

Werk

Titel: Der Einfluß des Walchensee-Kraftwerks auf den Temperaturhaushalt des Kochelsees

Autor: Zorell, Franz

Ort: Berlin

Jahr: 1955

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?385984391_0007|log11

Kontakt/Contact

[Digizeitschriften e.V.](#)
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

✉ info@digizeitschriften.de

Der Einfluß des Walchensee-Kraftwerks auf den Temperaturhaushalt des Kochelsees

Von

Franz Zorell

Mit 5 Figuren

Anläßlich des Baues des Walchenseekraftwerks wurden am Walchensee und Kochelsee umfangreiche seenkundliche Untersuchungen durchgeführt. Das Becken des Walchensees selbst wurde durch E. FELS (1928) einer sorgfältigen Neuauslotung unterzogen. FR. KÜHL (1928) hat an beiden Seen physikalische und biologische Beobachtungen angestellt. Dazu kamen weitere Untersuchungen über die geologischen Verhältnisse der Seen und ihren Chemismus.

Am Schluß seiner Arbeit über das Walchenseebecken spricht E. FELS dem Walchenseekraftwerk den Dank für die Unterstützung der wissenschaftlichen Arbeiten aus und drückt die Hoffnung aus, daß in späteren Zeiten den Veränderungen in der Natur, die durch die Einleitung der oberen Isar in den Walchensee vielleicht hervorgerufen werden, nachgegangen werden möge.

Leider kam es seitdem zu keinen solchen Untersuchungen. Lediglich über Änderungen, die im Temperaturhaushalt des Kochelsees infolge Einleitung des Kraftwerkswassers hervorgerufen wurden, können im nachfolgenden einige Angaben gemacht werden.

1. Das Beobachtungsmaterial und die Form seiner Auswertung

Verglichen mit anderen oberbayerischen Seen liegen vom Kochelsee verhältnismäßig viele Temperaturmessungen vor, und zwar:

1. von v. AUFSESS (1903) 12 t-Reihen vom 16. 6. 02 bis zum 20. 3. 03, von 0-40 m Tiefe.
2. von BREU (1905) 24 t-Reihen vom 1. 1. bis zum 15. 12. 04, von 0—60 m Tiefe.
3. von KÜHL (1928) 24 t-Reihen vom 22. 4. 21 bis zum 29. 4. 22, von 0—65 m Tiefe.
4. von BOHMANN (1939) bzw. HSI-MING KIANG (1941) 14 t-Reihen vom 19. 7. 38 bis zum 1. 8. 39, von 0—40 m Tiefe. Die Reihen sind nur in der zweitgenannten Arbeit vollständig wiedergegeben.
5. von ZORELL (unveröffentlicht) 1 t-Reihe 1950 und 4 Reihen 1951, von 0 m bis zum Boden.

Es stehen also aus der Zeit vor der Erbauung des Walchenseewerkes drei Jahresreihen, aus späterer Zeit eine Jahresreihe und eine Anzahl von Einzelbeobachtungen zur Verfügung. Man hat so nicht nur die Möglichkeit, die t -Verhältnisse vor und nach Erbauung des Kraftwerks miteinander zu vergleichen, sondern bekommt gleichzeitig ein Kriterium dafür, ob die gefundenen Unterschiede wirklich grundsätzliche sind und nicht etwa nur im Bereich der Variationsbreite im t -Haushalt von Jahr zu Jahr liegen.

Bislang wurde der Gang der Wassertemperatur in einem See gewöhnlich auf zwei Arten graphisch zur Darstellung gebracht: 1. durch Einzeichnen der t -Werte in ein Koordinatennetz, bei dem die Temperaturen eines bestimmten Beobachtungstages als Funktion der Wassertiefe gegeben wurden. Eine Aneinanderreihung dieser Temperaturkurven veranschaulicht besonders gut die Entstehung der „Sprungschicht“ im Frühjahr, ihre Tieferverlegung im Laufe des Sommers und Herbstes und ihr schließliches Verschwinden zu Beginn des Winters. 2. durch Isoplethendiagramme. Sie geben einen guten Überblick über die sommerliche Erwärmung eines Sees und deren Vordringen nach der Tiefe zu.

