

8. Mantelheliumfluss in einem vulkanischen Kratersee

In Kap. 2.3 wurden einige Beispiele von Untersuchungen des Mantelheliumflusses in Seen angeführt. Im Rahmen dieser Arbeit stiessen wir mehrmals – zuerst eher zufällig, später gezielt – auf Seen, die Mantelhelium enthalten. Einige Resultate aus der Türkei (Nemrutsee und Vansee) und aus Neuseeland (Lake Taupo) wurden in Kap. 4.3.2 dargestellt. Die Daten aus der Türkei werden von Kipfer et al. (1994) ausführlich behandelt. Hier konzentrieren wir uns auf Untersuchungen am Laacher See in Deutschland. Diese waren gezielt auf die Bestimmung der Flüsse von Mantelfluiden ausgerichtet.

8.1. Der Laacher See

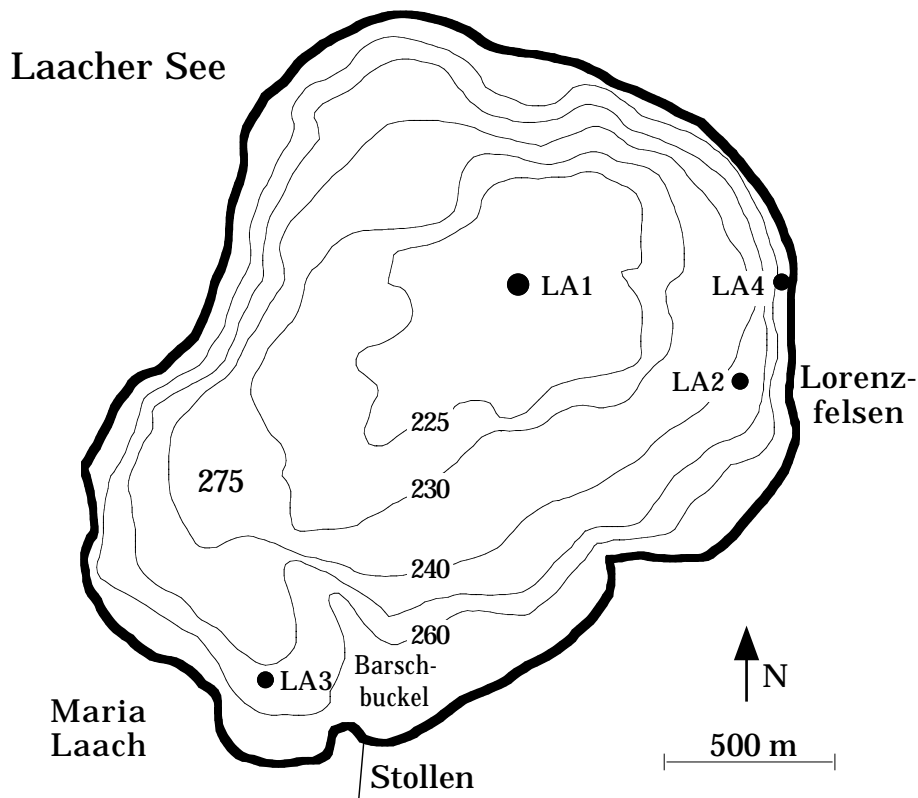
8.1.1. Geographische und limnologische Beschreibung

Der Laacher See liegt etwa 25 km NW von Koblenz in der Eifel (Rheinland-Pfalz, BRD). Sein Erscheinungsbild (Fig. 8.1, Tab. 8.1) ist geprägt durch die vulkanische Entstehungsgeschichte (Kap. 8.1.2). Der annähernd runde See mit einem Durchmesser von ca. 2 km ist von Kraterwällen umgeben. Vom dadurch eng begrenzten Einzugsgebiet nimmt er selber 27 % ein. Entsprechend gering ist der Zufluss. Da der See für seine Grösse recht tief ist (aspect ratio 0.028), resultiert eine grosse hydrologische Aufenthaltszeit von 66 Jahren. Im natürlichen Zustand war der See abflusslos. Ein Abt des Klosters Maria Laach liess schon 1164 einen Abflussstollen anlegen, der nach einem Einsturz 1844 neu erstellt wurde. Diese Massnahmen führten zur Absenkung des Seespiegels um insgesamt 14 m auf den heutigen Stand (Scharf und Menn, 1992).

Zusammen mit den anderen Maarseen der Eifel besitzt der Laacher See eine lange Tradition physikalisch-limnologischer Untersuchungen, die auf A. Thienemann, einen Pionier der Limnologie, zurückgeht (Thienemann, 1913 und 1914; vgl. auch Scharf, 1992) und bis heute fortgesetzt wird (z.B. Scharf und Oehms, 1992). Der See ist holomiktisch und meso- bis eutroph.

Oberfläche	3.31 km ²	Einzugsgebiet	12.2 km ²
Volumen	0.103 km ³	Pegelhöhe	275 m
Maximale Tiefe	51 m	Lufttemperatur	8.9 °C
Mittlere Tiefe	31 m	Rel. Feuchte	77 %
Abfluss	0.050 m ³ /s	Windgeschw.	3 m/s
Aufenthaltszeit	66 a	Niederschlag	0.64 m/a

Tabelle 8.1. Orographische, hydrologische (Scharf und Menn, 1992) und meteorologische (Jahresmittelwerte aus Krause, 1980a) Daten des Laacher Sees.



Figur 8.1. Karte des Laacher Sees mit den Probenahmestellen LA1 bis LA4. Hauptprobenahmestelle ist LA1, an der tiefsten Stelle des Sees (51 m). Höhenlinien mit Angaben in m. ü. M.

8.1.2. Vulkanismus und Gasaustritte in der Region des Laacher Sees

Der Laacher See liegt im Rheinischen Schiefergebirge am Ostrand der Vulkaneifel. Die Gegend ist geprägt durch eine vulkanische Aktivität, die vor mehr als 20 Millionen Jahren (~Grenze Oligozän-Miozän) begann (Bahrig, 1985). Die jüngste aktive Phase, aus der die heutigen Maare hervorgingen, begann vor 200'000 Jahren in der Westeifel. Die Aktivität wanderte langsam Richtung Osten, wo sie ca. 11'000 Jahre vor heute mit der Bildung des Laacher See Kraters ihren Höhepunkt und (vorläufigen) Abschluss fand. Der Vulkanismus in der Eifel ist vorwiegend phreatomagmatischer Natur. Grundwasser dringt in oberflächennahe Magmakammern ein und verdampft. Der steigende Dampfdruck entlädt sich schliesslich durch Wegsprengen des überstehenden Gesteins. Solche Eruptionen hinterlassen die typischen, Maare genannten Krater (Lorenz, 1973). In manchen dieser Krater bilden sich Seen. Die heutigen Maarseen sind im Westeifel-Vulkanfeld konzentriert, mit Ausnahme des grössten, eben des Laacher Sees.

Die Eifel beherbergt zahlreiche Mineral- und Thermalwasserquellen, die meist durch ihren hohen Gehalt an freiem CO_2 auffallen (Ulrich, 1958; Carlé, 1975). Es ist bekannt, dass solche Wässer und Gase auch in den Laacher See eintreten (Schmidt-Ries, 1955; Bahrig, 1985). Die Gasaustritte am Nordostufer des Sees, in der Gegend des Lorenz-

felsens (s. Fig. 8.1) können mit bloßem Auge beobachtet werden. Im Winter geben sie sich dadurch zu erkennen, dass der See an diesen Stellen nicht zufriert.

Giggenbach et al. (1991) haben Gase vom Ostufer des Laacher Sees auf Gehalt und Isotopie von CO₂ und Helium analysiert. Sie fanden, dass das Gas zu 99.9 % aus CO₂ besteht und eine Mantelsignatur sowohl im ³He/⁴He-Verhältnis als auch im δ¹³C aufweist. Auch Griesshaber et al. (1992) fanden Mantelhelium und -CO₂ in der Eifel. Giggenbach et al. verglichen die Situation am Laacher See mit anderen vulkanischen Seen, darunter der Nyos See in Kamerun. Dieser erlangte traurige Berühmtheit, als 1986 infolge einer schlagartigen Freisetzung des im See gespeicherten Kohlendioxids über 1700 Menschen ums Leben kamen (Kling et al., 1987).

Nicht zuletzt die Analogie zum Nyos See motivierte und leitete unsere Untersuchungen am Laacher See. Stratifizierte Seen akkumulieren die aus dem Untergrund eintretenden Gase, so dass deren Fluss bestimmt werden kann. Im Gegensatz zum Nyos See ist der Laacher See aber nur im Sommerhalbjahr thermisch geschichtet. Deshalb setzten wir unsere Probenahmen zu Beginn und gegen Ende einer solchen Periode an.

