

## Tafel 7.3 Temperaturverhältnisse in Fließgewässern und Seen

### Einleitung

Der Ausbau der Wasserkraftwerke förderte die Installation von Limnigraphen und Wassermessstationen. Entsprechend begünstigte die Zukunftsperspektive in bezug auf thermische Kraftwerke – hauptsächlich mit Kernenergie – in den sechziger Jahren die Entwicklung eines Temperaturmessnetzes in den wichtigen Fließgewässern. Beim Aufbau des hydro-metrischen Netzes stand die Nutzung der Gewässer, beim Temperaturmessnetz dagegen deren Schutz im Vordergrund. Allfällige Temperaturerhöhungen konnten so überwacht und negative Auswirkungen auf das Gewässersystem möglichst verhindert werden. Der Aufbau des eidgenössischen Messnetzes durch die Landeshydrologie und -geologie (LHG) begann im Jahre 1963.

Wegen der zunehmenden Opposition der Bevölkerung gegen die Verwendung von nuklearen oder fossilen Brennstoffen zur Erzeugung von Energie wurde die Neuerrichtung von thermischen Kraftwerken immer unwahrscheinlicher. Die ursprüngliche Motivation für das Temperaturmessnetz war somit nicht mehr gegeben, was eine Redimensionierung desselben zur Folge hatte. Durch diese spezielle Entwicklung findet man – bezogen auf die Anzahl der Stationen – ein Optimum an vergleichbaren Messreihen in der Periode von 1978 bis 1984. Eine Auswertung dieser Daten bildete die Grundlage einer Mitteilung der LHG [2]. Sie zeigt einerseits, dass die langfristige Temperaturbeobachtung in Fließgewässern auch mit einem weniger dichten Messnetz möglich ist, und andererseits, dass interessante Informationen auch aus gelegentlichen, mehr oder weniger regelmässigen Einzelmessungen gewonnen werden können. Solch stichprobenartige Erhebungen werden zum Beispiel bei Routineuntersuchungen in Fließgewässern und in Seen durch die kantonalen Gewässerschutzfachstellen oder durch Hochschulen durchgeführt. Die Karte basiert somit auf einer Auswahl Stationen verschiedenartiger Messnetze, bei denen aus den Jahren 1978 bis 1984 regelmässige Messdaten vorhanden sind. Die Datenquellen sind in Tabelle 1 respektive in den Tabellen der Tafel 7.1 ersichtlich.

### Temperaturschwankungen

Die Temperaturen der Oberflächengewässer sind stark von der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung abhängig. Man beobachtet verschiedene, sich überlagernde Schwankungsarten:

(1) Die Tagesschwankungen besitzen bei sonnigem Wetter eine markante, meist sinusförmige Periodizität. Die Differenzen zwischen Tages- und Nachttemperaturen bewegen sich oftmals in Grössenordnungen von einigen Graden. Hinweise zu diesen Schwankungen in grösseren Flüssen geben die in [7] veröffentlichten NADUF-Graphiken (NADUF: Nationales Programm für die analytische Daueruntersuchung der schweizerischen Fließgewässer). Publikationen zu diesem Thema in kleineren Fließgewässern sind selten [4].

(2) Die saisonalen Schwankungen weisen, im Mittelland ausgeprägter als in den Alpen, eine deutliche Sinusform auf. Diese Form ist nicht erstaunlich, wenn man ihr die Variation der durch die astronomischen Vorgänge beeinflussten Sonneneinstrahlung auf die Erde zugrunde legt. Dieser Effekt ist so vorherrschend, dass bei der Modellierung der saisonalen Schwankungen in praktisch allen Arbeiten die beobachteten Werte durch eine nach der Methode der kleinsten Summenquadrate bestimmte Sinuskurve abgebildet werden. Die auf diese – nachfolgend noch genauer beschriebene – Weise erhaltenen Parameter bilden auch den Hauptinhalt der vorliegenden Tafel. Die in der Karte integrierten Diagramme zeigen diese Schwankungen in Fließgewässern an einigen ausgewählten Stationen. Die Auswahl erfolgte mit dem Ziel, Unterschiede zwischen alpinen und mittelländischen Gewässern und die Wirkung von Seen im Vergleich von Stationen am Zu- und Ausfluss hervorzuheben. Von den berücksichtigten Jahren zeigen die ersten beiden durchschnittliche, das letzte (1983) zeigt überdurchschnittliche Wassertemperaturen.

(3) Gelegentliche Schwankungen mit ungewissem Gang treten bei meteorologischen Veränderungen wie Kalt- oder Warmfronten, Nord- oder Südströmungen auf. Sie erscheinen deutlich als Abweichung vom sinusförmigen saisonalen Verlauf. Bringt man letzteren in Abzug, entsteht ein «entsaisonalisierter» Temperaturverlauf, bei welchem die unvorhersehbaren, unregelmässigen Einflüsse der Witterung deutlich werden. Vergleicht man diese entsaisonalisierten Zeitreihen [2], so stellt man synchrone Verläufe über grössere Gebiete hinweg fest.

