



Bericht über die Messung in den Stauseen: Lac des Dix, Lac de Mauvoisin und Lac d'Emosson

M. Frey, L. Moosmann und W. Meier

Bericht über die Messung in den Stauseen: Lac de Dix, Lac de Mauvoisin und Lac d’Emosson

M. Frey, L. Moosmann und W. Meier

1. Dezember 2003

Zusammenfassung

Die Temperatur der Rhone wird durch die Temperaturen in den Kraftwerksauslässen und damit durch die Temperaturen in den Stauseen mitbestimmt. Im Sommer 2002 und 2003 wurden mit Hilfe von CTD (Conductivity Temperature Depth)-Sonden die Leitfähigkeit, Temperatur und zum Teil Lichttransmission in den Stauseen Lac des Dix, Lac de Mauvoisin und Lac d’Emosson gemessen. Aus Temperatur und Leitfähigkeit wurden Dichte und Wärmeinhalt berechnet.

Im Lac des Dix und im Lac de Mauvoisin lagen die Temperaturen im Bereich von 4.5 bis 6 °C und waren unterhalb einer wenige Meter tiefen Oberflächenschicht annähernd konstant. Im Lac d’Emosson bildete sich eine bis zu 20 m tiefe Oberflächenschicht mit Temperaturen über 12 °C; darunter ging die Temperatur auf ca. 4 °C zurück.

Das Einschichten von Wassermassen mit unterschiedlicher Temperatur und Zusammensetzung lässt sich aus den Temperatur- und Leitfähigkeitsprofilen erkennen. Dieses Phänomen trat im Lac de Mauvoisin sowie in einem der Profile im Lac des Dix auf.

Schliesslich wurde der Wärmeinhalt bestimmt, d.h. jene Energie, welche seit der Durchmischung im Frühjahr pro m^2 durch Zuflüsse und Sonneneinstrahlung in den See gelangte. Dieser liegt beim Lac de Mauvoisin im Spätsommer im Bereich von 2000 MJ/ m^2 . Bei den anderen beiden Seen ist er um 40 bis 90 % geringer, da diese aufgrund der hohen Trübe weniger Sonnenenergie aufnehmen.

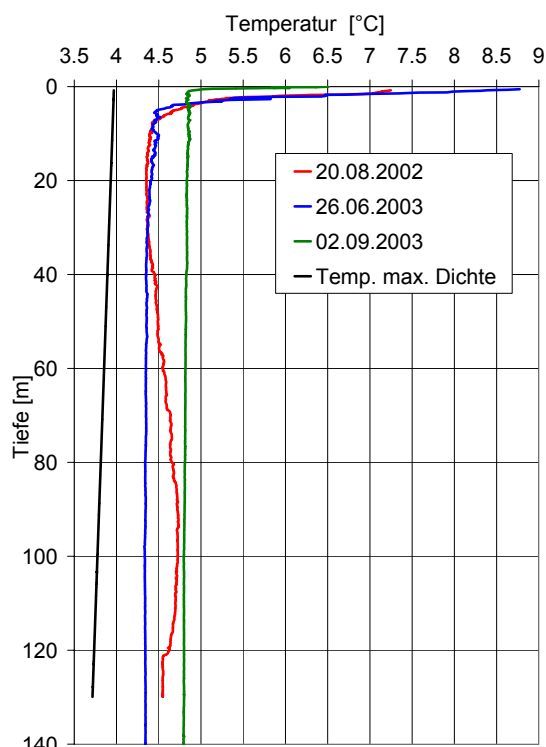


Abbildung 1: Profile der gemessenen Temperatur im Lac des Dix und Temperatur maximaler Dichte (siehe Gleichung 7).

1 Lac des Dix

1.1 Messung

Die Profilaufnahmen im Lac des Dix (Staumauer Grande Dixence) fanden am 20. August 2002, am 26. Juni 2003 und am 2. September 2003 statt.

Die Messungen wurden mit der CTD-Sonde SBE 19 durchgeführt. Diese wurde von der Mitte der Staumauer an einem Kabel in die Tiefe gelassen. Die Länge des Kabels (160 m) reichte nicht aus, um an den Grund des Stausees (285 m) zu gelangen.

Die Sonde SBE 19 misst die Parameter Druck, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt und Licht-Transmission bei 660 nm.

Die Tiefe wird indirekt über den Druck berechnet. Der Druck nimmt mit der Tiefe linear um 0.0981 bar pro Meter zu.

Im Jahr 2003 wurden zusätzlich die Schwebstoffkonzentrationen aus oberflächennahen Wasserpro-

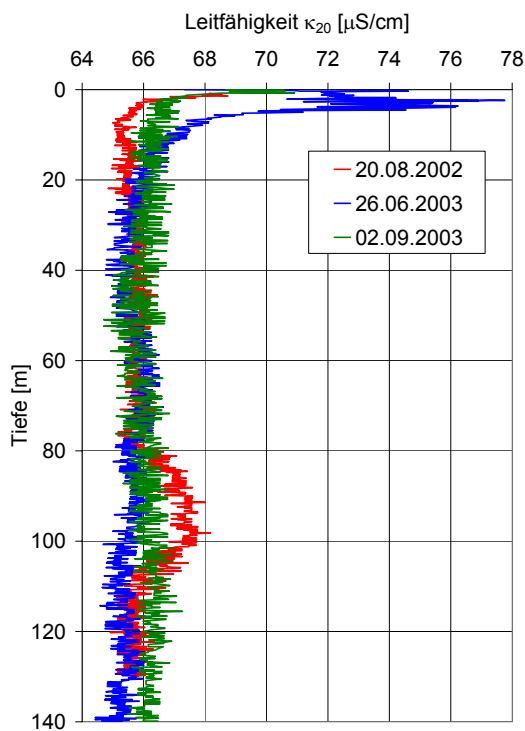


Abbildung 2: Tiefenprofile der Leitfähigkeit κ_{20} bei 20° Celsius im Lac des Dix.

