

# Schichtungs- und Strömungsprobleme in Seen: Teilprogramm eines nationalen Forschungsprogrammes

Autor(en): **Trösch, Jürg**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 40

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75542>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Schichtungs- und Strömungsprobleme in Seen

## Teilprogramm eines nationalen Forschungsprogrammes

Von Jürg Trösch, Zürich

**Dringende Probleme des Grundwasserhaushaltes und der Seephysik rasch und praxisnah zu lösen war die Aufgabe des nationalen Forschungsprogrammes «Grundlegende Probleme des schweizerischen Wasserhaushaltes» des schweizerischen Nationalfonds. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit dem Teilprogramm «Schichtungs- und Strömungsprobleme in Seen», das sich aus sechs kohärenten Einzelprojekten zusammensetzt. Das Ziel war es, die Strömungs- und Mischvorgänge in Seen experimentell und numerisch zu erfassen und ihren Einfluss auf den biochemischen Seezustand aufzuzeigen.**

**Die aus den Messungen physikalischer und chemischer Parameter gewonnenen neuen Erkenntnisse gelangten bereits während der Projektdauer praktisch zum Einsatz. Die nach Abschluss des Programms vorliegenden Geräte, Arbeitsmethoden und numerischen Modelle werden eine wesentliche Grundlage zur Gesunderhaltung unserer Seen sein.**

### Einleitung

Der Bundesrat genehmigte am 2. April 1976 den von einer Expertenkommission erarbeiteten Ausführungsplan des zweiten nationalen Forschungsprogrammes (NFP) «Grundlegende Probleme des schweizerischen Wasserhaushaltes». Wie bei sämtlichen NFP wurde die Durchführung dem *schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung* übertragen. Das Ziel des Programmes war es, in einer gemeinsamen Anstrengung von Hochschulinstituten und weiteren forschungsorientierten Stellen bestehende Wissenslücken zu schliessen und die Ergebnisse für die praktische Anwendung aufzubereiten.

Als Schwerpunkt wählte die Expertenkommission die *zwei Themenkreise*

- Schichtungs- und Strömungsprobleme in Seen
- Grundwasserdargebot; quantitative und qualitative Aspekte.

Mit einem Gesamtkredit von 6 Mio Fr. sollten innerhalb von fünf Jahren die Untersuchungen abgeschlossen sein. Später erfolgte eine Aufstockung des Programmes um zwei weitere Themen:

- Nutzung der natürlichen Wärme von Grundwasservorkommen (2 Mio Fr.)
- Abschätzung der Abflüsse in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessung (0,45 Mio Fr.).

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit den Arbeiten des *Teilprogrammes «Schichtungs- und Strömungsprobleme in Seen»*. Für die anderen Teilprogramme sei auf die entsprechenden Schlussberichte verwiesen. Erschienen sind bis jetzt die Schlussberichte «Grundwasser» [1] und «Seen» [2]; die anderen Teilprogramme sind noch nicht abgeschlossen.

Im Teilprogramm «Seen» sollten gemäss Ausführungsplan die Zirkulation und die internen Mischvorgänge in Abhängigkeit von Topographie und treibenden Kräften untersucht werden. Schwerpunkte des Programmes lagen im experimentellen Erfassen dieser Misch- und Strömungsprozesse und ihrer numerischen Modellierung. Das Ziel war es, den Einfluss der Seephysik auf die für den Seezustand wichtigen biochemischen Vorgänge abzuklären.

Nach Abschluss des Programmes zeigte sich als wichtige neue Erkenntnis, dass die *Strömungsvorgänge* in allen Seetiefen eine weitaus bedeutendere Rolle spielen, als bisher angenommen worden war. Sogar während der sommerlichen Stagnation erreichen stärkere Strömungsereignisse den Seegrund und führen zu Nährstoffverfrachtungen. Diese neuen Erkenntnisse konnten dank der Messgeräte und der zugehörigen Messmethodik zur Erfassung

diverser physikalischer und chemischer Parameter gewonnen werden. Die verschiedenen numerischen Modelle dienten zur Erklärung der gemessenen Vorgänge, aber auch zur Vorhersage der durch verschiedene Sanierungsvarianten beeinflussten Entwicklung des Seezustandes.

Die durchgeführten Projekte sind in Tabelle 1 aufgeführt. Alle Teilnehmer mussten sich zur Zusammenarbeit mit den anderen Gruppen des Teilprogrammes verpflichten. Dadurch ergaben sich innerhalb des Programmes wertvolle interdisziplinäre Kontakte, die auch nach Programmende weitergeführt werden.

