

Zeitschrift: Jahrbuch vom Thuner- und Brienzersee
Herausgeber: Uferschutzverband Thuner- und Brienzersee
Band: - (1952)

Artikel: Temperatur-, Strömungs- und Lichtverhältnisse des Brienzersees
Autor: Hofer, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1096526>

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: 24.03.2026

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

Temperatur-, Strömungs- und Lichtverhältnisse des Brienzersees

von Dr. F. Hofer, Bern-Bümpliz

Seenkunde - eine neuere Wissenschaft

Der Lausanner Naturforscher François Alphonse *Forel* verfasste um die Jahrhundertwende seine dreibändige Monographie «Le Léman», das Ergebnis einer dreissigjährigen Forschungsarbeit. Er darf damit als der Begründer der neuen Seenkunde gelten, nachdem es eine Zeitlang den Anschein hatte, als ob sie sich in der Erforschung der Wunderwelt der Planktonformen¹⁾ erschöpfen sollte. *Forel* vernachlässigte kein Problem: Er studierte die Geologie des Seebeckens, den Wasserhaushalt, die physikalischen Erscheinungen, namentlich Temperatur- und Wasserbewegungen, aber auch Lichtverhältnisse, ferner die chemische Zusammensetzung des Seewassers, die Biologie der Pflanzen- und Tierwelt, die Fischerei, die Siedelungsgeschichte und die wirtschaftlichen Verhältnisse der Anwohner.

In klassischer Weise bezeichnet *Forel* den See als einen Mikrokosmos. Man kann Zusammenhänge aufdecken über das Zusammenspiel des Lebendigen mit dem Leblosen in diesem einheitlichen und abgeschlossenen kleinen Teil der Hydrosphäre. Dadurch erhebt sich die Limnologie — so lautet der wissenschaftliche Name für Seenkunde — über eine reine Lokalbeschreibung hinaus und gibt Anlass, inmitten einer immer weiter greifenden Spezialisierung der naturwissenschaftlichen Disziplinen eine Synthese anzustreben.

Ein mächtiger Impuls ging von *Forels* Werk aus zur allseitigen Erforschung der Binnenseen. Tiefseethermometer, Schöpfflasche, Plank-

¹⁾ Plankton nennt man die Gesamtheit aller kleinen Tiere und Pflanzen, die sich im Wasser freischwebend erhalten, keine oder nur geringe Eigenbewegung besitzen und infolgedessen von Wasser- und Windströmungen umhergetrieben werden.

tonfangnetz und Mikroskop ermöglichten den Forschern, die Verhältnisse der tiefen Wassermassen, die bisher der Beobachtung unzugänglich waren, zu ergründen. Als Ergebnis dieser Einzeluntersuchungen konnte *Halbfass* um die Zwanzigerjahre dieses Jahrhunderts seine «Grundzüge einer vergleichenden Seenkunde» herausgeben und der Biologe *Thienemann* seine Seetypenlehre aufstellen.

Die Forschung geht weiter. Neue Methoden und neue Instrumente kommen zur Anwendung. Zur Zeit sind es mehr wirtschaftlich-praktische als theoretisch-allseitige Interessen, die im Vordergrund stehen. Die Verschmutzung unserer Gewässer mahnt zum Aufsehen und zur Vorsorge. Behörden und Institutionen stellen sich in den Dienst des Gewässerschutzes. Ueber alle praktischen Erwägungen setzt sich das Streben nach reiner Erkenntnis immer wieder durch.

Der Brienzersee im Licht der Seenforschung

Eine Sichtung der Literatur über den Brienzersee ergibt, dass dieser zwar schon öfters das Ziel wissenschaftlicher Untersuchung und geographischer Betrachtung war, dass er aber in bezug auf die eigentliche Limnologie nicht die ihm gebührende Beachtung erfahren hatte. Wohl weiss man seit langem, dass der See nie zufriert, wohl haben Biologen wie Prof. Dr. *Flück* und Prof. Dr. *Heuscher* die Lebensverhältnisse des Brienzersees für pflanzliche und tierische Lebewesen erforscht. Aber längere zusammenhängende Beobachtungsserien und eingehende Auswertungen über den *Wärmehaushalt* des Sees fehlten bis jetzt noch. Auf Anregung der Herren Prof. Dr. F. *Nussbaum* und Prof. Dr. F. *Gygax* vom Geographischen Institut der Universität Bern nahm der Verfasser in den Jahren 1945 bis 1949 umfassende Temperaturmessungen vor und brachte sie in Beziehung mit dem Wasserhaushalt und mit der Witterung. Es zeigten sich bald so interessante Zusammenhänge, dass die Arbeit auf Stabilitätsberechnungen und Strömungsmessungen ausgedehnt wurde. Ferner wurden Durchsichtigkeitsbestimmungen in die Untersuchungen einbezogen. Einige Ergebnisse dieser Forschungen sollen nachfolgend kurz beschrieben werden.

