

Saisonale chemische Variationen des See Genezareth,
seiner Zuflüsse und deren Ursachen

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

dem Fachbereich Geowissenschaften
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Dipl. Geologe Christian Siebert

aus Jena

2005

Die vorliegende Arbeit wurde von November 2002 bis August 2005 am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH im Department Hydrogeologie in Halle/Saale durchgeführt.

Als Dissertation vom Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin angenommen am: 02.11.2005

Tag der Verleihung: 05.01.2006

Erstgutachter: Prof. Dr. Peter Möller

Zweitgutachter: Prof. Dr. Asaf Pekdeger

Danksagung

Der Großteil unseres Planeten ist von Wasser bedeckt. Dagegen ist der Lebensraum des Menschen vergleichsweise klein. Aber nur ein Bruchteil davon ist mit relativ günstigen Klimaten und ausreichend Trinkwasser gesegnet. Weitaus größere Areale sind durch Trockenheit und geringe Süßwasservorkommen charakterisiert. Die Ironie besteht darin, dass gerade in diesen Regionen der Erde ein nahezu explosionsartiges Bevölkerungswachstum besteht – so auch im Staat Israel und seinen Nachbarländern. Der See Genezareth ist seit Jahrtausenden ein kulturelles Zentrum, doch weitaus mehr trägt er zur Existenzsicherung von Millionen bei. Und das, obwohl sein Wasser von minderer Qualität ist. Als Mitteleuropäer denkt man zunächst an menschliche Verunreinigungen, Industrieabfälle und Altlasten. Doch in diesem Fall ist es die Natur, die eine solch kostbare Wasserquelle gefährdet. Erst durch diese Arbeit wurde mir bewusst, wie sehr unser Leben von sauberem Wasser abhängt und dass wir all unser Wissen und unsere Energie dafür einsetzen müssen dieses zu schützen. Der See Genezareth ist ein nicht zu ersetzendes Gut und ich hoffe mit dieser Arbeit ein kleines Stückchen in das Puzzle eingefügt zu haben, welches den Prozess der Versalzung klären wird, damit Abhilfe geschaffen werden kann.

Für die Möglichkeit, zum einen an dieser Fragestellung, aber auch in einer Gruppe von hervorragenden Wissenschaftlern aus Deutschland, Israel, Jordanien und Palästina im multilateralen Joint Research Program (02WT0162) zu arbeiten, danke ich dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie dem Ministry of Science, Culture and Sport (MOS). Des Weiteren danke ich dem Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH für die konsequente Unterstützung während der Anfertigung dieser Arbeit. Ein besonderer Dank gilt dabei Frau Brigitte Großer, Prof. Mario Schirmer und Dr. Stefan Geyer, die immer wieder mit innovativen Ideen, hilfreichen Ratschlägen und Engagement aufwarteten.

Für die Analysen der Haupt- und Nebenelemente, der stabilen Isotope und des Tritiums möchte ich mich beim UFZ-Department Analytik in Leipzig, bei Petra Blümel, Gudrun Schäfer und Daniela Reichert bedanken. Bei Brigitte Richert bedanke ich mich für die viele Zeit bei der Einarbeitung in die Labortätigkeiten, die Tricks und Kniffe und die große Hilfsbereitschaft ganz besonders, auch und gerade wegen ihrer schwierigen aber glücklicherweise nur temporär andauernden Umstände. Dr. Peter Dulski danke ich für die reibungslosen, schnellen und hochwertigen Seltenerd-Daten sowie die allzeit vorhandene Hilfsbereitschaft und die Geduld auch simple Fragen zu beantworten und zu diskutieren.

Für die unermüdliche Hilfe bei der Vorbereitung und Durchführung von Probenahme-Kampagnen und bei der Entwicklung von benötigtem Equipment bedanke ich mich sehr herzlich bei Ronald Krieg. Durch ihn und die Hilfe aller Beteiligten von der Mekorot Co. Ltd. bei der Bewältigung logistischer und zolltechnischer Hürden während der Ein- und Ausfuhr des sehr umfangreichen und mitunter exotischen Probenahme-Equipments war die Datenerhebung vor Ort erst möglich. Weiterhin wurden wir durch die Mekorot Co. Ltd. bei den Probenahmen durch nützliche Hinweise, ortskundige Helfer, die Bereitstellung eines Probenahmebootes und von Laborkapazitäten unterstützt. Dafür seien besonders Dr. Yossi Guttman und Dr. Diego Berger gedankt. Bei Prof. Ami Nishri, Dr. Werner Eckert und Dr. Alon Rimmer vom Yigal Alon KLL bedanke ich mich sehr für zur Verfügung gestellte Bohrkerne und hydrogeologische Daten sowie für anregende Diskussionen und wertvolle Kritik.

Während der gemeinsamen Zeit im GIJP-Program entstanden Freundschaften und kam es neben interessanten persönlichen Erfahrungen immer wieder auch zu Fragestellungen, die nur durch die Diskussion mit „territorial Vertrauten“ gelöst werden konnten. Dafür danke ich neben Kobi und Nimrod, Dr. Haim Schulman, Prof. Amitai Katz sowie Prof. Akiva Flexer. Ganz besonders bedanke ich mich in diesem Zusammenhang aber auch für die ständige Unterstützung bei der Durchführung meiner Arbeit sowie für kritische *reviews* bei Prof. Eliyahu Rosenthal.

Prof. Asaf Pekdeger danke ich sehr für die bereitwillige Aufnahme als Doktorand im Fachbereich Geowissenschaften der FU Berlin, für seine Hilfe bei allen anfallenden Belangen und dafür, sich trotz eng bestückten Terminplaners als Gutachter zur Verfügung zu stellen.

An Dr. Stefan Geyer und Prof. Peter Möller geht ein spezieller Dank. Nicht nur dafür, mit mir gemeinsam diese sehr interessante Aufgabe zu formulieren, sondern auch für ihre immer währende Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit. Als vierte und sechste Hand im Gelände waren sie genauso wenig zu ersetzen wie bei der Erörterung und Diskussion thematischer Probleme. Ihren persönlichen und fachlichen Rat habe ich sehr gern in Anspruch genommen. Familie Möller danke für die warme und geduldige Gastfreundschaft während meiner häufigen Aufenthalte in Potsdam und Caputh.

Für die gemeinsame Erforschung von mitunter auch aquatischen Aspekten ob mit Fahrrad, Paddel oder per pedes, aber auch für das Mitfiebern während der Entstehung dieser Arbeit danke ich meinen Freunden.

Meiner Familie und ganz besonders meiner Mutter danke ich von ganzen Herzen für die Sorge, Geduld und ihr reges Interesse an der Arbeit sowie für die mitunter notwendige Unterstützung, durch die diese Arbeit erst gelingen konnte. Bei ihr und meinem Utchen bitte ich für die langen Tage und Nächte der Sorge um Verzeihung.

Meinem Utchen danke ich für die Liebe die sie mir gibt und die Unterstützung bei den ganz alltäglichen Dingen, für die mitunter die Zeit fehlt. Ihre Fragen, Anregungen und Lösungsvorschläge waren immer wieder Inspirationen für neue und erfolgreichere Gedankengänge.

Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es, Grundwasserzutritte in den See Genezareth zu erkennen, chemisch zu charakterisieren und zu quantifizieren. Für die Detektion solcher Zuströme war es notwendig die verschiedenen Grund- und Oberflächenwässer, die in diesen Prozess involviert sind, chemisch durch Haupt-, Neben- und Spurenelemente (REE+Y) sowie isotopenchemisch ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) zu erfassen.