### Die Messung der Strömungs- und Mischvorgänge

Messungen aller Art in Seen stellen hohe Anforderungen an die *Genauigkeit der Messinstrumente*, da entweder die Absolutwerte oder die Differenzen verschwindend klein sind. Die Beträge der Strömungen liegen besonders am Seegrund oft unter 1 cm/s. Schon Temperaturdifferenzen von wenigen Hundertstel Grad sind für die Schichtung des Sees und, damit zusammenhängend, für den vertikalen Stofftransport ausschlaggebend. Die Messung der Strömung erfolgte am Anfang ausschliesslich mit mechanischen Messgeräten, ausgerüstet mit Savoniusrotoren (Bild 1). Sie sind im See verankerbar und zeichnen die Messwerte in festgelegten Zeitintervallen auf Magnetband auf. Ihre Ansprechschwelle von 2,5 cm/s liegt allerdings für die schweizerischen Seen oft zu hoch, da die typische Strömungsgeschwindigkeit im Hypo-

Tabelle 1. Projekte des Teilprogrammes «Schichtungs- und Strömungsprobleme in Seen»

Institut	Kurzbezeichnung Projektleiter	Titel des Projektes	Projektdauer (Jahre)
Eidg. Institut für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, 8600 Dübendorf	Eawag D. M. Imboden	Der Einfluss von internen Transportvorgängen auf den trophischen Zustand von Seen	5
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich 8092 Zürich	VAW K. Hutter	Strömungen in stehenden Gewässern, insbesondere Seen	5
Institut für anorganische Chemie, Universität Bern, 3000 Bern 9	P. Schindler	Mischungs- und Strömungsprozesse im Bielersee	5
Istituto cantonale tecnico sperimentale, 6952 Canobbio	ICTS F. Zamboni	Mathematische Modelle zur Simulation der Zirkulation von Wässern und Belastungstoffen in einem See	5
Laboratoire d'Hydraulique, EPFL-Ecublens, 1015 Lausanne	Lhydrep W. H. Graf	Etude hydraulique du Léman: les courants	5
Physikalisches Institut, Universität Bern, 3012 Bern	H. Oeschger	Isotopenstudien im Jurakarst und im Bielersee	4