Für die nachfolgende Untersuchung wurde ein anderer Weg gewählt. Um die einzelnen Jahre möglichst leicht vergleichbar zu machen, wurden die Beobachtungen aus den einzelnen Tiefenstufen harmonisch analysiert und die so gewonnenen ausgeglichenen Werte graphisch dargestellt, mit der Zeit als Abszisse und der Temperatur als Ordinate. Diese in der Meteorologie seit langem gebräuchliche Methode wurde bisher für Meereswassertemperaturen vereinzelt zur Anwendung gebracht, so von v. SCHUBERT (1936) für die Oberflächenwasser-Temperatur bei Feuerschiffen der Nordsee, für Beobachtungen aus Seen dagegen kaum. Bei den zeitlich nichtgleichabständigen Daten aus Seen ist leider der Arbeitsaufwand für die Ausgleichsrechnung ziemlich erheblich. Über Einzelheiten der Rechnung und die Bedeutung höherer Glieder wird an anderer Stelle berichtet. In den beigefügten Kurven ist nur das erste Glied der Ausgleichung zur Darstellung gebracht. Die Beobachtungen von v. AUFSESS wurden weggelassen.

2. Übersicht über die Temperaturverhältnisse in den Jahren 1904, 1921 und 1938/39

Über den Zusammenhang von Luft- und Wassertemperatur wissen wir verhältnismäßig wenig, da längere, durch Jahre hindurch fortgeführte Beobachtungsreihen der Oberflächen- und Tiefentemperaturen von Seen nicht sehr zahlreich sind. Bekannt ist der Einfluß der Luft-Frühjahrstemperatur auf die Tiefentemperatur von Seen (BRÖNSTED und WESENBERG-LUND, 1912, und ZORELL, 1941). Danach begünstigt ein warmes Frühjahr die rasche Bildung der Sprungschicht, die ihrerseits einem Wärmetransport nach der Tiefe zu hinderlich ist. Ein kühles (und windreiches) Frühjahr begünstigt dagegen ein Eindringen der Wärme nach der Tiefe zu; nach einem solchen Frühjahr wird die Temperatur in den tieferen Schichten eines Sees den Rest des Jahres hindurch höher sein.

Für die vorliegende Untersuchung ist es günstig, daß die meteorologischen Verhältnisse in den einzelnen Beobachtungsjahren einander ähnlich waren: die für die

Tabelle 1

Lufttemperatur in München

Monatsmittel (M) und Abweichung (Δ) der Monatsmittel vom langjährigen Mittel 1851–1930

Monat	1851 bis 1930	1904		1921		1938		1939	
		M	Δ	M	Δ	M	Δ	M	Δ
Januar	-2,0	-2,4	-0,4	4,3	+6,3	1,1	+3,1	2,1	+4,1
Februar	-0,5	1,2	+1,7	0,9	+1,4	0,5	+1,0	0,4	+0,9
März	2,9	4,0	+1,1	6,5	+3,6	8,2	+5,3	1,1	-1,8
April	7,5	10,1	+2,6	7,4	-0,1	4,9	-2,6	11,0	+3,5
Mai	12,3	13,3	+1,0	15,1	+2,8	12,3	± 0	10,9	-1,4
Juni	15,6	16,7	+1,1	15,5	-0,1	18,7	+3,1	18,2	+2,6
Juli	17,4	20,7	+3,3	21,0	+3,6	19,1	+1,7		
August	16,6	18,1	+1,5	18,4	+1,8	18,5	+1,9		
September	13,1	11,7	-1,4	14,9	+1,8	14,9	+1,8		
Oktober	8,0	8,8	+0,8	11,8	+3,8	9,4	+1,4		
November	2,3	2,4	+0,1	-0,4	-2,7	5,8	+3,5		
Dezember	-1,0	1,0	+2,0	0,5	+1,5	-3,1	-2,1		
Jahr	7,7	8,8	+1,1	9,7	+2,0	9,2	+1,5		
März–Mai	7,6	9,1	+1,6	9,7	+2,1	8,5	+0,9	7,7	+0,1