In sämtlichen Grundwässern verdeutlichen saisonale hydrochemische Variationen die jeweilige hydraulische Anbindung an (i) spezifische Aquifere, (ii) unterschiedliche thermo-salinare Grundwässer sowie (iii) von den Infiltrationsgebieten abhängige Neubildungswässer.

5 Grundwassertypen sind im Beq'at Kinarot anhand von **Spider-Mustern** und **Elementverhältnissen** auszuhalten. Diese Gruppierung gibt Aufschluss über die Lithologie der Entlastungsaquifere sowie den Anteil und die Art zutretender thermo-salinarer Wässer.

- **Typ B1** repräsentiert Wässer der Judea-Kalksteine, die in geringen Mengen Halit und Gips aufgenommen haben. Mit Ausnahme von Bohrung D 906 sind die Grundwässer dieses Typs unbeeinflusst von thermo-salinaren Wässern.
- **Typ B2** umfasst Wässer, die überwiegend aus Eozänen Avedat- und nur geringfügig den Judea-Karbonaten entstammen und Beimengungen von Gips und Halit enthalten. Anhand der Elementverhältnisse werden die Subtypen **Typ B2a** (Tabgha Gruppe) und **Typ B2b** (Hammat Gader) unterschieden. Typ B2a ist von aufsteigenden Na-Ca-Mg-Cl-Solen beeinflusst und Typ B2b durch die Verwitterung der Vulkanite beeinflusst.
- **Typ B3** repräsentiert thermo-salinare Wässer. Sie entstammen ausschließlich dem Unteren Aquifer der westlichen Grabenflanke und weist molare Mg/Ca Verhältnis <1 auf. Cl/Br- und B/Cl Verhältnisse zeigen in Fuliya und Tabgha (KIN 8), dass Solen aus der Ablation verdeckter Evaporite (Halit, Gips) den überwiegenden Anteil der thermo-salinaren Endglieder bilden, während in den Tiberias Quellen die Beimischung von Na-Ca-Mg-Cl-Solen dominiert.
- **Typ C** ist geprägt durch oxidativen Basaltverwitterung. Hohe Nitratgehalte belegen die starke antropogene Beeinflussung aus der Landwirtschaft.
- **Typ D** mit molaren Mg/Ca Verhältnissen >1 und erhöhten bis hohen Salinitäten tritt landseitig nur ufernah in der Ostflanke und südlich Tiberias' auf. Die Elementverhältnisse kennzeichnen Ha'On 1 als Derivat einer primären Evaporationssole. Das Glaukonit-reiche Einzugsgebiet der Gofra-Quellen wird anhand hoher B-Gehalte im Quellwasser angezeigt.

Im Beq'at Kinarot zeigen alle Grundwässer mit erhöhter Mineralisation $2\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})>1$ (molar). Das verweist auf die intensive Laugung von Evaporitkörpern, wie dem in Zemah.

In Tiberias entspricht das salinare Endglied einer Mischung aus einer Ablationssole und einer chemisch modifizierten, residualen Evaporationssole. Eine solche modifizierte Restsole, als Teil des salinaren Endgliedes, ist nur in und nördlich von Tiberias zu beobachten, wobei die Mischungsverhältnisse regional stark schwanken. Die Modifikation der Primärsole ist das Resultat ihrer Migration durch Alkaliolivin-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 $\text{Mg}/\text{Ca}<1$ verändert. Aufgrund der starken Ähnlichkeiten (Cl/Br, Na/Cl) zwischen Tiberias und Ha'On 1, kann ein salinates Endglied wie in Ha'On 1 der Primärsole entsprechen.

In gut entwickelten Fließsystemen tapezieren **Seltenerd Elemente+Y (REY)** die Aquiferwandungen mit der Initialsignatur des Wassers und das Wasser behält im Unterschied zur makrochemischen, die REY-Signatur des Infiltrationsgebietes bei. Anhand der REY-Muster wurden die Grundwässer klassifiziert.

- **Typ REY-A1** entspricht Wässern aus der karbonatischen und stellenweise mergeligen Judea-Gruppe. Die Muster sind durch einen ausgeprägt glatten Verlauf und einen schwachen Abfall von den leichten zu den schweren REE gekennzeichnet.
- **Typ REY-A2** tritt nur in Tabgha auf und ist gekennzeichnet durch geringe REY-Gehalte sowie ausgeprägte negative Ce- sowie positive Gd- und Y-Anomalien. Sie repräsentieren das sauerstoffreiche, verkarstete System der Eozänen Karbonat-Aquifere.
- **Typ REY-A3** repräsentiert thermo-salinare Wässer aus Tiberias und ist mit seinen sehr flachen Mustern und ausgeprägten Y-Anomalien dem Typ REY-A1 ähnlich. Sie stehen mit den hydrothermal überprägten Kalksteinen des Unteren Aquifers in Kontakt.
- **Typ REY-A4** ist durch einen überwiegend steilen Verlauf der leichten REE (La bis Sm) charakterisiert. Diese ebenfalls thermo-salinaren Grundwässer entstammen Kontaktzonen von Kalken mit intrusiven Magmatiten.
- **Typ REY-B** ist nur in der östlichen Grabenflanke sowie in Ein PoriH vertreten und deutet durch Muster mit variablen Ce-, Gd- und Y-Anomalien auf Verwitterungslösungen aus den Golan- und Cover-Basalten hin, in denen FeOOH-Fällungen stattgefunden haben.

Die **stabilen Isotope** $\delta^{18}\text{O}$ und δD der Grundwässer verweisen auf eine Mischung leichter Neubildungswässer mit isotopisch schweren thermo-salinaren Grundwässern. Aufgrund der Isotopendaten aus dem Quellsystem Tabgha, ist ein bislang unbekannter Zustrom an isotopisch leichtem Wasser aus nördlichen Regionen durch den Korazim-Block in das Beq'at Kinarot nachgewiesen.

Das Wasser des See Genezareth wurde in 12 Seeprofilen auf die Haupt-, Neben- und Spurenelement- sowie Isotopenverteilung untersucht. Abgesehen von „Barbutim“, „Tabgha“ und „G“, drei Profilen, in denen sowohl die Makro- und Isotopenchemie, als auch die REY klar auf einen Zustrom an Grundwasser hinweisen, sind Zutritte in sämtlichen anderen Regionen des Sees nur anhand der Ce-Anomalie und geringfügigen Änderungen der REY-Muster nachweisbar.

Anhand von Daten der Mekorot Company Ltd. wurde für das hydrologische Jahr 2002/2003 die **in den See zutretende Menge an Grundwasser** sowie deren Cl- und Br-Gehalte auf $84 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, $66 \times 10^6 \text{ kg/a}$ Cl und $0,54 \times 10^6 \text{ kg/a}$ Br bilanziert. Die Unsicherheiten bei der Bestimmung der monatlichen Zu- und Abflüsse des Sees führen zu einer Fehlerbreite, die im Bereich des bilanzierten Grundwasserzuflusses liegt.

Die Kombination von flächenhaften Informationen über spezifische elektrische Widerstände im Porenwasser mit lokalen Informationen zu eintretenden Cl-Mengen durch Diffusion und Advektion aus Bohrdaten ergab einen jährlichen Minimal-Input von $22 \times 10^6 \text{ kg}$ 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 Seegrundfläche.

