikalprofile der Temperatur und Strömung im Luganersee aufgenommen werden konnten (vergleiche auch Abschnitt 4).

Zur Erfassung von Schichtung und Strömung werden die Messgeräte ortsfest verankert. Dabei gelangen zwei Systeme zur Anwendung, einmal die sogenannte «U»-Verankerung (Bild 7) für geringe Wassertiefen, zum anderen die «I»-Verankerung (Bild 8), die sich für grössere Wassertiefen und sehr unregelmässige Bodentopographie anbietet. Strömungs- und Temperaturmessgeräte sind innerhalb der Messketten, die durch Auftriebsselemente unter Wasser senkrecht gehalten werden, über die Tiefe verteilt. Während die «U»-Verankerung mit Hilfe einer Grundleine ausgelegt bzw. wieder aufgenommen werden kann, wird die «I»-Verankerung «frei»-fallend gesetzt, den Sinkvorgang und den Aufprall des Grundgewichtes bremst ein Fallschirm. Die Aufnahme erfolgt über einen Auslösemechanismus, der durch ein akustisches Signal zu beliebiger Zeit angesteuert werden kann. Dabei wird das Messsystem vom Grundgewicht getrennt, die Auftriebskörper bringen alle Messgeräte wieder an die Seeoberfläche und die eingesetzten Geräte lassen sich einfach und zeitsparend bergen. Neben dieser Art, die Wasserbewegung an einem festen Ort im See zu messen, findet die direkte Verfolgung der Bewegungsbahnen sowohl an der Seeoberfläche als auch in der Tiefe mit Hilfe spezieller Schwimmkörper (Stromkreuze) eine häufige Anwendung. Diese zweite Methode verlangt jedoch das ständige Einmessen der driftenden Objekte vom Ufer oder vom Schiff aus und ist damit aufwendig und nur eine begrenzte Zeit durchführbar.

SYMBOLS

- Schäkel
- Ring
- ∞ Drehwirbel
- △ Geräteanschluss

VERANKERUNG NR. 7904

Auslegeort : Lago di Lugano 1979
Wassertiefe : 230 m
Position : 719.000 / 94.200

	Datum	Uhrzeit
Auslegung	05.07.79	19.36
Aufnahme	23.08.79	12.07

Bild 8. «I»-Verankerung (Beispiel).



Bild 9. Einwässerung meteorologischer Bojen. Bojenlänge ü. a.: 12 m, Gewicht: 1,2 t.

3. Messprogramme

Nachdem die finanziellen und instrumentellen Grundlagen geschaffen waren, konnte die VAW im September 1977 mit ihren physikalisch-limnologischen Arbeiten beginnen. Die ersten kleinräumigen Untersuchungen beschränkten sich auf das Mündungsgebiet des Alten Rheins (September 1977), auf den unteren Teil des Zürichsees vor Zürich sowie auf den Bereich einer Trinkwasserfassung vor Neuenburg. Sie dienten zum einen der Erprobung der Verankerungstechnik mit kleinen Booten bzw. Arbeitsplattformen sowie der Funktionsprüfung des eingesetzten Instrumentariums. Zum anderen sollten die Messungen Fragen, die

bezüglich vorzunehmender wasserbaulicher Massnahmen in den genannten Testgebieten im Bodensee und Neuenburgersee aufgeworfen wurden, beantworten helfen. Dabei stand das Problem der Ausbreitung von Abwasser bzw. durch eine Uferschüttung getriebenen Seewasser im Zusammenhang mit den windbedingten Seeströmungen im Vordergrund.