8.1.3. Experimentelle Daten

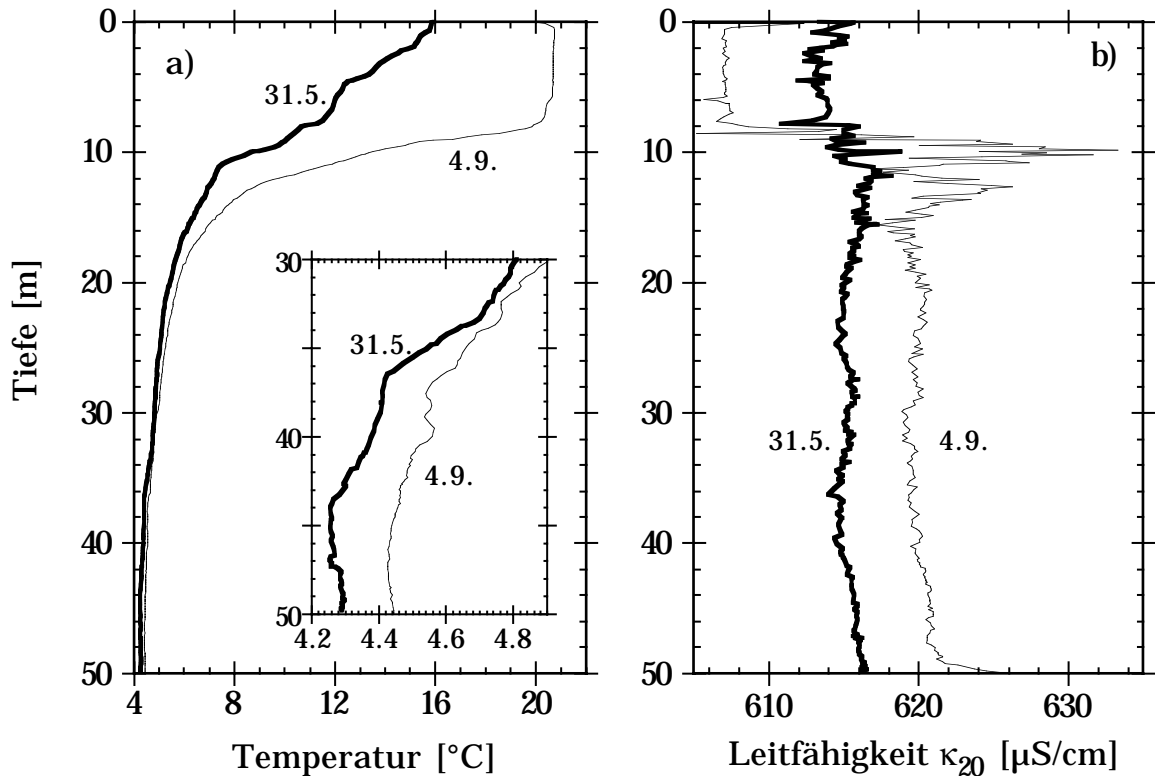
Profile von Temperatur und Leitfähigkeit (OTS-Sonde) sowie Helium, Neon und Tritium wurden am 31. Mai und 4. September 1991 an der tiefsten Stelle des Sees (LA1) genommen. Vereinzelt Wasserproben wurden auch bei LA2 und LA3 (s. Fig. 8.1) entnommen. Bei LA4 wurden unmittelbar am Ufer durch knietiefes Wasser aufsteigende Gase beprobt. Ausserdem wurden Proben von einigen umliegende Brunnen und Mineralquellen sowie aus 3 kleinen Maarseen der Westeifel (Gemündener Maar, Weinfelder Maar und Pulvermaar) analysiert.

In einer dritten Expedition im Herbst 1993 wurden mit Hilfe von Tauchern Gasproben direkt an den Gasaustritten in ca. 30 m Tiefe vor dem Lorenzfelsen entnommen, auf die hier aber nur am Rande eingegangen wird.

Figur 8.2 zeigt die OTS-Daten von der tiefsten Stelle. Die Temperaturprofile (Fig. 8.2a) belegen, dass der See im untersuchten Zeitraum thermisch stratifiziert war. Die Thermokline liegt um 10 m Tiefe. Die Vergrößerung des Bereiches unterhalb 30 m Tiefe zeigt, dass die Temperatur auch im Hypolimnion über den Sommer zunahm, allerdings maximal um 0.2 °C. Die Erwärmung kann durch turbulente Diffusion von oben oder geothermischen Wärmeffluss von unten zustande gekommen sein.

Die Leitfähigkeit (Fig. 8.2b) im Laacher See ist mit über 600 µS/cm die höchste aller Eifelmaare (Scharf und Oehms, 1992). Als Erklärung wird der Eintritt hochmineralisierter, CO₂-reicher Quellwässer in einer SW-NO streichenden Zone im westlichen Teil des Sees vermutet (Bahrig, 1985). Die Leitfähigkeitszunahme im Hypolimnion während des Sommers 91 und der daraus resultierende scharfe Gradient in der Thermokline könnten

neben der biologischen Aktivität eventuell auch auf eintretende Quellwässer zurückzuführen sein. Ansonsten deutet an den OTS-Daten nichts auf aussergewöhnliche Verhältnisse am Laacher See hin.



Figur 8.2. Profile von Temperatur (a) und Leitfähigkeit (b) an der tiefsten Stelle (LA1) im Laacher See. Aufgenommen mit der OTS-Sonde am 31.5.91 bzw. 4.9.91. Für die Temperatur ist der Bereich unter 30 m Tiefe vergrössert dargestellt.

Bei den ^3H -He-Daten (Fig. 8.3) sind ausser den Profilen von der tiefsten Stelle (LA1) Resultate einiger Proben von den Positionen LA2 (Mai) und LA3 (September) gezeigt.

Die Tritiumkonzentration (Fig. 8.3a) ist im Rahmen der Messgenauigkeit räumlich und zeitlich homogen. Die aufgrund des Zerfalles zu erwartende Abnahme in den 3 Monaten zwischen den Probenahmen beträgt knapp 0.5 TU. Sie sollte in den Mittelwerten der Vertikalprofile gerade noch nachweisbar sein. Beide Profile von der tiefsten Stelle streuen jedoch um fast identische Mittelwerte von ca. 32.4 TU. Zwischen den Probenahmestellen LA1 und LA2 ist kein Unterschied zu erkennen. Die leicht überdurchschnittlichen Werte von der Stelle LA3 sind nicht signifikant.

Spektakulärer sind die Heliumdaten. Die ^4He -Sättigungsanomalie (Fig. 8.3.b) steigt mit der Tiefe stark an. Im Mai erreicht sie Spitzenwerte über 400 % (leider ging die tiefste Probe (50 m) bei der Messung verloren). Im September haben sich die Überschüsse in allen Tiefen unterhalb 10 m mehr als verdoppelt. Die ^4He -Konzentration erreicht damit fast das zehnfache des Lösungsgleichgewichts. Ganz offensichtlich tritt Helium in den See ein und wird im Sommer im Hypolimnion akkumuliert.