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

Die Berechnung über Diffusion/Advektion sowie über die Änderung der Ce-Anomalie ergaben einen Zustrom an Chlorid durch den Seegrund, der definitiv $20 \times 10^6 \text{ kg/a}$ überschreitet, ohne eine obere Grenze angeben zu können.

Abstract

The aim of the study was to detect, to characterise and to quantify groundwater-inflows into the Lake Kinneret (Sea of Galilee, Lake Tiberias or See Genezareth). To detect those inflows, it was necessary to chemically acquire all ground- and surface waters, which are involved in this process by using a combination of advanced hydrochemical methods: major and minor elements, trace elements (REE+Y), radiogenic (^3H) and stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$).

Seasonal hydrochemical variations clarify the hydraulic connection of groundwaters to (i) specific aquifers, (ii) different thermo-saline groundwaters, and (iii) to recharge waters, which are chemically dependent on the lithology of their recharge areas.

In the Beq'at Kinarot, **5 types of groundwater** are outlined on the base of *spider-patterns* and *ionic ratios*. That grouping gives information about the lithology of the aquifers of discharge and the mixing with thermo-saline groundwaters.

- **Type B1** represents waters from Judea-limestones, where only small amounts of halite and gypsum occur. With exception of well D 906 no other groundwater of this type is influenced by thermo-saline waters.
- **Type B2** comprises waters mainly from Eocene Avedat- and only minor from Judea-limestones, which also contain some gypsum and halite. Based on ionic ratios this type is subdivided in **type B2a** (Tabgha group) and **type B2b** (Hammat Gader group). Waters of type B2a is compositionally altered by ascending Na-Ca-Mg-Cl-brines, whereas type B2b is influenced by weathering solutions of basalts.
- **Type B3** represents thermo-saline waters. They are solely from Lower Aquifer of the western graben shoulder showing Mg/Ca molar ratios <1 . Cl/Br- and B/Cl ratios in Fuliya and Tabgha (KIN 8) indicate high contributions of ablation brines of still undiscovered evaporate bodies (halite, gypsum). However, in Tiberias mixing with Na-Ca-Mg-Cl-brines dominates.
- **Type C** represents water from oxidative weathering of basalts. High contents of nitrate document a strongly anthropogenic influence by agriculture.
- **Type D** with high Mg/Ca molar ratios >1 and with elevated to high salinities is solely observable along the eastern graben shoulder and south of Tiberias. Ionic ratios of groundwater from Ha'On 1 indicate the presence of a primary evaporation brine of the Sdom Sea. The recharge area of Gofra spring is rich in glauconitic minerals, which may explain the high contents of B in this type of water.

In Beq'at Kinarot, all groundwaters with elevated mineralisation show molar $2\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})>1$, which indicates intensive leaching of evaporate bodies such as that of in Zemah borehole.

In Tiberias, the saline end-member is a mixture of residual evaporation brine chemically modified by albitisation and dolomitisation and a Na dominated ablation brine. As part of the saline end-member, the modified brine is only observable in and north of Tiberias. However, the mixture ratios locally strongly differ. Modification of primary evaporation brine is the result of their migration through alkali-olivine-basalts, gabbros and limestones as they occur in the graben *sensu stricto* and in the western graben flank. The former Mg/Ca molar ratio >1 is turned <1 , because of chloritisation and albitisation of plagioclase and the dolomitisation of the limestones. Waters from Tiberias show strong analogies (Cl/Br, Na/Cl) to those in Ha'On 1. In Tiberias, these refer to a saline end-member which is similar to the primary brine in Ha'On.

In well developed flow systems rare earth elements including yttrium (REY) cover the aquifer walls with the initial signature of the water. In contrast to the major elements, water maintains

the REY-signature of the lithology in the area of infiltration. Using REY-patterns, waters have been classified.

- **Type REY-A1** corresponds to waters from the carbonaceous and sometimes marly Judea-group. The patterns show a distinct flat course with a slight decline from light towards the heavy rare earths.
- **Type REY-A2** occurs only in the Tabgha area and is characterised by low contents of REY and well developed negative Ce-, positive Gd- and Y-anomalies. These waters represent the oxygen rich karstified system of the Eocene limestone aquifers.
- **Type REY-A3** represents thermo-saline waters from Tiberias. With flat patterns and well developed Y-anomalies. They are similar to type REY-A1 but are in contact with hydrothermally altered limestones of the Lower Aquifer.
- **Type REY-A4** is characterised by predominantly steep decline of the light REE (La to Sm). Groundwater of this type is also of thermo-saline origin, for instance, contact zones of limestones and intruded igneous basic rocks.
- **Type REY-B** is present solely along the eastern graben shoulder and in Ein Porih. Patterns with variable Ce-, Gd- and Y-anomalies refer to solutes from weathering of the Golan- and Cover Basalts, where precipitation of FeOOH occurred.

Stable isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in groundwaters are the results of mixing of (i) isotopically light recharge and (ii) isotopically heavy, ascending thermo-saline groundwaters. $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in Tabgha waters establish an inflow of isotopically very light groundwater from the north into the Beq'at Kinarot.

The distribution of major-, minor- and trace elements as well as of isotopes in **the water of Lake Kinneret** was investigated in 12 lake-water profiles. With the exception of profiles "Barbutim", "Tabgha" and "G" were hydrochemistry and isotopes clearly indicate the inlet of groundwater, in all other locations constant inflow of groundwater into the lake water was only provable by the systematic change of Ce-anomalies and marginal changes in REY-patterns at the sediment/water interface.

On the base of data from Mekorot Comp. Ltd., the **amount of inflowing groundwater at the lake bottom** and the contents of Cl and Br were balanced for the hydrological year 2002/03. The results are inflow of $84 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, Cl and Br equal 66×10^6 and $0.54 \times 10^6 \text{ kg/a}$, respectively. However, the uncertainties of the monthly in- and outflows of the lake fully cover the estimated inflow.

Combination of (i) areal information on specific electric resistivities in pore-waters and (ii) chemical analyses of pore fluids, lead to a yearly minimum input of $22 \times 10^6 \text{ kg}$ chloride by diffusion/advection. Weighting the Cl input by areas of similar specific resistivities describes the reality much better than a lump-sum view of the basal area of the lake.