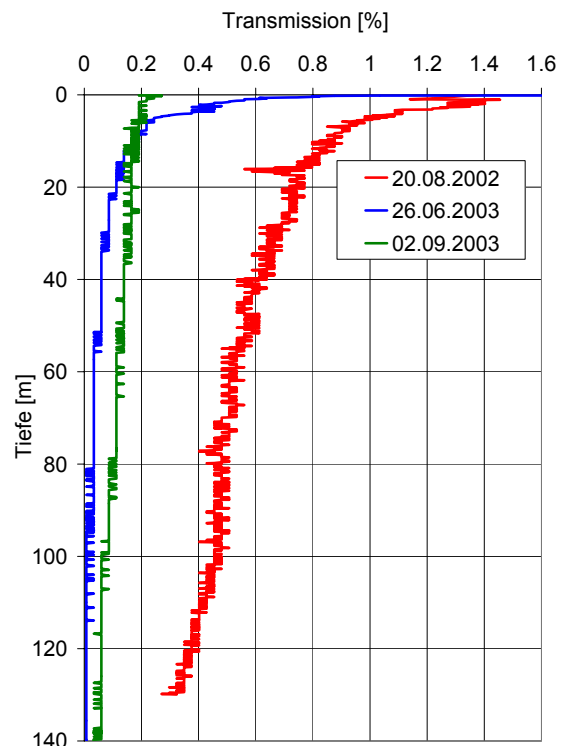


Abbildung 3: Tiefenprofile der Licht-Transmission im Lac des Dix.

ben (1 m Tiefe) bestimmt. Die Schwebstoffkonzentration betrug am 26. Juni 2003 74.0 mgL^{-1} , am 2. September 2003 85.3 mgL^{-1} .

1.2 Profile

Temperatur

Die gemessenen Temperaturprofile sind in Abbildung 1 dargestellt. Am 20. August 2002 und am 26. Juni 2003 nahm die Temperatur in den obersten 5 m nach oben hin zu, während die Temperatur im dritten Profil (2. September 2003) nur innerhalb des obersten Meters zunahm.

Im Profil vom 20. August 2002 nahm die Temperatur nicht mit der Tiefe kontinuierlich ab, sondern stieg unterhalb von 20 Metern bis in die Tiefe von 90 Metern wieder leicht an. Diese Zunahme beträgt $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$. Die beiden Profile des Jahres 2003 zeigen hingegen eine annähernd konstante Temperatur unterhalb von 20 m Tiefe.

Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit hängt von der Konzentration der gelösten Salze und der Temperatur (T) ab. Um ein Leitfähigkeitsprofil zu erstellen, werden die gemessenen Leitfähigkeitswerte (κ_T) auf eine Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (κ_{20}) umgerechnet (Formel 1).

$$\begin{aligned} \kappa_{20} = & \kappa_T \cdot (1.72118 - 0.0541369 \cdot T \\ & + 1.14842 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \\ & - 1.222651 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) \end{aligned} \quad (1)$$

[BA75]

Diese Umrechnung gilt für Kalziumbicarbonathaltiges Wasser, wie es in der Schweiz üblich ist.

Der Verlauf der Leitfähigkeit in Abbildung 2 ist ähnlich wie der Temperaturverlauf (Abbildung 1). In allen drei Profilen sind die Werte unterhalb von 10 m annähernd konstant. Die Schwankungen in der Graphik liegen in der Größenordnung der Auflösung des Messgeräts. Die gemessene Leitfähigkeit entspricht einem Ionengehalt von ca. 60 mgL^{-1} .

Sauerstoff

Da das Sauerstoffmessgerät für diese Messung nicht geeicht wurde, können darüber nur qualitative Aussagen gemacht werden. Nach den gemessenen Werten befindet sich die Sauerstoffkonzentration im See im Bereich der Sättigungskonzentration. (Die Sättigungskonzentration beträgt in der Höhe des Stausees bei einer Wassertemperatur von 7 °C an der Oberfläche ungefähr 9 mg/l [MH79].)

Licht-Transmission

Die Licht-Transmission ist definiert als das Verhältnis der nach einer bestimmten Distanz (10 cm) gemessenen Lichtintensität zur ursprünglich emittierten Lichtintensität bei 660 nm. Die Licht-Transmission ist damit ein Mass für die Trübung eines Wasserkörpers.

Die gemessenen Licht-Transmissionen sind in allen drei Profilen sehr klein, wobei die etwas grössere Transmission im August 2002 auf eine geringere Trübung hinweist (Abbildung 3).

Dichte

Um die Schichtung des Stausees zu analysieren, wird das Dichteprofil berechnet. Die Dichte von Wasser ist abhängig von der Temperatur, dem Druck und der chemischen Zusammensetzung.

Um die Zusammensetzung des Wasser abzuschätzen, wird die Salinität verwendet. Die Salinität ist definiert als:

$$S = \frac{\text{Masse aller Salze im Wasservolumen}}{\text{Totale Masse des Wasservolumens}} \cdot 1000 \quad (2)$$

Wenn man die Ionenzusammensetzung und den Partikelgehalt des Wassers kennt, kann man den Salzgehalt durch die Leitfähigkeit bestimmen (wiederum unter der Annahme, dass der Hauptanteil der Salinität vom Kalziumbicarbonat stammt. Die Partikel werden hier vernachlässigt).