Geographische Grundlagen

Der Brienzersee liegt unter 46° 43' nördl. Breite und 7° 58' östl. Länge als Alpenrandsee der Nordabdachung im Berner Ober-

land, im Talzug der Aare. Geologisch liegt er in der Wildhorn-Ueber-schiebungsdecke zwischen Kreideformationen im NW und Juraforma-tionen im SE. Die Lage im Innern eines Faltenbogens zwischen Inter-laken im SW und Brünigpass im NE ist tektonisch bedingt. Bei einer Länge von 14 km, einer durchschnittlichen Breite von 2,12 km und einer mittleren Tiefe von 174 m beträgt das Volumen des Brienzer-sees 5,157 km³. Im Verhältnis zur Oberfläche von 29,66 km² bei einem mittleren Wasserstand von 563,8 m ü. M. ist die Wassermasse sehr gross. Der See ist dank des bedeutenden Wasserumsatzes gut durch-flutet. Das Verhältnis des gesamten Einzugsgebietes von 1126 km² zur Seefläche beträgt 38:1. Die beiden Hauptzuflüsse, Hasli-Aare und Lütschine, sind Gewässer vom glazialen Typ mit Hochwasserstand im Juli und August. Von den Nebenbächen mit direktem Zufluss in den Brienzersee ist der Giessbach mit seinen malerischen Wasserfällen der bedeutendste. Die künstliche Regulierung der Hasli-Aare und des Brienzersee-Abflusses vermag das natürliche alpine Régime nicht wesentlich zu ändern.

Wärmeverhältnisse

Der Brienzersee weist unter allen Schweizerseen mit 174 m die grösste Durchschnittstiefe auf. Seine Wassermassen von rund 5 km³ = 5 Milliarden m³ stellen ein riesiges Wärmereservoir dar. Wärme ist in physikalischer Hinsicht eine Energieform. Bei erhöhter Temperatur gelangen die Moleküle in lebhaftere Bewegung, brauchen also mehr Platz, und deshalb dehnt sich der erwärmte Körper ein wenig aus. Auf dem ursprünglichen Raum haben daher nach dem Erwärmen nicht mehr so viele Moleküle Platz; die Dichte des Körpers nimmt ab, d. h. er wird spezifisch leichter. Wärmeres, spezifisch leichteres Wasser muss also auf kälterem, spezifisch schwererem Wasser schwim-men. So wird das Wasser *thermisch geschichtet*. Reines Wasser hat ferner die Eigenheit, dass es bei 4 ° C die grösste Dichte besitzt. Kühlt es sich weiter ab, von 4 ° bis zum Gefrierpunkt 0 °, so dehnt es sich wieder um ein Weniges aus. In diesem Fall kann dann auch kälteres Wasser auf wärmerem schwimmen, welchen Zustand man als *inverse Schichtung* bezeichnet im Gegensatz zu der vorhin erwähnten direk-ten Schichtung.

Zur Feststellung der Temperatur in jeder gewünschten Seetiefe auf Zehntelsgrade genau, bedient man sich im allgemeinen immer

noch des Tiefseekippthermometers. Durch eine spezielle Kippeinrichtung wird erreicht, dass sich der Quecksilberstand beim Heraufziehen des Instrumentes durch wärmere Wasserschichten nicht verändert. Eine vollständige Lotserie umfasste Temperaturmessungen in den Tiefen von 0, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 70, 100, 150, 200 und 250 m. Die Temperatur an der Oberfläche versteht sich ungefähr 20 cm unter dem Wasserspiegel im Bootsschatten gemessen. Die Aufnahme dieser vollständigen Mess-Serie beanspruchte durchschnittlich 1½ bis 2 Stunden. Es musste darauf geachtet werden, dass das Schiff, ein Ruderboot mit flachem Boden, während der Aufnahme nicht Abtrift erhielt und dass das Kabel, welches das Instrument mit dem Haspel verband, senkrecht auslief. Daheim wurden die abgelesenen Temperaturen anhand eines amtlichen Eichscheines korrigiert und auf einer Tabelle fortwährend nachgetragen. Es ist begreiflich, dass man an einem Nachmittag nicht Erhebungen über den ganzen See machen konnte. Es wurde aber auf Grund vieler Kontrollmessungen eine Stelle ausfindig gemacht, die von Bönigen aus mit dem Ruderboot rasch erreichbar war und die doch mehr oder weniger als repräsentativ für die Temperaturverhältnisse des ganzen Sees gelten konnte. Um so wichtiger schien es, die Temperaturlotungen in nicht allzu-grossen Zeitabständen vorzunehmen. Während der Jahre 1945 bis 1948 wurden die Messungen alle 7 bis 10 Tage ausgeführt. Im letzten Untersuchungsjahr wurde monatlich nur noch eine Mess-Serie aufgenommen.

*Der allgemeine jahreszeitliche Gang der Erwärmung
in unseren Seen*

In einem gewissen Zeitpunkt des Frühlings besitzen unsere Seen von der Oberfläche bis zum Seegrund die durchwegs gleichmässige Temperatur des Dichtemaximums. Die zunehmend stärker werdende Sonnenstrahlung erwärmt in der Folgezeit rasch die obersten Wasserschichten. Diese werden dadurch spezifisch leichter, und es stellt sich eine stabile thermische Schichtung ein. Weil das Wasser die Wärme schlecht leitet und die eindringenden Sonnenstrahlen schon in den obersten 5 Metern der Wassermasse zum grössten Teil absorbiert werden, müsste diese alleroberste Schicht sehr stark, die unteren wenig oder gar nicht erwärmt werden. Durch Wasserströmungen wird aber die Wärme in die Tiefe verfrachtet. Diese Austauschströme können durch den Wind verursacht werden oder auch durch ungleiches spezifisches Gewicht, indem die obersten Wasserteilchen

infolge der nächtlichen Abkühlung wieder spezifisch schwerer werden und absinken bis zu der Tiefe, die ihrer nunmehrigen Temperatur und Dichte entspricht. Nun beobachtet man im Sommer die charakteristische Erscheinung, dass die Temperatur nicht gleichmässig nach der Tiefe zu abnimmt. Vielmehr zeigen die obersten Schichten zunächst nur einen schwachen Temperaturabfall. In einer gewissen, für jeden See charakteristischen Tiefe fällt die Temperatur innerhalb geringer Tiefenzunahme sehr stark ab. Diese Zone wird allgemein *Sprungschicht* genannt. Unterhalb derselben nimmt die Temperatur wieder allmählich und regelmässig ab, bis von etwa 100 m Tiefe an eine Temperatur beibehalten wird, die zwischen 4 ° und 5 ° liegt. Der Zustand mit stabiler direkter Schichtung und ausgebildeter Sprungschicht wird *Sommerstagnation* genannt. Die Sprungschicht trennt dann die oberflächennahen Wassermassen, in denen sich dank der lichtbedürftigen Schwebeflora die biochemischen Vorgänge zur Hauptsache abspielen, von den tieferen Wassermassen, die von den Vorgängen über der Sprungschicht mehr oder weniger nicht berührt werden.

