Zeitschrift: Mitteilungen der aargauischen Naturforschenden Gesellschaft
Herausgeber: Aargauische Naturforschende Gesellschaft
Band: 22 (1945)

Artikel: Limnologische Untersuchungen im Hallwilersee
Autor: Keller, Rudolf
Kapitel: 1: Die Thermik im offenen See
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-172261

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: 02.10.2025

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

1. Die Thermik im offenen See

Einleitung

Die direkte Wärmestrahlung der Sonne zur Hauptsache, teilweise auch die Wärmestrahlung der über dem See liegenden Atmosphäre, bedingen die Wärmeaufnahme des Sees von der Oberfläche her, während umgekehrt die Wärmeabgabe hauptsächlich durch nächtliche Ausstrahlung, dann auch durch Abstrahlung an den kühleren Luftkörper und zum nicht geringsten Teil durch Verdunstung erfolgt, die ihrerseits abhängt vom jeweiligen Sättigungsdefizit und von der Bewegung (Wind, Wellen) der überlagernden Luft. Ein letzter Faktor des Wärmeaustausches von Luft und Wasser ist der direkte Übergang, d. h. die Leitung, der aber im Vergleich zu den oben beschriebenen Faktoren angesichts der viel geringeren Wärmekapazität der Luft im Verhältnis zu derjenigen des Wassers und des meist nicht erheblichen Temperaturgefälles vom einen zum anderen Medium, eine geringere Rolle spielt. Das Dichtemaximum des Hallwilerseewassers liegt bei 4,4° C. Kälteres und wärmeres Wasser muß sich auf diesem 4,4° warmen Wasser aufschichten. Im Sommer stellt sich direkte Schichtung ein, während diese im Winter durch die inverse Schichtung, kalt oben, warm unten, abgelöst wird. Durch den Einfluß der Jahreszeiten treten die gesetzmäßigen, thermischen Zirkulationsströmungen ein. Im Laufe des Sommers stabilisiert sich die direkte Temperaturschichtung solange, bis sich bei einem oberflächlichen Temperaturmaximum eine stagnierende Vertikalschichtung eingestellt hat. Die kalten Nächte des Herbstes kühlen die Oberfläche des Sees langsam ab, das Wasser wird schwerer und sinkt bis zu der seiner Temperatur entsprechende Tiefe ab. Es entsteht eine homotherme Schicht. Von dieser Schicht an abwärts beginnt erst die mehr oder weniger rasche Temperaturabnahme bis zum Minimum in der Tiefe. Die Grenzschicht mit dem starken Temperaturabfall heißt die *Sprungschicht.* Mit weiterer Abkühlung rückt die

Sprungschicht immer tiefer, bis die Oberflächentemperatur 4,4°C erreicht hat und diese Wassermassen bis zum Grund sinken können. Die Periode der beginnenden Zirkulation bis zur Abkühlung auf 4,4° ist die *Herbstteilzirkulation.* Ist die 4,4°-Grenze erreicht, so ist die *Herbstvollzirkulation* im Gang. Schreitet die Abkühlung noch weiter fort, so werden die oberflächlichen Schichten dadurch leichter und schichten sich auf dem 4,4°igen Wasser auf. Die Zirkulationsströmung macht einer Stagnation — der *Winterstagnation* — Platz. Mit dem Frühjahr werden nun wieder die obersten Wasserschichten erwärmt, bei Eisverschluß zunächst das Eis geschmolzen, wodurch das Wasser etwas schwerer wird und analog der Herbstteilzirkulation auf die entsprechende Tiefe absinkt, bis bei Aufwärmung der Oberfläche auf 4,4° diese Wassermassen wieder auf den Grund hinabsinken können, also wieder eine Vollzirkulation — die *Frühlings-Vollzirkulation* — eintritt. Hierauf folgt bei weiterer Erwärmung wieder die direkte thermische Schichtung bis zum Sommermaximum. Das Jahr schließt also sechs Perioden ein: Sommerstagnation, Herbstteilzirkulation, Herbst-Winter-Vollzirkulation, Winterstagnation, Frühlingsteilzirkulation und Frühlingsvollzirkulation.

Die Temperaturmessungen wurden mit dem Tiefseethermometer der Firma Friedinger in Luzern durchgeführt.