Der Zusammenhang zwischen der Dichte und dem Salzgehalt, der Temperatur und dem Druck kann bei Seen mit der empirischen Formel 3 berechnet werden [CM86]. Die Temperatur T wird dabei in °C, der Druck P in bar angegeben.

$$\rho^P = \rho^0 \cdot \left(1 - \frac{P}{K}\right)^{-1} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho^0 = & 0.9998395 + 6.7914 \cdot 10^{-5} \cdot T \\ & - 9.0894 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 1.0171 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 \\ & - 1.2846 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 + 1.1592 \cdot 10^{-11} \cdot T^5 \\ & - 5.0125 \cdot 10^{-14} \cdot T^6 + (8.181 \cdot 10^{-4} \\ & - 3.85 \cdot 10^{-6} \cdot T^5 + 4.96 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) \\ & \cdot S \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} K = & 19652.17 + 148.113 \cdot T - 2.293 \cdot T^2 \\ & + 1.256 \cdot 10^{-2} \cdot T^3 - 4.18 \cdot 10^{-5} \cdot T^4 \\ & + (3.2726 - 2.147 \cdot 10^{-4} \cdot T \\ & + 1.128 \cdot 10^{-4} \cdot T^2) \cdot P + (53.238 \\ & - 0.313 \cdot T + 5.728 \cdot 10^3 \cdot P) \cdot S \end{aligned} \quad (5)$$

Das errechnete Profil vom 20. August 2002 ist in der Abbildung 4 dargestellt. Der Verlauf der Profile für das Jahr 2003 ist annähernd identisch. Als Vergleich wird die maximale Dichte bei gegebenem Druck und Salinität in die Grafik aufgenommen. Für die maximale Dichte in Seen gilt die empirische Formel 6 [CM86].

$$\begin{aligned} \rho_{max} = & 0.9999720 + 4.94686 \cdot 10^{-5} \cdot P \\ & - 2.0918 \cdot 10^{-9} \cdot P^2 + (8.0357 \cdot 10^{-4} \\ & - 1 \cdot 10^{-7} \cdot P) \cdot S \end{aligned} \quad (6)$$

Beim Vergleich sieht man, dass auch in grosser Tiefe die maximale Dichte nicht erreicht wird.

Bei welcher Temperatur die maximale Dichte erreicht würde, ist in der Abbildung 1 zu sehen (Temperatur maximaler Dichte). Gleichung 7 ist die dazugehörige empirische Formel [CM86]. Die Temperatur maximaler Dichte wird bei der Mischung in der ganzen Wassersäule erreicht.

$$\begin{aligned} T_{mD} = & 3.9839 + 1.9911 \cdot 10^{-2} \cdot P \\ & - 5.822 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 - (0.2219 \\ & + 1.106 \cdot 10^{-4} \cdot P) \cdot S \end{aligned} \quad (7)$$

Das Dichteprofil in der Abbildung 4 ist stark vom hydrostatischen Druck geprägt, das heisst durch die Tiefe bestimmt. Um die Dichte von Wasser aus verschiedener Tiefe vergleichen zu können, kann man die Dichte ohne Druckeinfluss darstellen (Abbildung 5), dazu wird die potentielle Dichte ρ^0 (Formel 4) verwendet.

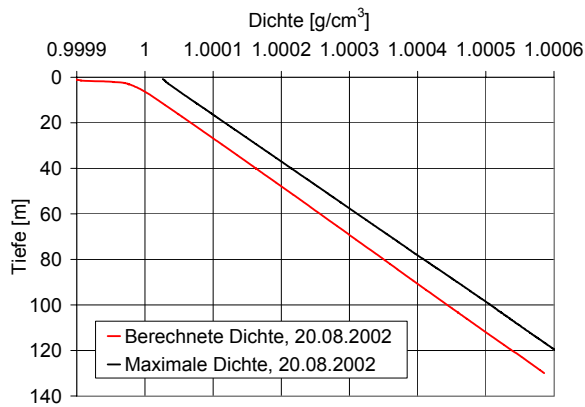


Abbildung 4: Berechnete in-situ-Dichte (Gleichung 3; einschliesslich hydrostatischer Druck) und maximale Dichte (Gleichung 6) bei gegebener Salinität im Lac des Dix am 20. August 2002.

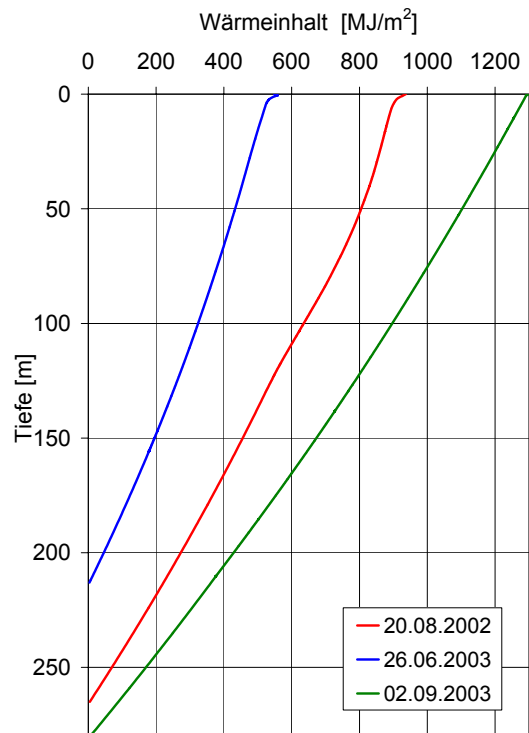


Abbildung 6: Nach oben integrierter Wärmeinhalt eines Quadratmeters bei der Mauer des Lac des Dix. Aufgrund des unterschiedlichen Füllstands an den drei Probenahmetagen beginnen die Profile in verschiedenen Tiefen.