Wenn nun mit einsetzender herbstlicher Abkühlung die oberflächennahen Wasserteilchen spezifisch schwerer werden, so müssen sie absinken, und zwar um so tiefer, je mehr die Abkühlung fortschreitet. Der See ist im Zustand der *Herbstteilzirkulation*. Längere Zeit noch mag sich die Sprungschicht halten; doch mit der immer tiefer greifenden Zirkulation wird sie endlich abgebaut, und die Herbstteilzirkulation geht in die *Wintervollzirkulation* über. Bei wenig tiefen Seen des Mittellandes kann schon im Dezember der See in Vollzirkulation und durchwegs auf 4 ° abgekühlt sein. Kommt nun mit dem Januar die grösste Kältezeit, so kühlt sich das Oberflächenwasser unter 4 ° ab, wird dadurch spezifisch wieder ein wenig leichter, und es muss sich nun eine inverse Schichtung einstellen, die allerdings weniger stabil ist als die direkte Schichtung im Sommer. Das Oberflächenwasser kann sich jetzt bis zum Gefrierpunkt abkühlen, und in einer windstillen, klaren Nacht kann sich dann eine erste dünne Eisschicht bilden. Sobald dem Wind nun der Einfluss auf die Seeoberfläche entzogen ist, so wird die Eisschicht rasch dicker.

Mit zunehmender Wärme wird zunächst die Eisschicht aufgeschmolzen. Hernach werden die invers geschichteten Wassermassen wieder durchmischt. Der See gelangt in den Zustand der *Frühlings-
teilzirkulation*, bis er von der Oberfläche bis zur Tiefe wieder die durchwegs gleiche Temperatur von 4 ° aufweist. Dann beginnt der Jahreszyklus von neuem.

Seen, die im Laufe eines Jahres diese Stadien mit abwechselnder direkter und inverser Schichtung durchmachen, werden nach *Forel temperierte Seen* genannt. *Tropische Seen* dagegen sind immer wärmer oder minimal nie kälter als 4 °. Sie sind nie invers geschichtet und frieren nie zu. In den *polaren Seen* wiederum steigt die Temperatur nicht über 4 °. Sie sind nie direkt geschichtet und sind meistens nur für kurze Zeit eisfrei.

Warum der Brienzersee nicht zufriert

Das Stadium der abgeschlossenen Wintervollzirkulation wird beim Brienzersee wegen seiner grossen Tiefe erst Ende Februar oder anfangs März erreicht. Zu dieser Zeit hat aber die Sonne schon wieder so viel Kraft, dass ein Eisverschluss nicht mehr eintreten kann. Die 4 Phasen eines Mittellandsees reduzieren sich beim Brienzersee auf zwei: Erwärmungshalbjahr mit Sommerstagnation vom März bis August und Abkühlungshalbjahr mit Zirkulation vom September bis Februar. Aber: Keine Regel ohne Ausnahme! Nach übereinstimmenden Berichten von alt Lehrer Brunner und Steuermann Stähli von Iseltwald war am Morgen des 21. März 1942 der See mit einer dünnen Eisschicht bedeckt, die sich aber schon gegen Mittag aufgelöst habe. Der Winter 1941/42 war kalt und streng. Da schon im November die kalte «obere Bise» häufig wehte, muss die Abkühlung bereits im Vorwinter ziemlich weit fortgeschritten gewesen sein. Die häufigen Schneefälle im Januar und Februar entzogen dem See weiterhin viel Wärme. Spät setzte die Erwärmung ein, und so war es möglich, dass sich in der windstillen, klaren und kalten Nacht vom 20. auf den 21. März eine dünne Eisschicht bilden konnte.

Wenn nach *Forels* allgemein gültiger Einteilung der Brienzersee dem tropischen Seetypus zugeteilt werden muss, so kann dies nicht recht passen. Nach dem Wiener Physiker *Sauberer* wären solche Seen — dem Brienzersee sehr ähnlich ist der Walensee — zu einem 4. Typus der *subtropischen Seen* zusammenzufassen.

Weitere Eigentümlichkeiten des Brienzersees

Meine Beobachtungen ergaben, dass die Sprungschicht im Vergleich zu anderen Seen recht tief liegt, nämlich etwa zwischen 25 und 35 Metern. Ferner weist sie nicht einen so ausgeprägten Temperaturabfall auf, wie es in den flachen Seen des Mittellandes beobachtet wird. Das mag darin begründet sein, dass der Brienzersee im Verhältnis zu seiner Grösse stark durchflutet und dass die Windeinwir-

kung beträchtlich ist. Durch die beidseitigen steilen Uferhänge werden die Winde kanalisiert, und ihre Wirkung wird dadurch vergrößert.