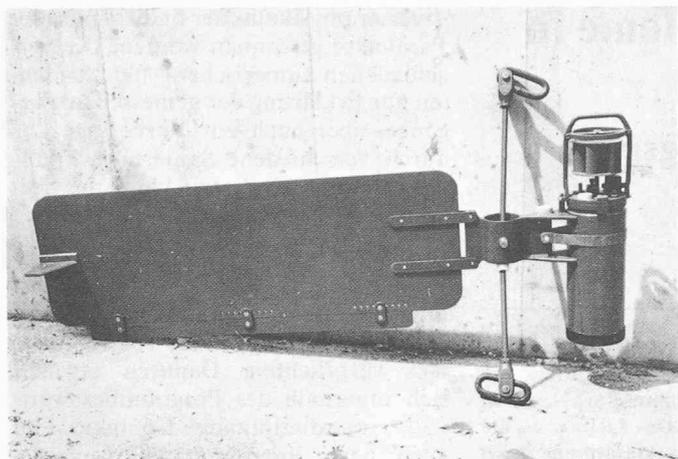


Bild 1. Rotor-Strömungsmesser Typ Aanderaa RCM 4

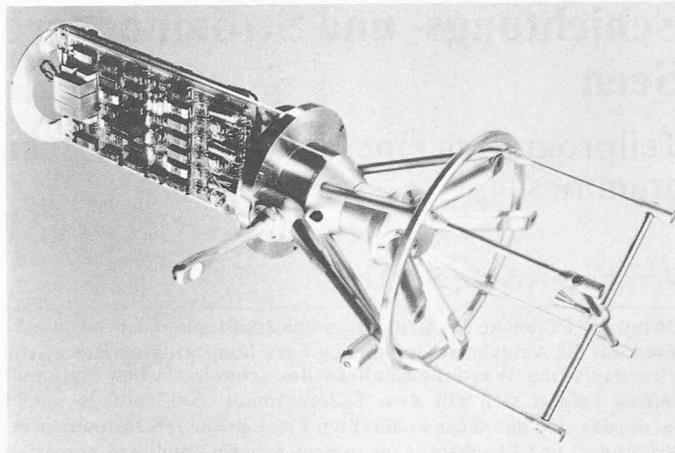


Bild 2. Ultraschall-Strömungsmesser Typ Michelsen

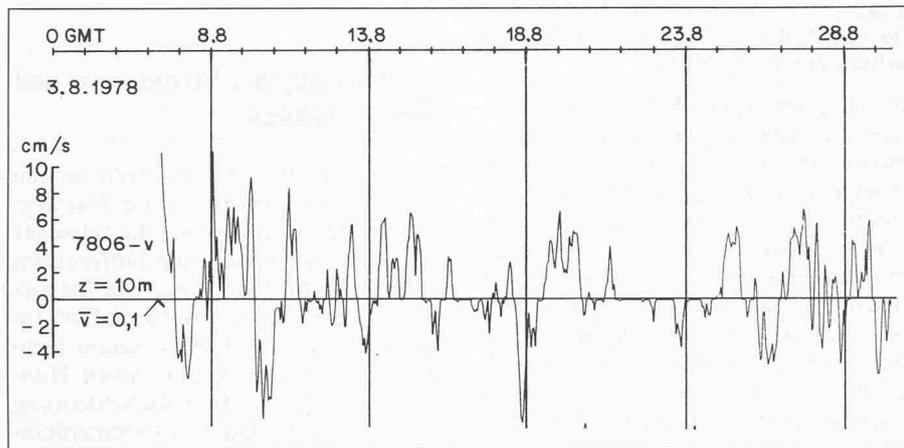


Bild 3. Mit Rotor-Strömungsmesser gemessene Strömung im Zürichsee, Stundenmittel; in 10 m Tiefe in Seemitte vor Thalwil

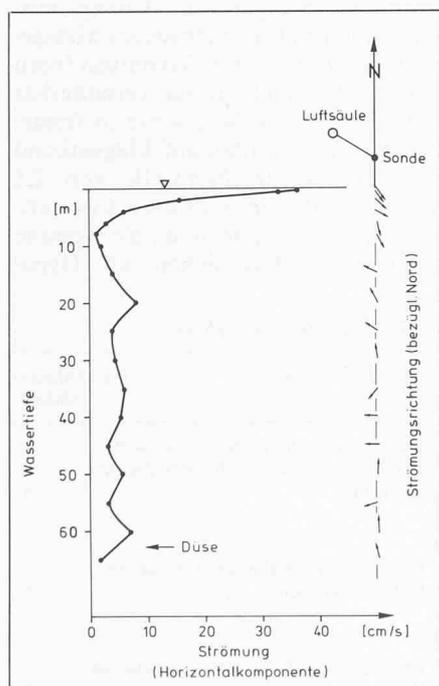


Bild 4. Mit Ultraschall-Strömungsmesser gemessene Horizontalströmungen im Baldeggersee, während Zwangszirkulation durch Einblasen von Luft (aus [4])

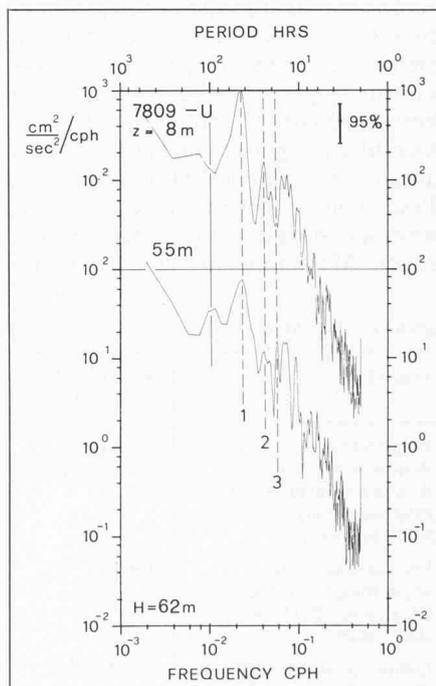


Bild 5. Frequenzanalyse der internen Wellenbewegung im Zürichsee. Eingezeichnet sind die Grundschwingung (1) und die zwei folgenden Oberschwingungen (2, 3)

limnion unter 2 cm/s liegt. Die neue Generation von Strömungsmessern arbeitet daher ohne bewegliche Teile mit Ultraschall und der Verwendung des

Doppler-Effektes (Bild 2). Ihre Ansprechschwelle liegt unter 0,2 cm/s, oft ergeben sich jedoch Schwierigkeiten mit elektronisch bedingten Instabilitä-

ten des Nullpunktes, so dass die absolute Genauigkeit um 0,5 cm/s liegt.

Beispiele einer Rotormessung und einer Ultraschallmessung sind in den Bildern 3 und 4 dargestellt. Deutlich kommt die unterschiedliche Aussagekraft der beiden Messmethoden zum Ausdruck. Das fest verankerte Instrument zeigt eine gute zeitliche Auflösung an einem Punkt im See, starke Wechsel in der Strömung innerhalb weniger Stunden können auftreten. Bei der Profilaufnahme von Hand mit dem Ultraschallströmungsmesser ist wohl die vertikale Auflösung des Strömungsprofils besser, doch können die zeitlichen Schwankungen nur mehr mit grossem Aufwand bestimmt werden. Daher wird oft eine Kombination beider Methoden und Gerätetypen notwendig sein, um ein umfassendes Bild der Strömungsverhältnisse zu erhalten.