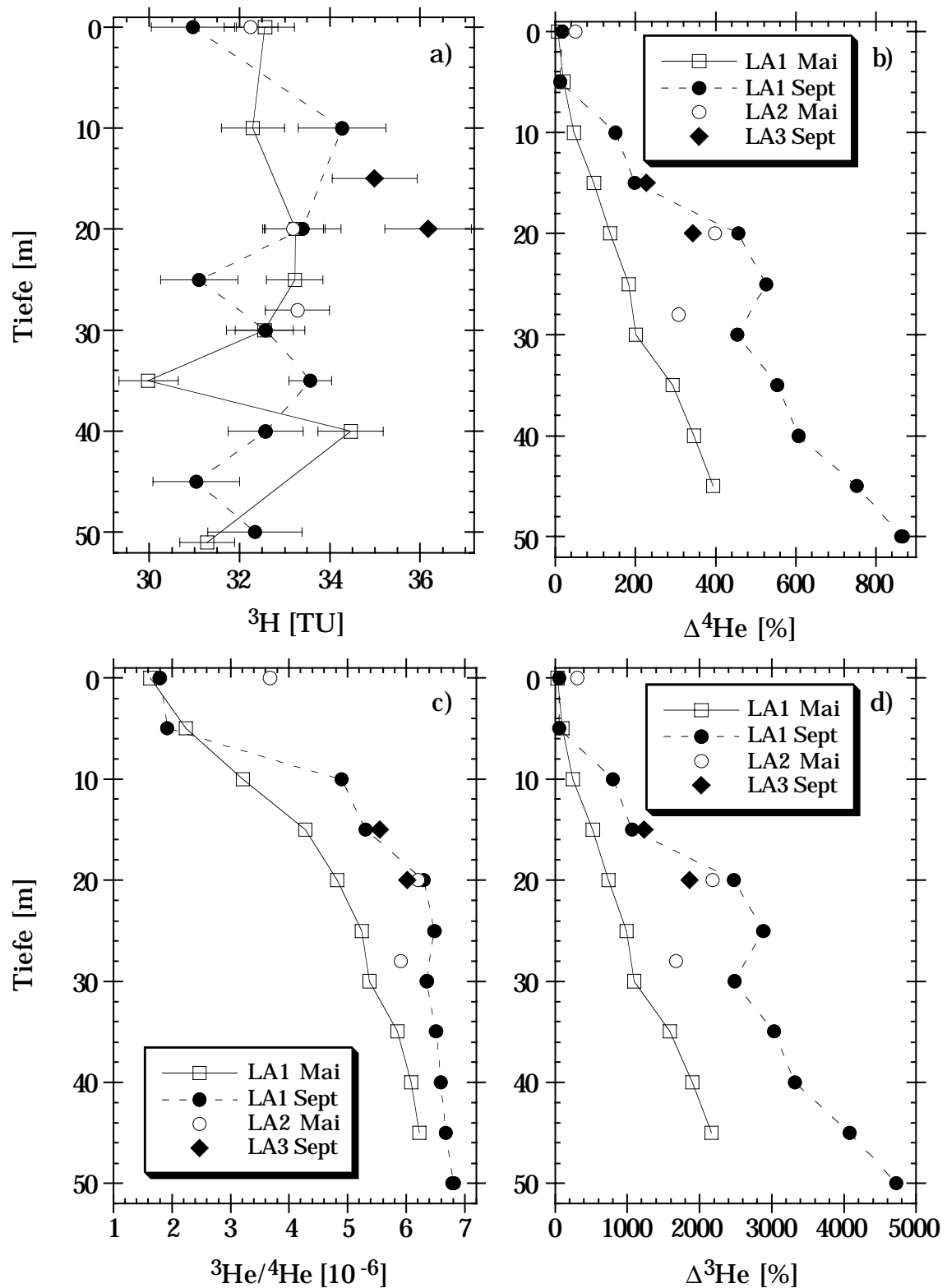


Fig. 8.3: Tritium- und Heliumdaten vom Laacher See. Hauptprofile von der tiefsten Stelle (LA1) am 31. Mai und 4. Sept. 1991. Einzelne Proben von den Stellen LA2 im Mai und LA3 im Sept. a) Tritium (Legende s. b) b) ^4He -Überschüsse in Δ -Notation. c) $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse. d) ^3He -Überschüsse. Die Fehler sind ausser für Tritium in den verwendeten Symbolen eingeschlossen.

Die Heliumverteilung ist horizontal inhomogen: In der Nähe der Gasaustritte am Ostufer beim Lorenzfelsen (LA2) sind die Überschüsse im Mai in 20 und 28 m Tiefe bereits fast so gross wie in der Seemitte (LA1) im September. In diesem Tiefenbereich hat sich im September im Hauptprofil ein auffälliges lokales Maximum herausgebildet. An der Position LA3, durch den Barschbuckel genannten Rücken etwas vom Hauptteil des Sees abgetrennt, ist in 20 m Tiefe nichts Auffälliges zu sehen. Diese Beobachtungen weisen alle auf eine starke Heliumquelle in der Nähe von Pos. LA2 in ca. 20 bis 30 m Tiefe hin. Die Identifikation dieser Quelle mit den dort sichtbaren Gasaustritten drängt sich auf. Der weitere Anstieg der ^4He -Anomalie unterhalb 30 m deutet aber auch auf tieferliegende, möglicherweise eher diffus verteilte Heliumquellen hin. Vielleicht stehen diese im Zusammenhang mit den von Bahrig (1985) postulierten Grundwassereintritten.

Das $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis (Fig. 8.3c) wächst ebenfalls mit der Tiefe und der Zeit an. Es erreicht Spitzenwerte knapp unter $7 \cdot 10^{-6}$. Dies gibt einen ersten Hinweis auf die Mantelherkunft des in den See eintretenden Heliums. Interessant ist das hohe $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis an der Oberfläche bei den Gasaustritten an Pos. LA2. Dieser Punkt zeigt deutlicher als die Konzentrationsanomalien, dass sich die Gasaustritte bei LA2 bis an die Oberfläche auswirken. Ein Teil des eintretenden Gases verlässt dort den See direkt in Form der beobachteten Gasblasen.

Die ^3He -Anomalien (Fig. 8.3d) gleichen denjenigen von ^4He aufs Detail, ausser dass sie gut 5 mal grösser sind. Offenbar besteht eine Korrelation zwischen den beiden Isotopen. Tritogenes ^3He spielt im Laacher See keine Rolle. Da der See regelmässig zirkuliert, sind höchstens Alter um ein Jahr zu erwarten. Bei der Tritiumkonzentration von rund 32 TU entspricht dies maximal 6 % tritogenem ^3He -Überschuss, nur gut 1 ‰ des höchsten gemessenen Wertes. An die Berechnung von Wasseraltern ist nicht zu denken.

8.2. Charakterisierung der Fluide im Laacher See und der Eifel

8.2.1. Das $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis im Laacher See

Um das Isotopenverhältnis R des in den See eintretenden Heliums zu bestimmen, verwenden wir die in Kap. 4.3.2 eingeführte Darstellung von ^3He gegen ^4He (Fig. 8.4., vgl. auch Fig. 4.5a). Die Messpunkte aus dem See liegen auf einer sehr gut definierten Geraden, die durch den Punkt für luftgesättigtes Wasser bei 4 °C verläuft. Die Steigung der Regressionsgeraden ergibt $R = (7.42 \pm 0.03) \cdot 10^{-6}$ oder $R/R_a = (5.36 \pm 0.02)$. Dies ist mit dem von Giggenbach et al. (1991) in Gasproben vom Ufer gefundenen Wert von $5.5 R_a$ verträglich. Obwohl deutlich tiefer als typische MORB-Mantelwerte sind diese Zahlen klare Indizien für Helium aus dem Erdmantel. Es ist anzunehmen, dass dieses Mantel-

helium beim Aufstieg durch die Kruste mit radiogenem Helium vermischt wird, wodurch das Isotopenverhältnis sinkt.

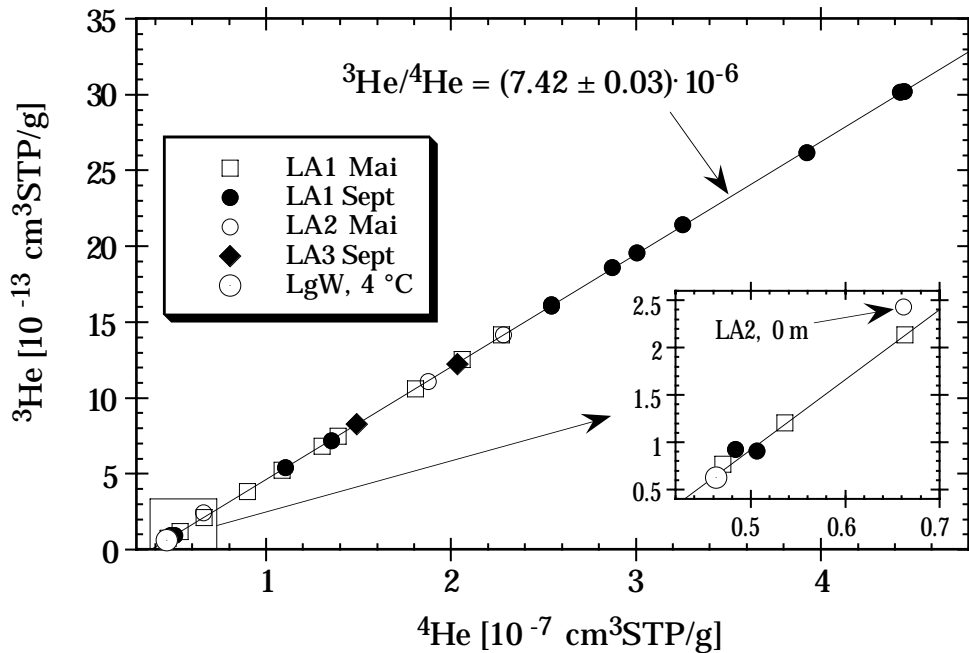


Fig. 8.4. Korrelation zwischen ^3He und ^4He im Laacher See. Die genau definierte Steigung der Regressionsgeraden ergibt das Isotopenverhältnis des in den See eintretenden Heliums. Der Ausschnitt um den Punkt für luftgesättigtes Wasser (LgW) ist vergrößert dargestellt.

Zur Bestimmung der Element- und Isotopenzusammensetzung der Gase am Laacher See dienen zwei im Mai 1991 bei LA4 genommene Gasproben. Ihr Mittelwert ergibt ein $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis von $(7.26 \pm 0.03) \cdot 10^{-6}$. Überraschenderweise ist dieser Wert etwas tiefer als aus der Regression der Messwerte aus dem See berechnet. In einer Gasprobe, die 1993 von Tauchern direkt am Gasaustritt vor dem Lorenzfelsen genommen wurde, liegt das $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis mit $(7.33 \pm 0.06) \cdot 10^{-6}$ näher am erwarteten Wert. Die Abweichung zu den Wasserproben ist aber immer noch zu gross, um durch tritiogenes ^3He erklärt werden zu können. Dazu wäre ein unrealistisches Alter von rund fünf Jahren im Hypolimnion nötig.

Einen Hinweis auf eine mögliche Erklärung der Differenz zwischen Gas- und Wasserproben gibt die Oberflächenprobe von der Stelle LA2. Diese Probe ist bereits in Fig. 8.3c durch ihr hohes Isotopenverhältnis aufgefallen. Im vergrößerten Ausschnitt von Fig. 8.4 wird ersichtlich, dass sie (als einzige aller Proben) signifikant von der Regressionsgeraden abweicht. In dieser Probe ist das $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis des Überschussheliums mit $(8.16 \pm 0.12) \cdot 10^{-6}$ ganze 10 % höher als sonst. Abgesehen von der Möglichkeit eines experimentellen Artefakts, wozu keine Hinweise bestehen, kann das nur durch einen stark fraktionierenden Prozess im Zusammenhang mit den aufsteigenden Blasen gedeutet werden. Infolge der höheren Gasaustauschgeschwindigkeit wird das leichte Isotop ^3He schneller zwischen Blase und Umgebungswasser ausgetauscht. Fuchs

et al. (1987) haben gezeigt, dass Luftblasen im Ozean zu einer kleinen Isotopenfraktionierung beim Helium führen können (vgl. Kap. 4.2.3). Schnellere Lösung von ^3He würde das gegenüber dem Quellgas erhöhte Isotopenverhältnis des gelösten Heliums erklären.