Bildung der Sprungschicht entscheidenden Monate März bis Mai hatten durchweg einen Wärmeüberschuß der Lufttemperatur, wie beifolgende Tab. 1 zeigt. Alle Beobachtungsjahre (1904, 1921, 1938 und — bis Juni — 1939) waren verhältnismäßig warm. Die Vergleichbarkeit der einzelnen Jahre ist also hinsichtlich des Strahlungshaushalts günstig.

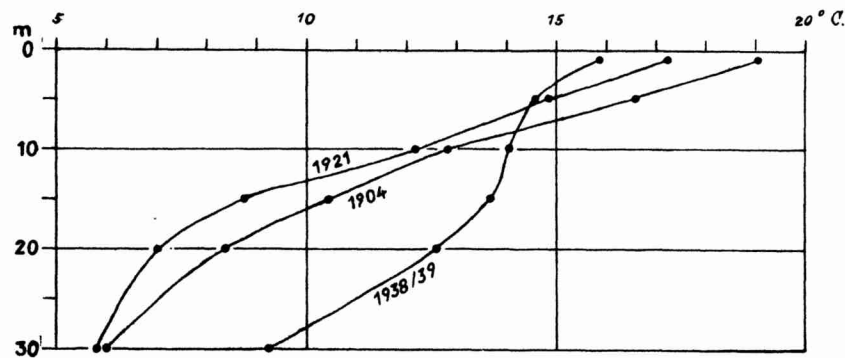


Fig. 1. Höhe der Temperaturmaxima nach der Tiefe zu für die Jahre 1904, 1921 und 1938/39

Tab. 2 gibt eine Übersicht über die Größe der Amplitude der einzelnen Kurven, sowie über die Höhe und die Eintrittszeit der t -Maxima. Die Höhen der Maxima sind außerdem in Fig. 1 dargestellt. Die beiden Kurven für 1904 und 1921 verlaufen ähnlich; die Maxima lagen 1904 etwas höher als 1921. 1938/39 ist der Kurvenverlauf dagegen ganz anders. In den oberen Wasserschichten (bis 5 m Tiefe) bleiben die Maxima unter denen der früheren Jahre, von 10 m ab nach der Tiefe zu liegen sie

dagegen beträchtlich höher. Die Amplituden sind ähnlich verteilt. 1904 und 1921 verfrühen sich in den tieferen Schichten (1904 von 20 m ab, 1921 schon von 10 m ab) die Eintrittszeiten, 1938/39 dagegen nicht: die Maxima fallen mit zunehmender Tiefe immer auf einen späteren Zeitpunkt.

Tabelle 2
t-Amplituden, Höhe und Eintrittszeiten der t-Maxima
in verschiedenen Tiefen des Kochelsees

m Tiefe	1904			1921			1938/39		
	Ampl.	t-Max.	Datum	Ampl.	t-Max.	Datum	Ampl.	t-Max.	Datum
	0	0		0	0		0	0	
1	8,56	19,04	12. 8.	7,32	17,22	3. 8.	6,59	15,84	12. 8.
5	7,10	16,59	18. 8.	6,03	14,81	11. 8.	5,92	14,57	16. 8.
10	4,90	12,80	23. 8.	4,15	12,14	17. 8.	5,60	14,01	18. 8.
15	3,54	10,42	22. 8.	1,93	8,75	15. 8.	5,39	13,64	20. 8.
20	2,44	8,37	25. 8.	1,02	7,00	26. 7.	4,76	12,58	24. 8.
30	1,03	5,99	12. 8.	0,44	5,80	29. 7.	2,67	9,22	3. 9.