In meine Beobachtungszeit fielen der Dürresommer 1947 und der extrem kühle Sommer 1948. Wie reagierte unser See auf diese Klimaeinflüsse? Im heißen Sommer 1947 war die Schichtung sehr stabil, die Sprungschicht lag hoch. Das warme Wasser, das an der Oberfläche oft die für den Brienzersee aussergewöhnlich hohe Temperatur von 22 bis 25 ° aufwies, wurde durch den starken Abfluss abgeschöpft. Im Sommer 1948 dagegen herrschte vom Juni bis August kühles, regnerisches Wetter vor. Häufige böige Winde verursachten viel Wellengang. Dadurch, sowie auch durch starken Wechsel von Erwärmung und Abkühlung, wurde die Wärme mehr in die Tiefe gearbeitet. Die Sprungschicht lag merklich tiefer als im Vorjahr, und der gesamte Wärmeinhalt an Kalorien erreichte im August 1948 das Maximum während meiner ganzen Beobachtungszeit, obschon der See an der Oberfläche kühl war und man nicht Lust hatte zum Baden. Der milde vorangegangene Winter leistete zu dieser Erhöhung des Wärmeinhaltes natürlich auch seinen Beitrag.

Interessant war es auch, zu beobachten, mit welchen zeitlichen Rückständen die Temperaturschwankungen in den verschiedenen Wassertiefen registriert wurden. Wenn der Unterschied der Durchschnittstemperatur zwischen dem wärmsten und kältesten Monat in der Luft etwa 20 ° betrug, so machte er im Oberflächenwasser des Sees noch 13,5 ° aus, in 5 Meter Seetiefe 8,3 °, in 10 m Tiefe 7,4 ° und in 50 m Tiefe nur noch 1,1 ° aus. Unterhalb 100 m Seetiefe konnten jährliche Temperaturschwankungen höchstens im Bereich von 0,1 bis 0,2 ° beobachtet werden. Tägliche Temperaturschwankungen wirken sich allgemein im Wasser höchstens bis 5 m Tiefe aus. Während in den obersten Wasserschichten die höchsten monatlichen Durchschnittstemperaturen mit den höchsten durchschnittlichen Lufttemperaturen zusammenfielen, trat das jährliche Maximum der Wassertemperatur in 10 m Tiefe rund 1 Monat nach dem Maximum der Lufttemperatur ein, 2 Monate in 30 m Tiefe, wo meistens die Sprungschicht anzutreffen war, in 200 bis 250 m Tiefe erst ein halbes Jahr nach der maximalen Lufttemperatur, also in der Zeit der Wintervollzirkulation.

Wärme-Bilanz

Auf dem Wege der graphischen Ausrechnung wurde zu jeder Termin-Temperaturlotung der Wärmeinhalt des Sees berechnet. Das

war im Prinzip eine einfache Mischungsrechnung, verlangte aber vorausgehend eine eingehende Auswertung der Tiefen- bzw. Höhenkurvenkarte des Brienzerseebeckens, die anhand der Originalkarte nach der letzten ganzen Seevermessung von 1898 vorgenommen wurde. Von jeder 10 m mächtigen Wasserschicht musste das Volumen und die mittlere Temperatur bekannt sein. Daraus liess sich der Wärmeinhalt in Kalorien berechnen. Die Summierung der Wärmemengen aller 10-m-Schichten ergab den gesamten Wärmeinhalt. Es resultierten Werte zwischen 20 und 30 Billionen Kalorien. Zum Vergleich: 1 kg Steinkohle liefert 8000 Kalorien. Der registrierte Wärmeumsatz von 10 Billionen Kalorien entspricht also einem Heizwert von 1¼ Milliarden Tonnen Kohle! Dividiert man die gesamte Kalorienmenge des Sees durch sein Volumen in dm³, so ergibt sich die Durchschnittstemperatur, die sich in den Grenzen von 4,2 ° bis 6,37 ° bewegte. (0,1 ° Unterschied der Durchschnittstemperatur entspricht rund ½ Billionen Kalorien des gesamten Wärmeinhaltes.)

Zur Beschreibung des Wärmehaushaltes eines Sees kann es aber nicht genügen, den Wärmegewinn oder -Verlust pro Einheit der Oberfläche (cm² oder m²) oder den Unterschied zwischen maximalem und minimalem Wärmeinhalt der gesamten Wassermasse anzugeben und mit imposanten Zahlen spielerische Vergleiche anzustellen. Es müssen vielmehr die verschiedenen Faktoren berücksichtigt werden, die den Wärmeumsatz beeinflussen. Das heisst, wir müssen versuchen, über den Wärmehaushalt unseres Sees eine *Wärmebilanz* aufzustellen.

Die *Wärmeeinnahmen* resultieren in erster Linie aus der positiven Strahlungsbilanz, d. h. aus dem Ueberschuss der Einstrahlung über die Ausstrahlung, dann aus der direkten Wärmeleitung von der Luft an die Wasseroberfläche, ferner aus der Wärmezufuhr durch die Zuflüsse und in geringem Masse auch aus den in Form von Regen gefallenen Niederschlägen.

Die *Wärmeausgaben* setzen sich zusammen aus der negativen Strahlungsbilanz, aus der Wärmeleitung von der Wasseroberfläche an die Luft, aus dem Wärmeentzug durch den Abfluss und schliesslich aus der verbrauchten Verdunstungswärme sowie aus der Schmelzwärme bei Schneefall.

Aus Wärmeeinnahmen minus Wärmeausgaben ergibt sich die Zu- oder Abnahme des gesamten Wärmeinhalts in einer bestimmten Zeit. Diese Aenderungen des Kaloriengehaltes sind aber aus unseren Messungen und Berechnungen bekannt. Aus ihnen sowie aus teilweise bekannten Aktiv- und Passivposten können Strahlung und Leitung zusammen berechnet werden.