8.2.2. $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse im gesamten Eifelgebiet

Um die Proben von einzelnen Brunnen und Quellen aus der Eifel zusammen mit den Daten vom Laacher See zu diskutieren, betrachten wir ein 3-Isotopendiagramm von Helium und Neon (Fig. 8.5, vgl. auch Fig. 4.7a). Darin lässt sich gut erkennen, wie die isotopische Signatur der einzelnen Proben durch Mischung von Gasen aus der Luft, dem Mantel und der Kruste zustandekommt.

Die Daten vom Laacher See definieren eine Mischungsgerade zwischen luftgesättigtem Wasser bei 4 °C und dem bei den Austritten im See gefundenen Gas. Für die Berechnung der eingezeichneten Regressionsgeraden wurden die Daten aus Tiefen kleiner als 20 m weggelassen. Ihr $^{20}\text{Ne}/^4\text{He}$ -Verhältnis ist in Abhängigkeit von der Temperatur verschoben, obwohl einige Proben auf unvollständigen Abbau der durch die Erwärmung bedingten Übersättigung hindeuten. Sie weisen Neonüberschüsse bis zu 4 % auf (s. Fig. 4.4d). Ansonsten repräsentiert das Neon die Lösungskomponente.

Die kleine Abweichung der Regressionsgeraden vom Punkt für viergrädiges Wasser rührt einerseits von der etwas höheren Hypolimniontemperatur, andererseits wahrscheinlich von systematischen Abweichungen der gemessenen Elementverhältnisse von den Löslichkeitsdaten her (s. Kap. 4.2.3). Der Schnittpunkt mit der y-Achse definiert ein Endglied, das annähernd mit den am Ostufer austretenden Gasen identifiziert werden kann. Das $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis des hypothetischen Endgliedes beträgt $(7.44 \pm 0.03) \cdot 10^{-6}$, in Übereinstimmung mit dem Resultat aus Fig. 8.4. Die bereits diskutierte kleine Abweichung vom Verhältnis in den Gasproben ist in Fig. 8.5. sichtbar.

Das Laacher See Mischungsendglied bzw. die Gasproben aus dem Uferbereich können ihrerseits als Mischung zwischen Helium aus dem Mantel und der Kruste interpretiert werden. Auf der Mischungslinie zwischen diesen Komponenten (y-Achse in Fig. 8.5) liegen ferner die Wasser- und Gasproben von der Reginarisquelle (RQ) in Mendig und vom Wallenden Born (WB) im nach ihm benannten Dorf Wallenborn. Diese Quellen sind stärker krustal beeinflusst als der Laacher See. Das $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis der jeweiligen Gasprobe beträgt $5.51 \cdot 10^{-6}$ (RQ) bzw. $3.69 \cdot 10^{-6}$ (WB).

Alle übrigen Proben in Fig. 8.5 sind als 3-Komponenten Mischungen zu erklären. In den meisten Wasserproben ist der atmosphärische Anteil recht gross, weshalb wir nicht weiter auf sie eingehen. Interessant sind die Proben vom Brunnchen in Wassenach (BW) und vom Erlenbrunnen in Mendig (EB). Legt man Mischungsgeraden durch diese Proben und den Punkt für luftgesättigtes Wasser bei 11 °C (der ungefähren Temperatur

der beiden Brunnen), so erhält man die hypothetischen nichtatmosphärischen Endglieder als Schnittpunkte mit der y-Achse. Die $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse dieser Endglieder betragen $6.11 \cdot 10^{-6}$ (BW) bzw. $4.35 \cdot 10^{-6}$ (EB). Da es sich bei BW um eine Gasprobe handelt, wäre auch Luftkontamination denkbar. Eine Mischungsgerade durch den Luftpunkt ergäbe ein Endglied mit $^3\text{He}/^4\text{He} = 6.39 \cdot 10^{-6}$.

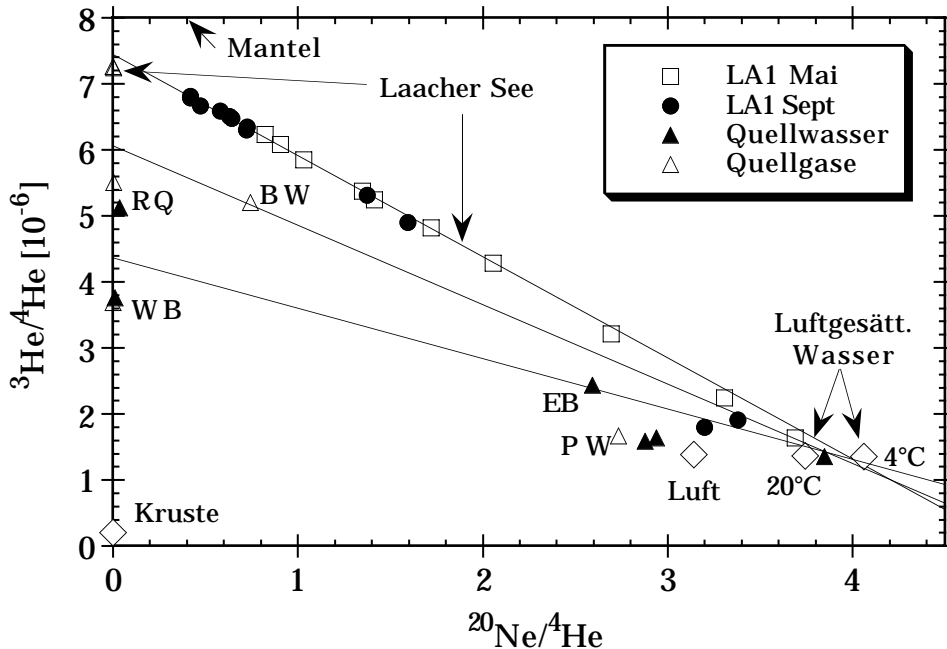


Fig. 8.5. 3-Isotopendiagramm mit Wasser- und Gasproben vom Laacher See und Umgebung. Die Daten vom See definieren eine Mischungsgerade zwischen luftgesättigtem Wasser (LgW) und den eintretenden Gasen. Eingezeichnet sind ferner Mischungsgeraden zwischen LgW und den Proben vom Brunnchen in Wassenach (BW) und vom Erlenbrunnen in Mendig (EB). Die beiden fast identischen Gasproben vom Laacher See sowie die Proben von der Reginarisquelle (RQ) und vom Wallenden Born (WB) liegen auf der Mischungsgeraden Mantel - Kruste. PW: Pferdebrunnen Wassenach.

Die Variation der nichtatmosphärischen Heliumendglieder hängt mit der Distanz zum jüngsten vulkanischen Aktivitätszentrum im Laacher See zusammen. Mit zunehmendem Abstand nimmt das $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis ab. Das Brunnchen in Wassenach liegt rund 2 km nördlich vom Laacher See, die Reginarisquelle und der Erlenbrunnen ca. 6 km südlich. Der Wallende Born liegt bereits rund 50 km südwestlich in der Westeifel, wo die vulkanische Aktivität schon länger abgeklungen ist. Wenn die Stärke der Mantelquelle zurückgeht, nimmt die Bedeutung der krustalen Kontamination zu.

Das unter der Eifel liegende Mantelreservoir hat ein tieferes $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis als der MORB-Mantel. Dunai und Baur (1993) fanden aus Messungen an Mantel-Xenolithen für den subkontinentalen Mantel unter der Eifel ein R/R_a von 6.1 ± 0.1 . Das ist tiefer als MORB-Werte ($8 - 10 R_a$, Kap. 2.2.4, Tab. 2.2) aber höher als unser Wert für den rezenten Fluss im Laacher See ($5.4 R_a$). Ausgehend von diesem subkontinentalen Mantelendglied und einem krustalen Endglied mit $0.015 R_a$ (Kap. 2.2.3, Tab. 2.2) können die nichtatmosphärischen Gase in Anteile aus Kruste und Mantel zerlegt werden. Der Man-

telanteil beträgt 88 % im Laacher See, 73 % im Brünchen in Wassenach, 66 % in der Reginarisquelle, 52 % im Erlenbrunnen und 44 % im Wallenden Born.

Einzigste Ausnahme vom Trend ist die Probe vom Pferdebrunnen in Wassenach (PW). Obwohl wie BW nahe am See gelegen, ergeben Mischungsrechnungen einen kleinen Anteil an Mantelhelium. Die heliumarme Probe liegt nahe am Luftpunkt, so dass die Unsicherheit der Extrapolation auf ein nichtatmosphärisches Endglied gross ist.

Die Proben von den Maarseen aus der Westeifel (Gemündener, Weinfelder und Pulvermaar) ergaben keinerlei Hinweise auf Helium aus dem Erdinnern.

8.2.3. Kohlenstoff/³He-Verhältnisse in der Eifel

Die Hauptkomponente aller Gase aus der Eifel ist CO₂. Da Mantelgase sich durch ein relativ uniformes C/³He-Verhältnis von rund 2 · 10⁹ auszeichnen (s. Kap. 2.3) gibt der ³He-Gehalt einen Hinweis auf den Anteil von Mantel-CO₂ am gesamten Gas. Der CO₂-Gehalt der Gasproben wurde gaschromatographisch bestimmt. Er beträgt in den meisten Fällen nahezu 100 %. Tab. 8.2. fasst die Helium- und CO₂-Gehalte sowie die Isotopen- und Elementverhältnisse der Gasproben zusammen.