Betrachtet man die Kurvenbilder für die einzelnen Jahre (*Fig. 2 bis 4*), so springt die Ähnlichkeit der Kurvenbilder für 1904 und 1921 untereinander und im Gegensatz dazu das Kurvenbild für 1938/39 sofort ins Auge. Während die Kurven für 1904 und 1921 nach der Tiefe zu ungefähr gleichmäßig sich verflachen, wobei 1921 die Kurve für 20 m schon sehr flach verläuft (Amplitude 1.02°) und der für 30 m von 1904 ähnlich ist (Amplitude 1.03°), liegen die Kurven für 1938/39 bis 20 m Tiefe nahe beisammen (große Amplitude!) und auch die für 30 m Tiefe hat noch eine größere Amplitude als die 20 m-Kurve von 1904 bzw. sogar die 15 m-Kurve von 1921. Auffällig ist bei den Kurven für 1938/39 vor allem, daß die Linien für 5, 10 und 15 m nahe beisammen liegen. Das bedeutet, daß die Wassermassen in diesen Tiefenlagen wenig geschichtet sind und der Gradient nur klein ist. In den andern Jahren ist bis zu einer Tiefe von 10 m (1904) bzw. 15 m (1921) das Wasser viel stärker geschichtet, der Gradient also groß. Oder anders ausgedrückt: bei höherer Oberflächentemperatur war die ganze Wassermasse bis 30 m 1904 und 1921 wesentlich kälter als 1938/39, wo die oberflächennahe Schicht etwas kühler war als in den früheren Jahren, die tieferen Schichten bis 30 m dagegen sehr viel wärmer.

3. Erklärung der Veränderungen in den Temperaturverhältnissen

Der Temperaturhaushalt eines Sees wird durch zwei Faktoren bestimmt:

1. durch die Einstrahlung,
2. durch den Einfluß des Windes auf die Verteilung der Strahlungsenergie im Wasser.

Beide Faktoren sind abhängig von der Größe und Form des Seebeckens, vor allem von der absoluten Größe der Seefläche und ihrem Verhältnis zu den Wassertiefen, der zweite insbesondere vom Windfeld über einem See, der Umrißform des Sees und seiner Lage zur Hauptwindrichtung.