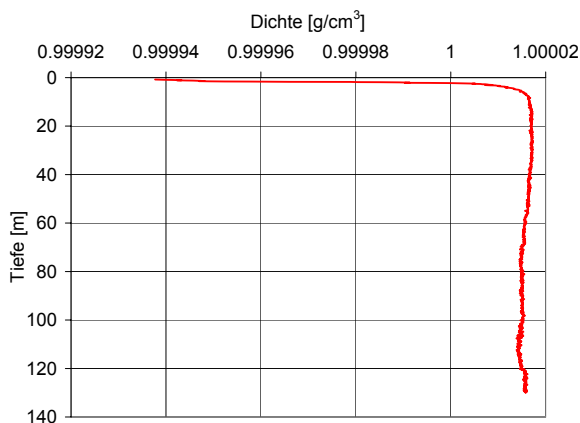


Abbildung 5: Berechnete Dichte ohne Berücksichtigung des hydrostatischen Drucks im Lac des Dix am 20. August 2002.

Die potentielle Dichte ist unterhalb von 10 Metern sehr ausgeglichen. Der See weist also keine grosse Schichtung auf.

In dieser Darstellung ist - wie im Temperaturprofil in Abbildung 1 - wieder die Einschichtung einer wärmeren Wassermasse unterhalb 20 m Tiefe zu erkennen. Die Dichte ist dort etwas kleiner, verursacht durch die etwas höhere Temperatur in dieser Schicht (Oberhalb der Temperatur der maximalen Dichte nimmt die Dichte mit zunehmender Temperatur ab.) Durch die erhöhte Salinität in dieser Schicht wird ein Teil der Dichtedifferenz wieder ausgeglichen (Die Dichte nimmt mit zunehmender Salinität zu.)

Wärmeinhalt

Die Wärmezunahme eines Sees seit der letzten Mischung lässt sich aus der Differenz zwischen der gemessenen Temperatur und der Temperatur maximaler Dichte und aus dem Seeprofil bestimmen (Formel 8).

$$E [J] = \int_{0m}^{Seetiefe} (T - T_{mD}) [^{\circ}C] \cdot \underbrace{4180 \frac{J}{kg^{\circ}C}}_{\text{Wärmekapazität}} \cdot \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot \underbrace{A(z) [m^2]}_{\text{Fläche in der Tiefe } z} \cdot dz [m] \quad (8)$$

Da bei der Messung das Profil nur an einer Stelle aufgenommen wurde und das Profil des Stausees nicht bekannt war, wurde der Wärmeinhalt des Lac des Dix für einen Quadratmeter bei der Staumauer bestimmt. Dabei wurde angenommen, dass die Temperatur von der gemessenen in 130 m Tiefe bis zum Seegrund in 265 m konstant bleibt. In der Abbildung 6 ist der entsprechende Wärmeinhalt eines Quadratmeters von unten nach oben integriert dargestellt. Der Wärmeinhalt eines Quadratmeters an der Staumauer betrug im August 2002 etwas mehr als 900 Megajoule. Im Juni 2003 war der Wärmeinhalt aufgrund der geringeren Füllhöhe und der niedrigeren Temperaturen kleiner, im September 2003 entsprechend grösser.

1.3 Interpretation

Temperatur- und Wärmehaushalt des Stausees

Die Temperaturen im Lac des Dix sind ziemlich tief. Der Grund liegt einerseits darin, dass das Wasser aus den Einzugsgebieten des Stausees sehr kalt (Gletscherwasser) ist und andererseits der Stausee auf einer grossen Höhe (die Krone ist 2365 M. ü. M.) liegt und dort die Lufttemperaturen nachts auch im Sommer tief bleiben.

Durch die Sonneneinstrahlung wird das Wasser erwärmt. Aufgrund der grossen Trübung im Stausee kann das Sonnenlicht jedoch nicht tief in den See eindringen. Das Sonnenlicht erwärmt so nur eine dünne oberste Schicht. Dieser Zusammenhang kann den im Temperaturprofil (Abbildung 1) dargestellten raschen Temperaturabfall in den ersten

Metern erklären. In der Nacht findet eine Auskühlung des Stausees statt und der grösste Teil der am Tag aufgenommenen Wärme geht wieder verloren.

Die Trübung in einem Gewässer kann auf sehr unterschiedliche Arten entstehen. Beim Wasser des Lac des Dix spielen wohl Stein- und Bodenpartikel aus Verwitterungsprozessen im Einzugsgebiet eine grosse Rolle. Hauptsächlich handelt es sich im Lac des Dix um Gletscherabrieb.

Die gemessenen Temperaturprofile (Abbildung 1) liegen um 0.5 bis 1.0 °C über der Temperatur maximaler Dichte, welche während der Mischung vorliegt. Bei vollem Wasserstand würde sich die Wassersäule im Lac des Dix wohl zweimal jährlich mischen (Frühling und Herbst). Bei einem Stausee muss man aber auch den Füllstand berücksichtigen. Die Stauseen sind im Frühling meistens (fast) leer, so dass die Temperatur im Stausee vorwiegend durch die Zuflüsse selbst bestimmt wird.

Einschichtung

Die Ursache für die Wasserschicht mit anderen Eigenschaften am 20. August 2002 kann ein Zufluss sein, der sich in dieser Tiefe eingeschichtet hat. (Der Stausee hat seitliche Zuflüsse, welche in der Nähe der Staumauer einmünden.)

Einen Einfluss auf die Einschichtung hat wohl auch die alte Staumauer, die beim Bau der neuen Mauer in der Mitte des Sees belassen wurde. Die Krone der alten Staumauer befindet sich 123.5 Meter unter der neuen Krone. Beim vorhandenen Seespiegel bedeutet das, dass die alte Mauer bei einer Wassertiefe von etwa 100 Metern liegt, also im Bereich der Einschichtung, die in Abbildung 2 zu erkennen ist. Es scheint wahrscheinlich, dass die alte Staumauer für die Struktur in 80-100 Metern verantwortlich ist. Eine genaue Erklärung ist aber ohne weitere Untersuchung nicht möglich.

