

9 Schlussfolgerungen

Sämtliche Grundwässer im Beq'at Kinarot sind durch die Auflösung von Kreide-, Kalk-, Dolomitgesteinen sowie Evaporiten charakterisiert. Im Graben *sensu stricto* und in dessen unmittelbarer Nähe aufsteigende Evaporations- und Ablationssole werden durch meteorische Grundwässer verdünnt. Daraus resultieren, abgesehen von distalen Neubildungswässern, die gering bis hoch mineralisierten Grundwässer im Beq'at Kinarot.

Anhand von **Spider-Mustern und Elementverhältnissen** werden die **Grundwässer** aus dem Umfeld des Beq'ot Kinarot gruppiert. Sie repräsentieren die gesteinsbildende Mineralogie der Entlastungsaquifere sowie die makrochemischen Charakteristika der süßen und thermo-salinaren Endglieder. Die spezifische Anbindung der jeweiligen Grundwässer an einen oder mehrere lithologisch verschiedene Aquifere sowie an aufsteigende thermo-salinare Tiefenwässer führt dazu, dass die *Spider*-Typen nicht notwendigerweise den Quellgruppen entsprechen.

Typ B1 Wässer (Alonei HaBashan 3, Huqoq, Kalanit 2, D 906, Amnon Beach, Migdal Quelle, Ein Tina) sind kaum oder unbeeinflusst von thermo-salinaren Wässern und lösen hauptsächlich Kalksteine der Judea Gruppe und jeweils geringe Mengen an Halit und Gips. Ein höherer Cl-Überschuss, höhere $(Na+K)/(Mg+Ca)$ Verhältnisse und niedrigere Ca/Cl- und Ca/SO₄ Verhältnisse zeigen nur in D 906 im Frühjahr einen deutlichen Anteil an aufsteigendem Salzwasser.

Wässer vom **Typ B2** sind durch die überwiegende Lösung junger biogener Avedat- und nur geringfügig der Judea-Karbonate gekennzeichnet, in denen jeweils Beimengungen von Gips und Halit vorhanden sind. Der Typ B2 ist untergliedert in **B2a** (Tabgha Gruppe) und **B2b** (Hammat Gader), welche sich in den Elementverhältnissen (Na/SO₄, Cl/SO₄, Sr/Cl), dem Q-Wert und dem Cl-Überschuss unterscheiden. Grund dafür ist die Zumischung von aufsteigenden Na-Ca-Mg-Cl-Solen in Tabgha, wohingegen die Grundwässer in Hammat Gader davon unbeeinflusst sind. Niedrige Cl/Br Verhältnisse und hohe U-Gehalte zeigen in Hammat Gader einen Kontakt zu der bituminösen und phosphatreichen Mt. Scopus Gruppe an. Mg/Ca- und Br/Na Verhältnisse belegen den Einfluss von Vulkaniten.

Das **Typ C**-Wasser (Ein Porih) ist durch geringe K- und erhöhte SO₄-Gehalte, niedrige Sr/Ca- sowie hohe Mg/Ca Verhältnisse gekennzeichnet, die charakteristisch für die oxidative Basaltverwitterung sind. Hohe Cl/Br Verhältnisse belegen die Abwesenheit von residualen Solen und sehr hohe NO₃-Gehalte die starke antropogene Beeinflussung aus der Landwirtschaft.

Thermo-salinare Wässer (**Typ B3** und **Typ D**) entstammen ausschließlich dem Unteren Aquif-

fer. Typ B3 (Tiberias Quellen, KIN 8, KIN 10b, Fuliya A, Fuliya B), mit einem molaren Mg/Ca Verhältnis <1 , tritt in der westlichen Flanke aus. Anhand der Cl/Br- und Cl/SO₄ Verhältnisse sowie der Q-Werte kann Typ B3 unterteilt werden: (1) Fuliya und Tabgha (KIN 8) wo die Halit- und Gipslösung eine höhere Bedeutung hat als in (2) den Tiberias Quellen, die zudem hohe Anteile an Na-Ca-Mg-Cl-Solen aufweisen. Gering mineralisierte Wässer in Fuliya und Tabgha haben niedrigere Cl/Br Verhältnisse als die zu diesen Gruppen gehörenden thermo-salinaren Endglieder KIN 10b und KIN 8, die ihrerseits deutlich höhere Cl/Br Verhältnisse aufweisen als in den Tiberias-Quellen. Für KIN 8 und KIN 10b resultiert daraus eine verstärkte Halit-Ablation von verdeckten Evaporitkörpern, ähnlich dem in Zemah. Für die Ablation solcher Evaporite spricht, dass der Na-Überschuss (molar 2Na-Ca-Mg) in den höher salinaren Wässern des Beq'at Kinarot stets >0 ist.