Probe	⁴ He [ppm]	R [10 ⁻⁶]	CO ₂ [%]	C/ ³ He [10 ⁹]
Laacher See (LA4)	19.8	7.24	99.7	7.0
Reginaris Quelle	6.2	5.51	95.6	28
Wallender Born	52.3	3.69	100	5.2
Brünchen Wassenach	0.010	5.21	100	20'000
Pferdebrunnen Wassenach	0.028	1.66	99.7	22'000

Tab. 8.2: Element- und Isotopenzusammensetzung der Gasproben aus der Eifel.

Interessanterweise zeigen alle Proben hohe ³He/⁴He-Verhältnisse, trotz grosser Variation im Heliumgehalt. Das Helium lässt auf geringen krustalen Einfluss schliessen. Dennoch variiert das C/³He-Verhältnis um Grössenordnungen, wie in krustalen Gasen üblich (Kap. 2.3).

8.2.4. Neonisotope in der Eifel

Trotz hoher Anteile an nichtatmosphärischem Helium in den Proben vom Laacher See und der Eifel sind die Aussichten gering, die entsprechenden Neonkomponenten nachweisen zu können. Bei Wasserproben genügt das gelöste Luftneon bei weitem, um allfällige andere Beiträge zu verbergen. Die einzige Chance sind Gasproben mit minimalster atmosphärischer Kontamination. Nachdem die Gasprobe vom Wallenden Born auffällige Neonisotopenverhältnisse erbracht hatte, wurden die am wenigsten luftkontaminierten Proben speziell auf ihre Neonisotopenzusammensetzung analysiert. Dazu wurde Neon auf dem üblicherweise für Helium verwendeten Spektrometer (Tom Dooley) im

Ionenzahl-Modus gemessen. Die Beschleunigungsspannung der Ionenquelle wurde so tief gewählt, dass keine doppelt geladenen Ionen von Ar oder CO₂ entstanden, welche mit der Messung der Neonisotope interferieren könnten.

Die jeweils zweimal gemessenen Gase vom Laacher See, der Reginarisquelle und dem Brünchen in Wassenach streuen um den Luftpunkt (vergrößerter Ausschnitt in Fig. 8.6). Dagegen belegen die drei Aliquotanalysen der Gasprobe vom Wallenden Born eindeutig die Präsenz einer nichtatmosphärischen Neonkomponente. Da der geysirartige Brunnen zyklische heftige Entgasungen hervorbringt, konnte dort eine besonders reine Probe genommen werden. Die mittleren Isotopenverhältnisse betragen $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 11.2 \pm 0.5$ bzw. $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0.0497 \pm 0.0005$. Damit liegt der Wallende Born auf der Mischungslinie zwischen Luft und dem von Sarda et al. (1988) definierten MORB-Endglied.

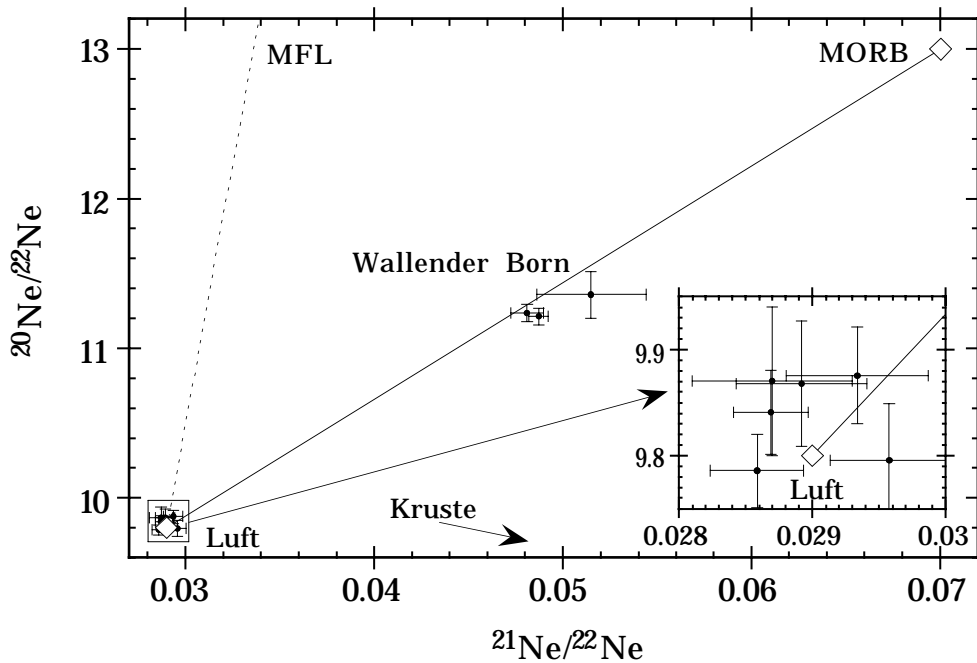


Fig. 8.6. Neon 3-Isotopendiagramm mit Gasproben aus der Eifel. Die Proben vom Laacher See, der Reginarisquelle und vom Brünchen in Wassenach streuen um den Luftpunkt (Ausschnitt). Drei wiederholte Messungen vom Wallenden Born liegen auf der Mischungslinie Luft-MORB. MFL: Massenfraktionierungslinie.

Das überraschende am Gas vom Wallenden Born ist, dass die Heliumisotope eine beträchtliche krustale Komponente anzeigen, das Neon aber auf ein reines MORB-Endglied hinweist. Eine Korrektur für den zu erwartenden krustalen Beitrag (aufgrund der krustalen He/Ne-Produktionsverhältnisse, s. Kap. 2.2.6) verschiebt den Punkt vom Wallenden Born weg von der MORB-Linie auf eine Mischungslinie, die eher auf solare Zusammensetzung des Neons in der Mantelquelle unter der Eifel hindeutet. Um das Rätsel der Neonisotope zu lösen, wurden in der Expedition von 1993 gezielt möglichst unkontaminierte Gasproben genommen. Die provisorischen Resultate scheinen den Befund von Wallenden Born mit weiteren Punkten zu unterstützen. Eine definitive Erklärung

der Neonisotopenzusammensetzung in der Eifel, wie auch generell in den terrestrischen Reservoiren, steht noch aus (vgl. Kap. 2.2.6).

8.3. Bestimmung des Heliumflusses

8.3.1. Einfache Boxbilanzen

Die einfachste Abschätzung des Heliumflusses im Laacher See ergibt sich aus dem Zuwachs des Gesamtheliuminventars zwischen den beiden Probenahmen (vgl. Glg. 5.56). Der Anstieg in 96 Tagen betrug $(8.8 \pm 0.3) \cdot 10^6 \text{ cm}^3 \text{STP } ^4\text{He}$ bzw. $(66 \pm 2) \text{ cm}^3 \text{STP } ^3\text{He}$. Das Isotopenverhältnis des zugewachsenen Heliums beträgt $(7.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-6}$, in Übereinstimmung mit zuvor berechneten Werten. Mit der Seeoberfläche von 3.31 km^2 berechnet man einen Fluss von $(8.6 \pm 0.3) \cdot 10^{12} \text{ } ^4\text{He Atome m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bzw. $(6.4 \pm 0.2) \cdot 10^7 \text{ } ^3\text{He Atome m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Diese Abschätzung liefert nur eine untere Grenze des Heliumflusses, denn jeglicher Heliumverlust wird vernachlässigt. Gase, die direkt im Uferbereich ins Epilimnion eingetragen werden, dürften den See zum grössten Teil schnell verlassen. Aus den Temperaturprofilen (Fig. 8.2a) lässt sich schliessen, dass unterhalb 15 m Tiefe kein nennenswerter Austausch stattgefunden hat. Durch Beschränkung der Heliumbilanz auf das Hypolimnion unterhalb 15 m (80 % der Seeoberfläche, 60 % des Volumens) ergibt sich ein zuverlässigerer Wert für den Heliumfluss. 90 % des zugewachsenen Heliums befinden sich in diesem Volumen. Folglich erhält man gut 10 % höhere Flüsse: $(9.6 \pm 0.3) \cdot 10^{12} \text{ } ^4\text{He Atome m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bzw. $(7.1 \pm 0.2) \cdot 10^7 \text{ } ^3\text{He Atome m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Die Annahme eines über die gesamte Sedimentfläche homogen verteilten Flusses ist jedoch nicht gerechtfertigt, wie das Heliumprofil vom September zeigt. Um ein Mass für die relative Bedeutung der in 20 bis 30 m Tiefe vor dem Lorenzfelsen vermuteten lokalen Quellen zu erhalten, berechnen wir die Heliumbilanz für die Box unterhalb 30 m Tiefe (60 % der Oberfläche, 25 % des Volumens). Sie sollte von den Quellen unbeeinflusst sein. Diese Box trägt 40 % zur gesamten akkumulierten Gasmenge bei. Bezogen auf die Oberfläche resultiert noch 60 % des Flusses ins Volumen unterhalb 15 m ($5.7 \cdot 10^{12} \text{ } ^4\text{He Atome m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bzw. $4.2 \cdot 10^7 \text{ } ^3\text{He Atome m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Die am Ostufer lokalisierten Quellen tragen mithin mindestens 40 % zum gesamten Heliumfluss im Laacher See bei.