Das erste grossräumig angelegte Forschungsvorhaben in einem Schweizer See begann am 2. August 1978 mit der Auslegung von 12 Messketten und der Verankerung von drei schwimmenden meteorologischen Messstationen im Zürich-Untersee (Bilder 9 und 10). Bis zum 29. September registrierten über 40 Instrumente alle 10 Minuten Strömungen und Wassertemperatur in Wassertiefen zwischen 4 und 131 m, sowie die meteorologischen Parameter Windgeschwindigkeit und -richtung, Lufttemperatur und -druck sowie die Strahlung in drei Niveaus (bis zu 6 m) über der Seeoberfläche. In intensiver Zusammenarbeit mit der Wasserversorgung Zürich konnten umfangreiche Schichtungsmessungen (rund 1600 Vertikalprofile von Temperatur, Leitfähigkeit, Sauerstoff und dem pH-Wert) vorgenommen werden, die ihren Höhepunkt in einem zweimal durchgeführten über je 60 Stunden laufenden synoptischen Programm fanden. Pegelaufzeichnungen sowie die Daten der grossräumigen Wetterlage – freundlicherweise von der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt zur Verfügung gestellt – ergänzen das Messmaterial. Neben der systematischen Erfassung des Strömungs- und Massenfeldes als auch der meteorologischen Situation ergaben Versuche mit einem fluoreszierenden Farbstoff (Tracer), der in etwa 10 m Tiefe, also im Bereich des grössten Temperaturgradienten (vergl. Bild 2), injiziert wurde, erste Anhaltspunkte über Diffusionsvorgänge in der sommerlichen Sprungschicht. Diese Arbeiten führte das Geographische Institut der Universität Bern mit einem in-situ-Fluoreszenzphotometer durch. Während das Unternehmen im Zürichsee mit Rücksicht auf die Fischerei auf zwei Monate beschränkt bleiben musste, konnte sich die VAW an einem Langzeitprojekt der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) im Baldeggersee beteiligen. In den Monaten November bis März, d. h. im Zeitraum der Abkühlung und späteren völligen Durchmischung (Homothermie), konnten die Untersuchungen der in der Einführung erwähnten Einzelphänomene mit einem Teil der Geräte fortgesetzt werden. Mit einer ähnlich wie im Zürichsee angelegten Kampagne im nordöstlichen Teil des Luganersees (Bild 11), die in Zusammenarbeit mit dem Istituto Cantonale Tecnico-Sperimentale im Juli und August 1979 durchgeführt wurde, fand die Messphase im physikalisch-limnologischen Untersuchungsprogramm einen ersten Abschluss.

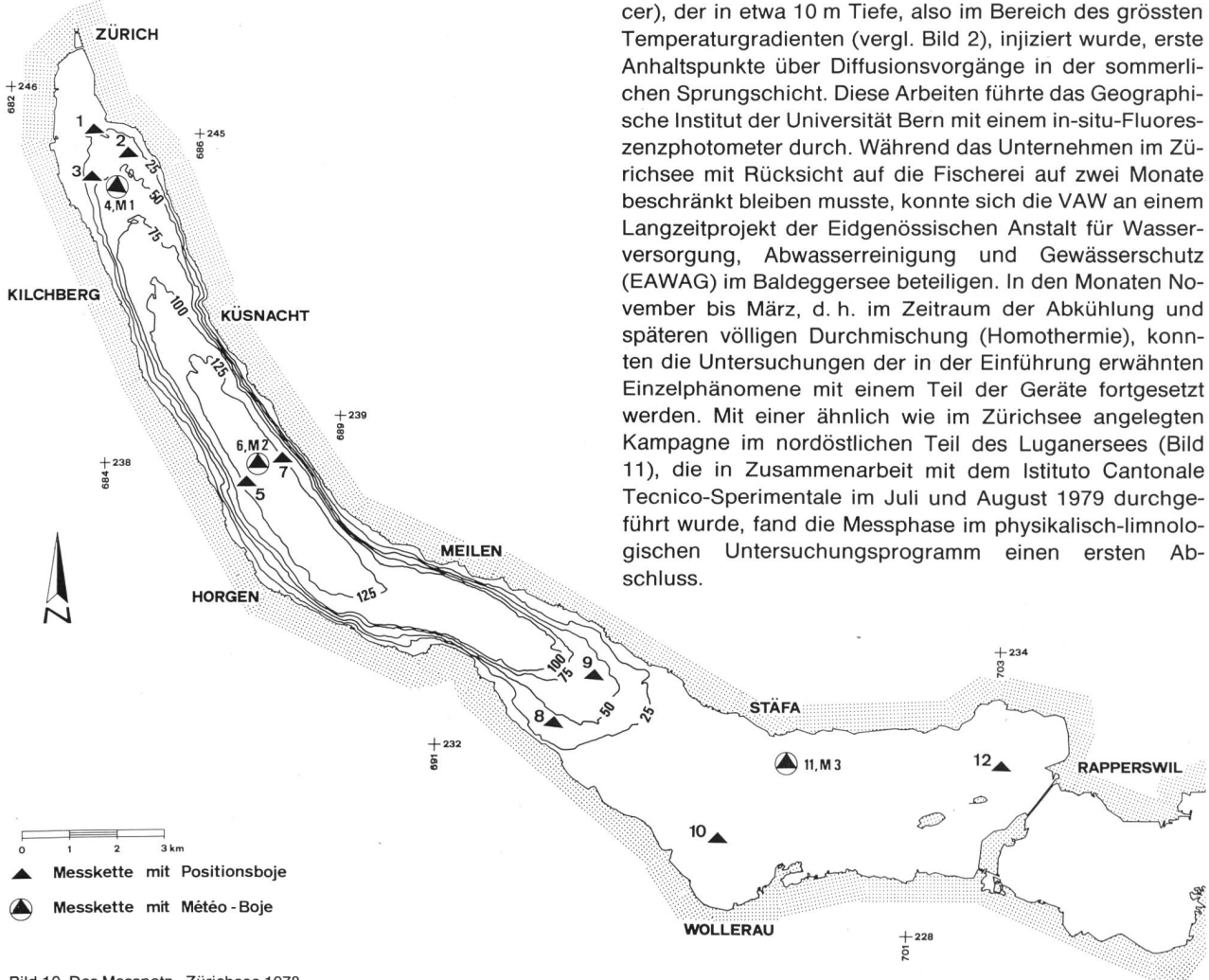


Bild 10. Das Messnetz «Zürichsee 1978».