Die negative Einschichtung bei der Dichte (Abbildung 5) ist wahrscheinlich in der Realität nicht vorhanden. Da die Differenzen bei der Dichte so gering sind, werden die Faktoren Salinität und Partikeldichte für die Feinstruktur entscheidend. Die Einbuchtung kommt wohl nur zustande, weil bei der Dichtebestimmung die Partikel nicht berücksichtigt wurden. Der Anteil der Partikel ist, wie bei der Transmission gesehen, gross. Durch Einbezug der Partikel und der genauen Salinität würde die Instabilität in der Dichte wohl wieder ausgeglichen.

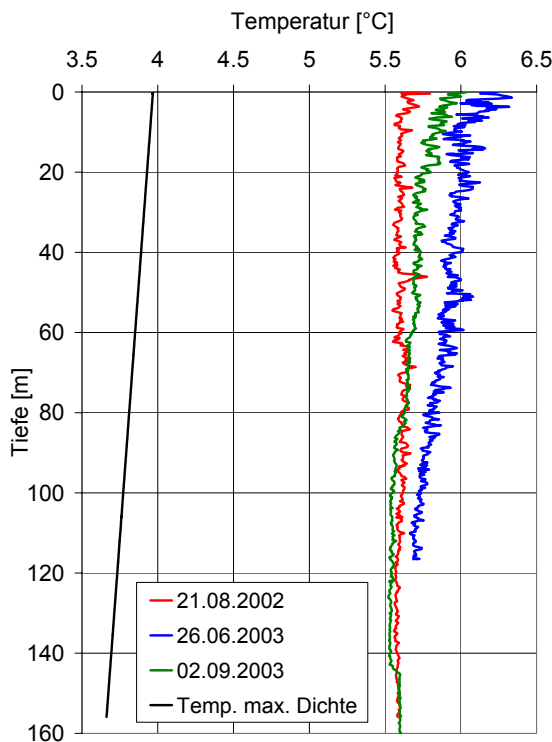


Abbildung 7: Profile der gemessenen Temperaturen und Profil der Temperatur maximaler Dichte im Lac de Mauvoisin.

In den Profilen des Jahres 2003 geben weder der Temperatur- noch der Leitfähigkeitsverlauf einen Hinweis auf eine Einschichtung.

2 Lac de Mauvoisin

2.1 Messung

Die Profilaufnahmen vom Lac de Mauvoisin fanden am 21. August 2002, am 26. Juni 2003 und am 2. September 2003 statt.

Die Messung wurde mit der CTD-Sonde XR-420 durchgeführt. Die Sonde wurde von der Mitte der Staumauer an einem Kabel in die Tiefe gelassen. Die Länge des Kabels (160 m) reichte nicht aus, um an den Grund des Stausees (250 Meter) zu gelangen.

Die Sonde XR-420 misst die Parameter: Druck, Temperatur und Leitfähigkeit.

Die Tiefe wird indirekt über den Druck be-

stimmt. Der Druck nimmt in die Tiefe linear um 0.0981 bar pro Meter zu.

Im Jahr 2003 wurden zusätzlich die Schwebstoffkonzentrationen aus oberflächennahen Wasserproben (1 m Tiefe) bestimmt. Die Schwebstoffkonzentration betrug am 26. Juni 2003 73.2 mgL^{-1} , am 2. September 2003 58.8 mgL^{-1} .

2.2 Profile

2.2.1 Temperatur

Das gemessene Temperaturprofil ist in der Abbildung 7 dargestellt. An allen Messtagen war die Temperatur in der gesamten Wassersäule annähernd konstant.

Um den Verlauf der Temperatur einordnen zu können, wurde in die Abbildung auch die Kurve der Temperatur der maximalen Dichte eingezeichnet (berechnet aus der Formel 7). In allen drei Profilen liegt die gemessene Temperatur um $>1.5 \text{ °C}$ über der Temperatur der maximalen Dichte.

Leitfähigkeit

Um ein Leitfähigkeitsprofil zu erstellen, wurden die gemessenen Leitfähigkeitswerte mit der Formel 1 auf die Referenztemperatur 20 °C (κ_{20}) umgerechnet. (Abbildung 8).

Die aufgezeichnete Leitfähigkeit variiert zwischen den drei Probenahmetagen um bis zu $12 \mu\text{Scm}^{-1}$, innerhalb der Profile ist sie aber annähernd konstant.

Dichte

Das Dichteprofil wurden mit Hilfe der empirischen Formeln 3 bis 6 berechnet. Die chemische Zusammensetzung wurde auch beim Lac de Mauvoisin grob abgeschätzt. Die Resultate sind in den Abbildungen 9 und 10 grafisch dargestellt.

Die Dichte ist an der Oberfläche am kleinsten. Mit zunehmender Tiefe nimmt sie konstant zu, wobei der Gradient parallel zur maximalen Dichte verläuft. Ohne hydrostatischen Druck (potentielle Dichte) verläuft das Profil über die ganze Wassersäule mehr oder weniger konstant.