From the systematic changes of the Ce-anomalies at the sediment/water interface a net-stream of minimal $44 \times 10^6 \text{ m}^3$ pore water into the lake was derived. From the assumption in the upper 0.3m of the sediment chloride is about 350 mg/l a net-inflow of $>17 \times 10^6 \text{ kg}$ Cl per year is derived. The inflow of chloride through the lake bottom as calculated by diffusion/advection and by the changing Ce-anomalies are definitely more than $20 \times 10^6 \text{ kg/a}$, without knowing the upper limit.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Methodik	5
2.1 Auswahl der Probenpunkte	5
2.2 Probenahme und Vor-Ort-Parameter.....	5
2.2.1 Oberflächengewässer	8
2.2.2 Grundwässer	8
2.2.3 Physikochemische Vor-Ort-Parameter	9
2.2.4 Haupt- und Nebenelemente	10
2.2.5 Seltenerd Elemente incl. Y (zukünftig als REE+Y abgekürzt)	12
2.2.6 Isotope.....	13
2.2.7 Porenwasser	16
2.2.8 Gesteine	16
3. Geographie	17
3.1 Klimatische Bedingungen	19
3.2 Der äolische Sedimenteintrag.....	21
3.3 Die Sedimente des Seebodens.....	21
4. Geologie	23
4.1 Regionale Geologie	24
4.2 Die Entwicklung der Region seit dem Mesozoikum.....	26
4.2.1 Die Trias	26
4.2.2 Der Jura.....	27
4.2.3 Die Kreide.....	27
4.2.4 Das Paläogen.....	29
4.2.5 Das Neogen.....	30
4.2.6 Das Quartär	34
4.2.7 Magmatische Gesteine im nördlichen Israel (Miozän – rezent).....	36
5. Struktur des Kinneret Beckens	40
6. Hydrogeologie und Hydrogeochemie	45
6.1 Der See Genezareth und seine Oberflächenzuflüsse.....	45
6.2 Allgemeine Hydrogeologie	47
6.3 Die hydrostratigraphischen Einheiten im Becken des See Genezareth.....	49
6.4 Die salinaren Grundwasseraustritte in der westlichen Grabenflanke.....	51
6.4.1 Regionale hydraulische Bedingungen	52
6.4.2 Tabgha Quellen.....	54
6.4.3 Fuliya Quellen.....	55
6.4.4 Tiberias Quellen.....	58
6.5 Die salinaren Grundwasseraustritte in der östlichen Grabenflanke	58
6.5.1 Regionale hydraulische Bedingungen	58
6.6 Genesen aufsteigender Solen – Stand der Forschung	60
7. Ergebnisse und Diskussion.....	64
7.1 Die physikochemischen Bedingungen im See Genezareth	64
7.2 Haupt-, Neben- und Spurenelemente	66

7.2.1 Darstellung und Charakterisierung der Wässer in Spider Diagrammen.....	66
7.2.2 Cl vs. Br und Cl/Br vs. TDS	77
7.2.2.1 Grundwasser.....	77
7.2.2.2 See Genezareth.....	79
7.2.2.3 Porenwässer.....	81
7.2.3 B vs. Cl und B vs. SO ₄	82
7.2.3.1 Grundwasser.....	82
7.2.3.2 See Genezareth.....	84
7.2.3.3 Porenwasser.....	85
7.2.4 Ca vs. Mg.....	85
7.2.4.1 Grundwasser.....	85
7.2.4.2 See Genezareth.....	87
7.2.4.3 Porenwasser.....	88
7.2.5 Ca vs. Sr.....	88
7.2.5.1 Grundwasser.....	88
7.2.5.2 See Genezareth.....	91
7.2.6 Na vs. Cl	91
7.2.6.1 Grundwasser.....	91
7.2.6.2 See Genezareth.....	93
7.2.6.3 Porenwasser.....	94
7.3 Stabile Isotope und radioaktives Tritium	95
7.3.1 Allgemeine Charakteristika der Isotope im aquatischen System.....	95
7.3.2 $\delta^{18}\text{O}$, δD und Salinität (TDS).....	98
7.3.2.1 Grundwasser.....	98
7.3.2.2 See Genezareth.....	102
7.3.3 ^3H vs. TDS; ^3H vs. $\delta^{18}\text{O}$	103
7.3.3.1 Grundwasser.....	103
7.3.3.2 See Genezareth.....	106
7.3.4 $\delta^{13}\text{C}$ vs. $\delta^2\text{H}$	106
7.3.4.1 Grundwasser.....	106
7.3.4.2 See Genezareth.....	109
7.3.5 $\delta^{34}\text{S}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ (SO ₄)	111
7.3.5.1 Grundwasser.....	111
7.3.5.2 See Genezareth.....	114
7.4 Seltenerd Elemente.....	115
7.4.1 Generelle Charakteristika der Seltenerd Elemente	115
7.4.2 Verhalten der REY im aquatischen System.....	118
7.4.2.1 Trans-Aquifer-Fluss	121
7.4.2.2 Limitierende Faktoren	123
7.4.3 REY in Grundwässern	127
7.4.4 REY in den Vorflutern.....	131
7.4.5 REY im See Genezareth	133
7.4.5.1 Die stratifizierte Periode.....	133
7.4.5.2 Die durchmischte Periode	138
7.4.5.3 REY Muster einzelner See-Profile.....	139
7.4.5.4 Wiederfindung von REE	142
7.5 Piper Diagramme.....	145
8. Quantifizierung der unspezifizierten Zutritte von (salinaren) Grundwässern in den See Genezareth.....	148

8.1 Zielsetzung	148
8.2 Volumen- und Stoffmengen-Bilanzierung	148
8.2.1 Ergebnisse und Diskussion	148
8.3 Betrachtung der diffusiven und advektiven Stoffflüsse	151
8.3.1 Ergebnisse und Diskussion	151
8.4 Bilanzierung zutretender Grundwässer auf Grundlage der Änderungen der Ce Anomalien in der Wassersäule	152
8.4.1 Ergebnisse und Diskussion	152
9 Schlussfolgerungen	154
10 Perspektiven	160
11 Literaturverzeichnis	162

Anhang

Anhang A: Kartengrundlage und Digitales Höhenmodell (DHM)	II
Anhang B: Volumen- und Stoffmengenbilanzierung	III
Anhang C: Einträge durch Diffusion und Advektion	XIII
Anhang D: Ce-Bilanz	XVI
Anhang E: Finite Element Modellierung mit FEFLOW® 5	XVII
Anhang F: Legende zu Abb. 6-2	XIX
Anhang G: Legende zu Diagrammen in Kapitel 7.2.2 bis 7.2.6	XX
Anhang H: Datenblätter Haupt- und Nebenelemente	XXI
Anhang I: Datenblätter Isotope	XXXI
Anhang K: Datenblätter Seltenerd Elemente + Yttrium (REY)	XXXVI
Anhang L: Übersicht über die Datenerfassung und -bearbeitung	XLII