4. Messergebnisse

Die heute vorliegende Datenmenge erlaubt zunächst Aussagen über die räumliche und zeitliche Veränderung von Schichten und Strömung. Eine kleine Auswahl aus dem ausgewerteten Material soll dies verdeutlichen: In Bild 13 ist die horizontale und vertikale Temperaturverteilung in Form eines Schnitts dargestellt, die entlang des Talwegs von Zürich (Station L1) bis vor Rapperswil (vergleiche auch Bild 10) am 15. September 1978 aufgenommen wurde. Dem räumlich inhomogenen Epilimnion mit einer warmen, oberflächennahen Schicht, die sich aufgrund des Tagesganges der Einstrahlung ausgebildet hat, schliesst sich in 10 m Tiefe etwa eine 10 m mächtige, ausgeprägte Temperatursprungschicht an. Die Abnahme der Temperatur mit der Tiefe beträgt je nach Position und Tiefe zwischen $5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ und $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Der nicht horizontale Verlauf der Isothermen bedeutet eine inhomogene Massenverteilung und damit ein variables Strömungsfeld. Etwa unterhalb von 25 m wäre vom Hypolimnion zu sprechen, einem Gebiet nahezu konstanter Temperatur. Da ein Schnitt wie in Bild 12 keine «Momentaufnahme» der Temperaturverteilung geben kann – die mit dem Schiff eingenommenen Messpositionen liegen ja zeitlich auseinander –, dient er im wesentlichen zur Beschreibung einer mittleren räumlichen Situation. Gleichwohl konnte im Bereich der Stationen L 10 und L 11 ein aus grösseren Tiefen stammender Wasserkörper mit Temperaturen unter 5°C erfasst werden. Demgegenüber liefern die ortsfest verankerten Thermistorkabel ein detailliertes Bild vertikaler und zeitlicher Veränderlichkeit; die horizontale Auflösung des Temperaturfeldes ist wegen der zwangsläufig beschränkten Anzahl von ausgelegten Messketten wesentlich geringer. Das Beispiel einer 55 Tage langen Temperaturregistrierung in 13 äquidistanten Tiefenstufen zwischen 6 und 30 m auf einer Wassertiefe von 60 m zeigt Bild 13. Die dargestellten Zeitreihen geben die Temperaturschwankungen auf der Verankerungsposition 4 (siehe Bild 10) wieder. Die horizontalen Bezugslinien entsprechen dem Mittelwert \bar{T} der Zeitreihe, so dass die Fluktuationen um diesen Mittelwert direkt entnommen werden können.

Für den betrachteten Messzeitraum sind Überlagerungen von hoch- und niederfrequenten Schwingungsanteilen erkennbar, deren Deutung und Charakterisierung erst durch weitere Analysen möglich ist. Markante Temperatursprünge greifen bis in die unteren Schichten des Hypolimnions durch; sie sind insbesondere für den 12./13.9.1978 die Folge eines kräftigen Föhnsturmes, der die Wasser-