I. Die Temperatur des Oberflächenwassers

Das Oberflächenwasser weist naturgemäß die größten Temperaturschwankungen auf. Im Untersuchungsjahr war der See vom 12. 1. 42 bis 18. 3. 42 zugefroren. Im Hochsommer, am 29. 8. 42, wurde an der Stelle 1 das Temperaturmaximum von 24,2°C (1 m Tiefe) gemessen. Die Schwankung beträgt also mindestens 24,2°. In 5 m Tiefe wurde an der gleichen Stelle wie auch an Stelle 3 eine Temperatur von 21,7° gemessen, nur die Seemitte (Stelle 2) zeigte 22,2° und war mit der Oberfläche praktisch homotherm.

Trotzdem die Oberfläche des Sees nur 10,3 km² beträgt, werden doch an den drei Meßstellen, die in der Seeaxe verteilt an den jeweils tiefsten Punkten des Querprofils des Grundes

liegen, das ganze Jahr hindurch Differenzen von 1—2°C gemessen.

Die Ursachen dafür sind verschiedener Natur. In erster Linie wird wohl der Wind, der die Strömungen und Ausgleichsströmungen erzeugt, beteiligt sein. Er kann stärker erwärmtes oder auch abgekühltes Uferwasser gegen die Seemitte bewegen. Lokale Winde erzeugen Wellen, die eine stärkere Durchmischung verursachen und oberflächliche Temperaturschichtung zerstören. Örtliche kalte Regenschauer oder Hagel kühlen ab. Lokale Trübungen des Wassers, wie sie oft festgestellt werden, können verschiedene Erwärmung des Wassers verursachen. Trübes Wasser ist bekanntlich weniger diatherman als klares, es absorbiert die Wärmestrahlen stärker, d. h. es läßt die Wärmestrahlen weniger tief eindringen. Außer diesen Ursachen spielt auch die Tageszeit eine beträchtliche Rolle. Die Messungen können nicht an allen drei Stellen zugleich mit demselben Instrument vorgenommen werden. Die Temperaturjahreskurve (Fig. 1), die den Verlauf des Temperaturabfalles und Anstieges in 1 m Tiefe veranschaulicht, zeigt außer dem Absinken auf 0° und darauffolgendem totalen Eisverschluß nichts Besonderes. Innerhalb von 9 Tagen sank die Temperatur von 3,6° auf 0°. Während 65 Tagen war der See zugefroren. 2 Tage nach dem Auftauen war das Oberflächenwasser bereits wieder 2,9° bis 3,3° C warm. Der rascheste Temperaturanstieg erfolgte von Mitte April bis Ende Mai. Anfangs Juli war die Sommertemperatur schon auf 21,5° bis 22,2° C angestiegen, um von Anfang September an wieder stetig abzusinken.

Anläßlich der Strömungsversuche vom 25./26. 6. 42 in 10 m Tiefe, auf den Höhen der drei Probenahmestellen, wurden die Temperaturen der Start- und Endstellen der Strömungskreuze verfolgt. Allgemein wurde beobachtet, daß die Temperaturen an den Start- und Endstellen nicht dieselben waren.

Die folgende Tabelle veranschaulicht die Temperaturdifferenzen bei allgemeiner Nord—Süd-Windrichtung.

Diese Beobachtungen lassen darauf schließen, daß die gemessenen Tiefenströmungen nicht durchaus horizontal verlaufen, was ohne weiteres einleuchtend ist. Die Methodik der mit bestimmten Kabellängen versenkten Kreuze erlaubt uns ledig-

Tabelle 1

Ort	Temperatur an Startpunkt	Temperatur an Endpunkt	Temperatur-Differenz
Stelle 1	8,1	9,3	+ 1,2
	9,3	9,55	+ 0,25
	7,9	8,5	+ 0,6
	9,7	9,3	— 0,4
Stelle 2	7,4	7,3	— 0,1
Stelle 3	9,7	8,0	— 1,7
	9,75	8,0	— 1,75
	9,3	16,4	+ 7,1 (?)

lich die horizontale Projektion der Bewegungsrichtung der Wassermassen anzuzeigen.

II. Die Temperatur in den tieferen Wasserschichten

Herbstteilzirkulation

Vom 20.—27.9.41 wurden die ersten Temperaturmessungen ausgeführt. Zu dieser Zeit hatten die kühlen Nächte eingesetzt, eine charakteristische Sprungschicht war aber noch nicht ausgebildet, sie war erst im Entstehen begriffen. Schon anfangs Oktober war die Temperatur bis zu einer Tiefe von 8 m ausgeglichen, und Ende Oktober war die Sprungschicht bei 10 m Tiefe angelangt. Einen Monat später, Ende November/anfangs Dezember, trafen wir an den Stellen 1, 2 und 3 die Sprungschicht unterhalb 15 m Tiefe. Im Hallwilersee wurde bei 15 m Tiefe ein Temperaturmaximum von 7,3° C im Oktober und ein Minimum von 3° C im März gemessen. Die jährliche Schwankung betrug dort nur 4,3° C. Weil wir in 15 m Tiefe schon auf die ausgesprochene Kaltwasserzone stoßen, ist es leicht verständlich, daß die Sprungschicht im Zeitraum von einem Monat nur 5 m, die Temperatur aber um 3,9—5,8° C abgesunken ist. Bis zur Temperatur des Dichtigkeitsmaximums, für den Hallwilersee 4,4° C, mußte sich das Wasser über der Sprungschicht noch um 1,5—2,2° C abkühlen.