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Blick nach Westen auf den See Genezareth.	1
Abb. 1-2: Der SDC bei Migdal.	2
Abb. 2-1: Topographische Karte des Untersuchungsgebietes mit Lage der Probenpunkte und Einzugsgebiete der Quellgruppen.	6
Abb. 2-2: Schematisierte Darstellung der Probenahme auf dem See Genezareth. Die genaue Position des Bootes wurde per GPS-Empfänger ermittelt, die Teufe mittels der metrischen Skala am Fixierseil des Pumpenschlauchs.	7
Abb. 2-3: Die Zeitpunkte der Probenahmen sind durch Pfeile dargestellt. Abgesehen von 2004 lagen diese immer zu Beginn der Wiederauffüllungsperiode.	7
Abb. 2-4: Probenahme auf dem See Genezareth mittels einer 2-Kanal Schlauchpumpe.	8
Abb. 2-5: Probenahme an einer Grundwassermessstelle.	8
Abb. 3-1: Der Jordangraben und wichtige morphotektonische Elemente.	17
Abb. 3-2: Schematisches Profil durch den Jordangraben vom Hula-Tal im Norden bis zum Wadi Arava im Süden (stark überhöht).	18
Abb. 3-3: Landsat TM Aufnahme des Einzugsgebiet des See Genezareth. EDB, NDB und WDB sind östliches, nördliches und westliches Drainagegebiet (in weiß umrandet). (Bandkombination 1,2,3)	18
Abb. 3-4: Monatliche Niederschlagsverteilung in der Neubildungsperiode August 2002 bis April 2003. Datenbasis: 43 Messstationen des Hydrological Service of Israel. Koordinatensystem: Neues Israelisches Gitter.	20
Abb. 4-1: Plattentektonischer Rahmen der Roten Meer – Riftzone.	24
Abb. 4-2: Triassische Fazies des südl. Tethysshelfs. (1): stark dolomitisch, (2): offen marin, epikontinental, (3): Ga'ara Höhen, (4): littoral kontinental, (5): kontinental, (6): präkambrisches Basement.	26
Abb. 4-3: Späte Toarcium-Aalenium Fazies in Israel.(1): Karbonate, (2): Schieferdominanz, (3): Karbonatdominanz mit Tonschiefer und Sanden, (4): Arenitdominanz, Tonschiefer und Kalkstein (5): Arenitdominanz, (6): Dolomitisiert.	27
Abb. 4-4: a)Untere Kreide bis Apt (1):kontinentale Sandsteine, (2): Übergangszone Sandstein, Tonschiefer, Kalkstein, (3):mächtige marine Tonsteine, V: Vulkanite; SG: See Genezareth b):Apt bis Turon (1):dünne Karbonate mit Sandsteineinschaltungen, (2): Kalksteine und Dolomite, (3): pelitische Kalksteine c):Senon (1):Sand, Flint, Kreide, (2) Kreide, Mergel, Flint, (3) Mergeldominanz, Die Anzahl der „Zähne“ symbolisiert die Mächtigkeit der Flinte.	28
Abb. 4-5: a) Mittleres Oligozän, b) Oberes Oligozän und Frühes Miozän.	30
Abb. 4-6: Mittleres Miozän.	31
Abb. 4-7: 3D-Darstellung der Oberfläche der Judea Gruppe (grün-blau) und zum Vergleich die Morphologie und Topgraphie des nördlichen Jordangrabens. Die Judea Gruppe bildet südlich von Tiberias einen mächtigen Trog, der durch den miozänen Vulkanismus mit etwa 1000 m mächtigen Basalten gefüllt ist.	31
Abb. 4-8: a) Spätes Miozän, b) Frühes Pliozän.	32
Abb. 4-9: Spätes Pliozän.	33
Abb. 4-10: Frühes Quartär (Q I).	34
Abb. 4-11 bis 4-19: Palynozoische Einteilung des Quartärs.	35

Abb. 4-20: Dargestellt sind die generalisierte Lithostratigraphie im Untersuchungsgebiet (nördlicher Jordangraben) sowie der Aufbau der einzelnen stratigraphischen Schichten.	39
Abb. 5-1: Profil durch das Beq'at Kinarot bei Tabgha (Lage des Profils in Abb. 2-1 A*-B). Die westliche Grabenflanke des Beckens wird im Unterer Galilee von Oberkretazischen bis Pliozänen und im Golan von eozänen bis pleistozänen Karbonaten, Klastika und Vulkaniten gebildet.	40
Abb. 5-2: Schematische geologische Karte des nördlichen Jordangrabens. Koordinaten: geogr. Länge/Breite	41
Abb. 5-3: Der See Genezareth und seine Umgebung. Darstellung der a) Bouguer-Anomalie (Kontur-Intervall: 4 mgal/km) und b) horizontale Ableitung der Bouguer-Anomalien in a) (Kontur-Intervall: 2 mgal/km) und Skizze des von Ben-Avraham et al., 1996 vorgeschlagenen Pull-Apart-Beckens. Koordinaten: gekürzte Darstellung nach Neuem Israelischen Gitter.	42
Abb. 5-4: Darstellung der Bathymetrie des Sees.(Kartenbasis: Bathymetric Map of Lake Kinneret, 1:50.000; GSI et al., 1990). Störungen nach Ben-Avraham et al. (1996), Hurwitz et al. (2002), Reznikov et al. (2004). Das bathymetrische Tief ist mit KD gekennzeichnet, das gravimetrische Tief mit GL. Profile zeigen seismische Ergebnisse von Hurwitz et al. (2002).	43
Abb. 6-1: 3D-Abbildung des Seebodens (oben) und Profilschnitt durch den See entlang 257 E. Koordinaten: NIG, Bathymetrie: nach Bathymetric Map of Lake Kinneret (GSI et al., 1990). (Darstellungen sind vertikal 50-fach überhöht.)	46
Abb. 6-2: Abbildung der Morphologie und der Geologie des Drainagegebietes des Sees, sowie der Lokation der Quellgruppen. Für Tabgha (pink), Fuliya (weiß), Tiberias (rot) und Gofra (blau) sind die jeweiligen Einzugsgebiete dargestellt. Weiterhin sind Störungen (schwarz), die Bathymetrie des Sees (blau graduiert) und die Vorfluter (blau) eingezeichnet.	47
Abb. 6-3: Quellgruppen entlang des Seeufers und die „chemische Teilung“ der thermo-salinaren Grundwässer in Ca- und Mg-dominant.	48
Abb. 6-4: Geologisches Profil durch das Beq'at Kinarot bei Fuliya (Lage des Profils in Abb. 2-1 C - C*).	49
Abb. 6-5: Konzeptionelles Modell für die hydraulischen Bedingungen a) in Tabgha und Fuliya sowie b) in Tiberias (ohne Oberen Aquifer).	51
Abb. 6-6: Die geologisch bedingten Unterschiede in der Hydraulik von Tabgha und Fuliya.	52
Abb. 6-7: Ergebnis der Simulation: thermo-salinare Konvektion in der Störungszone. Chloridität in g/l und b) Temperatur in °C. (Vektoren linear skaliert, keine vertikale Überhöhung).	53
Abb. 6-8: Schematische Lageskizze der beprobten Grundwassermessstellen in den Quellgruppen Tabgha (a); Fuliya (b) und Tiberias (c).	54
Abb. 6-9: Vergleich der Grundwasserganglinien in Tabgha (KIN 8) und in Fuliya (D 906) als Reaktion auf Niederschlagsereignisse. Zum Vergleich ist der Seespiegel des See Genezareth dargestellt.	55
Abb. 7-1: Teufenabhängige Darstellung der physikochemischen Parameter im See Genezareth im Profil des Probenpunktes „A“, unterschieden nach Frühjahr und Herbst. Lokation „A“: Nr. 45 in Abb. 2-1; direkt an der Station A des KLL im See Genezareth.	64
Abb. 7-2: Charakteristische Spider-Diagramme der Grundwassertypen a) B1, b) B2a und B2b, die sich durch unterschiedlich intensive Minerallösung unterscheiden. In Grundwässern vom Typ B1 dominiert die Karbonatlösung, in Wässern des Typ B2 die des Halit.	70