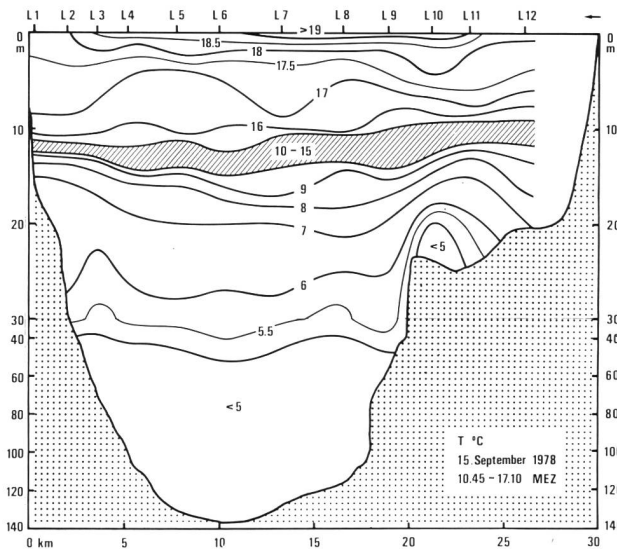
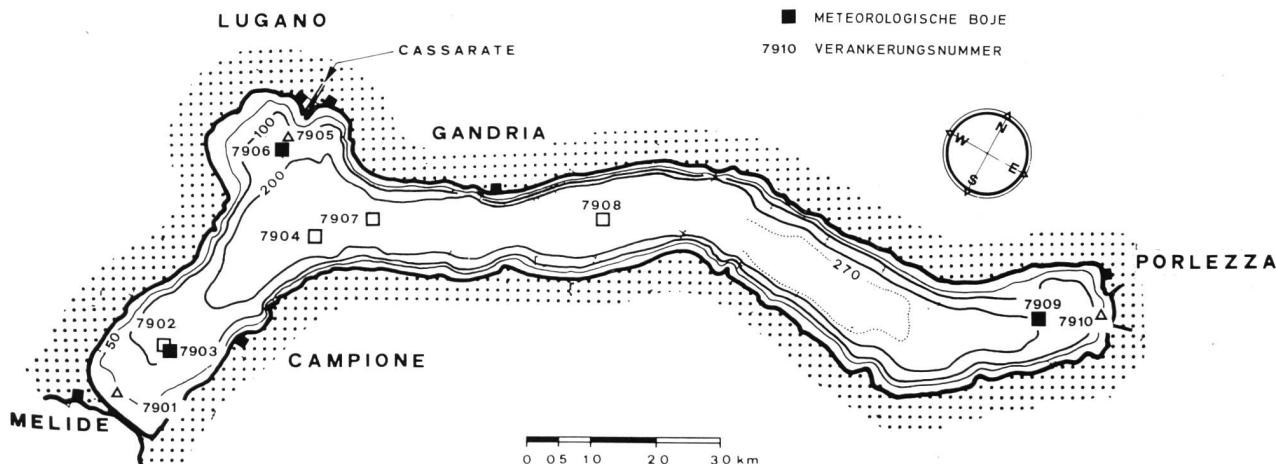


Bild 12. Temperaturlängsschnitt Zürich-Rapperswil; L1 bis L12: Stationsnummern (Skalensprung in 30 m Tiefe).

massen des Zürichsees in starke Bewegung versetzte. Dies belegt auch ein Ausschnitt aus den Strömungsregistrierungen von der Messposition 8 (Bild 15) für dieses Datum. In der Darstellung sind die Strömungen in den Mess-tiefen 7 bzw. 31 m in ihre Nord-Süd, sowie ihre Ost-West Anteile zerlegt worden. Abgesehen von den hohen Strömungswerten im Epilimnion gegenüber denen im Hypolimnion zeigen sich besonders am 14./ 15.9.1978 gegenläufige Bewegungen in den beiden durch die Sprungschicht getrennten Wasserkörpern, deren «Periode» in der Grössenordnung von 45 Stunden liegt. Folgt man den eingangs angeführten Zielsetzungen für die physikalisch-limnologischen Untersuchungen, ist dieses Messbeispiel eine gute Grundlage, die Reaktion eines Sees auf den Einfluss der meteorologischen Kräfte zu studieren. Weiterhin führt die Strömungsregistrierung in 31 m Tiefe auf das bereits erwähnte Problem der Registrierung geringer Geschwindigkeiten zurück. Über einen Tag lang gibt es aus der Strömungsmessung keine Information über Bewegungsvorgänge im Hypolimnion. Nur über den gleichzeitig erfassten Temperaturverlauf sind gewisse Aussagen darüber möglich.

Wie bereits angedeutet, ist bei der Untersuchung physikalischer Prozesse im See eine Analyse der zeitlichen Variabilität eher möglich: bei vorgegebenem Messintervall von

Bild 11. Das Messnetz «Luganersee 1979».