Die Vollzirkulation kann nur kurze Zeit dauern. Das weitere Abkühlen verringert das spezifische Gewicht des Wassers, so-

daß das kältere dem wärmeren überlagert und somit die Vollzirkulation einer

Winterstagnation Platz macht. Die inverse Temperaturschichtung konnte sich langsam ausbilden, denn unter die Eisdecke, die den See am 12. 1. 42 verschlossen hatte, wirkten keine Temperaturschwankungen mehr ein. Leider war es nicht möglich, die Temperaturschichtung unter der Eisdecke zu messen. Als am 20. und 21. 3. 42, zwei Tage nach Eisbruch, die Messungen ausgeführt wurden, war die

Frühlingsteilzirkulation schon im Begriff, in *Frühlingsvollzirkulation* überzugehen. Ebenso wie die *Herbst-Winter-Vollzirkulation* hatten auch die *Frühlingsteil- und -Vollzirkulation* nur kurze Dauer. Die Wärmestrahlung der Sonne an Frühlingstagen machte der Frühlingsvollzirkulation ein rasches Ende und bildete die direkte Temperaturschichtung heraus. Bis zum Sommermaximum der Temperatur ergab sich die längste zusammenhängende Periode — *die Sommerstagnation.* Sie hatte am 17. 4. 42 schon begonnen und dauerte bis zum 23. 9. 42.

III. Die Temperatur in der Seetiefe

Trotzdem der See an den ausgewählten drei Probenahmestellen verschieden tief ist, wurden bei der Winterstagnation nur zwei verschiedene Grundtemperaturen gemessen. Die Stellen 1 und 2 wiesen beide 4,4° C auf, während an der wenig tiefen Stelle 3 nur 4,2° C beobachtet wurden. Der Grund für diese Weiterabkühlung unter die Temperatur des Dichtemaximums kann auf verschiedene Weise erklärt werden.

1. Tatsache ist, daß diese Abkühlung während der Zeit des Eisverschlusses stattgefunden hat. Der Abfluß bedingt das Nachströmen neuer Wassermassen aus dem südlicheren Teile des Sees. Diese Wassermassen können Ausgleichsströmungen am unteren Seeteil auslösen, die kaltes Wasser in die Tiefe reißen und dort eine Abkühlung verursachen. Oder aber

2. das Seewasser wurde vor dem Zufrieren durch starke Bise durchwühlt.

Nach dem Auftauen des Sees setzte die Frühlingsteilzirkulation ein, die hier weniger lang gedauert haben mag, hingegen

wirkte sich die Vollzirkulation umso intensiver aus. Die Vollzirkulation setzte ein, als die homogene Schicht 4,2° C aufwies und dauerte fort, bis die Temperatur von 4,4° C erreicht war. Die Sauerstoffwerte bei Beginn der Sommerstagnation sind relativ hoch.

Aus der Tabelle 2 geht hervor, daß sich die Temperatur am Grunde des Sees im Laufe des Sommers 1942 um 0,3° C erhöht hat. Die Stellen 1 und 3 gingen zeitlich voran und zeigten diese Temperaturerhöhung auf dem Grunde schon am 4. 7. 42, während in der Seemitte (Stelle 2) erst Ende Juli eine Erhöhung von 0,1° gemessen wurde. Es ist festzuhalten, daß am Ende des Versuchsjahres die Wassertemperaturen in allen Schichten gegenüber dem gleichen Zeitpunkte des Vorjahres höher lagen. Diese *allgemeine* Temperaturerhöhung scheint auf den ersten Blick die Ursache derjenigen der Grundschichten zu sein. Dabei muß aber die Frage, woher bei Sommerstagnation die Wärme für die Temperaturerhöhung des Wassers am Grunde kommt, geprüft werden.

