

Diss. ETH Nr. 10714

# **Helium und Tritium als Tracer für physikalische Prozesse in Seen**

ABHANDLUNG  
zur Erlangung des Titels  
DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von  
Werner Aeschbach-Hertig  
dipl. Phys. ETH  
geboren am 3. 2. 1964  
von Zürich, Adliswil (ZH) und Leutwil (AG)

angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. D. M. Imboden, Referent  
Prof. Dr. P. Signer, Korreferent

Zürich 1994

---

## Kurzfassung

Der radioaktive Zerfall von  $^3\text{H}$  (Tritium) zu  $^3\text{He}$  mit einer Halbwertszeit von 12.4 Jahren bietet die Möglichkeit, die effektive Isolationszeit eines Wasserkörpers von der Atmosphäre zu messen. Dieses Zeitmass,  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$ -Wasseralter genannt, kann zur Quantifizierung von Prozessraten in der Hydrosphäre verwendet werden. Helium ist für sich ein bedeutender geochemischer Tracer für Fluide aus dem Erdinnern.

Helium und Tritium werden massenspektrometrisch analysiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die von Kipfer (1991) aufgebaute und beschriebene Messapparatur für ausgedehnte Seestudien eingesetzt und gleichzeitig laufend verbessert. Die Reproduzierbarkeit von Helium- und Neonkonzentrationen liegt zwischen 0.6 und 1%, für das  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis ist sie besser als 0.5 %. Tritium wird in Routineproben mit einer Genauigkeit von 2 bis 3 % und einer Nachweisgrenze von 0.5 TU gemessen, aber beide Parameter können durch Verwendung grösserer Proben um eine Grössenordnung gesenkt werden. Die in Oberflächenwasser aus Seen gemessenen Konzentrationen beider leichten Edelgase weichen weniger als 1 % von den für Gleichgewicht mit der Atmosphäre erwarteten Werten nach Weiss (1971) ab. Die beobachteten He/Ne-Verhältnisse passen jedoch besser zu den Löslichkeitsdaten von Top et al. (1987).

Es wird gezeigt, wie Helium aus anderen Quellen als dem Tritiumzerfall identifiziert werden kann, um das für die Bestimmung des Wasseralters benötigte tritiogene  $^3\text{He}$  zu berechnen. Die Interpretation des Wasseralters in nicht vollständig abgeschlossenen Systemen, wie dem Tiefenwasser von Seen, wird diskutiert. Die Entwicklung des Wasseralters wird mittels Seemodellen verschiedener Komplexität untersucht. Diese Modelle dienen als Grundlage für die Bestimmung der Parameter physikalisch-limnologischer Prozesse wie Wasseraustauschraten, vertikale turbulente Diffusivität, Gasaustauschgeschwindigkeit, Sauerstoffzehrung und Heliumfluss aus dem Untergrund.

Bei der Anwendung der Methode konzentrierte ich mich auf vier Seen, die drei zentrale Themenkreise repräsentieren:

- Das Ausmass der *vertikalen Mischung in tiefen meromiktischen Seen* wird im *Zuger- und Luganersee* bestimmt. Als Folge der Eutrophierung haben sich in diesen Seen permanent anoxische Tiefenwasserkörper gebildet. Die  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$ -Wasseralter belegen, dass dennoch eine gewisse Erneuerung durch vertikale turbulente Diffusion stattfindet. Dieser Prozess kann aus der  $^3\text{He}$ -Bilanz zuverlässiger quantifiziert werden als mit Hilfe der Temperatur. Numerische Modelle erlauben Rückschlüsse auf die Mischungsintensität in den letzten 40 Jahren. Die effektive jährliche Zufuhr von Oberflächenwasser ins tiefe Hypolimnion beträgt im Zugersee rund 20 %, im Luganersee nur 5 % des jeweiligen Tiefenwasservolumens.

- Der *dichtegetriebene Wasseraustausch über Schwellen zwischen Teilbecken* wird im Vierwaldstättersee untersucht. Dieser subalpine See ist durch drei hohe und zwei weniger ausgeprägte Schwellen in vier Hauptbecken und zwei kleinere Tiefenwasserkörper unterteilt. Unterschiede im Salzgehalt der Zuflüsse sowie in der Windexposition führen zum Aufbau horizontaler Dichtegradienten im Winter und Frühjahr. Diese Gradienten treiben Strömungen an, die mit  $^3\text{He}$  verfolgt werden können und die signifikant zur Erneuerung von mindestens vier der sechs Tiefenwasserkörper beitragen. Trotzdem bleibt die übliche windinduzierte vertikale Mischung innerhalb der vier Hauptbecken der dominante Prozess für die Erneuerung des Tiefenwassers.
- Der *Fluss von Fluiden aus dem Erdmantel* in vulkanischen Gebieten wird im *Laacher See*, einem Maarsee in Deutschland, studiert. Helium mit einem  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis von  $7.4 \cdot 10^{-6}$  ( $5.4 R_a$ ), was den Ursprung aus dem Mantel klar anzeigt, tritt zusammen mit  $\text{CO}_2$  in diesen See ein. Aus der Verdoppelung des Heliuminhaltes zwischen Mai und September 1991 konnte der Heliumfluss von  $1.0 \cdot 10^{13}$   $^4\text{He}$  Atomen  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  direkt abgeleitet werden. Mit dem in Gasen aus dem Laacher See gemessenen  $\text{C}/^3\text{He}$ -Verhältnis von ca.  $5 \cdot 10^9$  ergibt sich ein jährlicher  $\text{CO}_2$ -Umsatz von mindestens 3000 Tonnen.

Drei weitere Prozesse wurden in den obengenannten Schweizer Seen (Zuger-, Luganer- und Vierwaldstättersee) untersucht:

- *Sauerstoffzehrungsraten* können einfach quantifiziert werden mit Hilfe der Korrelation zwischen Sauerstoffdefizit und Wasseralter. Die resultierenden Zehrungsraten sind korreliert mit dem Verhältnis von Sedimentfläche zu Volumen der jeweiligen Seen.
- Der *Fluss von krustalem Helium* kann analog aus der Korrelation von Heliumüberschuss und Wasseralter bestimmt werden. Die gemessenen Flüsse sind vergleichbar mit Abschätzungen des kontinentalen Mittels ( $\approx 3 \cdot 10^{10}$   $^4\text{He}$  Atome  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), mit Ausnahme des Urnersees, eines Beckens des Vierwaldstättersees, wo der Fluss um mindestens einen Faktor fünf höher ist.
- Die Bestimmung der *Gasaustauschgeschwindigkeit* verlangt eine sorgfältige Überwachung der Heliumkonzentration an der Oberfläche. Da sich diese Arbeit auf die Entwicklung im Tiefenwasser konzentriert, wurden nur wenige Abschätzungen des Gasaustausches durchgeführt. Die Werte liegen im erwarteten Bereich um 1 m/d.