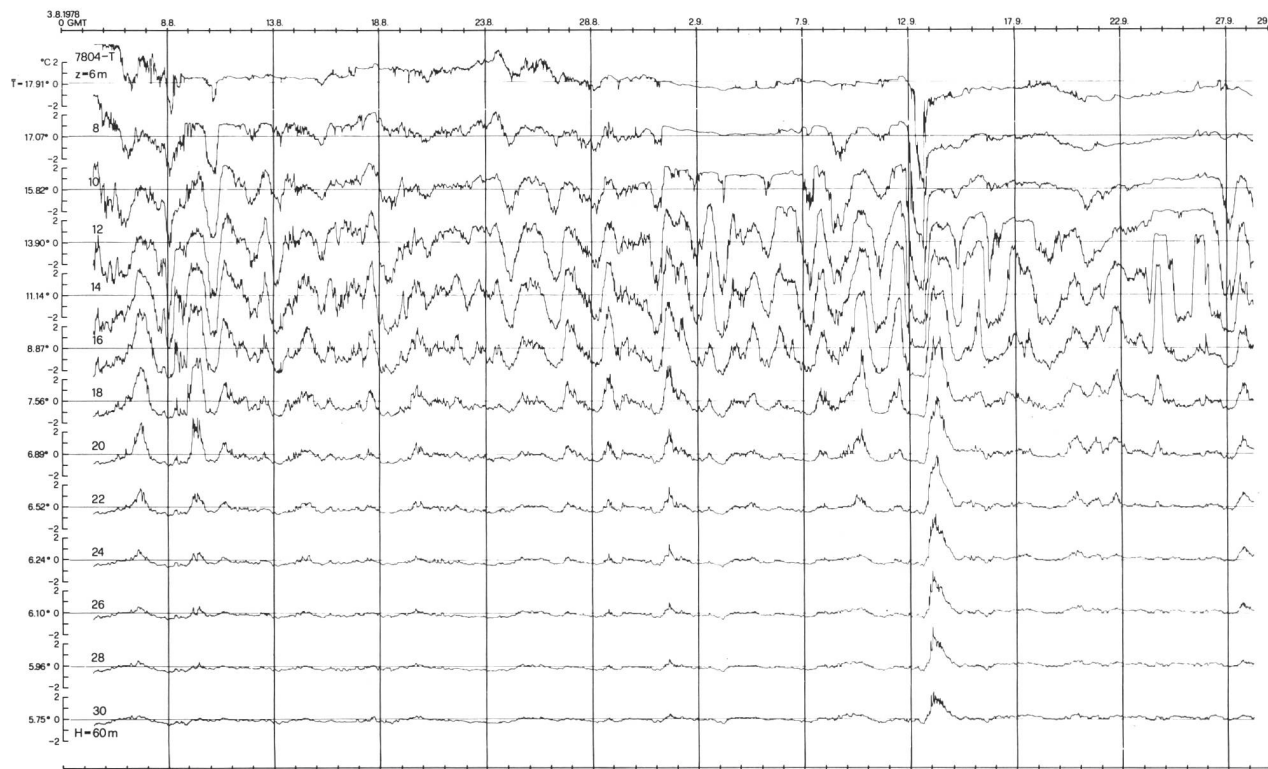
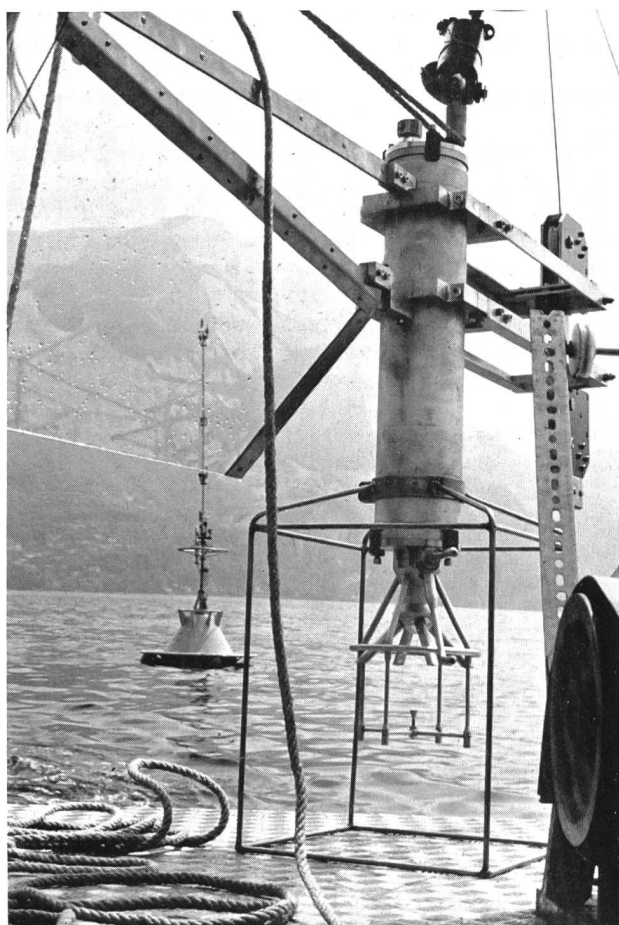


Bild 13. Zeitreihen der Temperatur zwischen 6 und 30 m Tiefe, Messposition 4 im Zürichsee.

Bild 15. Einsatz des akustischen Strömungsmessers, im Hintergrund eine Meteo-Boje.