Alle bisherigen Bilanzen beruhen ausschliesslich auf den Daten der zentralen Heliumprofile (Pos. LA1). Nicht berücksichtigt wird die horizontale Inhomogenität der Heliumverteilung, die durch die Gasaustritte erzeugt wird. Dazu müsste ein höher dimensionales Modell verwendet werden, was angesichts der geringen experimentellen Auflösung in der Horizontalen keinen Sinn macht. Vermutlich ist ein Maximum im Bereich

der Gasaustritte beim Lorenzfelsen das dominante Merkmal der horizontalen Heliumverteilung.

Horizontale Diffusionskoeffizienten in Seen liegen zwischen 0.02 und 0.3 m²/s (Peeters, 1994). Die typische Diffusionslänge $l = \sqrt{2Dt}$ liegt für die 96 Tage zwischen den Probenahmen zwischen 600 und 2200 m, also in der Größenordnung des Laacher Sees. Die horizontalen Inhomogenitäten können daher das Resultat nicht um Faktoren verfälschen, was auch die relativ kleinen Differenzen zwischen LA1 und LA3 im September belegen. Wahrscheinlich geben die zentralen Profile recht gute horizontale Mittelwerte wieder. Allerdings sind die oben angegebenen Fehler der Heliumbilanzen, die unter der Annahme horizontaler Homogenität berechnet wurden, mit Sicherheit viel zu klein.

Schwerwiegender ist das Problem des direkten Entweichens von Helium in den Gasblasen, die vor dem Lorenzfelsen aufsteigen. Dieses Gas erscheint in keiner Bilanz des im See gespeicherten Heliums, was zu einer Unterschätzung des Flusses führt.

Der Volumenanteil von Helium im eintretenden Gas ist mit rund 20 ppm (Tab. 8.2) höher als in der Luft (5.4 ppm). Zudem führt der Druckanstieg mit der Tiefe zu einer raschen Zunahme der Gleichgewichtskonzentration in Lösung im Austausch mit den Gasblasen. In 30 m Tiefe beträgt diese Gleichgewichtskonzentration ca. das 16fache der atmosphärischen Sättigung (je ein Faktor 4 von der He-Konzentration im Gas und dem Druckanstieg). Gemessen wurde maximal das 7fache der Sättigung. Deshalb geht das Helium aus dem Gas in allen Tiefen ins Wasser über, auch wenn sich die Blasen nicht vollständig auflösen.

Die bei der 93er Expedition eingesetzten Taucher berichten, dass sich die Gasblasen wenige Meter über einem starken Austritt in 31 m Tiefe auflösen (B. Rinne, pers. Mitteilung). Dies erklärt das Konzentrationsmaximum in 25 m Tiefe (Fig. 8.3b, d). Dennoch können bei ruhigen Windverhältnissen Blasenschleier an der Oberfläche beobachtet werden. Insgesamt deuten die Indizien darauf hin, dass der Grossteil des eintretenden Gases in Lösung geht, und nur ein kleinerer Teil direkt entweicht. Auf jeden Fall muss der aus Bilanzen des gelösten Heliums berechnete Fluss als untere Grenze des tatsächlichen betrachtet werden.

Eine weitere Verbesserung der Flussbestimmung bringt die Abschätzung des Heliumtransportes aus dem Hypo- ins Epilimnion und des Verlustes durch Gasaustausch. Zu diesem Zweck soll K_z aus der Temperaturbilanz berechnet werden.

8.3.2. Berechnung von K_z aus der Temperaturbilanz

Der Untersuchungszeitraum ist ideal für die Anwendung der Bilanz-Gradient Methode mit dem Tracer Temperatur. In allen Tiefen hat die Temperatur zwischen Mai und September durch oberfächliche Erwärmung und diffusiven Transport nach unten zugenommen (s. Fig. 8.2a).

Auch eine mögliche Erwärmung von unten durch den geothermischen Wärmefluss muss in einem Vulkankrater wie dem Laacher See in Betracht gezogen werden. Z. B. könnten die postulierten Grundwasserquellen Wärme in den See eintragen. Tatsächlich haben geothermische Untersuchungen von Langguth und Plum (1984) Hinweise auf eine lokale Temperaturanomalie im Bereich des Laacher Sees ergeben. Diese Autoren benutzten den Chemismus von Mineral- und Thermalwässern als sog. Geothermometer, um auf die maximale Untergrundtemperatur im Bereich des Fließsystems des jeweiligen Wassers zu schließen. Die einzige von ihnen zitierte direkte Wärmeflussmessung im See selber ergab aber mit 75 mW/m^2 keinen besonders hohen Wert. Auch bei Beobachtungen mit der OTS-Sonde im Bereich der Gasaustritte bei Pos. LA2 fanden wir keine Hinweise auf eine nennenswerte Temperaturanomalie.

Die im tiefsten Bereich beobachtete Erwärmung um $0.15 \text{ }^\circ\text{C}$ (Ausschnitt in Fig. 8.2a) kann problemlos durch turbulente Diffusion erklärt werden. In 96 Tagen betrug die Zunahme des Energieinhaltes unterhalb 35 m ($1.7 \cdot 10^7 \text{ m}^3$) maximal 10^{13} J . Bereits ein K_z von nur gut $0.03 \text{ cm}^2/\text{s}$ genügt angesichts des Temperaturgradienten von 0.05 K/m zur Erzeugung des benötigten Wärmeflusses von ca. 0.7 W/m^2 durch die Querschnittsfläche in 35 m Tiefe ($1.7 \cdot 10^6 \text{ m}^2$). Nur durch geothermischen Wärmefluss erklärbar ist hingegen die schwache Temperaturinversion in den untersten 3 bis 5 Metern. Der Temperaturgradient ist hier zehnmal kleiner als in 35 m Tiefe. Das lässt bei gleichem K_z auf einen zehnmal kleineren Fluss schließen, im Einklang mit dem gemessenen Wert von 75 mW/m^2 .

Es sind also keine Indizien für einen ungewöhnlich hohen Wärmefluss im Laacher See vorhanden. Für die K_z -Berechnung aus der Temperaturbilanz nach (5.46) wird der gemessene Wert von 75 mW/m^2 verwendet. Fig. 8.7 zeigt das resultierende K_z -Profil.

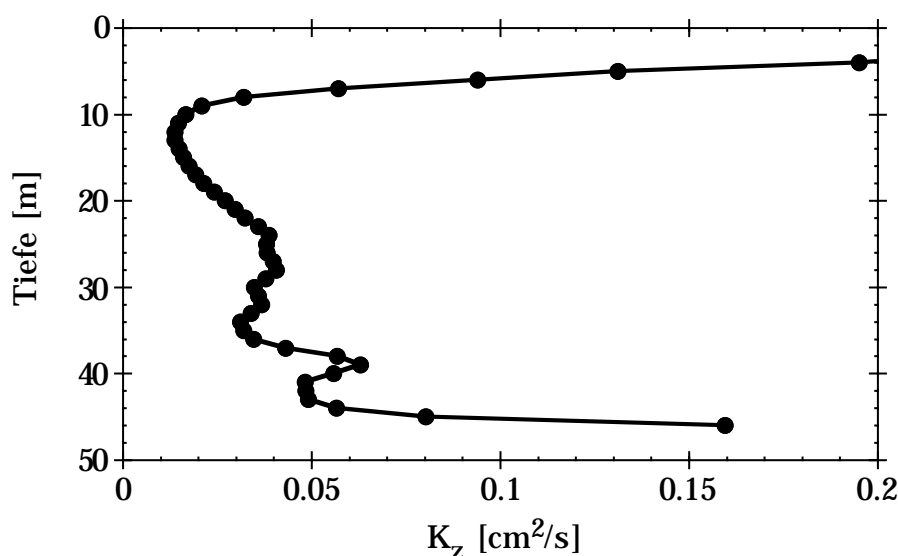


Fig. 8.7: K_z im Laacher See, berechnet aus den Temperaturprofilen von Fig. 8.2.

K_z liegt in fast allen Tiefen unter $0.05 \text{ cm}^2/\text{s}$, mit einem Minimum von $0.015 \text{ cm}^2/\text{s}$ in der Thermokline um 12 m Tiefe. Diese Werte sind klein im Vergleich zu den längerfristigen Mittelwerten im Zuger- und Luganersee (Kap. 6). Hier umfasst die Berechnung nur eine Sommerperiode mit sehr starker Schichtung.

8.3.3. Der Heliumfluss im CHEMSEE-Modell

Ein CHEMSEE-Modell des Laacher Sees erlaubt die beste Abschätzung des Heliumflusses. In diesem Modell können vertikale turbulente Diffusion und Gasaustausch berücksichtigt werden. Auch die vertikal inhomogene Verteilung des Heliumeintrages, die zur Ausbildung eines Maximums in 25 m Tiefe im Septemberprofil geführt hat, kann modelliert werden. Dadurch kann der Fluss in die Beiträge der Punktquelle bei den Gasaustritten und einer diffusen Flächenquelle zerlegt werden. Aufgrund der eindimensionalen Modellstruktur kann auch im CHEMSEE-Modell die horizontale Inhomogenität der Heliumverteilung nicht berücksichtigt werden. Es gelten diesbezüglich die selben Bemerkungen wie bei den Boxberechnungen.