- Abb. 7-3: Spider-Diagramme der Grundwässertypen von a) Typ B3, thermo-salinare Wässer mit einer hohen Halitfracht, b) Typ C gekennzeichnet durch die Lösung basaltischer Minerale und c) Typ D, nur in der östlichen Grabenflanke auftretende Derivate primärer Evaporationssoolen. 72
- Abb. 7-4: Dünnschliff-Aufnahmen des Cover-Basaltes (gekr. Nic). Das Gestein weist in einer glasarmen Matrix aus überwiegend idiomorphen Plagioklasen, opaken Phasen und Apatit: a) alterierte Olivine und b) Klinopyroxene (überwiegend Augite und Diopside) als porphyrische Einsprenglinge sowie c) Calcit als Hohlraumfüllungen auf. (Vergr. jeweils 5 mal). 73
- Abb. 7-5: Spider-Diagramme der Oberflächenwässertypen E und F. Da die Flüsse (Typ E) den Hauptanteil des Seewassers (Typ F) erbringen, sind die Muster beider Gruppen einander ähnlich. Der Zustrom von salinaren Grundwässern in den See drückt sich in der deutlichen Anreicherung von Na, Cl, Br, SO₄ gegenüber den Wässern vom Typ E aus. 75
- Abb. 7-6: Die molaren Cl- vs. Br-Gehalte der Wässer zeigen 4 lineare Korrelationen an, welche die Wässer von Tiberias/Ha'On, Fuliya, Tabgha und Hammat Gader voneinander separieren. Die Legende zu dieser und der folgenden Abbildungen bis zum Ende des Kapitels 7-3 ist in Anhang G gegeben. 76
- Abb. 7-7: Die molaren Cl/Br Verhältnisse in Kombination mit der Gesamtmineralisation (TDS) der Wässer verdeutlichen deren saisonale Variationen. Der See Genezareth ist in Hinsicht auf dessen Cl/Br Verhältnis zwischen dem Typus Fuliya und Tabgha/Tiberias/Ha'On eingeklammert. 77
- Abb. 7-8: Molare Cl/Br Verhältnisse der unteren Wassersäule (bis 20 m über Grund) des SeeGenezareth. Variationen entstehen durch unterschiedliche Zutritte (Barbutim) und Neubildungsereignisse. Letztere führten zu einem Anstieg des Cl/Br-Verhältnis von 2002 zu 2004. 79
- Abb. 7-9: Veränderung des Cl/Br Verhältnis im Seewasser seit 1964. Zusätzlich sind die Spannen der Cl/Br Verhältnisse der Quellgruppen dargestellt. 80
- Abb. 7-10: Molare Gehalte an B und Cl der untersuchten Wässer. Die östliche Grabenflanke weist Wässer mit deutlich höheren B/Cl Verhältnissen auf, ein Trend der auch im See Genezareth zu beobachten ist. 81
- Abb. 7-11: Molare Gehalte an B und SO₄ in den Wässern des Beckens. Wie in Abb. 7-9 zeigt sich die Separation der östlichen Wässer. Das Porenwasser weist deutlich kleinere B/SO₄ Verhältnisse auf als die meisten Grundwässer. Eine Ähnlichkeit mit Ein Pori, deren Wasser das Bor nicht aus Sulfaten, sondern aus der Basaltverwitterung erhält, ist zu beobachten. 82
- Abb. 7-12: Die Gegenüberstellung der molaren Ca- und Mg-Gehalte der Wässer des Beckens zeigt zum einen die geographische Trennung der untersuchten Wässer: im Osten herrscht Mg- und im Westen Ca-Dominanz. Nur Hammat Gader ist ein typisches Kalksteinwasser mit Ca>Mg. Die Abbildung zeigt 4 lineare Korrelationen: Hammat Gader, Tabgha, Fuliya und Ha'On 1/Gofra. 85
- Abb. 7-13: Die molaren Ca- und Sr-Gehalte in den Wässern gegeneinander aufgetragen zeigen 3 lineare Korrelationen: Tabgha, Fuliya/Tiberias und Ha'On 1/Gofra/Hammat Gader, die sämtlich durch einen Ca-Achsenabschnitt charakterisiert werden. 88
- Abb. 7-14: Die molaren Cl- und Sr-Gehalte in den Wässern zeigen ähnliche Linearkorrelationen wie bei der Gegenüberstellung von Ca und Sr. Im Unterschied zu Abb. 7-13 separieren sich die Wässer aus Hammat Gader von Gofra/Ha'On 1. Gründe dafür sind die moderate Salinität der Wässer, und ein hoher Sr-Eintrag aus der phosphatreichen Mt. Scopus Gruppe in die Hammat Gader Quellen. 89

- Abb. 7-15: Die Gegenüberstellung der molaren Na- und Cl-Gehalte in den Wässern des Beckens zeigt, dass in sämtlichen Wässern (außer Zemah 1), als Folge des Ionenaustausches von Na gegen andere Kationen, Cl über Na dominiert. Nur 2 lineare Trends sind auszumachen: Tiberias/Ha'On 1 zum einen und die übrigen Wässer zum anderen. 91
- Abb. 7-16: Fokus aus Abb. 7-15. Die solitäre Lage von Alonei HaBashan 3 ist deutlich zu erkennen. 92
- Abb. 7-17: Molare Na/Cl vs. 1000Br/Cl Verhältnisse in den Wässern des Beckens. Der See Genezareth befindet sich in einem Mischungsdreieck, welches sich zwischen den Flüssen (Stellvertreter: Jordan), den thermo-salinaren Wässern vom Ostufer und Tiberias sowie Fuliya und den Neubildungswässern aufspannt. 93
- Abb. 7-18: Schematischer Überblick über die $\delta^{13}\text{C}$ Variationen in der Natur, insbesondere die Komponenten, die im hydrologischen Kreislauf eine Rolle spielen. 95
- Abb. 7-19: Schematische Darstellung der $\delta^{34}\text{S}$ (SO_4) Veränderung im marinen Milieu während der Erdgeschichte. 96
- Abb. 7-20: Die ^{18}O - vs. ^2H -Verhältnisse zeigen, dass abgesehen von einigen Wässern aus Tabgha und Alonei HaBashan 3 alle Wässer unterhalb der Lokalen MWL liegen. Der See Genezareth weist durch die hohe Evaporation die schwersten Isotopensignaturen auf. 98
- Abb. 7-21: Die Gegenüberstellung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und der Gesamtmineralisation (TDS) verweist innerhalb der Quellgruppen deutlich auf die Mischung von Neubildungswasser mit thermo-salinarem Tiefenwasser. In Tabgha wird ersichtlich, dass zusätzlich eine isotopisch leichtere Komponente als das Neubildungswasser aus dem Galilee einen Einfluss hat. Ha'On 1 weist im Frühjahr eine deutlichen Zumischung von isotopisch schwerem und zugleich geringer mineralisierten Seewasser auf. 99
- Abb. 7-22: Die Signaturen $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ des Seewassers verdeutlichen die schrittweise Verdünnung des isotopisch schweren Seewassers mit leichterem Neubildungswasser. Das Profil „Barbutim“ ist in Bodennähe durch den Zutritt von Grundwasser stets isotopisch leichter. Durch lateralen Zustrom von isotopisch leichtem Jordanwasser ist die tiefste Probe im Profil „G“(2000) abgereichert. 101
- Abb. 7-23: Die Tritium-Gehalte über die Gesamtmineralisation der Wässer verdeutlicht die saisonale Variabilität der meisten Grundwässer. Die Pfeile geben den Trend an, den Neubildungswässer im Frühjahr verursachen, sowie die Charakteristik der hydraulischen Systeme und der Grundwässer. Eingehende Erläuterungen dazu sind im Text gegeben. Das Seeprofil „Barbutim“ ist durch grau hinterlegte Kreuze gekennzeichnet. 103
- Abb. 7-24: Der Vergleich des ^3H -Gehaltes mit $\delta^{18}\text{O}$ -Werten verdeutlichen die saisonal ansprechenden Aquifer-Systeme in den spezifischen Grundwässern. Eine starke Verdünnung des Seewassers mit leichterem Neubildungswasser und der Trend des Seeprofiles „Barbutim“ (grau hinterlegte Kreuze) zu den Grundwässern aus Tabgha ist deutlich zu erkennen. 104
- Abb. 7-25: $\delta^{13}\text{C}$ -Werte vs. $\delta^2\text{H}$ in den Grund- und Oberflächenwässern der Region. Neben dem See Genezareth weist die Shamir-Bohrung die schwersten $\delta^{13}\text{C}$ -Werte auf. Die Stabilitätsfelder des ^{13}C im Boden- CO_2 unter C_3 - und C_4 -Pflanzen und des atmosphärischen ^{13}C sind gekennzeichnet. (Mischungs-) Trends sind durch Linien gekennzeichnet. 106
- Abb. 7-26: Schematisierte $\delta^{13}\text{C}$ -Entwicklung unter a) C_4 -und b) C_3 -Pflanzenbewuchs im Neubildungsgebiet. Vor der Agrarwirtschaft des Menschen (a) bestand ein wesentlich größerer Teil des Bewuchses aus C_4 -Pflanzen. 107