10 min und einem Messzeitraum von 2 Monaten ist prinzipiell jeder zeitlich ablaufende Vorgang mit Perioden zwischen 20 min und 1 Monat erfassbar. Der Analyse der räumlichen Veränderlichkeit sind Grenzen gesetzt: einmal durch die meist beschränkte Anzahl von verankerten Geräten sowie durch die Verankerungstechnik selbst. Ausserdem ist jedes Instrument bzw. jede Messkette ein Fremdkörper im zu untersuchenden Medium und können deshalb nicht beliebig direkt eingesetzt werden. Um wenigstens in der Vertikalen ein möglichst vollständiges Bild über Schichtung und Strömung zu erhalten, wurde von der VAW 1979 im Luganersee – wie erwähnt – eine Strömungs- und Temperaturprofilsonde eingesetzt (Bild 15, Details: Bild 5). Während des Absenkens konnten etwa alle 30 cm die Temperatur und die horizontalen Strömungskomponenten gemessen werden. Die registrierte vertikale Komponente entspricht der Sinkgeschwindigkeit, die in Kombination mit der vom Echolot georteten Sondentiefe die jeweilige Messtiefe ergibt. Daher rührt die nichtlineare Tiefenskala in Bild 16, das die gemessenen Profile zeigt. Wie schon im Zeitbereich ist auch in der Vertikalen die Strömung in Betrag und Richtung stark variabel, besonders im Bereich der Temperatursprungschicht. Die mit diesem Gerät erfassten Parameter erlauben es nun direkt, das Verhältnis der Energieübertragung aus der Schichtung in die Strömung und umgekehrt zu bestimmen. Dies ist gleichbedeutend mit der Messung der sogenannten Richardson Zahl, des vielleicht wichtigsten dimensionslosen Parameters der physikalischen Limnologie, stellt sie doch ein Mass für die Turbulenz innerhalb der Wassersäule dar.

5. Analytische und numerische Modelle

Die Erfassung der physikalischen Vorgänge in Seen ist nicht nur auf direkte Messungen beschränkt. Diese bilden zurzeit nur einen der Schwerpunkte der physikalisch-limnologischen Arbeiten, sind aber Voraussetzung für einen Einblick in die komplizierten Mechanismen der Energie- und Stofftransporte in «stehenden Gewässern». Ebenso

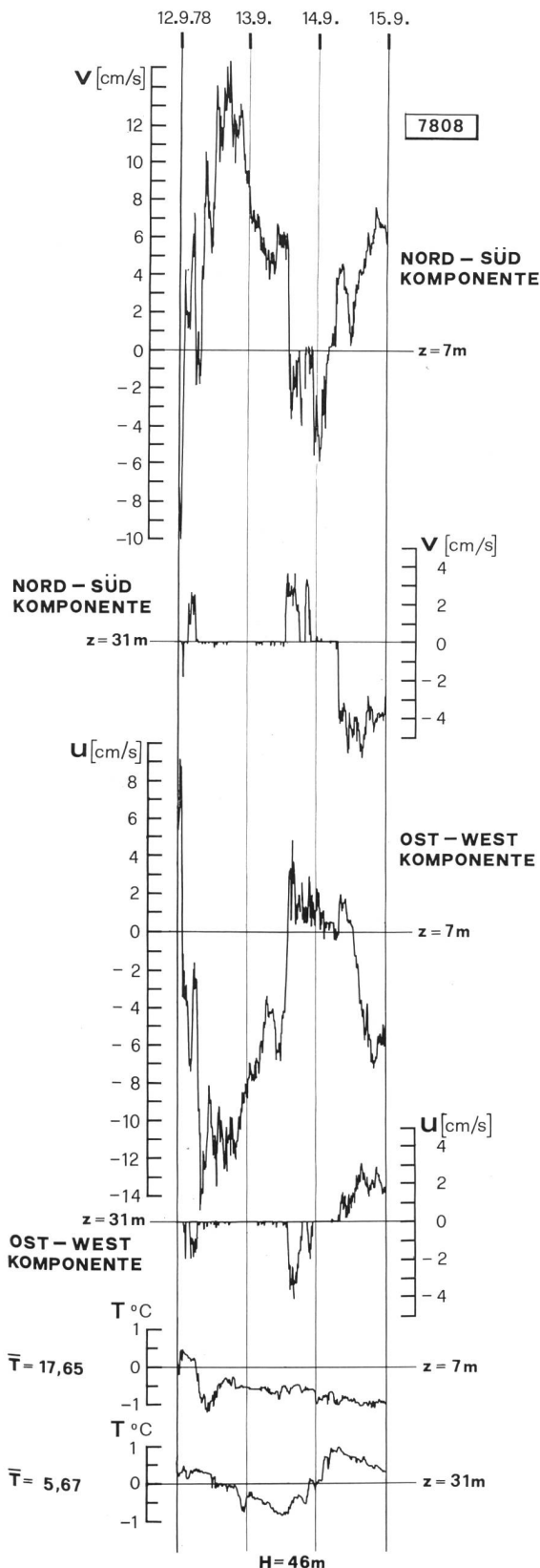


Bild 14. Ausschnitt aus den Strömungs- und Temperaturregistrierungen der Messposition 8 im Zürichsee.