Typ D umfasst ausschließlich Grundwässer der östlichen Grabenflanke (Ha'On 1, Gofra), die generell ein molares Mg/Ca Verhältnis >1 zeigen. Die Grundwässer in Ha'On 1 sind durch geringe Mengen an schweren Alkalien und besonders durch die niedrigen Cl/Br- und hohen Mg/Ca (>1) Verhältnisse als Derivate einer primären Evaporationssole charakterisiert.

Deutlich erhöhte B-Gehalte sind in Gofra durch die Laugung der oligozänen Glaukonite im Einzugsgebiet festzustellen.

Das saline Endglied in Tiberias entspricht einer Mischung aus einer Ablationssole und einer chemisch modifizierten, residualen Evaporationssole. Eine solche modifizierte Restsole als Teil des salinaren Endgliedes ist im Beq'at Kinarot nur in und nördlich von Tiberias zu beobachten, wobei die Mischungsverhältnisse regional stark schwanken. Die Modifikation der Primärsole ist das Resultat ihrer Migration durch Alkali-Olivin-Basalte und Gabbros sowie Kalksteine, wie sie im Graben *sensu stricto* und der westlichen Flanke vorkommen. Durch die Chloritisierung und Albitisierung der Magmatite und die Dolomitisierung der Kalksteine wurde das ursprüngliche Mg/Ca Verhältnis von >1 zu Mg/Ca <1 verändert. Aufgrund der starken Ähnlichkeiten (Cl/Br, Na/Cl) zwischen Tiberias und Ha'On 1, kann die Primärsole in Tiberias einem salinaren Endglied ähnlich dem in Ha'On 1 entsprechen.

Der **monomiktische See Genezareth** ist saisonal stratifiziert. Das Porenwasser ist bereits vor seinem Austritt makrochemisch an den See angeglichen. Die überwiegende Mehrheit der Seeprofile zeigt daher keine signifikanten makrochemischen Veränderungen in Bodennähe. Nur in den Seeprofilen „Barbutim“, „G“ und „Tabgha“ wurden deutliche und wiederholt messbare Veränderungen von Na, Cl, Br, $\delta^{18}\text{O}$ und δD im Sedimentnähe beobachtet. Wie Punkt „G“ zeigt, handelt es sich nicht generell um saline Zutritte, sondern auch um, entweder am Seeboden entlang fließendes kälteres und daher dichteres Jordan-Wasser, oder um

süßes Grundwasser.

Das Seewasser unterscheidet sich von den großen Vorflutern durch Anreicherung von Na, Cl, Br, B und SO₄. Der See weist ganzjährig höhere Mg/Ca-Verhältnisse auf als die Wässer der Westflanke oder der Vorfluter, was neben der Calcitfällung auf einen Grundwasserzustrom aus der östlichen Grabenflanke hinweist. Das Profil „Barbutim“ zeigt einen Mg-Eintrag durch thermo-salinare Grundwässer an. Grundwasserzuflüsse und das Karbonat-Recycling im Hypolimnion verursachen ein generell höheres Sr/Ca Verhältnis im Seewasser als im Jordan.

Die Cl/Br Verhältnisse im Seewasser liegen zwischen denen von Tabgha und Fuliya. Die Porenwässer zeigen außerhalb des Grabens *sensu stricto* die chemischen Charakteristika der angeschlossenen Quellsysteme, während die Cl/Br Verhältnisse des Porenwassers innerhalb des Grabens ausschließlich die niedrigen Werte residualer Solen aufweisen. Im Porenwasser ist mit zunehmender Teufe ein Anstieg der regional stark unterschiedlichen Na- und Cl-Gehalte und eine leichte Abnahme der Na/Cl Verhältnisse zu verzeichnen.

Bor wird in den See durch äolische Fracht, Basaltverwitterung, Gipslösung und Salinarwässer eingetragen. Im Porenwasser werden die B-Gehalte von zuströmenden Salzwässern und der Verwitterung des basaltischen Detritus bestimmt.