Abb. 7-27: $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen im See Genezareth in Abhängigkeit von der Höhe über Grund für Nov 2002 und b) Mrz 2004. Die Abreicherung an ^{13}C im Hypolimnion 2002 ist deutlich zu erkennen. Die Proben aus dem Seeprofil „Barbutim“ tendieren zu Grundwasser-typischen leichteren Signaturen.	109
Abb. 7-28: $\delta^{34}\text{S}$ -Werte (SO_4) vs. $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4). Die Bereiche, in denen die Isotopensignaturen typischer Weise spezifischen S-Quellen zugeordnet werden können, sind umrandet dargestellt. Die meisten beprobten Wässer liegen im Feld mariner Sulfate und Evaporite. Der See Genezareth liegt typischerweise ebenfalls im Feld des atmosphärischen SO_4 .	111
Abb. 7-29: $\delta^{34}\text{S}$ -Werte (SO_4) im See Genezareth vs. der Höhe über Seegrund a) 2002, b) 2003 und c) 2004. Die Anreicherung an ^{34}S im reduzierenden Hypolimnion wird deutlich.	112
Abb. 7-30: Sättigungsindex (SI) von Gips über $\delta^{34}\text{S}$ -Werte im Wasser des See Genezareth für das Probenjahr 2002. Die starke Untersättigung im reduzierenden Hypolimnion durch die DSR ist deutlich zu erkennen.	114
Abb. 7-31: Illustration des Tetraden-Effektes: Darstellung der logarithmischen Verteilungskoeffizienten D für jedes REE normiert auf Gd vs. der Ordnungszahl. [D ist für das System 0,25 M HCl und HDEHP (bis-2-ethyl hexyl Phosphorsäure) in n-Heptan.] (Wood, 1990: Fig. 1)	115
Abb. 7-32: Schematische Darstellung eines sauerstoffreichen Karstaquifers und die Bindung von REY(III) und Ce(IV) an FeOOH-Komplexe. Während der Alteration dieser Komplexe werden REY(III) freigesetzt, während Ce(IV) stabil eingebunden bleibt.	117
Abb. 7-33: Schematisches Profil durch die westliche Grabenflanke, die aus kretazischen Kalksteinen und einer Basaltdecke aufgebaut ist. Dargestellt sind die Änderungen der Grundwasserchemie und der Prozess der „Tapezierung“ des Aquifers durch die REY.	121
Abb. 7-34: Prinzipdarstellung des Phosphateintrages in den See Genezareth und die Phosphor-Spezies im See.	125
Abb. 7-35: REY-Muster der Grundwässer aus a) unveränderten, mergeligen und tonigen kretazischen Kalksteinen (REY-A1), b) aus Eozänen Kalksteinen (REY-A2), c) thermisch überprägten Karbonatgesteinen (REY-A3) und d) stark silifizierten Karbonatgesteinen (REY-A4).	127
Abb. 7-36: REY-Muster der Laugungsprodukte (1h gelaugt) von aufgemahlene kretazischen und eozänen Kalksteinen aus dem Drainagebecken des See Genezareth.	128
Abb. 7-37: Die Abreicherung der mittleren REE charakterisiert die REY-Muster der Grundwässer vom Typ REY-B, die ausschließlich in der östlichen Flanke auftreten.	129
Abb. 7-38: Die REY-Muster der Vorfluter im Untersuchungsgebiet, der Typ REY-C, sind durch einen steten Abfall von La zu Lu und geringe Anomalien gekennzeichnet.	131
Abb. 7-39: Die Ähnlichkeit der REY Verteilungsmuster zwischen Jordan (2000 und 2003) und See Genezareth zeigt sich am Beispiel des Probenprofils „Susita“ im Jahr 2002	132
Abb. 7-40: Vergleichende Darstellung der REY Muster des a) See Genezareth, am Beispiel des Probenprofils „Susita“ im Jahr 2002 mit denen des b) Thyro-Beckens im Mittelmeer (Daten von Bau et al., 1997).	133
Abb. 7-41: Die Mischung von 45% thermo-salinarem KIN 8-Wasser (offenes Quadrat) mit 55% Tiefenwasser des See Genezareth ergibt ein REY-Muster, welches dem des Wassers aus der Bohrung Barbutim (dicke Linie) entspricht.	134
Abb. 7-42: Der Vergleich der REY-Muster des Seeprofiles „Barbutim“ und der Bohrung Barbutim zeigen die Veränderungen der REY-Verteilung als Folge der Migration durch das anoxische Sediment.	134

Abb. 7-43: Variationen der Ce-Anomalie, aufgetragen über die Höhe über dem Seeboden a) für selektierte Profile in den Jahren 2002, 2003 und 2004. Graphik b) zeigt eine schematische Prinzipskizze der Variation der Ce-Anomalie innerhalb der Wassersäule aus Abb. 7-43a.	136
Abb. 7-44: Die REY Muster des Jordans (2004) und des See Genezareth am Beispiel des Probenprofils „Susita“ während der vollständigen Durchmischung des Sees im Jahr 2004.	137
Abb. 7-45: Die REY Muster des Seeprofiles „Shaldag“ während der Stratifizierung des Sees 2002 und 2003. Die Ähnlichkeit der REY-Muster mit denen der Tiberias Haupt-Quelle wird in den bodennächsten Proben deutlich und weist auf einen Zutritt von vergleichbarem thermo-salinaren Wasser hin.	138
Abb. 7-46: REY Muster des Seeprofiles „Ha’On“ während der Stratifizierung 2002 und 2003 sowie der Bohrung Ha’On 1.	139
Abb. 7-47: Die REY Muster des Seeprofiles „Migdal“ - unmittelbar vor der Region Fuliya gelegen - während der Stratifizierung 2002. Die REY-Verteilungsmuster der tiefsten Profilproben sind mit denen der Bohrung KIN 5 vergleichbar.	140
Abb. 7-48: Die REY Muster des Seeprofiles „Maga’an“ - wenige 100m vom Fischerhafen (Maga’an) von Tiberias gelegen - während der Stratifizierung 2003 und der Durchmischung 2004. Die REY-Muster der tiefsten Profilproben sind mit denen der Bohrung KIN 10b vergleichbar.	140
Abb. 7-49: Vergleich der REY Muster des Seeprofiles „Tabgha“ im Jahr 2002 und der Bohrung KIN 7, die sich nur durch eine stärkere negative Ce-Anomalie in KIN 7 unterscheiden.	141
Abb. 7-50: Die REY Muster des Seeprofiles „Ein Gev“ im Frühjahr 2004. Dieser Probenpunkt unterscheidet sich besonders durch die negative Ce-Anomalie in Bodennähe von den übrigen Seeprofilen in der durchmischten Phase.	141
Abb. 7-51: Darstellung der quantitativen Wiederfindungsrate des Tm-spikes in den Wässern des See Genezareth, aufgetragen über die Höhe über dem Seeboden.	142
Abb. 7-52: Darstellung der quantitativen Wiederfindungsrate eines Multi-REE-spikes in den Wässern des See Genezareth, der Tiberias Haupt Quelle und der Hammat Gader Quelle Ein Makla.	143
Abb. 7-53: Piper Diagramm der Grundwässer klassifiziert nach Spider-Diagramm-Typen.	145
Abb. 7-54: Piper Diagramm der Grundwässer klassifiziert nach den REY-Typen.	146
Abb. 8-1: Seespiegelentwicklung seit 1980. Grau hinterlegt ist der Bilanzzeitraum von Herbst 2002 bis Herbst 2003. (Daten: Nishri - KLL, 2004)	149
Abb. 8-2: zeigt die bilanzierten Werte der monatlichen a) Volumina, b) Cl-Fracht und c) Br-Fracht der unspezifizierten Zutritte.	150