(4) Die Langzeitschwankungen treten aufgrund klimatischer Veränderungen auf. Es sind dies auf eine längere Zeit ausgedehnte entsaisonalisierte Änderungen, analog zu den gelegentlichen Schwankungen. Man ist in jüngerer Zeit oft versucht, aus den Daten eine anthropogen verursachte Erwärmung herauszulesen. Je nach Beobachtungsperiode können in grösseren Flüssen deutliche Temperaturerhöhungen mit unklaren Ursachen festgestellt werden [5]. Das Klima auf der Erde ist seit jeher gewissen Fluktuationen unterworfen, sei dies seit Beginn menschlicher Aufzeichnungen oder in geologischen Zeiträumen [6]. Einige Beispiele längerer Zeitreihen sind in den Figuren 1 und 3 dargestellt. Man sieht bei den Fliessgewässern den Einfluss der Seen, speziell in der Erhöhung der jährlichen minimalen Tagesmittel (Fig. 1). Bei den Seen werden Zeitreihen der Stichprobenmessungen in 5 m bzw. 100 m Tiefe aufgezeigt (Fig. 3). Im Gegensatz zu den Fliessgewässern ist hier die Wassertiefe von wesentlicher Bedeutung.

### **Vertikale Schichtung in Seen**

Analog zu den in der Karte integrierten Darstellungen zur Saisonalität in Fliessgewässern sind in der Figur 2 die Daten der gleichen Periode (1981 bis 1983) von ausgewählten Seen zu finden. Die 3D-Graphiken zeigen deutliche Unterschiede beim saisonalen Temperaturverlauf in verschiedenen Tiefen. In jedem See entsteht im Sommer aus physikalischen Gründen (temperaturabhängige Dichte des Wassers) eine deutliche Schichtung (Sommerstagnation). Zuoberst befindet sich die erwärmte Wasserschicht, das Epilimnion. Darunter folgt mit einem grossen Temperaturgradienten die Sprungschicht (Metalimnion). Die das ganze Jahr über mehr oder weniger gleich kalte, tiefe Wasserschicht nennt man Hypolimnion. Im Herbst / Winter tragen Winde dazu bei, die abkühlenden oberen Wasserschichten immer weiter nach unten zu durchmischen, so dass meist eine Zirkulationsphase entsteht, bei welcher im ganzen See die gleichen Temperaturen vorherrschen. Im Winter kann dann – je nach Witterung, Wassertiefe und geographischer Lage – erneut eine Schichtung, nun aber mit den weniger als 4 °C kalten Wassermassen an der Oberfläche, zum Teil mit Eisbildung, entstehen (Winterstagnation). Im Frühling findet meist eine Zirkulationsphase statt, bevor die Temperaturen in den obersten Schichten wieder ansteigen. Je nach Tiefe und Exponierung eines Sees entwickelt sich die Zirkulationsphase zwischen Herbst und Frühling nicht in jedem Jahr.

Für die in der Karte und in der Tabelle 2 präsentierten Ergebnisse der Modellrechnungen wurden nur Daten aus dem oberen Teil des Epilimnions, nämlich die Mittelwerte der Temperaturen zwischen der Oberfläche und einer Wassertiefe von 10 m berücksichtigt.

### **Das Sinuskurvenmodell**

Der saisonale Verlauf der Temperaturen in Fliessgewässern und in den oberen Schichten von Seen zeigt eine deutliche Sinuskurve. Es gilt nun, die Parameter für die den Messwerten optimal angenäherte Schwingung nach der Methode der kleinsten Summenquadrate zu finden. Man kann in diesem Fall nicht direkt von einer harmonischen Analyse oder einer Fourier-Transformation sprechen, da nur die Parameter der Sinuskurve berechnet werden sollen. Die hier angewandte, abweichende Berechnungsmethode wurde bisher nur in wenigen Arbeiten beschrieben [1,2,3]. Sie basiert darauf, durch eine trigonometrische Transformation die Sinusfunktion zu linearisieren. Danach werden die Parameter mit Hilfe einer multivariaten Regressionsanalyse bestimmt. Die Parameter der Sinuskurve sind der Mittelwert, die Halbamplitude sowie der Phasenwinkel. Letzterer ist in unserem Fall definiert als derjenige Tag im Jahr, an welchem die Sinuskurve das Minimum durchläuft. Um aus den Messdaten die Parameter zu bestimmen, wurde ein Programm,

das bei der LHG verfügbar ist, auf einem Personal Computer eingesetzt.