Dank der modernen Ultraschall-Strömungsmesser können auch Strömungen in vertikaler Richtung gemessen werden. Dadurch gelang es, die Richtigkeit einer Annahme bei der Seesanie rung nachzuweisen: Im Baldeggersee wird während des Sommers reiner Sauerstoff in der Nähe des Seegrundes zur Beatmung des Tiefenwassers eingeblasen. Die Sauerstoffbläschen steigen auf und sollten im Wasser gelöst sein, bevor sie die warme Oberflächenschicht erreichen, dort eine Strömung hervorrufen und sie damit stören könnten. Mit dem Strömungsmesser wurden die vertikalen Strömungen gemessen: Oberhalb der Austrittsdüsen bewirken die Blasen eine vertikale Strömung von etwa 10 cm/s, die gegen oben abnimmt und vor dem Erreichen des warmen Oberflächenwassers verschwindet. Die sommerliche Schichtung bleibt somit erhalten.

Die Interpretation der gemessenen Strömungs- und Temperaturdaten erweist sich als äusserst schwierig. Die Gründe dafür liegen einmal in den stochastisch auftretenden, räumlich und zeitlich

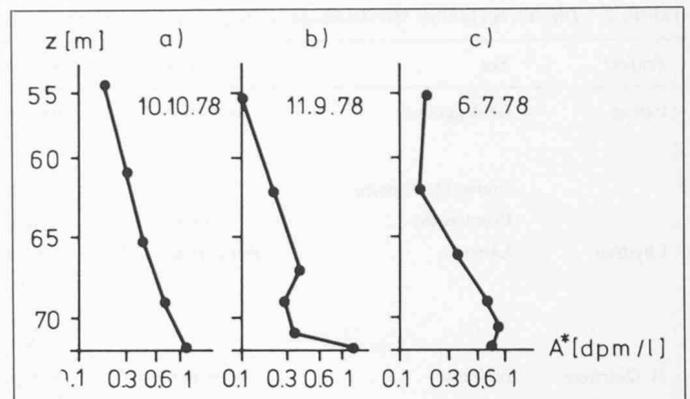
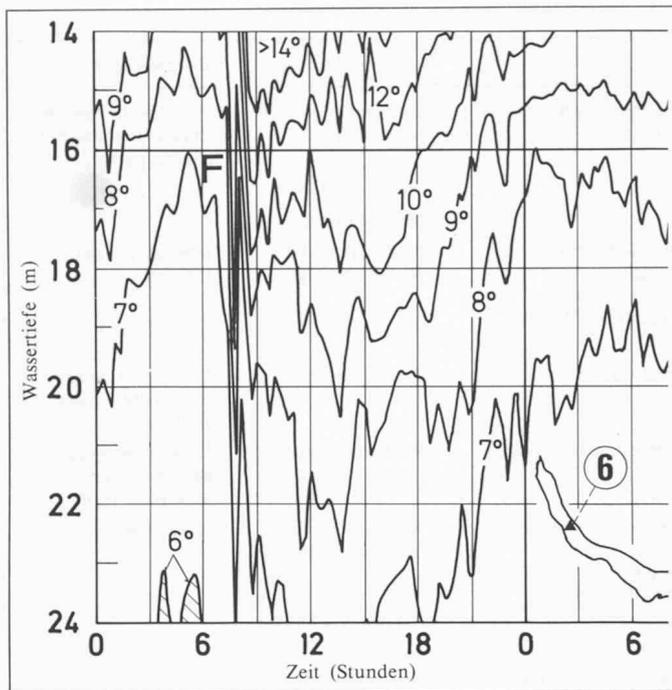


Bild 7 (oben). Gemessene Radon-222-Profile im Bielersee. Vergleich von Profilen ohne (a) und mit (b, c) Strömung in Bodennähe (aus [8])

Bild 6 (links). Bewegung der Isothermenganglinien im Zürichsee nach einem Sturm. Buchstabe F zeigt den Zeitpunkt des Beginns der Sturmauswirkungen

stark varrierenden äusseren Bedingungen, wie Windfeld, Sonneneinstrahlung und Zuflüssen. Dazu gesellt sich die komplizierte Topographie der Seebecken, die zu lokalen Strömungsstrukturen führt. Schliesslich ist die Wasserströmung im See in jedem Falle turbulent; anfänglich grössere Wirbel zerfallen mit der Zeit, unter Abgabe eines Teils ihrer Energie, in immer kleinere Wirbel.