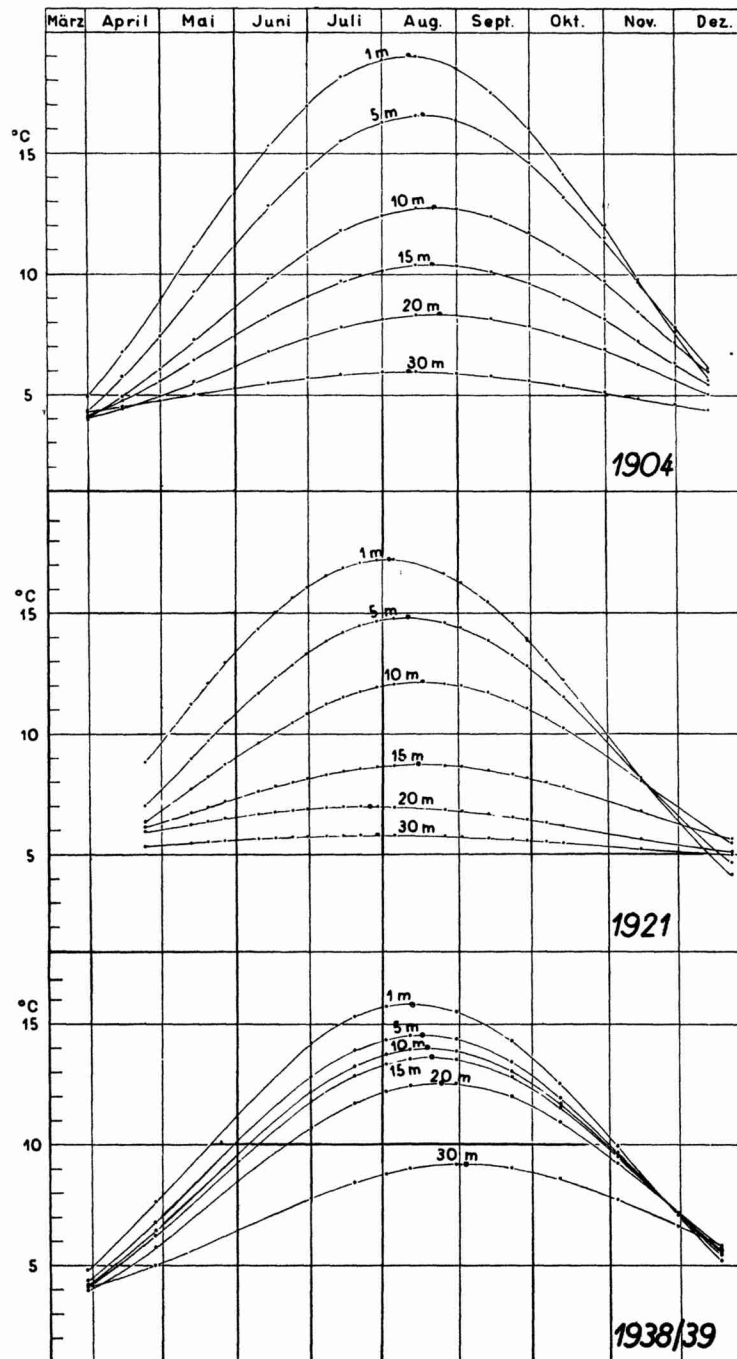


Fig. 2—4. Jahresgang der Temperatur in verschiedenen Tiefen in den Jahren 1904, 1921 und 1938/39

Die Bedeutung des Windes für den thermischen Aufbau eines Sees ist durch die Untersuchungen von WEDDERBURN (1907) und BIRGE (1916) klargelegt worden. Später hat B. WENDIN (1937) eine gute Darstellung der ganzen Vorgänge gegeben. Für die Entstehung der Sprungschicht und ihre Tieferverlegung sind die Änderungen der Dichte des Wassers mit der Temperatur und die Arbeitsleistungen des Windes entscheidend.

Neben diesen beiden überragenden Faktoren für den Wärmehaushalt eines Sees ist früher schon die Bedeutung des Zu- und Abflusses erörtert worden, durch BRÜCKNER (1909) und HALBFASS (1910). Letzterer, der sich mit den Anschauungen Brückners auseinandersetzt, behauptet, daß „ein Einfluß auf die Tieftemperatur eines Sees sich höchstens bei ganz flachen Seen nachweisen lasse“. Er regt einen Vergleich auf Grund neuer Untersuchungen an benachbart liegenden Seen an, also unter der Annahme, daß bei den beiden Vergleichsobjekten ähnliche Wind- und Strahlungsverhältnisse herrschen. In unserem Falle liegen die Verhältnisse für einen solchen Vergleich nun besonders günstig, da es sich ja um ein und denselben See handelt, dessen t-Verhältnisse sich geändert haben aus Gründen, die — wie zu vermuten ist — in den geänderten Zuflußverhältnissen zu suchen sind.

Den Hauptzufluß des Kochelsees bildet die aus dem Werdenfelser Land kommende Loisach. Ihre Wasserführung ist aus Tab. 3 ersichtlich; im Jahresmittel beträgt sie 23.3 m³/sec. Seinen Höchstwert erreicht der Zufluß im Juni (Zusammenfallen von Schneeschmelze und Sommerregen), seinen niedrigsten im Dezember; das Verhältnis beider ist etwa 3 : 1. Die Schwankungen des Zuflusses aus dem Walchenseekraftwerk sind naturgemäß geringer (Tab. 4). Sie bewegen sich zwischen 10.68 m³/sec im April und 19.31 m³/sec im August, das Jahresmittel beträgt 15.13 m³/sec. Das sind etwa $\frac{2}{3}$ der Wassermenge der Loisach. Leider liegen über die Temperaturen der Zuflüsse keine Angaben vor. Zwar wird die Temperatur des aus dem Walchensee durch die Turbinen des Kraftwerks laufenden Wassers täglich gemessen, doch sind

Tabelle 3

Zuflußmengen der Loisach nach Angaben der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde 1921 Pegel Großweil, Mittelwerte und 1938/39 Pegel Schlehdorf.