Aus dem Kapitel «Strömungsmessungen» kann entnommen werden, daß die Wassermasse des Sees kein ruhendes Element darstellt. Im Gegenteil, die Wassermassen werden gedrängt und gestoßen durch den Wechsel der Winde. Die Bewegungen sind nicht allein oberflächlich, sondern die Strömungen wirken sich bis auf den Grund hinunter aus. In 30 m Tiefe wurden Strömungen von bis 20 m/Std. gemessen. Diese Geschwindigkeit stellt sicherlich kein Maximum dar. Wo solche Bewegungen auftreten, muß auch eine Durchmischung der Wassermassen, wenn auch vielleicht mehr oder weniger regional beschränkt, stattfinden, wodurch *Temperaturen ausgeglichen* werden. Die Tatsache, daß die Temperaturen in allen Tiefen während des Sommers 1942 gegenüber denjenigen des Vorjahres angestiegen sind, und zwar um 0,3° in 45 m und um 4° in 1 m Tiefe, und der Nachweis von Strömungen in den verschiedensten Richtungen, läßt diese Temperaturerhöhung am Seegrunde wenigstens teilweise erklären.

Die Wärmemengen, die durch biologische Prozesse und chemische Abbaureaktionen frei werden, sind nach der herrschenden Auffassung (vergl. *G. Alsterberg*[1]) als Wärmespender

der Tiefe ebenso zu vernachlässigen wie die Eigenwärme der Erde. Dagegen können die tiefsten Schichten des Sees durch das Wasser der Zuflüsse erwärmt werden. Führt das Zuflußwasser größere oder geringere Mengen suspendierten Schlammes mit, oder ist das spezifische Gewicht erhöht durch gelöste Salze, Säuren und Hydroxyde, so ist dieses zugeführte Wasser schwerer als das Seewasser gleicher Temperatur. Dieses sinkt infolgedessen nach seiner Einmündung in den See tiefer hinab als es seine Temperatur erfordern würde und gelangt so in Tiefenschichten, die zwar die gleiche Dichte haben wie das Zuflußwasser, aber nach den Gesetzen der thermischen Schichtung kälter sind als dieses. Das schlamm- oder mineralreiche Wasser mischt sich mit dem kalten Tiefenwasser und erwärmt dieses.

Tabelle 2 Stelle 2

Daten	23. 9	31. 10.	6. 12.	3. 1.	20. 3.	17. 4.	30. 5.	4. 7.	31. 7.	1. 9.	23. 9.
Tiefen											
1 m	17,0	9,8	5,9	3,3	3,3	7,4	17,4	21,9	21,6	22,3	20,6
5 m	16,3	9,8	5,9	3,5	3,3	7,1	14,2	19,8	20,9	22,2	20,6
10 m	13,4	9,8	5,9	3,9	3,4	4,6	8,0	8,8	10,5	12,2	11,5
15 m	6,0	5,4	5,9	3,8	3.2	5,6	6,2	6,1	6,5	6,7	6,5
20 m	5,0	4,7	4,8	3,9	3,1	4,8	5,4	5,5	5,6	5,7	5,6
25 m	4,6	4,6	4,6	4,1	4,1	4,5	4,8	5,1	5,1	5,3	5,1
30 m	4,5	4,5	4,5	4,4	4,1	4,4	4,4	4,8	4,8	4,9	4,8
35 m	4,4	4,4	4,4	4,4	4,1	4,4	4,4	4,6	4,8	4,7	4,7
40 m	4,4	4,4	4,4	4,4	4,3	4,4	4,4	4,6	4,7	4,7	4,7
45 m	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5	4,7	4,7

IV. Die jährlichen Temperaturschwankungen an Stelle 2

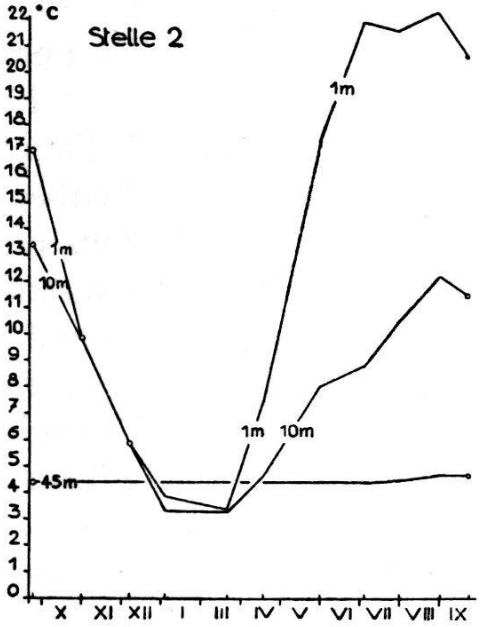
Als Tiefstpunkte zur Bestimmung der jährlichen Temperaturschwankungen wurden die Messungen vom 20. 3. 42 verwendet. Die größten Differenzen finden wir zwischen 5 und 10 m und zwischen 10 und 15 m Tiefe. Die 10-m-Schicht weist noch ein Temperaturmaximum von 12,2° C auf, während in 15 m Tiefe nur noch eine Maximaltemperatur von 6,7° gemessen wurde. Diese Tiefe ist als Kaltwasserzone ausgeprägt.