Verschiedene Möglichkeiten der Analyse stehen zur Verfügung. Die periodischen Vorgänge können mittels Frequenzanalyse sichtbar gemacht werden, und die herausragenden Perioden lassen sich oft den Eigenschwingungen des Seebeckens zuordnen (Bild 5). Die Amplitude der Oszillationen der Thermoklinale (Temperatursprungschicht) beträgt dabei mehrere Meter und kann nach Föhnstürmen auch 20 m betragen. In Bild 6 werden solche Eigenschwingungen gezeigt. Solche Bewegungen der Wassermassen sind für die Biologie des Sees von grosser Bedeutung, ebenso wie sie bei Probenahmen in mehrtägigen Intervallen beachtet werden müssen.

Neben diesen periodischen Ereignissen sind auch die längere Zeit andauernden Strömungsvorgänge von Bedeutung, da damit grosse Wassermassen transportiert und Nährstoffe verfrachtet werden. Sie sind daher bei jeder realistischen Untersuchung des Nährstoffhaushaltes als wesentlicher Faktor zu berücksichtigen.

Da die in den Seen vorhandenen Strömungen und vor allem die turbulenten Mischprozesse oft unter der Ansprechschwelle der Strömungsmessgeräte liegen, erfolgt der Nachweis der Seedynamik auch mit indirekten Nachweismethoden.

Dazu gehören alle Arten von Tracerstudien. Im NFP 2 wurde unter anderem Radon-222, ein natürlich vorkommender radioaktiver Tracer, eingesetzt. Damit konnten die Diffusionsprozesse in der Nähe der Seesedimente näher untersucht werden. Auch diese Untersuchungen zeigten deutlich, dass nicht nur eigentliche turbulente Mischung vorherrscht, sondern dass die Strömungen weitaus stärker, als ursprünglich angenommen, den Wasser- und Nährstoffaustausch beeinflussen. Bild 7 zeigt den Vergleich von Radon-222-Profilen mit und ohne Strömung.

Um die treibenden Kräfte der Seephysik zu erfassen und sie mit den gemessenen Strömungsereignissen zu korrelieren, wurden gleichzeitig meteorologische Messstationen, schwimmend und auf Pfählen, betrieben (Bild 8). Gemessen wurden dabei Wind, Temperatur, Luftdruck, Strahlung und Feuchte. Durch die Untersuchung der Phänomene der Grenzschicht Wasser/Luft mit direkten Messungen an der Seeoberfläche konnte der Wissensstand entscheidend verbessert werden. Der Zusammenhang zwischen gemessenem Wind und der Strömung im See konnte jedoch nicht überall einleuchtend erklärt werden. Allzuoft ist das Windfeld von Lokalwinden dominiert, und die Seetopographie leitet die Strömungen in andere Richtungen. Numerische Modelle fördern in solchen Fällen den Einblick in diese Zusammenhänge.

In Tabelle 2 sind die durchgeführten experimentellen Untersuchungen zusammengestellt, um allfälligen Interessenten die Suche nach geeigneten Daten zu erleichtern. Kleinere Kampagnen in verschiedenen Seen sind weggelassen.

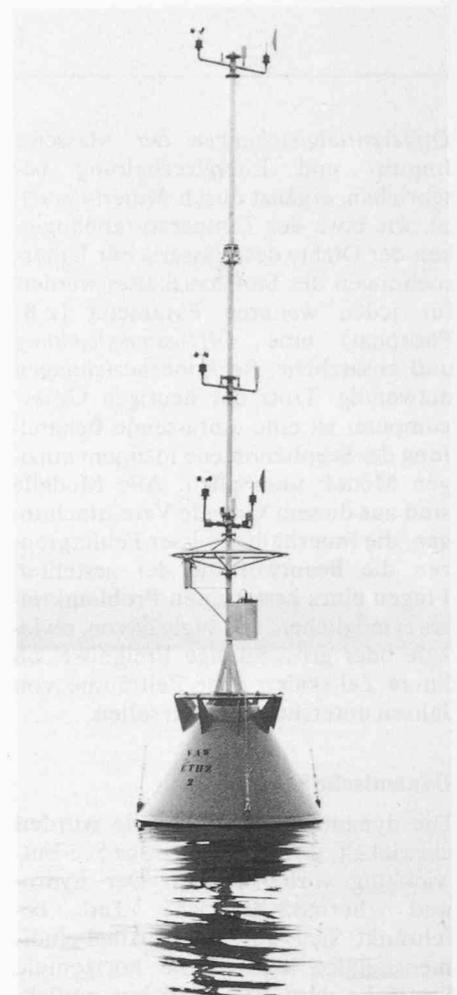


Bild 8. Meteorologische Messstation auf dem Zürichsee

### Numerische Modelle

Die Strömungen und die Thermik in einem See werden durch die bekannten

Tabelle 2. Die durchgeführten Messkampagnen. Ausführliche Literaturhinweise in [2]