Die Signaturen der **stabilen Isotope** $\delta^{18}\text{O}$ und δD der **Grundwässer** im Beq'at Kinarot liegen auf einer zur lokalen MWL subparallelen Geraden. Die salinaren Grundwässer sind Mischungen aus isotopisch schweren, thermo-salinaren Wässern (Tiberias, KIN 8, KIN 10b und Ha'On 1) mit isotopisch leichten Neubildungswässern. Letztere unterscheiden sich durch isotopisch unterschiedliche Niederschläge, die aus topographischen Höhendifferenzen zwischen den Infiltrationsflächen abzuleiten sind. Die $\delta^{18}\text{O}$ und δD in den gering salinaren Quellwässern in Tabgha (Ein Sheva, KIN 7) sind isotopisch leichter als deren Neubildungswässer im Galilee. Dadurch ist ein unbekannter oder bislang mengenmäßig unterschätzter, isotopisch stark abgereicherter Grundwasserzustrom durch den permeablen Korazim-Block in das Beq'at Kinarot nachweisbar. Aufgrund der geologischen Gegebenheiten kann ein Grundwasser vom Typ Shamir, das im Hula-Tal angetroffen wurde, dafür in Frage kommen. Dessen Gehalte an $\delta^{18}\text{O}$ und δD verweisen wiederum auf ein Neubildungsgebiet im Hermon Massiv. Auch in Alonei HaBashan 3 und Hammat Gader sind isotopisch ähnliche Wässer wie in KIN 7 und Ein Sheva anzutreffen. Daraus wird auch hier ein Grundwasserstrom abgeleitet, der südwärts durch den Golan strömt und dessen Ursprung sich in den hoch gelegenen Gebieten des nördlichen Golan oder der Hermon-Antiklinale befindet.

Das Wasser des See Genezareth ist auf Grund der hohen Evaporation hinsichtlich $\delta^{18}\text{O}$ und δD generell schwerer als jedes Grundwasser der Region. Signifikante Abreicherungen der

stabilen Isotope auf Grund von Fremdwasserzutritten sind in Bodennähe nur in den Profilen „G“ und „Barbutim“ beobachtet worden. Ein unterirdischer Zustrom von isotopisch leichtem Grundwasser (Typ Shamir), auch in den See Genezareth hinein, ist anhand der stabilen Isotopensignatur und der Makrochemie in der Bohrung Barbutim nachgewiesen. Das Wasser der Bohrung ist eine Mischung aus (1) thermo-salinarem Wasser des Typs KIN 8, (2) Tiefenwasser des Sees, (3) Neubildungswasser aus dem Tabgha EZG und (4) einem Wasser vom Typ Shamir.

Durch biogene Calcitfällung ist das Seewasser gegenüber den Grundwässern des Beckens an $\delta^{13}\text{C}$ angereichert. Eintretende Grundwässer sind nur in „Barbutim“ und „G“ anhand leichter $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen nachweisbar. Die generelle Abreicherung im Hypolimnion kann sowohl die Folge des Karbonat-*recycling* als auch zutretender Grundwässer sein.

Anhand der **REY-Muster** wurden 5 *Grundwassertypen* klassifiziert. **Typ REY-A1** (KIN 5, Kalanit 2, Huqoq, Ein Tina, Migdal Quelle, Amnon Beach, Alonei HaBashan 3, Gofra, Druzi Quelle) repräsentiert Wässer aus Karbonaten der Judea Gruppe mit mergeligen Einschaltungen, die als Ionenaustauscher eventuell primär vorhandene REY-Anomalien ausgleichen. Muster mit einem ausgeprägt glatten Verlauf und einem schwachen Abfall von den leichten REE zu den schweren REE sind daher typisch. Der **Typ REY-A2** (KIN 7, Ein Sheva, Sartan gering salinar, Sartan salinar, Barbutim), gekennzeichnet durch geringe REY-Gehalte sowie ausgeprägte negative Ce- und positive Gd- und Y-Anomalien, repräsentiert das sauerstoffreiche, verkarstete System der eozänen Karbonat-Aquifere. Alle Tabgha Wässer (bis auf KIN 8) gehören diesem Typ an. Die thermo-salinaren Wässer vom **Typ REY-A3** (Tiberias Quellen) zeigen sehr flache Muster mit ausgeprägten Y-Anomalien, die denen des Typs REY-A1 stark ähneln. Sie treten nur in Tiberias auf und stehen mit den hydrothermal überprägten Kalksteinen des Unteren Aquifers in Kontakt. Thermo-salinare Grundwässer des **Typs REY-A4** (D 906, Fuliya A, Fuliya B, KIN 10b, KIN 8) sind durch REY Muster gekennzeichnet, die einen überwiegend steilen Verlauf der leichten REE (La bis Sm) zeigen. Diese Wässer haben mit stark veränderten Kalksteinen, die durch den Kontakt mit intrusiven Magmatiten rekristallisiert und silifiziert sind, unter erhöhten Temperaturen reagiert. Diesem Typ gehören KIN 8 und abgesehen von KIN 5 alle Wässer aus Fuliya an. Der **Typ REY-B** kommt nur in der östlichen Grabenflanke (Ha'On 1, Hammat Gader Quellen) sowie in Ein Porih vor. Die variablen Ce-, Gd- und Y-Anomalien der Muster sind typisch für Verwitterungslösungen aus den Golan- und Cover-Basalten, in denen FeOOH-Fällungen stattgefunden haben.