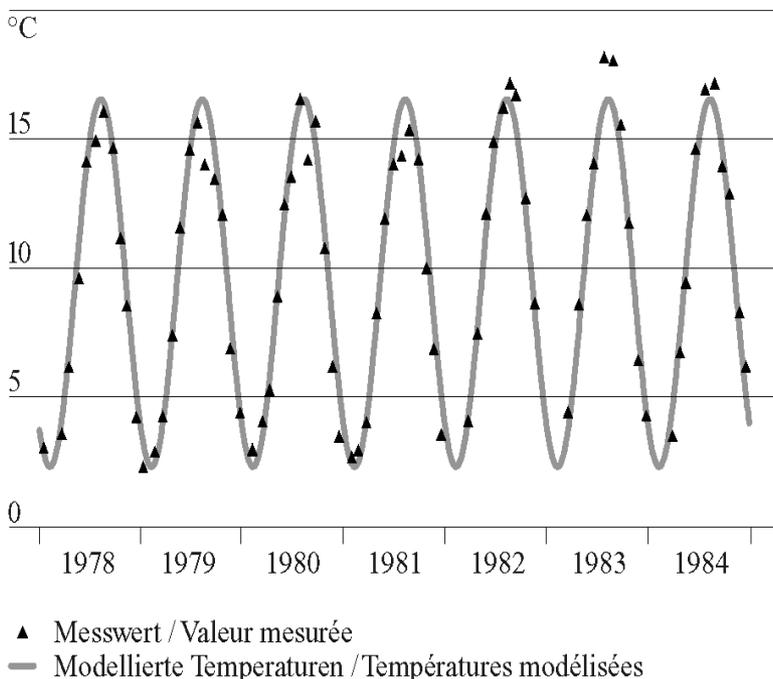
Die Figur 4 zeigt eine Sinuskurve, die mit den gemessenen Daten des Pfäffikersees aus den Jahren 1978 bis 1984 berechnet wurde. Die Sinuskurve deutet an, dass in den Wintern der Jahre 1982 bis 1984 die minimalen Temperaturen möglicherweise nicht erfasst wurden.

Das Sinuskurvenmodell erlaubt es, die mittlere zu erwartende Temperatur an irgendeinem Tag im Jahr zu berechnen. Die dazu benötigte Formel lautet:

$$T_{(j)} = A \cdot \sin[(J - J_m) \cdot 360^\circ/365.242 - 90^\circ] + M$$

Dabei bedeuten  $T_{(j)}$  die zu erwartende Temperatur ( $^\circ\text{C}$ ) am Tage  $j$ ,  $A$  die Halbamplitude,  $J$  die Nummer des Tages  $j$  innerhalb des Kalenderjahres,  $J_m$  der Tag mit dem Minimum und  $M$  die Jahresmitteltemperatur. Die zur Berechnung nötigen Informationen finden sich in der Karte und in der Tabelle 2. Um die Temperaturen in einem Fließgewässer zwischen zwei Stationen abzuschätzen, können die Parameter als Annäherung interpoliert werden. Bei Fließgewässern ohne Temperaturmessstellen sind Inter- oder Extrapolationen kaum durchführbar, müssen doch noch andere Faktoren wie die Höhe des Einzugsgebietes oder die Distanz zur Quelle berücksichtigt werden.

Fig. 4  
**Gemessene und modellierte Temperaturen im Pfäffikersee**  
**Températures mesurées et modélisées dans le lac de Pfäffikon**



## Literatur

- [1] **Ball, J. A. (1978):** Algorithms for RPN calculators. New York.
- [2] **de Montmollin, F., Parodi, A. (1990):** Température des cours d'eau suisses. Communication du Service hydrologique et géologique national No 12, Berne.
- [3] **Güttinger, H. (1980):** Die Anwendung einer Fourier-Transformation zum Ausgleich von Saisonschwankungen bei der physikalisch-chemischen Charakterisierung von Fließgewässern In: Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie 42/2:309–321, Basel.
- [4] **Jakob, A., Tschumi, P.A. (1988):** Tagesschwankungen chemischer und physikalischer Faktoren in einem Fließgewässer (Schüss, Berner Jura). In: Archiv für Hydrobiologie 113:607–620, Stuttgart.
- [5] **Jakob, A. et al. (1995):** NADUF – Observation à long terme de l'état physico-chimique des eaux. In: Gaz-Eaux-Eaux usées 5/95:378–393, Zurich. Deutsche Fassung in: Gas-Wasser-Abwasser 3/94:171–186, Zürich.
- [6] **Le Roy Ladurie, E. (1967):** Histoire du climat depuis l'an mil. Paris.
- [7] **Service hydrologique et géologique national (dès 1972):** Annuaire hydrologique de la Suisse. Berne.