Projekt	See	Periode	Parameter	Art der Messung	Bemerkungen
Eawag	Baldeggersee	ab Juni 1977	umfangreiche chemisch-physikalische Messungen	kontinuierlich und Probenahmen	viele Messungen im Zusammenhang mit Sanierungsstudie
	Vierwaldstättersee	1979	Radon-222	Probenahmen	
	Brienzersee	1979	Radon-222	Probenahmen	
Lhydrop	Léman	ab Februar 1977	- Strömungs- und Temperaturregistrierung - umfangreiche Studie Grenzschicht Luft/Wasser - Wellen	kontinuierliche Aufzeichnungen	feste Station auf Pfählen
H. Oeschger	Bielensee	1976-80	Isotopenverhältnis O-16/O-18	Probenahmen	Untersuchung zur Einschichtung der Zuflüsse
P. Schindler	Bielensee	ab 1977 Schwergewicht 1978	Radon-222, Radium Temperatur	Probenahmen	Untersuchung zur Bestimmung der Mischvorgänge
VAW	Zürichsee	März/April 1978 Aug./Sept. 1978	- Strömungs- und Temperaturregistrierung - Meteorologie - chem./phys. Parameter	kontinuierliche Aufzeichnung	ohne Obersee
		Januar 1982	Oberflächenseiches	Einzelmessungen in versch. Abständen	
VAW/ICTS	Luganersee (Nordbecken)	Juli/Aug. 1979	- Strömungs- und Temperaturregistrierung - Meteorologie - chem./phys. Parameter - Oberflächenseiches	kontinuierlich	
				Einzelmessungen	

*Differentialgleichungen* der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung beschrieben, ergänzt durch *Materialgesetze*, wie etwa der Temperaturabhängigkeit der Dichte des Wassers. Für Untersuchungen des Stoffhaushaltes werden für jeden weiteren Parameter (z.B. Phosphat) eine *Diffusionsgleichung* und zusätzliche *Reaktionsbeziehungen* notwendig. Trotz der heutigen Grosscomputer ist eine umfassende Behandlung der Seephänomene in einem einzigen Modell unmöglich. Alle Modelle sind aus diesem Grunde Vereinfachungen, die innerhalb gewisser Fehlergrenzen die Beantwortung der gestellten Fragen eines bestimmten Problemkreises ermöglichen, abhängig davon, ob lokale oder grossräumige Ereignisse, ob kurze Zeitskalen oder Zeiträume von Jahren untersucht werden sollen.

### Dynamische Seemodelle

Die dynamischen Seemodelle wurden entwickelt, um die langfristige See-Entwicklung vorherzusagen. Der hydro- und thermodynamische Teil beschränkt sich auf ein vertikal-eindimensionales Modell, die horizontale Seefläche wird parametrisiert berücksichtigt. Als wichtigster Bestandteil wird der Nährstoffhaushalt berücksichtigt, also beispielsweise der Phosphat/Sauerstoffkreislauf unter Berücksichtigung von Produktion, Reduktion und Sedimentation. Viele der verwendeten Parameter mussten zuerst im See experimentell bestimmt werden. Diese Modelle haben sich im praktischen Ein-

satz, vor allem zum Durchrechnen verschiedener Sanierungsszenarien, bewährt. Eine Optimierung von see-externen Massnahmen (Reduktion des Phosphateintrages) und seeinternen Massnahmen (Seebelüftung und Tiefenwasserableitung) ist damit möglich. Durch die Erfahrung mit durchgeführten Sanierungsmassnahmen können die Modelle zukünftig weiter verbessert werden.

### Zirkulationsmodelle

Strömungsmodelle im barotropen (ungeschichteten) und baroklinen (geschichteten) See ermöglichen die *raumzeitliche Bestimmung des Wassertransportes* in Abhängigkeit von verschiedenen Umwelteinflüssen, vor allem der Meteorologie und der Topographie. Die Kenntnis der Strömungen ist eine Voraussetzung zur Berechnung von Stofftransport- und Ausbreitungsvorgängen.