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Übersicht der analytischen Methoden, Messunsicherheiten und Nachweisgrenzen	11
Tab. 2-2: Material und Reagenzien zur Probenahme der stabilen Isotope	13
Tab. 2-3: Übersicht der Isotopenanalytischen Methoden	14
Tab. 3-1: Mineralogie der Tonfraktion in Böden und Sedimenten im Drainagegebiet	22
Tab. 4-1: jurassische Abfolgen, die Arad Gruppe	27
Tab. 4-2: Die kretazische Abfolgen	29
Tab. 4-3: Überblick über die Entwicklungsphasen und deren Einordnung im Känozoikum	29
Tab. 4-4: Die Embryonische Phase – Lithostratigraphie relevanter Sedimentgesteins – Formationen im Untersuchungsgebiet	37
Tab. 4-5: Eritreische Phase – relevante Sedimentgesteins-Formationen im Untersuchungsgebiet	37
Tab. 4-6: Levantinische Phase – relevante Sedimentgesteins-Formationen im Untersuchungsgebiet	38
Tab. 4-7: neogene Magmatite – relevante Formationen im Untersuchungsgebiet	38
Tab. 6-1: Die Parameter der hydrostratigraphischen Einheiten der Region	50
Tab. 6-2: Die lithologischen und hydrochemischen Charakteristika der untersuchten Grundwasseraustritte im Beq'at Kinarot und dessen Drainagebecken.	56
Tab. 6-3: Mischungsbestimmung der bedeutendsten Grundwässer in Tabgha und Fuliya auf der Basis von Cl, Br, Na, K, Mg, Ca, $\delta^{18}\text{O}$	57
Tab. 7-1: Typisierung der Grund- und Oberflächenwässer nach deren Mineralisation und mittleren molaren Element-Verhältnissen.	68
Tab. 7-2: Elektronenkonfiguration und Ionenradien der REE als Funktion der Koordination	116
Tab. 8-1: Monatssummen [10^6 m^3] der Zu- und Abflüsse des See Genezareth (Mekorot, 2004)	149

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius	KGA	Kurnub Gruppe Aquifer
µg/g	Mikrogramm pro Gramm	KIN	Kinneret
µg/l	Mikrogramm pro Liter	KLL	The Yigal Allon Kinneret Limnological Laboratory, Tabgha
¹³ C	Kohlenstoff-13 Isotop	km	Kilometer
¹⁴ C	Kohlenstoff-14 Isotop	La	La ³⁺ - Lanthan
¹⁸ O	Sauerstoff-18 Isotop	L-JGA	Unterer Judea Gruppen Aquifer
2D	2-Dimensional	LK	Lake Kinneret (See Genezareth)
³⁴ S	Schwefel-34 Isotop	Ln	Lanthanide
³⁶ Cl	Chlor-36 Isotop	loc. typ.	<i>locus typicus</i> - Typlokation
3D	3-Dimensional	Lu	Lu ³⁺ - Lutetium
⁸⁶ Sr	Strontium-86 Isotop	m NN	Meter über Normalnull
⁸⁷ Sr	Strontium-87 Isotop	m ³	Kubikmeter
∅	Durchmesser	Ma	Millionen Jahre (10 ⁶)
B	B ³⁺ - Bor	Mg	Mg ²⁺ - Magnesium
Br	Br ⁻ - Bromid	mg/l	Milligramm pro Liter
C ₃	Pflanzen, die nach dem Calvin-Mechanismus photosynthetisieren	mGal	Milli-Gal
C ₄	Pflanzen die nach dem Hatch-Slack-Mechanismus photosynthetisieren	Mio	Million
Ca	Ca ²⁺ - Kalzium	mS/cm	Milli-Siemens pro Zentimeter
Ce	Ce ³⁺ - Cer	Mt.	Mountain – Berg
CH ₃ COOH	Acetat	mV	Millivolt
CH ₄	Methan	MWL	Meteoric Water Line – meteorische Wasserlinie
Cl	Cl ⁻ - Chlorid	Na	Na ⁺ - Natrium
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	NIG	New Israel Grid – Neues Israelisches Gitter
δ	Isotopenverhältnis	NO ₃	NO ₃ ⁻ - Nitrat
D, ² H	Deuterium Isotop (Wasserstoff-2 Isotop)	nT/km	Nanotesla pro Kilometer
DEM	Digital elevation modell – Digitales Höhenmodell	NWC	National Water Carrier – Nationaler Wasserversorger des Staates Israel
E	Osten	OZ	Ordnungszahl im Periodensystem der Elemente
e ⁻	Elektron	P	partieller Dampfdruck
Eh	Redoxpotential	pH	pH-Wert: negativ dekadischer Logarithmus der Wasserstoffkonzentration
et al.	<i>et alii</i> – und andere	r ²	Korrelationskoeffizient
Eu	Eu ³⁺ - Europium	REE	Rare earth elements – Seltenerd Elemente oder Lanthanide
EZG	Einzugsgebiet	REY	REE inklusive Yttrium
FeOOH	Eisen-Oxihydroxide	SDC	salinity diversion channel – Salzwasserkanal
g/l	Gramm pro Liter	SiO ₂	Siliziumdioxid
Gd	Gd ³⁺ - Gadolinium	Sm	Sm ³⁺ - Samarium
GIJP	German-Israelian-Jordanian-Palestinian Joint Research Program	SO ₄	SO ₄ ²⁻ - Sulfat
GK	Geologische Karte	Sr	Sr ²⁺ - Strontium
GOK	Geländeoberkante	T	Temperatur
GSI	Geological Survey of Israel – Geologischer Dienst von Israel	T, ³ H	Tritium (Wasserstoff-3 Isotop)
H ₂ O	Wasser	TDS	Total dissolved solids – Gesamtlösungsinhalt
H ₂ S	Schwefelwasserstoff	TK	Topographische Karte
H ₄ SiO ₄	Kieselsäure	TU	Tritiumunit - Tritiumeinheit
HCO ₃	HCO ₃ ⁻ - Bikarbonat	überm.	übermittelt
Ho	Ho ³⁺ - Holmium	U-JGA	Oberer Judea Gruppen Aquifer
HSI	Hydrological Service of Israel – Hydrologischer Dienst von Israel	vs.	<i>versus</i> – gegen
JGA	Judea Gruppe Aquifer	WHO	World Health Organisation
K	K ⁺ - Kalium	Y	Y ³⁺ - Yttrium
kg/a	Kilogramm pro Jahr		