

Tiefenschichtung von Seen

Daniel Herrmann, Tanja Schlaepfer, Philipp Baumann

Einleitung

In den meisten tieferen Seen innerhalb der gemässigten Klimazone bildet sich im Jahresverlauf zweimal eine horizontale Schichtung des Wassers im Tiefenprofil. Dabei verhindert der Temperaturunterschied zwischen der oberen (Epilimnion) und unteren (Hypolimnion) Wasserschicht eine Durchmischung. Die Entstehung dieser Schichtung wird dadurch möglich, dass Wasser bei 4°C die grösste Dichte hat. Der Übergang zwischen den beiden Schichten nennt man Sprungschicht (Metalimnion). Das Epilimnion und das Hypolimnion vermischen sich im Sommer und Winter nicht. Dieses Phänomen bezeichnet man als Stagnation. Typischerweise liegt die Sprungschicht in einer Tiefe von ca. 20 Metern.

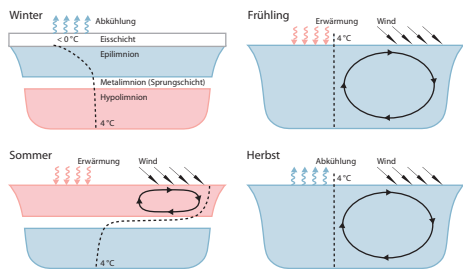


Bild 1: Jahreszeitlicher Ablauf der Stagnation und Zirkulation

Im **Winter** ist die Zirkulation nicht möglich, weil das Oberflächenwasser stärker (unter 4°C) abkühlt als das Tiefenwasser und somit leichter ist und auf dem 4°C kalten Tiefenwasser schwimmt. Das Oberflächenwasser wird durch Wind und Wellengang durchmischt, bleibt aber vom Tiefenwasser getrennt.

Im **Frühling** wird die durchmischte Oberflächenzone dicker, da sich das Wasser ständig erwärmt und so durch die grössere Dichte nach unten sinkt. Die vollständige Zirkulation erfolgt, sobald die gesamte Wassermasse eine Temperatur von 4°C erreicht hat.

Im **Sommer** bildet sich erneut eine Schichtung aus, diesmal weil das Oberflächenwasser mit mehr als 4°C wärmer ist als das Tiefenwasser.

Mit der Abkühlung des Oberflächenwassers im **Herbst** kann dann wieder eine vollständige Durchmischung erfolgen.

Material und Methode

Im Rahmen der diesjährigen Messkampagne wurden vom 21. bis zum 29. August sämtliche grossen Engadiner Seen, sowie als Vergleichswerte der Lago di Poschiavo im Puschlav und der Laj da Marmorera (stark genutzter Stausee der EWZ im Oberhalbstein) vermessen. Bild 2 bietet einen kartographischen Überblick.

Um die Ausprägung der Schichtung zu bestimmen, wurde mit Hilfe von GPS-Geräten ungefähr der tiefste Punkt der Seen gesucht und das Ruderboot bestmöglich verankert. Unsere Messungen wurden trotz der Verankerung durch den jeweils gegen Mittag aufkommenden Malojawind erschwert. Dadurch wurde das Boot und der Sensor mit Kabel unterschiedlich stark vom Zielpunkt abgetrieben. Der Fehler in der Tiefenmessung beläuft sich in 75m Tiefe schätzungsweise auf maximal 2.5m (Neigungswinkel von 15°). Aufgrund der horizontalen Wasserdurchmischung hat das Abdriften



Bild 2: Übersichtskarte mit den Engadiner Seen und dem Laj da Marmorera

vom Zielpunkt jedoch keine Auswirkungen auf die Resultate in den gemessenen Grössen.

Mithilfe von professionellen Wassertemperaturen der EAWAG wurde die Temperatur, der pH-Wert, der Gehalt an gelöstem Sauerstoff und die Leitfähigkeit von der Wasseroberfläche bis zum Grund gemessen. Die ersten 50 Meter wurden im Abstand von einem Meter, tiefere Zonen im Abstand von 5 Metern gemessen.

Resultate

Engadiner Seen

Die Messresultate zu den Engadiner Seen sind in Bild 3 dargestellt. Die Temperaturverläufe der Engadinerseen sind sehr ähnlich und stimmen in gleicher Tiefe fast überein. Die Sprungschicht erstreckt sich bei allen Seen von ca. 10m bis 25m Tiefe. In der Sprungschicht sinkt die Temperatur um etwa 1°C pro Meter. Die Sprungschicht ist aber nicht sehr ausgeprägt, da die Temperaturabnahme moderat verläuft. Bei den tieferen Seen gibt es ein Hypolimnion, welche aus einer homogenen Wasserschicht mit einer Temperatur von 4°C besteht. Bei den Seen mit geringerer Tiefe fehlt es aber oder ist nur sehr klein. Dies ist beispielsweise beim Laj da Champfèr der Fall. Beim Laj da San Murezzan fällt auf, dass die Sprungschicht ca. 5m tiefer liegt als bei den anderen Engadinerseen.