Die *zweidimensionalen Zirkulationsmodelle* unterteilen den See in mehrere horizontale Scheiben beliebiger Dicke. Durch die Annahme einfacher vertikaler Geschwindigkeitsverteilungen lassen sich die Grundgleichungen über die Schichtdicke integrieren. Die zu lösenden Gleichungen sind damit noch zweidimensional und berechnen die Änderung des Wassertransportes in einer Schicht. Die numerische Diskretisierung der Gleichungen erfolgt mit der Differenzenmethode oder mit der Methode der finiten Elemente. Viele der einzugebenden Parameter, insbesondere die turbulenten Viskositäts- und Diffu-

sionskoeffizienten, sind jedoch ungenügend bekannt und hängen teilweise selber wieder vom berechneten Strömungszustand ab. Wegen der horizontalen Struktur dieser Modelle können Strömungszustände mit starken Vertikalströmungen nicht nachgebildet werden. In Bild 9 ist der Vergleich einer gerechneten Isothermenganglinie mit Messungen dargestellt. Qualitativ stimmen sie überein, quantitativ können sich jedoch beträchtliche Abweichungen ergeben. Eine weitere Schwierigkeit liegt in der numerischen Stabilität der mehrschichtigen Modelle. Oft ist es notwendig, zur Dämpfung unerwünschter Oszillationen grosse turbulente Viskositätskoeffizienten einzuführen, grössere als aus physikalischen Gründen sinnvoll wären.

*Vertikal-zweidimensionale Modelle* ermöglichen die Berechnung von Strömungen in Querschnitten eines Sees. Die vertikalen Transportvorgänge, insbesondere der Mechanismus der Impulsübertragung vom windangeregten Epilimnion in das Hypolimnion, können damit besser untersucht werden. Solche Berechnungen wurden durchgeführt, um die gemessenen Radonkonzentrationen (Bild 7) unter Einbezug der Strömungen erklären zu können.

Die *dreidimensionalen Modelle* diskretisieren die vollständigen Gleichungen, ohne vorangehende Vereinfachungen. Eine Unterteilung des Sees in Schichten ist daher nicht notwendig. Sie ermöglichen die Berechnung von Strömungen mit bedeutenden Vertikalkomponen-

Tabelle 3. Zusammenstellung der numerischen Modelle. Ausführliche Literaturhinweise in [2]

Projekt	Art des Modelles	Numerische Methode	Autor	Resultate	
Lhydrop	2-D Schichtmodell	barotrop	Differenzen, irreguläres Gitter	Bauer	Strömungen Oberflächenseiches
Eawag	dynamisches Seemodell	baroklin	Differenzen	Imboden/Gächter	Stoffhaushalt (z.B. O <sub>2</sub> , P)
P. Schindler	dynamisches Seemodell	baroklin	Differenzen	Schweingruber/ Nyffeler	Stoffhaushalt und Transportmodell
VAW	1-D Kanalmodell	barotrop	finite Elemente	Raggio	Strömungen, Oberflächenseiches
	2-D Schichtmodell	baroklin	Differenzen	Oman	Strömungen, Temperatur
	2-D Zweischichtmodell	baroklin	Differenzen	Schwab	interne Wellen
	3-D Seemodell	barotrop	finite Elemente	Trösch	Strömungen, Oberflächenseiches
ICTS	2-D vertikales Schichtmodell	baroklin	Differenzen	Roberts/Street	Strömungen, Temperatur
	3-D Seemodell	baroklin	Differenzen	Spraggs/Street	Strömungen, Temperatur

ten, wie sie bei Seebelüftungen oder bei durch Schwebstoff beladenes Flusswasser entstehenden Dichteströmen auftreten können. Leider schränkt die lange Rechenzeit und der Speicherplatzbedarf die breite Verwendung dieser dreidimensionalen Modelle noch ein, sie können vorerst nur zur Untersuchung von Detailproblemen eingesetzt werden.

### Modelle zur Untersuchung periodischer Vorgänge

Allgemein bekannt sein dürften die von F.A. Forel [3] schon 1873 beschriebenen und als Seiches bezeichneten Oberflächenschwingungen des Léman. Wie im Kapitel «Messungen» beschrieben, spielen solche Vorgänge besonders im Bereich der Thermoklinalen eine wichtige Rolle. Zur Untersuchung solcher Vorgänge eignen sich Modelle, die die Eigenschwingungen des Sees unter verschiedenen Verhältnissen berechnen, beispielsweise in Abhängigkeit von verschiedenen Dichteverteilungen.

### Schlussfolgerungen

Das Teilprogramm «Schichtungs- und Strömungsprobleme in Seen» des NFP «Wasserhaushalt» wurde offiziell am 24. August 1983 mit einem Symposium in Genf abgeschlossen. Die Anwesenheit von insgesamt 40 Teilnehmern aus der Schweiz, von Hochschulen, öffentlichen Verwaltungen und spezialisierten Privatunternehmen, bewies die Wichtigkeit des untersuchten Problemkreises.