Die jährlichen Temperaturschwankungen an Stelle 2 (Seemitte ergeben sich aus nachstehender Tabelle.

Tabelle 3

Bei	1 m	Tiefe	Schwankung	zwischen	3,3°—22,3° C	Differenz 19,0° C
„	5 m	„	„	„	3,3°—22,2° C	„ 18,9° C
„	10 m	„	„	„	3,4°—12,2° C	„ 8,8° C
„	15 m	„	„	„	3,2°— 6,7° C	„ 3,5° C
„	20 m	„	„	„	3,1°— 5,7° C	„ 2,6° C
„	25 m	„	„	„	4,1°— 5,3° C	„ 1,2° C
„	30 m	„	„	„	4,1°— 4,9° C	„ 0,8° C
„	35 m	„	„	„	4,1°— 4,7° C	„ 0,6° C
„	40 m	„	„	„	4,3°— 4,7° C	„ 0,4° C
„	45 m	„	„	„	4,4°— 4,7° C	„ 0,3° C

Fig. 1. Temperaturjahreskurven der Tiefen 1, 10 und 45 m vom 23. 9. 41 bis 23. 9. 42



V. Generelle Beschreibung der beobachteten Thermik des Hallwilersees

Im Untersuchungsjahr konnten die thermisch bedingten bzw. ausgelösten charakteristischen Seeperioden festgestellt werden. Wenn es auch nicht gelang, z. B. die Tage der Winter- und Frühlingsvollzirkulation festzuhalten, so konnte doch anhand der Schichtung die vollzogene Umbildung genau und deutlich ersehen werden. Nach dem thermischen Verhalten muß der Hallwilersee in die Serie der temperierten Seen eingereiht wer-

den. *F. A. Forel*[2] hat drei verschiedene thermische Seetypen mit Übergängen unterschieden: den tropischen, temperierten und polaren Typus.

Der Herbst- und Frühlingstypus der Sprungschicht, wie sie von *L. Minder*[3] unterschieden wurden, war gut ausgebildet. Der Frühjahrstypus hatte seine obere Grenze bei 5 m Tiefe, während die Herbstsprungschicht schon bei 10 m ihren Anfang nahm. *A. Güntert*[4] fand bei seinen Temperaturmessungen im Hallwilersee, daß die Tiefenschicht mit verhältnismäßig konstanter Temperatur bei 20 m beginnt. Er bestimmte für die maximalen jährlichen Schwankungen ganz ähnliche Werte wie ich selbst gemessen habe, doch ist zu erwähnen, daß die Differenzen der 40-m- und 45-m-Tiefe von mir nur mit 0,4 resp. 0,3° C angegeben worden sind, während A. Güntert Differenzen von 0,8 resp. 0,7° C beobachtet hatte. Die Minimaltemperatur gibt A. Güntert mit 4,0° C an, während ich bei meinen zahlreichen Messungen mit dem Tiefseethermometer von Friedinger Luzern eine Mindesttemperatur bei 45 m von 4,4° C beobachtete.

Über die täglichen Temperaturschwankungen orientiert ein Bericht im Rahmen einer speziellen Untersuchung vom 18./19. 6. 43, die sich über 24 Stunden erstreckte und in dieser Arbeit gesondert aufgeführt wird (s. Kombinierte Temperatur-Sauerstoff-Planktonuntersuchung). Es kann aber hier schon erwähnt werden, daß der Einfluß der kühleren Nacht die Temperatur bis 5 m Tiefe auszugleichen vermag, sodaß innerhalb einer 5-m-Schicht die Tag- und Nachtoscillationen auftreten; allerdings ist deren Umfang und Stärke sicher von den jeweiligen meteorologischen Verhältnissen abhängig. Unter dieser homothermen Schicht befindet sich die eigentliche Sprungschicht, deren Tiefenlage als Folge der oben beschriebenen Oscillationen Schwankungen unterworfen ist.

Von 15 m Tiefe ab bleibt die Temperatur von diesen Tag- und Nachtschwankungen unbeeinflußt.