Monat	Mittel 1926—1939 m ³ /sec	1921 m ³ /sec	1938 m ³ /sec	1939 m ³ /sec
Januar	12,8	12,0	15,9	9,11
Februar	13,1	9,9	14,5	9,08
März	15,7	9,5	22,1	12,9
April	23,2	15,1	22,6	28,7
Mai	33,4	20,6	32,6	43,7
Juni	35,2	33,6	42,8	38,5
Juli	34,0	20,3	28,1	32,4
August	35,1	23,9	40,8	24,4
September	27,0	15,6	30,8	32,0
Oktober	21,5	10,4	15,0	32,4
November	15,2	18,9	10,8	—
Dezember	12,7	10,0	9,03	—

Tabelle 4
Abflußmengen des Walchenseekraftwerks zum Kochelsee

Monat	Mittel 1925—1948 m ³ /sec	1938 m ³ /sec	1939 m ³ /sec
Januar . . .	14,75	14,05	8,46
Februar . . .	12,96	18,35	6,27
März	12,08	16,37	8,97
April	10,68	18,67	11,35
Mai	11,08	9,55	13,52
Juni	14,50	14,75	22,21
Juli	17,58	23,70	22,25
August	19,31	25,32	22,93
September . .	18,37	25,09	12,81
Oktober . . .	16,76	20,09	18,38
November . .	16,60	17,22	20,35
Dezember . .	16,89	18,39	28,81

die Aufzeichnungen aus der Vorkriegszeit verloren gegangen. Nach frdl. Mitteilung der Bayernwerk-AG., Betriebsleitung Walchenseewerk, schwanken die Temperaturen zwischen 2 und 6°, als Extreme wurden 1° und 8° gemessen.

Nach der herrschenden Vorstellung sollen sich die Wassermassen eines Seezuflusses entsprechend ihrer durch die Temperatur bedingten Dichte in die Wassermassen eines Sees einschieben und so keinen besonderen Einfluß auf den Wärmehaushalt ausüben. Mit HALBFASS weist ULE (1926) die von BRÜCKNER aufgestellte Behauptung zurück, wonach Zufluß und Abfluß auf die Wärmeverhältnisse nicht nur der Oberflächen-, sondern auch des Tiefenwassers eines Sees einwirken.

Wie kann nun die Änderung in den t-Verhältnissen beim Kochelsee seit der Erbauung und Inbetriebnahme des Kraftwerks erklärt werden?

Man könnte zunächst daran denken, daß die Wassermassen, die aus dem Walchensee kommend durch die Turbinen in den Kochelsee laufen, relativ warm sind und dem See so Wärme zuführen. Nach dem Mittelwert von 15,13 m³/sec Zufluß in den Kochelsee beträgt die Jahresmenge des Zuflusses 477×10^6 m³, das ist das 2½ fache des Kochelseevolumens (183×10^6 m³, vgl. ZORELL, 1951). Nach den oben angeführten Angaben des Walchensee-Kraftwerks ist aber das Wasser, das durch die Turbinen läuft, relativ kühl, im Maximum 8°. Diese Temperatur reicht nicht aus, um das Wasser in den Schichten zwischen 10 und 30 m Tiefe zu erwärmen, und gerade diese Schichten sind nach den Beobachtungen von 1938/39 (und 1950/51) wärmer geworden.

Betrachtet man natürliche Zuflüsse in einen See, etwa die Tiroler Achen in den Chiemsee, oder die Loisach in den Kochelsee, oder die Ammer in den Ammersee, so hat man es meistens mit einem geschiefeführenden Zufluß zu tun, der vor seiner Mündung ein Delta aufbaut. Die Bewegungsenergie, mit der der schnelle Stromlauf in den See sich ergießt, wird rasch aufgebraucht. Die mitgeführten Stoffe setzen sich ab, je nach der Korngröße, und die Strömungsgeschwindigkeit nimmt schnell ab. Bei dem Zufluß des Kochelsees aus dem Kraftwerk handelt es sich dagegen um sehr reines Wasser, das sich mit großer Geschwindigkeit in das hier steil abfallende Kochel-

seebecken ergießt. Man kann annehmen, daß die Arbeit, die sonst der Wind für einen Wärmetransport nach der Tiefe zu leistet, hier durch den Zufluß aus dem Walchensee geleistet wird. Und gerade die relativ kühlen Wassermassen dürften ihre Wirkung in tieferen Schichten geltend machen, als es ein wärmerer Zustrom tun würde.