Der Sauerstoffgehalt ist in den tiefsten Schichten des Laj da Segl und Laj da Silvaplana mit über 90% sehr gross. In den flacheren Seen hingegen sinkt der Sauerstoffgehalt im Hypolimnion bis zu Werten um 50%. Das entspricht recht gut den Erwartungen. Der Abbau von organischem Material zehrt auch im Hypolimnion dauernd Sauerstoff. In den Stagnationsphasen wird aber der Sauerstoffvorrat im Hypolimnion nicht regeneriert werden, da der Kontakt zur Atmosphäre unterbrochen ist. Bei Seen mit kleinem Hypolimnion führt das zu einem raschen Abbau der Sauerstoffvorräte bis hin zu einer starken Anoxie (Sauerstoffarmut).

Die Leitfähigkeit zeigt bei allen Seen deutlich die Sprungschicht an und nimmt nach unten zu. Ebenfalls auffällig ist, dass die Leitfähigkeit in Entwässerungsrichtung des Engadins stetig zunimmt, was wahrscheinlich durch die natürlichen und anthropogenen Einträge bedingt ist.

Laj da San Murezzan (St. Moritzersee)

Im Laj da San Murezzan liegt die Sprungschicht im Jahr 2007 zwischen 20 und 25 Metern (siehe Bild 4). Die Temperaturschichtung im Jahr 2009 ist deutlich weniger ausgeprägt als 2007. Überdies ist der Verlauf der Sprungschicht in der Temperatur, Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt praktisch identisch,

wogegen 2009 deutliche Unterschiede bestehen.

Die Leitfähigkeit zeigt 2009 einen Sprung bei 20 Metern, bei der Temperatur beginnt die verstärkte Temperaturabnahme bereits mit 10 Metern Tiefe.

Die Sauerstoff-Sättigung liegt 2007 bei 1%. Im Jahr 2009 hingegen ist das Wasser in 32 Metern Tiefe noch mit 50% Sauerstoff gesättigt.

Die regelmässige Zirkulation wird durch den aussergewöhnlich hohen Salzgehalt verhindert. Dieser ist natürlichen Ursprungs, ein konstant kleinen Zufluss von nur 50 bis 60 l/s (Ovel da Mulin) ist stark gipshaltig.

Die anoxischen Bedingungen im Hypolimnion für das Jahr 2007 sind gemäss den Studien von Schmid und Dorji 2008 auf das Fehlen der Durchmischung im Frühling 2006, Herbst 2006 und Frühling 2007 zurückzuführen. Als Folge davon enthielt der See Mitte Juli 2007 unterhalb der Sprungschicht praktisch keinen Sauerstoff. Unsere Daten vom August 2009 geben Aufschluss darüber, dass in der Zwischenzeit eine Durchmischung stattgefunden hat.

Laj da Marmorera (Marmorerassee)

Der Laj da Marmorera zeigt keine charakteristische Sprungschicht. Im Bereich von 10 bis 45 Metern Tiefe nimmt die Temperatur relativ linear ab. Die Temperatur an der Oberfläche ist mit 15°C leicht kälter als bei den Engadiner Seen. Am Seegrund in 65 Metern Tiefe beträgt die Temperatur 9.5°C statt wie erwartet 4°C. Die Leitfähigkeit variiert um maximal 20µS/cm und zeigt im Profil keine eindeutige Zunahme.

Die Sauerstoff-Sättigung liegt 2009 bis zum tiefsten Punkt bei 50 Metern an beiden Messpunkten immer noch bei 95% resp. 102%.

Der ungewöhnliche Profilverlauf in allen gemessenen Grössen lässt sich damit erklären, dass der Laj da Marmorera kein natürlicher See, sondern ein künstlicher Stausee ist. Der Abfluss des Sees liegt in der Nähe des Damms am Seegrund. Somit wird der See durch den Abfluss ständig von der Oberfläche in die Tiefe durchmischt. Bei einem Volumen von 62130000m³ und einem mittleren Abfluss von 17m³/s wird der Stausee pro Jahr mehr als 8 mal vollständig umgewälzt, was das Fehlen der Schichtung begründet.