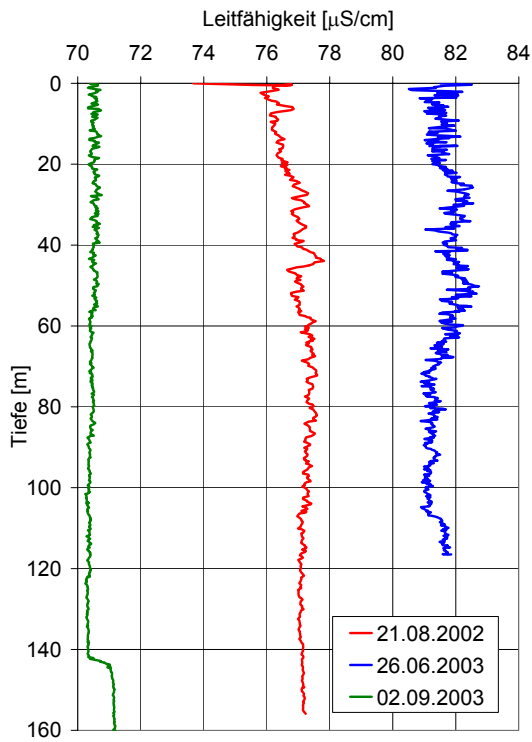


Abbildung 8: Tiefenprofile der Leitfähigkeit κ_{20} im Lac de Mauvoisin.

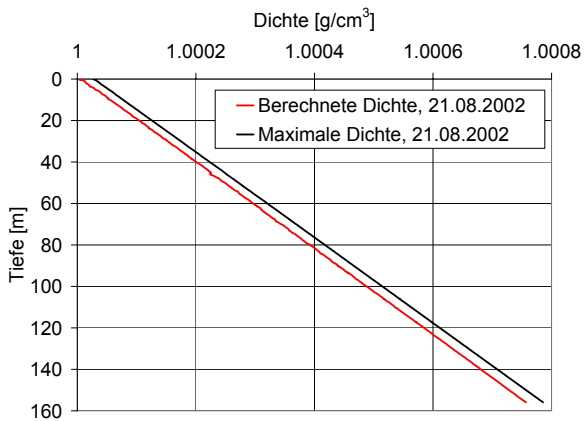


Abbildung 9: Berechnete in-situ-Dichte (inkl. hydrostatischer Druck) und maximale Dichte bei gegebener Salinität im Lac de Mauvoisin am 21. August 2002.

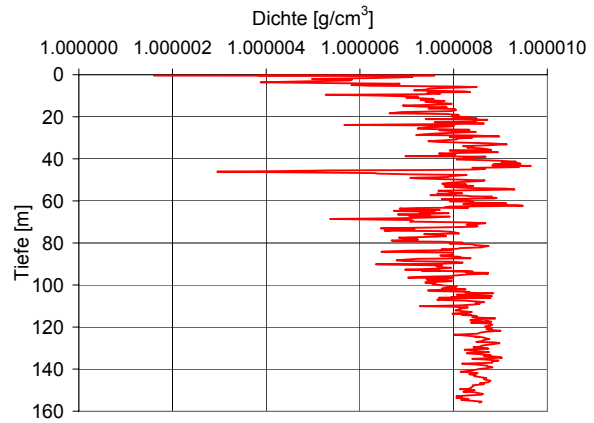


Abbildung 10: Berechnete Dichte ohne Berücksichtigung des hydrostatischen Drucks im Lac de Mauvoisin am 21. August 2002.

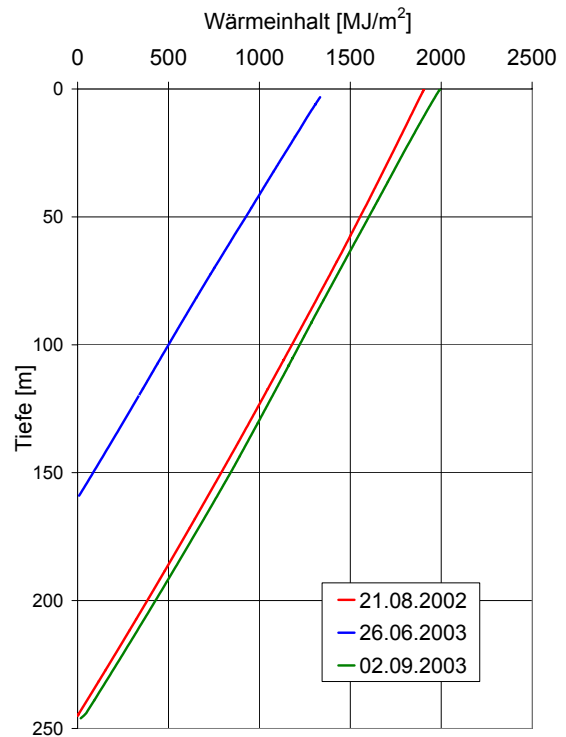


Abbildung 11: Nach oben integrierter Wärmeinhalt über einen Quadratmeter Seefläche bei der Mauer des Lac de Mauvoisin.

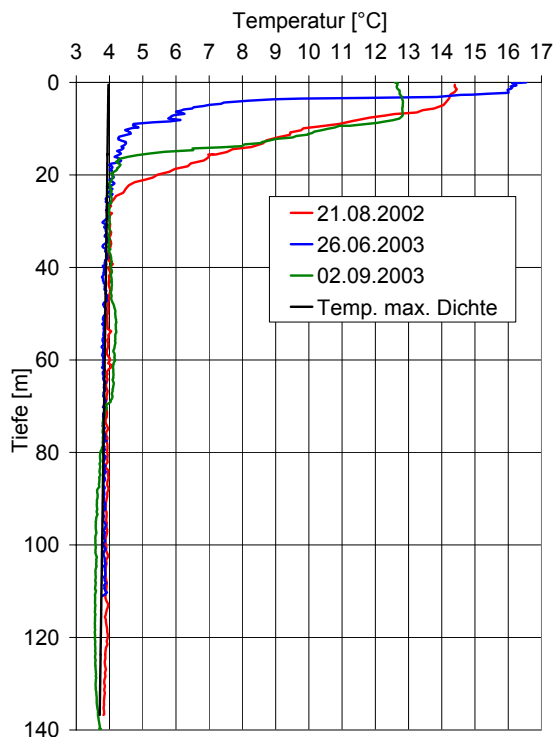


Abbildung 12: Profile der gemessenen Temperatur und Profil der Temperatur maximaler Dichte im Lac d'Emosson.