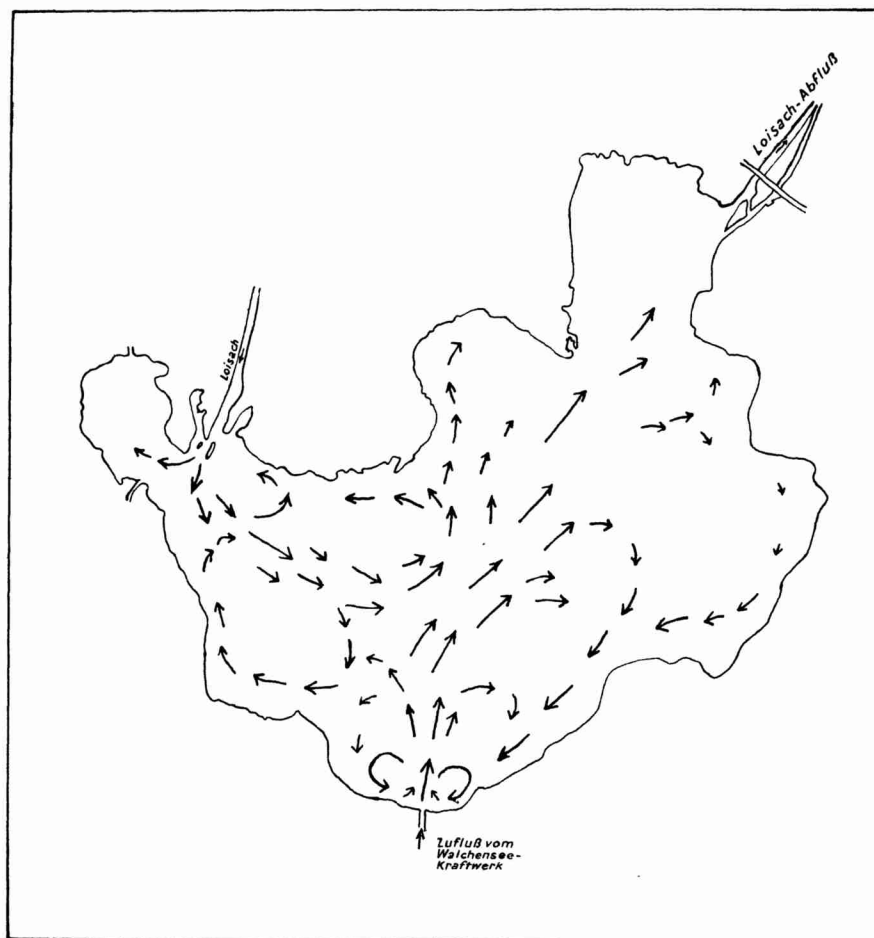


Fig. 5. Oberflächenströmungen im Kochelsee

Eine Stütze bekommt die vorstehend skizzierte Annahme durch die Tatsache, daß der Kochelsee weit mehr als andere Seen relativ starke Strömungen aufweist. Bei der Neuauslotung 1950 wurden die Lotpunkte durch eine zwischen einem Uferpunkt und einer im See verankerten Boje gespannte Leine festgelegt. In Seen gleicher Größenordnung liegen solche Leinen bei Windstille ganz gerade, was sich leicht durch die alle 50 m angebrachten Korkschwimmer, die die Leine an der Wasseroberfläche halten, feststellen läßt. Im Kochelsee zeigten die Leinen fast immer Ausbiegungen.

auch bei Windstille. Nach den darüber geführten Aufzeichnungen ist versucht worden, eine Karte der Oberflächenströme zu zeichnen, die in *Fig. 5* wiedergegeben ist.