Die eingehende Wärmebilanz, die alle die genannten Posten berücksichtigt, wurde nur für den Jahreslauf September 1947 bis August 1948 aufgestellt. Sie gründet sich auf die Bilanz über den Wasserhaushalt, auf die Wärmeinhaltsberechnungen, auf Temperaturmessungen in den Hauptzuflüssen und im Abfluss sowie auf die Beobachtungen an der meteorologischen Beobachtungsstation Unterseen und kann folgendermassen überblickt werden:

Ein grosser Teil des Wärmeumsatzes, besonders des kurzfristigen infolge täglicher Einstrahlung und nächtlicher Ausstrahlung, konnte mangels genügender Beobachtungsgrundlagen zahlenmässig nicht erfasst werden. Der Teil der aufgenommenen Wärmemenge, der registriert werden konnte, wurde im internen Wärmehaushalt des Sees wie folgt verwendet:

Im Abkühlungshalbjahr September bis Februar wurden für die Verdunstung 71 %, als Schmelzwärme 4 % (starker Schneefall Ende Dezember 1947) und für die Auftemperierung des Abflusswassers gegenüber dem zugeströmten Wasser 25 % verwendet. Diese verbrauchte Wärmemenge von rund 10 Billionen Kalorien wurde zunächst durch die positive Strahlungsbilanz gedeckt mit 37 %. Der Rest von 63 % wurde den Wärmereserven des Sees entnommen. Einzig im Monat Dezember wurde eine negative Strahlungsbilanz, d. h. ein Ueberschuss der Ausstrahlung über die Einstrahlung festgestellt, da der nachfolgende Januar 1948 ausserordentlich mild war.

In der Erwärmungsperiode März bis August gewann der See infolge der positiven Strahlungsbilanz 21 Billionen Kalorien. Davon beanspruchte die Verdunstung 33 %; für die Auftemperierung des Abflusswassers wurden 24 % verwendet, und der Rest von 43 % wurde als Rücklage im See aufgespeichert, was mit rund 9 Billionen Kalorien gemessen werden konnte. Davon konnten die grössten «Einlagen» im Mai und Juni getätigt werden.

Diese Aufstellung zeigt, dass lange nicht alle Wärme, die der See während der Abkühlungszeit abgibt, der Ufergegend zugute kommt. Denn ein grosser Teil dieser Wärme wird durch das Abflusswasser abgeschöpft und weggeführt. Ferner wird ein enormer Teil der Wärme für die Verdunstung, also für eine strukturelle Aenderung des Wassers, verwendet. Sie kann aber in Form von Kondensationswärme, je nach den Windverhältnissen, der näheren oder weiteren Umgebung wieder abgegeben werden. Dagegen wird der See für seine Ufergegend auch indirekt zum Wärmesponder, indem er an seiner Oberfläche einen grossen Teil der direkten Sonnenstrahlung sowie der diffusen Himmelsstrahlung, je nach dem Einfallswinkel, gar nicht

aufnimmt, sondern zurückspiegelt. In Anbetracht der steilen Ufer des Brienersees kommen diese reflektierten Strahlen zum grossen Teil der Umgebung zu gut.

Mechanische Energie (Stabilität)

Wir meinen damit nicht die Energie der Lage, die sich beim Herunterfallen auf ein tieferes Niveau in Energie der Bewegung verwandelt und durch Turbinen und Generatoren in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Vielmehr ist die Energie gemeint, die zum Durchmischen der thermisch geschichteten Wassermassen aufgewendet werden muss. Wenn der See zur Zeit der Sommerstagnation stabil geschichtet ist, wenn also wärmere, leichtere Wassermassen auf kälteren, schwereren auflagern, so muss damit der Schwerpunkt der gesamten Wassermasse ein wenig tiefer zu liegen kommen. Zahlenmässig kann man die Arbeit, die aufgewendet werden muss, um die geschichteten Wassermassen wieder zu durchmischen, im physikalischen Arbeitsmass ausdrücken. Die Einheit dieses Masses ist das Meterkilogramm; das ist die Arbeit, die aufgewendet werden muss, um 1 kg um 1 m zu heben. Allgemein ist die Arbeit gleich dem Produkt aus Kraft (Gewicht) mal Weg. Für unseren See kann also der innere Arbeitswert gefunden werden aus dem Gewicht der gesamten Wassermasse mal den Weg, um welchen der Schwerpunkt gehoben werden muss, wenn das Wasser wieder durchwegs gleich warm sein soll. Dieser Arbeitswert wird als *Stabilität* bezeichnet.

Jede Temperaturlotung wurde nun ausser nach dem Wärmeinhalt auch nach der Stabilität ausgewertet. Es ergab sich, dass dieses Stabilitätsmass viel sensibler als das Wärmemass auf äussere Einwirkungen anspricht. Im sprunghaften Verlauf der Stabilitätskurve zeigt sich ein Ringen zwischen Windeinfluss einerseits, Lufttemperatur und Besonnung anderseits. Sonnenstrahlung und Wärmeleitung von der Luft an das Wasser wirken darauf hin, die Stabilität zu erhöhen; durch Windeinfluss wird die an der Oberfläche aufgenommene Wärme in die Tiefe gearbeitet. Damit werden auch die thermisch geschichteten Wassermassen durchmischt, und der Stabilitätswert sinkt, auch wenn der Wärmeinhalt gleich bleibt oder gar noch steigt. Die Stabilität gibt dem Limnologen ein Mass für den Grad der Absperrung der oberflächennahen Wassermassen mit all ihren Lebewesen von den Wassermassen der Tiefe. Sie gibt ihm aber auch ein Mass, die