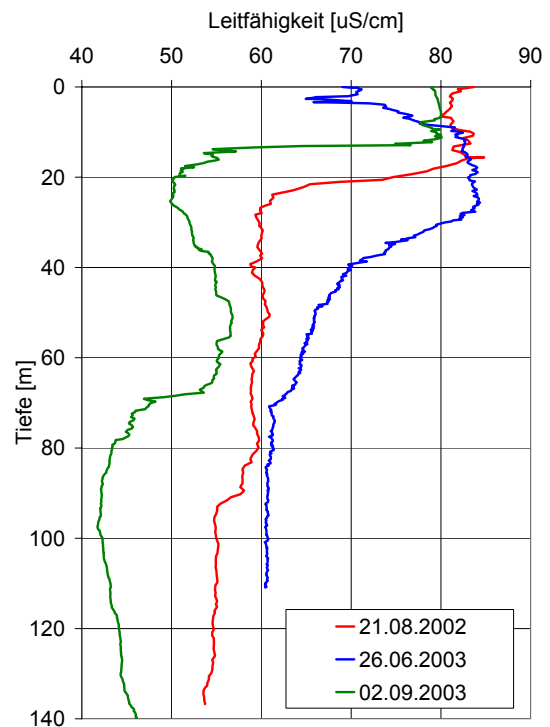


Abbildung 13: Tiefenprofile der Leitfähigkeit κ_{20} bei 20° Celsius im Lac d'Emosson.

Wärmeinhalt

Für den Wärmeinhalt wurde das Temperaturprofil wieder auf den Grund verlängert. Die Wärmezunahme seit der letzten Mischung wurde mit der Formel 8 berechnet.

Das Resultat ist in der Abbildung 11 dargestellt. Wegen der konstanten Temperatur nimmt auch der Wärmeinhalt des Stausees nach oben annähernd konstant zu. Im Juni 2003 war der Wärmeinhalt aufgrund der geringeren Füllhöhe kleiner als an den beiden anderen Messtagen.

2.3 Interpretation

Die tiefen Temperaturen an der Oberfläche sind wiederum auf die hohe Trübung des Wassers zurückzuführen. Die Sonneneinstrahlung dringt auch an einem schönen Tag nicht weit in den See und erwärmt so nur eine dünne Schicht, welche dann in der Nacht wieder abgekühlt wird.

Die gemessene Temperatur liegt in allen Profilen ca. 2 °C über der Temperatur der maximalen Dichte. Die konstante Temperatur über das ganze Profil deutet darauf hin, dass während der Mischungsphase nur sehr wenig Wasser im Stausee war und der See danach durch die Zuflüsse mit 5.5-gradigem Wasser wieder aufgefüllt wurde.

3 Lac d'Emosson

3.1 Messung

Die Profilaufnahmen vom Lac d'Emosson fanden am 21. August 2002, am 26. Juni 2003 und am 2. September 2003 statt.

Die Messung wurde mit der CTD-Sonde XR-420 durchgeführt. Die Sonde wurde von der Mitte der Staumauer an einem Kabel in die Tiefe gelassen. Die Länge des Kabels (160 m) reichte nicht aus, um an den Grund des Stausees (180 Meter) zu gelangen.

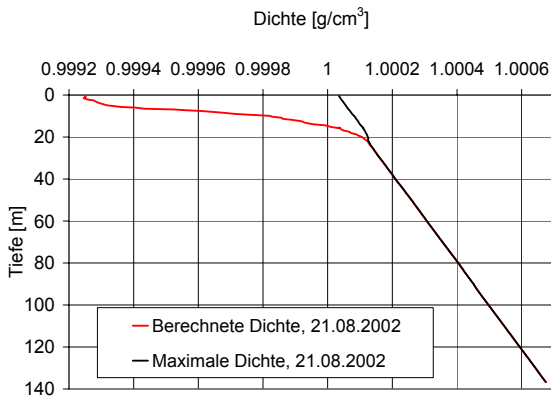


Abbildung 14: Berechnete Dichte und maximale Dichte bei gegebener Salinität im Lac d’Emosson am 21. August 2002.

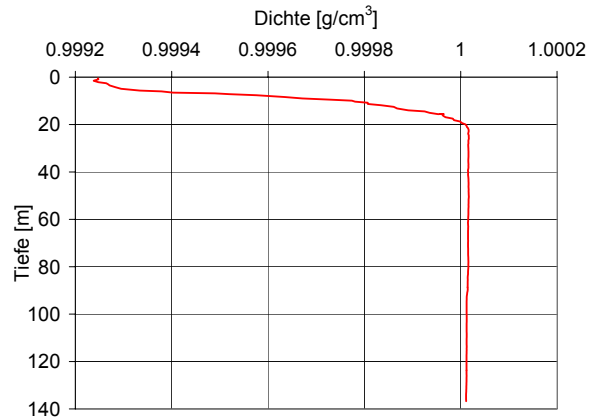


Abbildung 15: Berechnete Dichte ohne Berücksichtigung des hydrostatischen Drucks im Lac d’Emosson am 21. August 2002.

Die Sonde XR-420 misst die Parameter Druck, Temperatur und Leitfähigkeit.

Die Tiefe wird indirekt über den Druck bestimmt. Der Druck nimmt in die Tiefe linear um 0.0981 bar pro Meter zu.