Die anfangs vermutete *grosse Bedeutung der Seephysik für die Ökologie des Sees* erwies sich als richtig. Die Erkenntnisse über die Transportvorgänge und Austauschprozesse wurden schon während der Projektdauer bei verschiedenen Untersuchungen direkt verwendet, beispielsweise als wichtiger Beitrag

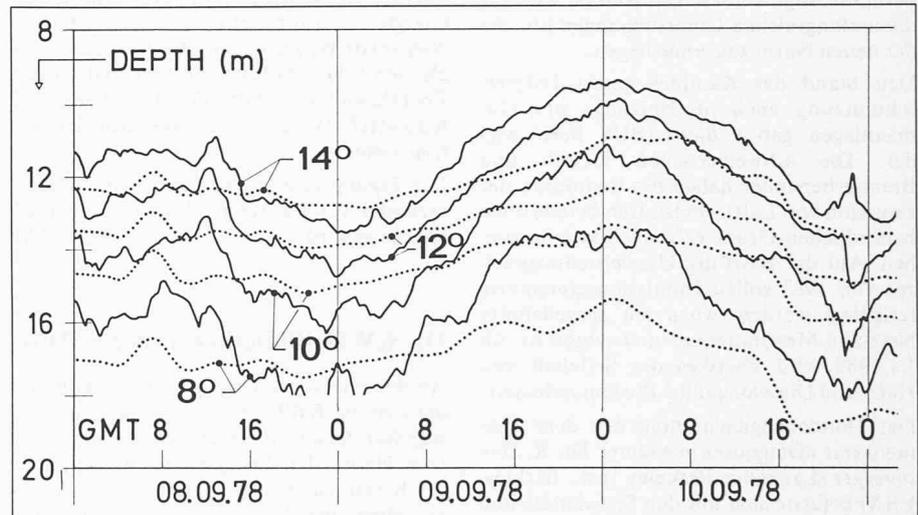


Bild 9. Vergleich von gemessenen (ausgezogen) und berechneten (gepunktet) Isothermenganglinien

### Literatur

- [1] NFP 2 (1983a), Teilprogramm «Grundwasserangebot, quantitative und qualitative Aspekte». Schlussbericht. Gas, Wasser, Abwasser 63/9
- [2] NFP 2 (1983b), Teilprogramm «Schichtungs- und Strömungsprobleme in Seen». Schlussbericht. Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie 45/1
- [3] Forel, F.A. (1873): «Etude sur les seiches du lac Léman». Bull. Soc. Vaud, Sc. Nat., Vol. 12
- [4] VAW (1984): «Zwangszirkulation und künstlicher Sauerstoffeintrag im Baldeggersee». Bericht der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie im Auftrag des Militär- und Polizeidepartementes des Kantons Luzern, Abteilung Gewässerschutz
- [5] Trösch, J.: (1983a): «Strömung in Seen – dreidimensionale Simulation mit finiten Elementen». Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 63, 1983
- [6] Trösch, J. (1983b): «Physikalische Limnologie, eine Aufgabe von nationaler Bedeutung». Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie, 45/1, 1983
- [7] Imboden, D.M.; Lemmin, U.; Joller, I. and Schurter, M. (1983): «Mixing processes in lakes: mechanisms and ecological relevance». Schweiz. Zeitschr. für Hydrologie, 45/1
- [8] Nyffeler, U.P.; Schindler P.W. and Wirz, U.E. (1983): «Chemical and geochemical studies of Lake Biel II. A chemical approach to lake mixing». Schweiz. Zeitschr. für Hydrologie, 45/1
- [9] Graf, W. H. (1983): «Hydromechanics of the Lake of Geneva». Schweiz. Zeitschr. für Hydrologie, 45/1
- [10] Hutter, K. (1983): «Strömungsdynamische Untersuchungen im Zürich- und Luganersee. Ein Vergleich von Feldmessungen mit Resultaten theoretischer Modelle». Schweiz. Zeitschr. für Hydrologie, 45/1
- [11] Bozzolo, D.; Pamini, R.; Salvadè, G.; Solcà, F.; Spinedi, C. und Zamboni, F. (1983): «Mathematische Modelle zur Simulation von Zirkulationsströmungen in einem See». Schweiz. Zeitschr. für Hydrologie, 45/1.

zur Planung der Sanierung des Baldeggersees. Auch künftig werden die Messgeräte, die Messtechnik und die numerischen Modelle von unschätzbarem Wert sein, denn noch sind unsere Gewässer nicht gesund. Der stetig zunehmende Eintrag von Schadstoffen aller Art bedingt auch weiterhin äusserste

Wachsamkeit der zuständigen Behörden, gemeinsam mit den auf diese Untersuchungen spezialisierten Institutionen.

Adresse des Verfassers: Dr. J. Trösch, Projektleiter Teilprogramm «Seen», Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zentrum, 8092 Zürich.