Möglichkeiten des Auftretens von Strömungssystemen zu beurteilen. So können kausale Zusammenhänge zwischen dem Gebiet der Temperaturverhältnisse und dem noch wenig bekannten Gebiet der Strömungen in einem Binnensee aufgedeckt werden. Es bleibt abzuwarten, ob die Hydrobiologen aus diesen Stabilitätsberechnungen, die meines Wissens erstmals auf einem Schweizersee durchgeführt wurden, einen Gewinn ziehen können. Für den Laien mag folgender Hinweis überraschend sein: Wenn der See «waltet und siedet und brauset und zischt», wenn er vom Sturm aufgewühlt zu sein scheint bis auf den Grund, dann ist diese Wasserbewegung nur auf die oberste Schicht beschränkt und wirkt sich in 5 m Tiefe schon fast nicht mehr aus. Dagegen wird die spiegelglatte oder leicht gekräuselte Seefläche als Bild der Ruhe und des Friedens oft beschrieben, besungen und gemalt. Und doch können an einem Herbsttag unter dieser ruhenden Wasserfläche riesige Kräfte am Werk sein, um die Wasser umzuwälzen und zu durchmischen.

Strömungen

Während die Erforschung der Meeresströme einen grossen Ausbau erfahren hat, wurden Strömungen in Binnenseen bisher recht wenig erforscht. Wegen der Enge der in Betracht kommenden Räume und der geringen Strömungsgeschwindigkeiten bieten sich der exakten Messung etwelche Schwierigkeiten.

Im Rahmen meiner Untersuchungen wurde versucht, die Strömungsverhältnisse im unteren Teil des Brienzersees, zwischen Bönigen und Ringgenberg, zu messen. Verwendet wurde ein einfaches Gerät, wie es vereinzelt auf anderen Seen zur Anwendung gelangte. Dieses Gerät bestand zur Hauptsache aus etwa 4 m² kreuzweise ausgespannter Tuchfläche. Das hiezu erforderliche Gerüst konnte im Boot leicht montiert oder demontiert werden. Dieses Strömungskreuz, spezifisch etwas schwerer als Wasser, wurde in die gewünschte Seetiefe versenkt und an einer hölzernen Schwimmboje mit Stromlinienform, mit einem Fanion versehen, aufgehängt. Während nun das Strömungskreuz mit seiner grossen Fläche die Bewegung der es umgebenden Wassermassen mitmachte, bot die Schwimmboje wegen ihrer geringen Angriffsfläche dem Wind- und Wassereinfluss an der Oberfläche einen verschwindend kleinen Widerstand und musste den Bewegungen des Schwebekörpers folgen. Durch fortwährendes Einmessen von 2 Landstationen aus konnte die Standortsveränderung

des Schwimmkörpers und damit die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit des Schwebekörpers bestimmt werden. Allerdings erhielt man so nur die horizontale Komponente der möglicherweise schief aufwärts oder abwärts verlaufenden Tiefenströme.

Es ist ein gewagtes Unternehmen, ein gesamtes Strömungsbild des Brienzersees entwerfen zu wollen auf Grund der wenigen ausgeführten Messungen. Diese können aber durch Beobachtungen von Fischern und Schiffsleuten ergänzt werden.

Vor allem dürfte feststehen: Der Brienzersee ist nicht ein auf eine gewisse Strecke verbreitertes Teilstück eines Flusses mit stark verringerter Fliessgeschwindigkeit, wo das Wasser von der Einmündung der Zuflüsse in gleichgerichteter Bewegung der Abfluss-Stelle zuströmt. Nach meinen Beobachtungen und nach den erhaltenen Mitteilungen ist zu schliessen, dass das ganze Brienzerseebecken von einer grossen, stehenden Hauptwalze erfüllt ist, mit Rotationszentrum in der Gegend Oberried—Niederried—Iseltwald. (Aus der Terminologie der Flussbautechnik übernehmen wir den Begriff der Stromwalze für kleinere oder grosse Wirbelbewegungen. Diese Stromwalzen sind stehend, wenn ihre Drehachse vertikal steht, und liegend, wenn die Drehachse horizontal ist.) Diese grosse stehende Hauptwalze bewirkt meistens eine Linksrotation, d. h. Faulhornseite ostwärts und Brienzergratseite westwärts, und nur ausnahmsweise eine Rechtsrotation. Bei den grösseren Flussmündungen sowie bei markanteren Hindernissen, z. B. beim Felssporn in der Seetiefe als Fortsetzung von Burg und Schneckeninsel in Iseltwald, von dieser etwa $1\frac{1}{4}$ km nordöstlich und 100 m über dem flachen Seegrund streichend, treten Fliesswirbel und Nebenwalzen auf.

Die stehende Hauptwalze dürfte das Ergebnis längerer gleichbleibender Wind- und Zuflusseinwirkung sein. Ihrer Wirkung kann zum Teil die gleichmässige horizontale Verteilung der Temperaturen und des Planktongehaltes zugeschrieben werden.

Liegende Walzen dürften ihre Entstehung mehr kurzen, heftigen Windeinwirkungen verdanken. Die Sprungschicht verursacht eine Unstetigkeitsfläche. Es konnte beobachtet werden, dass zwei liegende Walzen übereinander existierten und zwar mit entgegengesetztem Drehungssinn. Ein lokaler Fallwind kann, vermöge seines grossen Anstellwinkels, an der Wasseroberfläche grössere Wasserbewegungen verursachen. Die Ausgleichsströmung erfolgt im Bereich der Sprungschicht. Die so entstehende liegende Oberflächenwalze kann eine liegende Grundwalze induzieren.