Im Jahr 2003 wurden zusätzlich die Schwebstoffkonzentrationen aus oberflächennahen Wasserproben (0.5 m Tiefe) bestimmt. Die Schwebstoffkonzentration betrug am 26. Juni 2003 4.6 mgL^{-1} , am 2. September 2003 3.4 mgL^{-1} .

3.2 Profile

Temperatur

Die gemessenen Temperaturprofile sind in der Abbildung 12 dargestellt. An allen Messtagen wurden in den obersten Metern Wassertemperaturen von über $12 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Unterhalb einer Tiefe von 25 Metern bleiben die Temperaturen in den drei Profilen annähernd konstant.

Um den Verlauf der Temperatur einordnen zu können, wurde in die Abbildung 12 auch die Temperatur der maximalen Dichte eingezeichnet.

In den obersten 25 Metern liegt die gemessene Temperatur über der Temperatur der maximalen Dichte. Unter 25 Metern entspricht die gemessene Temperatur annähernd der Temperatur maximaler Dichte.

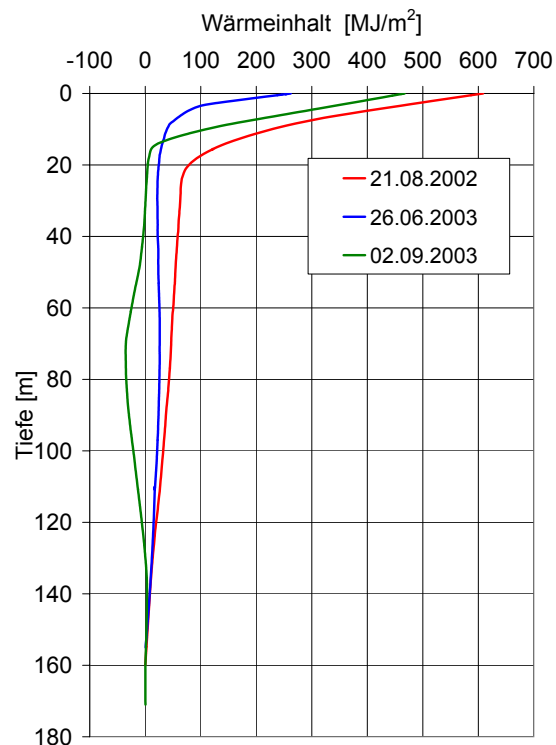


Abbildung 16: Nach oben integrierter Wärmeinhalt eines Quadratmeters bei der Mauer des Lac d’Emosson.

Leitfähigkeit

Der Verlauf der auf 20 °C (κ_{20}) umgerechneten Leitfähigkeit (Formel 1) ist in der Abbildung 13 dargestellt. Alle drei Profile zeigen Schichten mit unterschiedlicher Leitfähigkeit und unterscheiden sich auch in den absoluten Werten.

Dichte

Die berechneten Dichteprofile (Formeln 3 bis 6) sind in den Abbildungen 14 und 15 (potentielle Dichte) dargestellt.

Die berechnete Dichte ist in der obersten, erwärmten Schicht am höchsten. Mit zunehmender Tiefe nimmt sie ab. Unterhalb von 25 Metern entspricht die berechnete Dichte der maximalen Dichte.

Die potentielle Dichte (ohne hydrostatischen Druck) nimmt in den obersten 25 Metern ab, darunter bleibt sie konstant.

Wärmeinhalt

In der Abbildung 16 wurde der Wärmeinhalt über einen Quadratmeter bei der Staumauer von unten nach oben integriert (Formel 8). Da am 2. September 2003 Temperaturen unterhalb der Temperatur maximaler Dichte gemessen wurde, ist der Wärmeinhalt zum Teil im negativen Bereich, d. h. kleiner als im Fall der vollständigen Durchmischung. Auch in den anderen beiden Profilen ist der Wärmeinhalt unterhalb 20 m gering. Damit beträgt im Lac d'Emosson der Wärmeinhalt nur einen Bruchteil des Wärmeinhalts im Lac de Mauvoisin (ca. 2000 MJ/m², siehe Abbildung 11).

3.3 Interpretation

Die hohe Temperatur in der obersten Schicht kommt durch die Erwärmung der Sonne zustande. Das Sonnenlicht kann relativ weit in den See eindringen, weil das Wasser im Lac d'Emosson klar ist (Partikelgehalt ca. 4 mgL⁻¹). Durch den Wind und die nächtliche Abkühlung (Konvektion) werden die obersten 5 bis 10 Meter durchmischt, so dass dort eine Schicht mit einer relativ konstanter Temperatur entsteht. Dieser Prozess stand im Juni 2003 erst am Beginn (kurz nach Auftauen der Eisschicht), weshalb die Schicht mit höherer Temperatur noch nicht vollständig ausgeprägt war.

Die tiefen Temperaturen unterhalb von 25 Metern entsprechen der Mischungstemperatur im Frühjahr. Die niedrigen Temperaturen im September 2003 (unter 4 °C) können eventuell auf kalte Zuflüsse zurückgeführt werden. Typisch sind partikelgeladene Trübestrome, welche in grosse Tiefen vordringen können. Ein Mischungsereignis während des Spätsommers ist hingegen auszuschliessen, da die Temperaturen in den obersten 15 m des Profils vom September 2003 relativ hoch sind und somit die Dichteschichtung sehr stabil ist. Auch die Leitfähigkeitsprofile deuten auf Einschichtungen unterschiedlicher Wassermassen - und weniger auf ein Mischungsereignis - hin.

Literatur

- [BA75] Bühler and Ambühl. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 37:347–369, 1975.
- [CM86] Chen-Tung A. Chen and Frank J. Millero. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range. *Limnol. Oceanogr.*, 31(3):657–662, 1986.
- [MH79] McGrew-Hill. *Lange's Handbook of Chemistry*. 1979.