Als Ergebnis läßt sich feststellen: der Kochelsee hat durch den Bau des Walchensee-Kraftwerkes eine bemerkenswerte Umwandlung seines Wärmehaushalts erfahren. Die oberflächennahen Schichten sind kühler geworden, während das Tiefenwasser, zumindest noch bis 30 m, sehr viel wärmer geworden ist. Diese Änderung wird im wesentlichen durch die Bewegungsenergie der aus dem Kraftwerk mit großer Geschwindigkeit in den See strömenden Wassermassen bewirkt.

Ob diese Erwärmung auf die Trophieverhältnisse des Sees von Einfluß sind, soll hier nicht erörtert werden. Durch die Abwässer der oberen Loisachorte kommen sicherlich viel Nährstoffe in den See. Der See gilt als ertragreichster unter den oberbayerischen (vgl. BOHMANN), was durch die Abwassermengen, die die Loisach mitführt, erklärt wird. Vielleicht wirkt zusätzlich als günstiger Faktor, daß dazu das reine, sauerstoffgesättigte Walchenseewasser tritt, das zugleich eine gute Durchmischung des ganzen Sees bewirkt.

Literatur

- 1903 v. AUFSSESS: Die Farbe der Seen. Diss. TH München.
 1905 BREU, G.: Der Kochelsee. Ber. Naturw. Verein zu Regensburg. X. 121—223.
 1907 WEDDERBURN, E. M.: The temperature of the fresh-water Lochs of Scotland. Trans. R. Soc. of Edinburgh. XLV.
 1909 BRÜCKNER, E.: Zur Thermik der Alpenseen und einiger Seen Nordeuropas. Geogr. Z. 15.
 1910 HALBFASS, W.: Zur Thermik der Alpenseen und einiger Seen Nordeuropas. Z. f. Gewässerkde. 9. 281—291.
 1912 BRÖNSTED, J. N. und C. WESENBERG-LUND: Chemisch-physikalische Untersuchungen der dänischen Gewässer. Int. Rev. d. ges. Hydrobiol. u. Hydrogr. IV. 251—290, 437—492.
 1916 BIRGE, E. A.: The work of the wind in warming a lake. Transl. Wisc. Ac. of Science, Arts and Letters. XVIII, Part II, 341—391.
 1926 ULE, W.: Physiogeographie des Süßwassers. Lpzg. u. Wien.
 1928 FELS, E.: Vermessung und Morphologie des Walchensee-Beckens. Arch. f. Hydrobiol. VI. 1—56.
 1928 KÜHL, FR.: Untersuchungen über Temperaturverhältnisse und Sichtigkeit im Walchensee und Kochelsee in den Jahren 1921—1923. Arch. f. Hydrobiol. VI. 57—95.
 1936 SCHUBERT, v.: Der jährliche Gang der Oberflächen-Wassertemperatur an den deutschen Feuerschiffen der Nordsee. Ann. Hydr. 64. 386—390.
 1937 WENDIN, B.: Über die Entstehung der typischen sommerlichen Temperaturlagerung der Binnenseen. Met. Z. 296—299.
 1939 BOHMANN, L. u. a.: Untersuchungen über die Ertragsfähigkeit einiger Seen Oberbayerns. Int. Rev. d. ges. Hydrobiol. u. Hydrogr. 39. 547—599.
 1941 HSI-MING KIANG: Über die Cyclomorphose der Daphnien einiger Voralpenseen. Int. Rev. d. ges. Hydrobiol. u. Hydrogr. 41. 345—408.
 1941 ZORELL, F.: Über die sommerliche Temperatur des Hypolimniums von Binnenseen. Met. Z. 442—425.
 1951 ZORELL, F.: Neuauslotungen oberbayerischer Seen. Mitt. Geogr. Ges. München. XXXVI. 197—219.