Die **REY-Muster im See Genezareth** ähneln denen des Jordans. In der Wassersäule zeigen sich Variationen, die besonders den *Redox*-Verhältnissen geschuldet sind. Jedoch zeigt das

Verhalten der REY, und besonders das des Ce, im Gegensatz zu Haupt- und Nebenelementen sowie den analysierten Isotopen einen signifikanten und über das gesamte Jahr hinweg reproduzierbaren Zufluss an Fremdwasser in den See an. Besonders deutlich ist das am Seeprofil „Barbutim“ zu sehen, welches REY-Muster aufweist, die mit denen aus dem Hypolimnion korrespondieren, obwohl das Profil ausschließlich im Epilimnion liegt und *redox-cycling* der REY unmöglich ist. Grund dafür ist thermo-salines Wasser vom Typ Barbutim, welches in den See zutritt. Dieses artesische und chemisch reduzierende Wasser zeigt jedoch REY-Muster, die sich klar von denen unterscheiden, die in „Barbutim“ an der Sediment-Wasser Grenzfläche zu beobachten sind. Entscheidend dafür ist der Aufstieg thermo-salinerer Wässer durch das reduzierende Sediment, wobei sie chemisch verändert in den See eintreten. Dabei werden besonders die leichten und schweren REE stärker angereichert als die mittleren, was aus der Auflösung von Fe-Fällungen folgt. Weitere Zutritte werden in „Shaldag“, „Ha’On“, „Maga’an“, „Tabgha“ und „Ein Gev“ angezeigt. In diesen Profilen zeigen die REY-Muster des Bodenwassers starke Ähnlichkeiten zu nahen, aber landseitig gelegenen, thermo-salinen Grundwässern.

Die in nahezu allen Seeprofilen auftretende, charakteristische Änderung der *redox*-sensitiven Ce-Anomalie in Bodennähe beweist zudem einen steten, flächenhaft diffusen oder konzentrierten Zustrom an Fremdwasser. Die Ce-Anomalie im bodennahen Seewasser variiert auf Grund der regional und saisonal wechselnden *Redox*-Konditionen. Sie wird jedoch durch die ganzjährig konstante Ce-Anomalie der austretenden Salinarströme minimiert, bzw. in deren Richtung verändert, anhand dessen erstmalig ein flächenhafter Fremdwasserzutritt in den See direkt nachgewiesen wurde.

Die vorliegende Untersuchung zeigt dass die Herkunft der Grundwasserkomponenten und ihrer Fließpfade nur durch eine kombinierte Betrachtung von hydrochemischen und isotopenchemischen Parametern abzuleiten ist. Die Erfassung saisonaler hydrochemischer Unterschiede erbringt ein klares Verständnis für die quellspezifischen hydraulischen Verhältnisse und daher des Gefährdungsgrades jeder einzelnen Grundwassermessstelle.

Für die **zutretende Menge an Grundwasser in den See**, sowie deren Cl- und Br-Gehalte, ergab die auf Monatsbasis berechnete Volumen- und Massenbilanz: $84 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, $66 \times 10^6 \text{ kg/a}$ Cl und $0,54 \times 10^6 \text{ kg/a}$ Br. Die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Zu- und Abflüsse, der Elementkonzentration des Sees und dessen Volumen führen zu einer Fehlerbreite, die im Bereich des bilanzierten Grundwasserzuflusses und dessen Cl- und Br-Fracht liegt. Der Verschnitt von flächenhaften Informationen zu spezifischen Widerständen im Porenwasser mit lokalen Informationen zu eintretenden Cl-Mengen durch Diffusion und Advektion aus

Bohrdaten ergab einen jährlichen Minimal-Input von 22×10^6 kg Chlorid. Die Wichtung von Cl-Strömen mit Flächen gleicher spezifischer Widerstände gibt die Realität genauer wider, als eine Berechnung von jährlichen Stoffflüssen auf Basis einer pauschalen Betrachtung der See-grundfläche.

Aus der Änderungen der Ce-Anomalien an der Sediment-Wasser-Grenzfläche wurde ein Netto-Strom von Wasser aus dem Sediment in den See von minimal 44×10^6 m³ Wasser abgeleitet. Unter der Annahme, dass in den oberen 0,3 m des Sedimentes ein durchschnittlicher Cl-Gehalt von 350 mg/l (Stiller, 1994) existiert, resultiert ein Netto-Zustrom von $>17 \times 10^6$ kg Cl pro Jahr in den See.

Auf Grund der bestehenden hohen Unsicherheiten und geringen Datendichte sind alle Bilanzierung zutretender Wässer schwierig. Die Berechnung über Diffusion/Advektion sowie über die Änderung der Ce-Anomalie ergaben einen Zustrom an Chlorid durch den Seegrund, der definitiv $>20 \times 10^6$ kg/a ist, ohne eine obere Grenze angeben zu können.