Welche Bedeutung kommt den Wasserströmungen zu? Zunächst ist es vom praktisch-technischen Gesichtspunkt aus wichtig, das Verhalten und die Folgen dieser Ströme zu erkennen in bezug auf Versandung von Hafenanlagen, Verschmutzung und Abkühlung von Strandbädern, Gefährdung von Uferbauten und namentlich auch in bezug auf Beeinflussung von Wasserentnahmestellen für die Trinkwasserversorgung. Ferner haben die Ströme eine eminente Bedeutung für die Fischerei. Vorerst dadurch, dass Fischernetze abgetrieben und in Unordnung gebracht werden können, und dass Fischeier und Jungfische ohne beachtenswerte Eigenbewegung von den Laichstellen weg verbreitet werden können. Noch grösser ist die indirekte Wirkung, indem möglicherweise im Zentrum von Wasserwalzen eine Anreicherung von Nahrungsplankton erfolgt, was wiederum planktonfressende Tiere anzieht, oder umgekehrt, dass Fischeschwärme auseinandergetrieben werden, wenn durch Stromwirbel ihre Nahrung zersprengt wird.

Die im vorderen Abschnitt besprochenen vertikalen und ungeordneten Strömungen, die durch verschiedene Temperaturen und damit durch verschiedene Dichten verursacht werden, können nicht durch Messung erfasst werden. Die Perioden der Herbstteil- und der Wintervollzirkulation haben aber für die Gesunderhaltung des Sees eine ähnliche Bedeutung wie das Pflügen für den Ackerboden oder das Tiefatmen für den Menschen. In Zukunft dürften vielleicht mehr als bis jetzt die Erforschung der Energie-, Stabilitäts- und Strömungsverhältnisse in ein limnologisches Untersuchungsprogramm einbezogen werden.

Endlich geht aber das Studium der Seeströmungen über technische und wirtschaftliche Zwecke hinaus und kann zum wissenschaftlichen Selbstzweck werden. Die Tatsache, dass eben Strömungen bestehen, weckt schon an und für sich das Interesse, nachzuforschen, unter welchen Bedingungen sie entstehen und welche Folgen sie haben. Ein dankbares Forschungsgebiet wird so dem Streben nach reiner Erkenntnis erschlossen.

Optische Verhältnisse

Bekannterweise kommt der Sonnen- und Himmelsstrahlung die grösste Bedeutung in der Energiewirtschaft eines Sees zu. Zudem steuert sie direkt oder indirekt auch alle biologischen Vorgänge. Es

ist deshalb eine wichtige Aufgabe, zu untersuchen, welche Veränderungen die ins Wasser eindringenden Strahlen erfahren.

Die Frage, wie tief die Strahlen ins Innere der Wassermassen einzudringen vermögen, bis sie absorbiert und in eine andere Energieform — Wärme — übergeführt worden sind, führt uns auf das Problem der *Sichttiefe* oder Transparenz.

Die Frage, welche Empfindungen die aus dem See austretenden Strahlen im menschlichen Auge hervorrufen, führt uns auf das Problem der *Farbe* des Sees.

Nur nach diesen beiden Gesichtspunkten wurden die optischen Verhältnisse des Brienzersees untersucht.

Sichttiefe

Die Sichttiefe oder Durchsichtigkeit wird nach der verbreitetsten Methode dadurch gemessen, dass eine kreisrunde, weiss emaillierte Scheibe von 30 cm Durchmesser, die Secchischeibe, an einer markierten Schnur in den See versenkt wird und man die Tiefe feststellt, in welcher sie den Blicken eben entwindet. So einfach diese Messmethode ist, so sehr ist sie mit Mängeln behaftet. In einem durch Gletscherschlamm getrübten Gewässer, wie es der Brienzersee darstellt, kann es in der Tiefe, wo die Umrisse der Scheibe wegen der diffusen Zerstreuung der Strahlen verschwinden, noch sehr hell sein wie hinter einer Milchglasscheibe. Dagegen herrscht im klaren, aber dunkel gefärbten Braunwasser eines Moorsee dort, wo die Scheibe der Sicht entwindet, nur noch eine geringe Gesamtintensität des Lichtes; denn die im Wasser gelösten Humusstoffe wirken stark absorbierend auf die eindringenden Lichtstrahlen. Ferner ist es für die Erforschung der Lebensbedingungen für die Planktonorganismen von grosser Wichtigkeit, neben der Intensität des Lichtes auch dessen spektrale Zusammensetzung zu kennen. Daraus folgt, dass die Bestimmung der Sichttiefe eines Sees wenig Aufschluss gibt über dessen tatsächliche Beleuchtungsverhältnisse. Dagegen lassen sich, eingedenk aller Unzulänglichkeiten, die Messungen mit der Secchischeibe exkursionsmässig leicht ausführen. Deshalb liegen Mess-Serien von sehr vielen Seen vor. Die Veränderung der Transparenz ein und desselben Sees liefert immerhin brauchbare Ergebnisse, um seinen Jahresrhythmus zu charakterisieren. Die Vergleichung der Transparenz verschiedener Seen kann ferner in der Seetypenlehre wertvolle Aufschlüsse geben. Wenn daher die Secchischeibe auch fernerhin ein wichtiges Instrument in der Hand des Limnologen bleiben wird, so

dürfte in Zukunft die Methode mit den lichtfiltrierenden Sperrschichtphotozellen grössere Bedeutung erlangen. Bei Inangriffnahme meiner Arbeit waren jedoch noch keine derartigen Instrumente erhältlich, die eine einfache exkursionsmässige Untersuchung erlaubt hätten.