bedeutend ist ihre mathematische Beschreibung mit Hilfe der hydrodynamischen Grundgleichungen. Ihre Lösungen erhält man vorwiegend durch numerische Modellrechnungen. Dabei werden je nach untersuchtem Prozess die unterschiedlichsten Verfahren der angewandten Mathematik gebraucht, die damit zur wichtigsten Hilfswissenschaft in der physikalischen Limnologie wurde. Die nur angedeu-

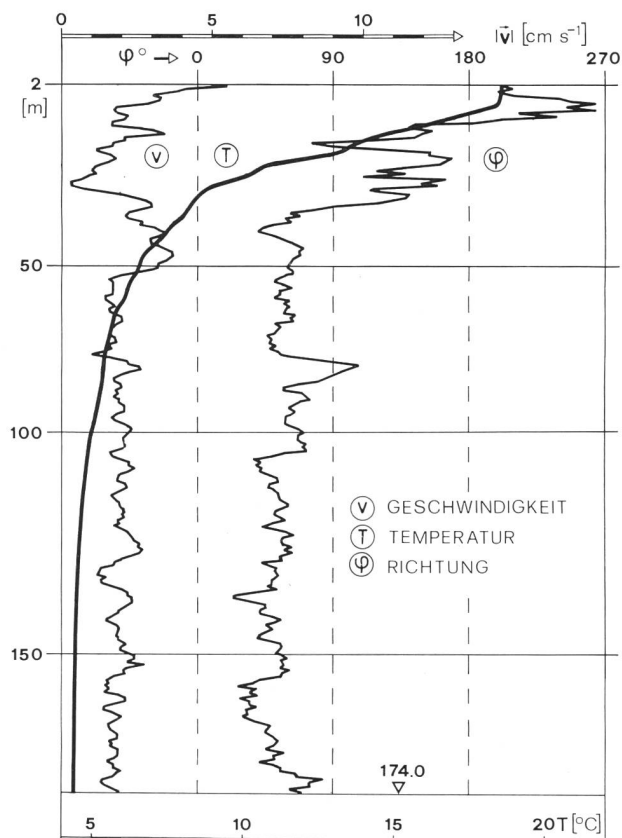


Bild 16. Beispiel eines vertikalen Strömungs- und Temperaturprofils, gemessen mit der Ultraschallsonde an der Messposition 6 im Luganer See.

tete Analyse des Beobachtungsmaterials ergab (vergleiche Bilder 13 und 14) ein Beispiel der Reaktion des Sees auf ein spezielles Windfeld. Auch weitere Beschreibungen können hier nicht zu einer quantitativen Interpretation führen, die für eine befriedigende Erklärung der an der Dynamik beteiligten Prozesse notwendig wäre. Aus diesem Grund geht man auf theoretische Methoden zurück, die – wie bereits erwähnt – eine Vorhersage der hydrodynamischen Parameter wie Strömung und Schichtung in Abhängigkeit treibender Kräfte (z. B. Wind) und der sogenannten Rand- und Anfangsbedingungen (z. B. Seetopographie bzw. Einsetzen eines bestimmten meteorologischen Ereignisses) ermöglichen. Mit diesem Vorgehen können die sich überlagernden Einflüsse voneinander getrennt und quantitativ auf die Messungen bezogen werden.

Folgendes Beispiel sei dazu angeführt:

Eine der komplizierten hydrodynamischen Erscheinungen, die theoretisch formuliert und dann modelliert werden konnten, sind die durch Wind- und Luftdruckschwankungen angeregten Eigenschwingungen eines nahezu oder vollständig abgeschlossenen Seebeckens. Dieses nach dem Volksmund als «Seiches» (von sec = trocken) benannte Steigen und Fallen des Genfersees war anfangs der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts von F.-A. Forel studiert worden. An zahllosen anderen Seen wurde ähnliches beobachtet, und es gelang dem Schotten G. Chrystal (1906) eine Theorie aufzustellen, die den Vorgang mathematisch zumindest grundsätzlich beschreibt.

Die zeitlichen Schwankungen der Seiches verlaufen zwar stets sinusförmig, jedoch werden die räumliche Verteilung der Schwingungsamplituden und der Schwingungsperioden selbst durch Form und Grösse des Sees bestimmt. Seiches treten einmal als Oberflächenwellen, d. h. mit maximaler Amplitude an der Seeoberfläche (sichtbar in den Registrierungen der Limnigraphen), zum anderen als in-

terne Wellen auf, die ihre grösste Amplitude im Innern des Sees aufweisen. Interne Wellen sind allerdings nur in geschichteten Wassermassen, also für den Zürichsee etwa von April bis Dezember möglich. Ähnlich wie die Gezeiten im Meer spielen die Seiches eine wichtige Rolle für den Test eines Modells, denn sie sind als wohldefinierte Schwingung ein gutes Eichsignal. Ein Teil des Datenmaterials aus Zürichsee und Luganersee wird jetzt dazu verwendet, schon vorhandene bzw. neu entwickelte Seichesmodelle für diese Seen zu erarbeiten.