Alle im folgenden beschriebenen Modelle gehen vom gemessenen ^3He -Profil im Mai aus und berechnen Vorhersagen für den September, die mit den Messdaten verglichen werden. Das tritiogene ^3He wird vernachlässigt. Tab. 8.3. fasst die wichtigsten Modellparameter zusammen.

Prozess	Parameter	Wert
Oberflächenmischung	h_{epi}	Anstieg von 3 m (Mai) auf 8 m (Sept.)
Turbulente Diffusion	K_z	Profil nach Fig. 8.7
Gasaustausch	v_{He}, v_3	$v_{\text{He}} = 1 \text{ m/d}$; $v_3 = 1.075 v_{\text{He}}$ (Kap. 2.6.2)
Heliumfluss	F_{Sed}	variabler Flächenfluss [$\text{Atome m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
	F_Q	variable Punktquelle [Atome s^{-1}]
Hydrographie	Q, A, h_{max}	s. Tab. 8.1
Morphometrie	$A(z)$	nach Scharf und Menn (1992)

Tabelle 8.3. Prozesse und Parameter in den CHEMSEE-Modellen des Heliums im Laacher See.

Im Modell H (Fig. 8.8a) wird der ^3He -Fluss durch einen räumlich uniformen Flächenfluss F_{Sed} beschrieben, dessen Wert von $7.1 \cdot 10^7 \text{ Atome m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aus der Boxbilanz unterhalb 15 m stammt. Wie erwartet kann das Maximum in 25 m Tiefe damit nicht erklärt werden. Dafür wird der Zuwachs im Tiefenwasser überschätzt. Als logische Verbesserung reduzieren wir den Flächenfluss auf den Wert aus der Boxbilanz unterhalb 30 m ($4.2 \cdot 10^7 \text{ Atome m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) und geben die Differenz von total $9.6 \cdot 10^{13} \text{ Atome s}^{-1}$ als Punktquelle F_Q zu. Eine strikt punktförmige Einspeisung kann bei den kleinen K_z -Werten die Breite des Maximums im Septemberprofil nicht erklären. Die Quelle wird daher gleichmässig auf einen Tiefenbereich verteilt, der durch Anpassung an die Messdaten

auf 18 bis 28 m festgelegt wird. Das resultierende Modell Q (Fig. 8.8a) ergibt befriedigende Übereinstimmung mit dem gemessenen Profil.

Die Verteilung der Einspeisung auf einen gewissen Bereich erscheint physikalisch sinnvoll. Die Untergrenze des Einspeisebereichs im Modell steht im Einklang mit den erwähnten Taucherberichten, wonach sich die Blasen wenige Meter oberhalb des Eintritts in 31 m Tiefe auflösen. Je nach Blasengrösse und Stabilitätsverhältnissen können die Blasen aber auch weiter aufsteigen, wie die Beobachtungen von Blasenschleiern an der Oberfläche beweisen. Haupthindernis auf dem Weg zur Oberfläche ist die Thermokline, die sich im September bis in Tiefen erstreckt, die der Obergrenze des Einspeisebereichs im Modell entsprechen (vgl. Fig. 8.2).

Der totale Heliumfluss im Modell Q unterscheidet sich nicht vom Resultat der Boxbilanz unterhalb 15 m. Theoretisch müsste eine Erhöhung des Flusses resultieren, da der Austausch durch turbulente Diffusion berücksichtigt wird. Dieser Austausch ist aber sehr gering, wie eine Abschätzung mit dem 1. Fick'schen Gesetz zeigt. Aus dem mittleren ^3He -Gradienten von $1.7 \cdot 10^{12}$ Atomen/ m^4 und einem K_z von $0.015 \text{ cm}^2/\text{s}$ in 15 m Tiefe resultiert bezogen auf die gesamte Seeoberfläche ein Fluss von $2 \cdot 10^6$ ^3He Atomen $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ oder rund 3 % des Gesamtflusses. Die Sensitivität des Modells genügt nicht, um diesen Effekt nachzuweisen.

Addieren wir 3 % zum Resultat aus der Boxbilanz, so ergibt sich als endgültiger Wert für den Heliumfluss im Laacher See $1 \cdot 10^{13}$ ^4He Atome $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ mit einem $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis von $7.4 \cdot 10^{-6}$. 60 % des Flusses sind homogen über den See verteilt und können recht genau aus der Boxbilanz bestimmt werden. Die restlichen 40 % stammen von den Gasaustritten in 30 m Tiefe vor dem Lorenzfelsen und sind aufgrund der horizontalen Inhomogenität mit einer geschätzten Unsicherheit von ± 50 % behaftet. Der Gesamtfluss ist somit auf ca. ± 20 % genau festgelegt, stellt aber wegen des direkten Entweichens von Gasblasen nur eine untere Grenze dar.

Als ergänzende Möglichkeit zur Fehlerabschätzung betrachten wir eine Sensitivitätsanalyse im CHEMSEE-Modell. Fig. 8.8b zeigt, wie die Vorhersagen der ^3He -Überschüsse im Epilimnion auf Änderungen der Parameter K_z , F_{He} und v_{He} um je 20 % reagieren (F_{He} umfasst in dieser Diskussion den Gesamtfluss $F_{\text{Sed}} + F_{\text{Q}}$). Am wenigsten bewirkt eine Änderung von K_z , am sensitivsten sind die Vorhersagen im Epilimnion auf die Gasaustauschgeschwindigkeit v_{He} . Die recht gute Übereinstimmung des Modells Q mit den Messwerten belegt, dass der eingesetzte Wert von 1 m/d für v_{He} korrekt ist.

Der Laacher See mit seinen gewaltigen Überschüssen an Helium und CO_2 wäre ein interessantes natürliches Laboratorium zum Studium des Gasaustausches. Während der winterlichen Zirkulation müssen grosse Flüsse aus dem See bestehen, um das im Sommer akkumulierte Gas wieder abzugeben. Im Sommer kann, wie hier gezeigt, der Fluss aus dem Sediment in den See studiert werden. Im Winter könnte unter Benutzung dieser

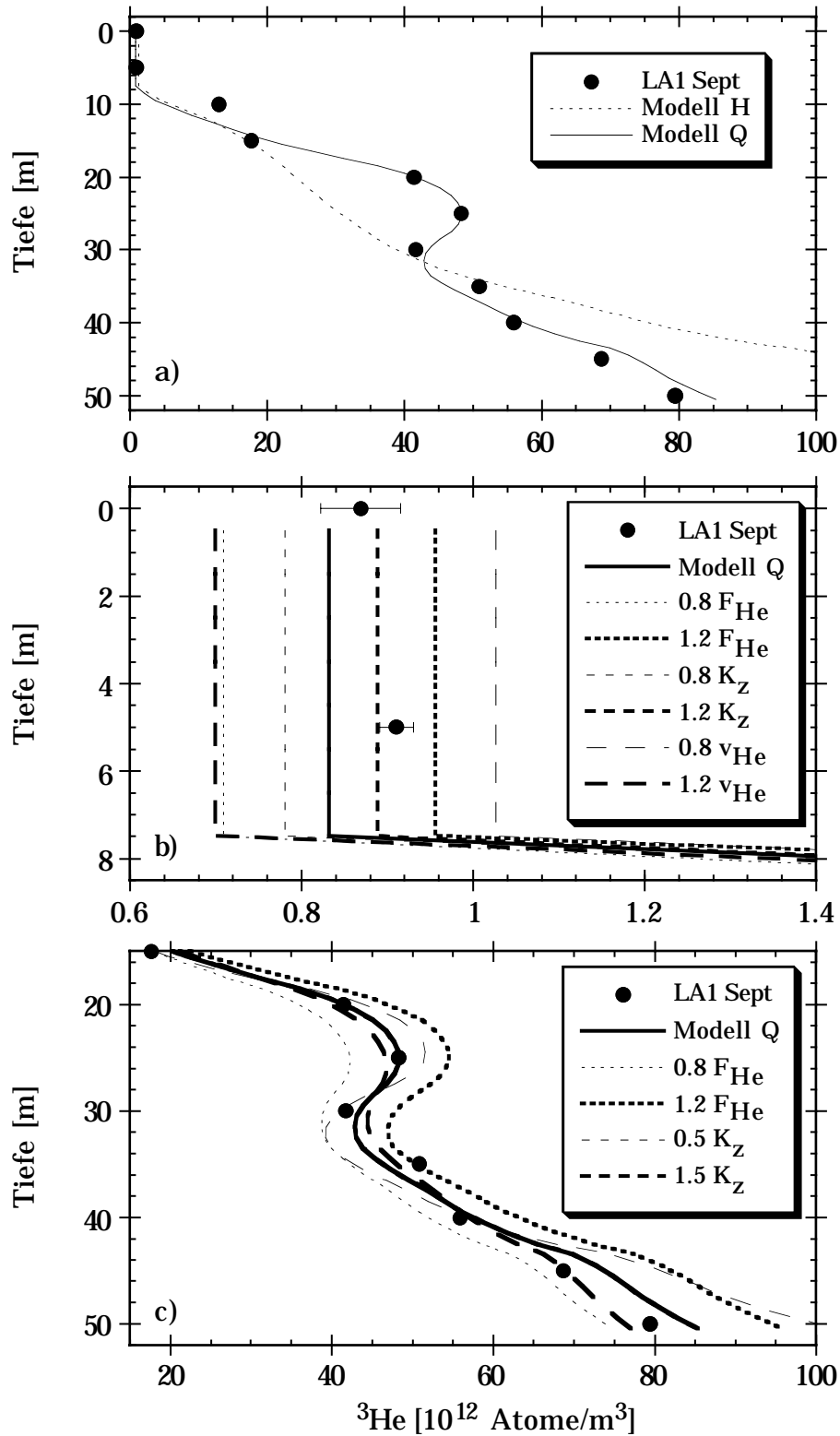


Fig. 8.8: ^3He -Überschuss in verschiedenen CHEMSEE-Modellen des Laacher Sees. a) Modell H: homogen verteilter Fluss. Modell Q: Eintrag aufgeteilt in homogenen Flächenfluss (60 %) und zwischen 18 und 28 m verteilten Quellfluss (40 %). b) Sensitivitätsanalyse im Epilimnion: Die Parameter F_{He} , K_z und v_{He} gegenüber Modell Q je um 20 % erhöht bzw. erniedrigt. c) Sensitivitätsanalyse im Hypolimnion: Die Parameter F_{He} und K_z um 20 bzw. 50 % erhöht bzw. erniedrigt. Variationen von v_{He} haben keinen merklichen Effekt.