Die Ergebnisse meiner Beobachtungen über die Sichttiefe des Brienzersees lassen sich kurz folgendermassen zusammenfassen: Der Brienzersee befolgt die allgemeine Sichttiefenregel der Alpenseen: Grosse Durchsichtigkeit im Winter, geringe im Sommer. Als extreme Sichttiefen wurden festgestellt: 8 bis 9 m jeweilen im Januar oder Februar und etwa 1 m Ende Juli / Anfang August. Die wechselnde Trübung ist vor allem auf den jeweiligen Gehalt an mineralischen Schwebestoffen, also Gletscherschlamm, zurückzuführen. In geringerem Mass wird die Durchsichtigkeit auch durch Konvektionsströme in den oberen Wasserschichten beeinflusst und zwar so, dass die Durchsichtigkeit ein wenig abnimmt, wenn infolge Kaltwettereinbruchs die thermische Schichtung an der Oberfläche abgebaut wird. Da der Brienzersee arm an Plankton ist, beeinflussen biologische Vorgänge dessen Transparenz nicht merklich.

Farbe

Der Brienzersee übt auf den Beschauer einen eigenartigen Reiz aus. Etwas Ernstes, ja Unheimliches geht von ihm aus. Noch ist er bei der einheimischen Bevölkerung sagenumwoben, und man begegnet manchmal der Ansicht, er sei bodenlos. Seinen fast mystischen Eindruck bewirkt der Brienzersee nicht nur wegen seiner herben «Sachlichkeit» und seinen steil abfallenden Ufern, sondern zum guten Teil auch wegen seiner Farbe. «Farben sind es, die kein einziger Schweizersee von ähnlicher Grösse und Höhenlage aufzuweisen hat», sagt der Dichter Hermann *Hiltbrunner*.

Wenn wir nun versuchen, die *wahre* Farbe zu beschreiben, unter welcher der Brienzersee dem Beobachter erscheint, so sei gleich vorweggenommen, dass wir uns nicht täuschen lassen dürfen durch die Reflexionserscheinungen an der Wasseroberfläche; kann doch eine «spiegelglatte» Wasserfläche aus dem blauen Himmel, den segelnden Wolken und den umliegenden Wäldern und Wiesen mannigfaltige Farbwirkungen hervorzaubern, und das dunkelste Moorwasser kann blau erscheinen, wenn sich der wolkenlose Himmel darin spiegelt. Wir dürfen uns ferner nicht täuschen lassen durch Kontrastwirkungen; erscheint doch der See in ganz anderer Farbe, wenn ringsum alles

mit Schnee bedeckt ist, als wenn bunte Herbstwälder oder sattgrüne Wiesen ihn umsäumen.

Abgesehen von diesen äusseren Einflüssen ändert sich mit der Durchsichtigkeit auch die wahre Farbe des Sees. Im Winter, zur Zeit der grössten Transparenz, ist diese ein Blau mit leicht grünlichem Einschlag. Mit zunehmender Trübung im Frühling wird er mehr und mehr grün, und im Hochsommer hat er eine grau-grüne Farbe mit einem leuchtenden milchigweisslichen Einschlag. Mit fortschreitender Herbstzirkulation, im Mass wie die Schwebstoffe absinken und die Transparenz zunimmt, gewinnt der See die vorwiegend blaue Farbe wieder. Blau ist die Farbe des fast reinen Wassers bei grösserer Tiefe. Auch im klarsten Seewasser sind noch Schwebstoffe vorhanden.²⁾ An diesen werden die eindringenden Sonnenstrahlen reflektiert. Wenn nun die durchschnittliche Weglänge der eindringenden und reflektierten Strahlen gross ist, so werden der Reihe nach die roten, langwelligen, dann die orange, gelben und grünen Strahlen absorbiert, und in das Auge des Beschauers gelangen nur noch die kurzwelligen blauen Strahlen. Wird der Gehalt an Schwebstoffen grösser, so kehren die Lichtstrahlen schon aus geringerer Wassertiefe zurück. Die Wirkung der Streuung wird somit herabgesetzt, und die langwelligeren Strahlen werden nur noch unvollständig absorbiert. Dadurch wird die Verschiebung des Farbtons gegen das Grün bewirkt. Und wenn der Schwebgehalt noch grösser wird, so gelangen noch mehr gelbe und rote Strahlen ins Auge. Die Mischfarbe über den ganzen Spektralbereich ist aber weiss. Mit seiner grün-weissen Farbe im Hochsommer gleicht der Brienzersee aber einem reinen Hochgebirgssee (z. B. dem Oeschinensee), obschon er in der Niederung liegt. Da bekanntlich der Brienzersee das Klärbecken für den Thunersee ist, wird uns der Unterschied der beiden Seen in ihren Farbtönen verständlich, und wir «trösten» uns mit den Worten, die Dr. Hans Spreng dem Brienzersee widmet: «Damit der Thunersee blau und klar ist, muss der Brienzersee oftmals grau und trüb sein. Darum sind mildernde Umstände walten zu lassen, wenn Vergleiche zwischen den beiden Zwillingenbrüdern gezogen werden.»

²⁾ Ein absolut reines, optisch leeres Wasser müsste bei genügender Tiefe, senkrecht von oben gesehen, nahezu schwarz erscheinen.

Die Dissertation, welcher der vorliegende Auszug entnommen ist, erschien als: «Beiträge zur Geologie der Schweiz — Geotechnische Serie — Hydrologie», herausgegeben von der Schweizerischen Geotechnischen Kommission und der Hydrologischen Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft als Lieferung 7 unter dem Titel: *Ueber die Energieverhältnisse des Brienzersees*. Kommissionsverlag: Geographischer Verlag Kümmerly & Frey, Bern, 1952.