Die Eigenschwingungen eines Sees zu erfassen ist verhältnismässig einfach, wenn man z. B. die Simulation der dreidimensionalen Variabilität von Strömung und Temperatur aufgrund langanhaltender oder kurzfristig einsetzender Stürme betrachtet. Diese Ereignisse prägen die Prozesse im See und haben damit eine übergeordnete Bedeutung in der Beantwortung der in der Einführung gestellten Fragen. Bei der Modellierung stösst man sehr schnell auf das Problem, wie weit man den Grad der Vollständigkeit sinnvoll erhöht, um beobachtete Verhältnisse zu reproduzieren. Gleichzeitig muss auch berücksichtigt werden, dass die in einem Modell erwünschte Vorhersage ebenso treffsicher wird wie die mit Hilfe der Messungen erfolgte «Nachhersage». Diese Problematik ist aus der numerischen Wettervorhersage hinreichend bekannt.

Trotz der angeführten Schwierigkeiten erbringen nur eine Weiter- und Neuentwicklung der mathematisch-numerischen Modelle auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen die Voraussetzungen sowohl für eine weitere systematische Forschungsarbeit in den Seen als auch für wasserbauliche und gewässerschützende Massnahmen.

Literaturhinweise

- F.-A. Forel: Le Léman, Monographie Limnologique. Lausanne, 1892.
 G. Chrystal: On the hydrodynamical theory of seiches. «Trans. Roy. Soc.» Edinburgh, 41, 1906.
 P. Nydegger: Vergleichende Untersuchungen an sieben Schweizer Seen. «Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie» Nr. 9, 1957.
 D. Vischer: Zirkulationsströmungen in Seen und ihre messtechnische Erfassung. «Schweiz. Techn. Zeitschrift», Nr. 5/6, 10. Februar 1977.
 W.H. Graf und C.H. Mortimer (Herausgeber): Hydrodynamic of Lakes, Proceedings of a Symposium 12-13 Oct. 1978 in Lausanne. In: Developments in Water Science, 11, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, 1979.

Adresse des Verfassers:

Wilfried Horn, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidg. Technischen Hochschule Zürich, 8092 Zürich.

Bild 1. Jahresgänge (Monatsmittel) der Abflüsse aus den Einzugsgebieten der Massa (195 km², 1446 bis 4195 m ü.M., 66,6% vergletschert), des Dischmabaches (43 km², 1668 bis 3146 m ü.M., 2,6% vergletschert), des Rietholzbaches (3,2 km², 680 bis 950 m ü.M.) und des Rheins (34 550 km², 262 bis 3402 m ü.M., 1,6% vergletschert) für das Trockenjahr 1976.

Wasserhaushalt und Wärmehaushalt

Herbert Lang und Bruno Schädler

Zusammenfassung

Wasserhaushalt und Abfluss werden massgebend durch den Wärmehaushalt an der Erdoberfläche gesteuert. Die genauere Kenntnis der einzelnen Komponenten des Wärmeumsatzes ist eine Voraussetzung zum Verständnis der Verdunstungs- und Abschmelzungs Vorgänge und damit ein wichtiger Schlüssel zur richtigen Erfassung des Wasserhaushaltes, der Abflussprozesse und ihrer Beziehungen zum Klima. Bei hydrologischen Grundlagenuntersuchungen in voralpinen und hochalpinen Gebieten werden deshalb neben den Messungen von Niederschlag, Schmelzen und Abfluss gleichzeitig Wärmebilanzstudien durchgeführt. Die gewonnenen Resultate dienen auch der Praxis, wie zum Beispiel der besseren Abschätzung und Vorhersage von Wasservorkommen und Abflüssen.

Résumé: Le bilan hydrique et le bilan énergétique

Le bilan hydrique et l'écoulement sont régis principalement par le bilan énergétique à la surface de la terre. Une meilleure connaissance des différents termes du bilan énergétique est essentielle pour la compréhension des processus d'évaporation et de fusion, et par conséquent d'une importance considérable pour la compréhension du bilan hydrique, des processus d'écoulement et de leur relation avec le climat. Dans le cadre de recherches fondamentales portant sur l'hydrologie des Préalpes et des Alpes, on procède, en plus des mesures de précipitations,

Abfluss in mm