Fazit

Sämtliche Engadiner Seen in der Höhenlage um 1800 m ü. M. zeigen mit einer Sprungschicht im Bereich von 10m bis 25m Tiefe Stagnationsphasen.

Die Seen mit kleinem Hypolimnion (westlicher Teil des Laj da Segl, Laj da Champfèr und Laj da San Murezzan) neigen zu partieller Anoxie gegen Ende des Sommers resp. Winters.

Beim Laj da San Murezzan wird die Sauerstoffarmut im Tiefenwasser durch das Phänomen des natürlichen Salzeintrags zusätzlich verstärkt. Das schwere gipshaltige Wasser des Bächleins Ovel da Mulin sinkt beim Einfluss in die Tiefe und verhindert durch den Dichtegradienten eine regelmässige Zirkulation.

Das Fehlen der Sprungschicht beim Laj da Marmorera ist speziell, weil der See durch den Grundabfluss des Kraftwerks ideal durchmischt ist.

Wir durften bei unseren Untersuchungen stark von den Erfahrungen der Seengruppe des Lagers 2007 in La Punt profitieren. Dank den professionellen Sensoren der EAWAG konnten wir drei aussergewöhnliche Schichtungstypen erforschen.

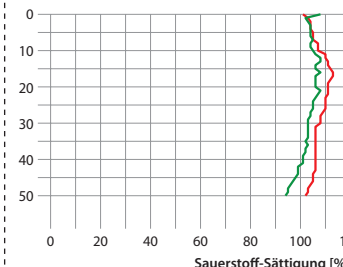
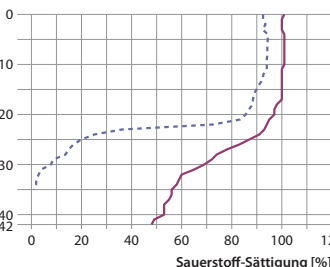
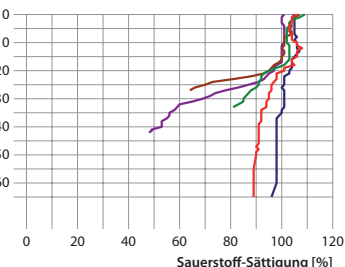
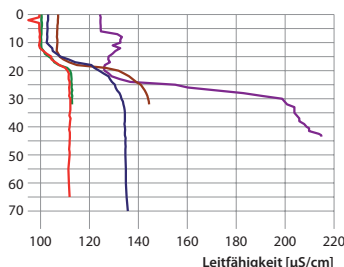
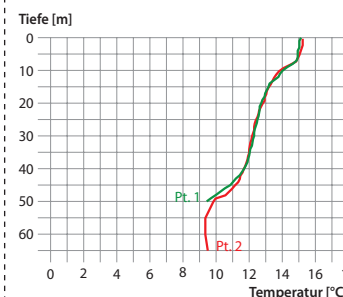
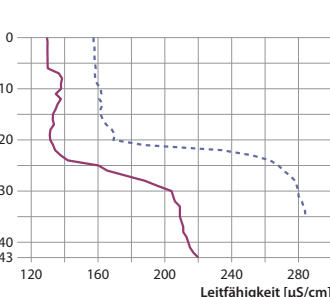
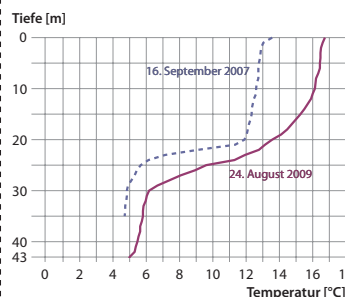
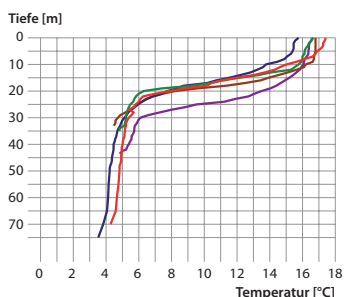


Bild 3: Tiefenmessungen der Engadiner Seen, rot: Laj da Segl Pt. 1, grün: Laj da Segl Pt. 2, blau: Laj da Silvaplana, braun: Laj da Champfèr, violett: Laj da San Murezzan

Bild 4: Vergleich der Tiefenprofile des St. Moritzersees vom 16. September 2007 und 24. August 2009 (academia-Untersuchungen des Lagers in La Punt)

Bild 5: Temperatur- und Sauerstoff-Messungen des Laj da Marmorera an zwei Standorten, Punkt 1 und Punkt 2 (oberhalb des Abflusses)