Resultate der Fluss aus dem See in die Atmosphäre bestimmt werden. Eine kombinierte Untersuchung über beide Perioden wäre ideal.

Die Vorhersagen für das Hypolimnion (Fig. 8.8c) sind praktisch unabhängig von v_{He} . Wichtiger ist K_z , vor allem zur Beschreibung der Form des Profils. Auch eine 50 %ige Änderung von K_z hat aber insgesamt einen kleineren Effekt als eine Änderung von F_{He} um 20 %. Dies beweist, dass Flüsse aus dem Sediment während der Stagnationsphase im Sommer präzise bestimmt werden können.

8.3.4. Der CO_2 -Fluss im Laacher See

Nachdem der Heliumfluss bestimmt worden ist, kann der Fluss von CO_2 aus dem Erdmantel durch den Laacher See mit dem in den Gasproben gemessenen C^3He -Verhältnis abgeschätzt werden. Für ein MORB-Reservoir würde man ein Verhältnis von ca. $2 \cdot 10^9$ erwarten. Unsere Messungen ergaben $7 \cdot 10^9$ (Tab. 8.2). Giggenbach et al. (1991) erhielten in Gasproben vom Ostufer des Sees Werte zwischen $3 \cdot 10^9$ und $5 \cdot 10^9$. Deshalb schätzen wir das C^3He -Verhältnis im Laacher See auf $(5 \pm 2)10^9$.

Mit diesem Verhältnis folgt als Minimalwert für den CO_2 -Fluss im Laacher See $(4 \pm 2) \cdot 10^{17}$ Moleküle $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, oder $(20 \pm 10) \text{ mol m}^{-2} \text{a}^{-1}$. Die totale CO_2 -Menge, die der See jährlich freisetzt, beträgt $70 \cdot 10^6 \text{ mol/a}$ oder 3000 t/a , mit einer Unsicherheit von 50 %. Das ist mindestens 2 Größenordnungen weniger, als bei der Katastrophe am Nyos See schlagartig freigesetzt wurde (die Schätzungen variieren um eine Größenordnung von $2.4 \cdot 10^5 \text{ t}$ (Giggenbach, 1990) bis maximal $2.4 \cdot 10^6 \text{ t}$ (Kling et al., 1987)). Da die Entgasung im Laacher See vergleichsweise kontinuierlich erfolgt, können keine gefährlichen Ansammlungen von CO_2 entstehen.

8.4. Vergleich mit anderen vulkanischen Kraterseen

In den letzten Jahren wurden an verschiedenen Seen in Vulkankratern ähnliche Untersuchungen wie am Laacher See durchgeführt. Die publizierten Arbeiten vom Nyos See (Sano et al., 1990), Mashu See (Igarashi et al., 1992) und Crater Lake (Collier et al., 1991) wurden bereits in Kap. 2.3.2 erwähnt. Eigene Resultate vom Nemrut See werden demnächst veröffentlicht (Kipfer et al., 1994). Es ist interessant, die Resultate aus vulkanischen Gebieten in verschiedenen Erdteilen miteinander zu vergleichen. Tab. 8.4 fasst die wichtigsten Ergebnisse zusammen.

Das $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis trennt die fünf Seen in zwei Gruppen: Mashu, Crater und Nemrut mit MORB-ähnlichen Werten, Nyos und Laacher See etwas tiefer. Beim Heliumfluss sticht vor allem der Nyos See hervor, aber der Laacher See folgt immerhin an zweiter Stelle. Das selbe Bild mit umgekehrten Vorzeichen zeigt sich beim Wärme/ ^3He -Verhältnis. Die Werte von Nyos und Laacher See sind weit tiefer als in ozeanischen

hydrothermalen Quellen ($\sim 3 \cdot 10^{-7}$ J/Atom, s. Kap. 2.3.1). Es scheint, dass sich die Maarsysteme Nyos und Laacher See deutlich von den anderen Seen abheben. Modelle für die ihnen zugrundeliegenden geochemischen und geophysikalischen Vorgänge werden von Giggenbach et al. (1991) diskutiert. Sie werden als CO_2 -reiche Tieftemperatursysteme charakterisiert. Der Laacher See ist aber der einzige der betrachteten Kraterseen, der keinen sonderlich erhöhten Wärmefluss aufweist.

Beim C^3He -Verhältnis und dem CO_2 -Fluss ergibt sich ein weniger klares Bild. Interessant ist die Feststellung, dass der gesamte CO_2 -Umsatz recht einheitlich ist. Im Laacher See ist er am kleinsten. Der vom Sicherheitsaspekt aus entscheidende Unterschied zwischen Laacher und Nyos See ist aber nicht der kleinere CO_2 -Fluss, sondern die Tatsache, dass hier eine regelmässige Entgasung stattfindet. Auch die kleinere Tiefe des Laacher Sees lässt keine derart grossen Ansammlungen von CO_2 zu wie am Nyos See.

	Nyos	Mashu	Crater	Nemrut	Laacher
Oberfläche [km^2]	1.49 ^a	20	53	11	3.31
Volumen [10^6 m^3]	175	?	16000	980	103
Tiefe [m]	208	210	590	167	52
Zirkulationen pro Jahr	0	2	?	1?	1-2
$^3\text{He}/^4\text{He}$	$7.8 \cdot 10^{-6}$	$9.4 \cdot 10^{-6}$	$9.8 \cdot 10^{-6}$	$10.3 \cdot 10^{-6}$	$7.4 \cdot 10^{-6}$
^3He -Fluss [$\text{At. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	$2.4 \cdot 10^9$	$8.7 \cdot 10^6$	$5.4 \cdot 10^6$	$> 6 \cdot 10^7$	$7.4 \cdot 10^7$
Wärme/ ^3He [J/At.]	$2.9 \cdot 10^{-10}$	$1.7 \cdot 10^{-7}$	$1.0 \cdot 10^{-7}$	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$1.0 \cdot 10^{-9}$
Wärmefluss [mW/m^2]	698	1500	1000	750	75
C^3He	$3.0 \cdot 10^{10}$	$1.8 \cdot 10^{11}$	$4.0 \cdot 10^{10}$	$1.6 \cdot 10^{10}$ ^b	$5.0 \cdot 10^9$
CO_2 Fluss [$\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-7}$	$> 3.6 \cdot 10^{-6}$	$6.2 \cdot 10^{-7}$
CO_2 Umsatz [kg/a]	$8.6 \cdot 10^7$	$7.2 \cdot 10^7$	$2.6 \cdot 10^7$	$> 2.4 \cdot 10^7$	$2.8 \cdot 10^6$

Tab. 8.4.: Vergleich der Helium-, Wärme- und CO_2 -Flüsse in verschiedenen Kraterseen der Erde. Quellen: Nyos See: Sano et al., 1990; Mashu See: Igarashi et al., 1992; Crater Lake: Collier et al., 1991; Nemrut See: Kipfer et al., 1994; Laacher See: diese Arbeit.

^a Für die Flussberechnung wird im Nyos See eine Eintragsfläche von nur 0.52 km^2 angenommen.

^b bestimmt an Gasproben von Quellen innerhalb der Nemrut-Caldera.

Die Resultate von Kraterseen aus der ganzen Welt demonstrieren das grosse Potential der Analyse von Helium in Seen zum Studium der Entgasung aus dem Erdinnern. Die Speicherwirkung der Seen ermöglicht die Quantifizierung der beteiligten Gasflüsse, wenn man genug über die Mischungsprozesse im Wasserkörper weiss. An dieser Stelle treffen sich die seephysikalischen und erdwissenschaftlichen Fragestellungen. Erst die Kombination von Erkenntnissen aus beiden Gebieten führt zu einem umfassenden Verständnis der Vorgänge in Seen wie dem Laacher See oder dem Van See (Kipfer et al., 1994). Die Erforschung von Seen in vulkanischen Gebieten mit der ^3H - ^3He -Methode ist vielversprechend, auch wenn die ursprüngliche Idee der Bestimmung eines Wasseralters oft nicht verwirklicht werden kann.