

8. Quantifizierung der unspezifizierten Zutritte von (salinaren) Grundwässern in den See Genezareth

8.1 Zielsetzung

Die unspezifizierte Wassermenge, die in den See Genezareth zutritt und maßgeblich zur Versalzung des Sees beiträgt, sollte hinsichtlich der Schüttungsmengen und Hydrochemie charakterisiert werden.

Dazu wurde (1) mittels Daten der Mekorot Co. (Berger, pers. Komm.) eine Volumen- und Stoffmengenbilanz auf Monatsbasis für das hydrologische Jahr 2002/2003 erstellt und bewertet und (2) die variable Ce-Anomalie an der Sediment-Wasser-Grenzfläche genutzt, um eine Abschätzung über die Zutrittsraten durch das Sediment zu erhalten. Zur Validierung dieser Raten wurden (3) Diffusions- und Advektionsraten aus der Literatur (Stiller, 1994; Dror et al., 1999) mit Flächen gleicher spezifischer Widerstände im Seesediment (Goldman et al. 2004) gewichtet.

8.2 Volumen- und Stoffmengen-Bilanzierung

8.2.1 Ergebnisse und Diskussion

Der Bilanzzeitraum lag am Ende einer mehrjährigen Trockenperiode in einem überdurchschnittlich niederschlagsreichen hydrologischen Jahr ($N = 152\%$ des 16-jährigen Mittels) (Tab. 8-1; Abb. 8-1). Die Niederschlagsmenge beeinflusst direkt das Seevolumen, nahezu direkt die Wasserführung der Vorfluter, durch die Grundwasserneubildung zeitlich verzögert die Schüttung der Quellsysteme im Beq'at Kinarot, sowie die unspezifizierten Grundwasseraustritte – insofern sie an den meteorischen Wasserkreislauf angeschlossen sind. Durch die erhöhte Wasserführung der Zuflüsse stieg der Seespiegel innerhalb des Bilanzzeitraumes um etwa 3,5 m (Abb. 8-1).

Das Volumen der unspezifizierten Zutritte wurde nach dem in Anhang B2 erläuterten Verfahren mit $84,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (Abb. 8-2a) und deren Chlorid-Fracht mit $65,5 \times 10^6 \text{ kg/a}$ (Abb. 8-2b) berechnet. Eine Bilanzierung der Br-Fracht auf der Basis der Volumenbilanzierung führte zu einem Ergebnis von $0,54 \times 10^6 \text{ kg/a}$ (Abb. 8-2c). Dabei wurde auf der Basis eigener Messungen im Seewasser im November 2002 und November 2003 eine kontinuierliche Änderung des Cl/Br-Gewichts-Verhältnisses des Sees von 128 zu 131 angenommen. Die Messergebnisse (Cl, Br) sämtlicher beprobter Seeprofile wurden entsprechend der Probenahmetiefe mit den Volumina des Hypo- und des Epilimnions gewichtet.

Tab. 8-1: Monatssummen [10^6 m^3] der Zu- und Abflüsse des See Genezareth (Mekorot, 2004)

Datum	J	OA	SDC	KIN7	Y	N	D	LK	NWC	E	X
Okt. 02	18.6	0.83	0.65	0.43	1.44	1.70	0.70	10.6	6.35	22.4	2.42
Nov. 02	19.1	0.87	0.30	0.41	3.05	4.49	0.32	7.04	7.18	26.8	0.88
Dez. 02	40.2	4.14	0.02	0.43	5.92	26.5	0.15	3.83	5.49	15.3	0.98
Jan. 03	52.8	9.18	0.05	0.47	5.34	12.2	0.04	0.83	6.00	6.50	1.92
Feb. 03	162	91.4	0.07	0.41	10.2	34.8	0.002	0.77	2.60	8.05	16.3
Mrz. 03	171	75.9	0.99	0.45	11.4	21.4	0.05	3.31	26.3	7.63	15.0
Apr. 03	102	9.69	0.43	0.57	6.53	2.37	0.26	7.14	31.5	7.08	9.83
Mai. 03	67.6	2.61	0.14	0.46	0	0	1.00	8.07	44.0	20.8	9.75
Jun. 03	48.7	1.27	0.07	0.42	0	0	1.02	10.5	44.6	21.8	4.14
Jul. 03	35.4	0.90	0.05	0.43	0	0	1.99	11.3	45.1	25.3	6.14
Aug. 03	28.0	0.83	0.05	0.44	0	0	2.04	10.8	48.1	28.6	10.1
Sep. 03	29.0	0.79	0.19	0.43	0	0	1.06	9.74	44.9	30.9	6.89
Anteil [%] % des 16- jährigen Mittels	63.9	16.4	0.2	0.4	3.6	8.5	1.4	13.4	49.9	35.3	7.0
	186	284	57	97		152				88	122

Zutritte: X: unspezifizierte Zutritte, J: Jordan; OA: Oberflächenabfluss; SDC: Überlauf des Salzwasserkanals in Tabgha; KIN7: Arteser KIN 7 (Tabgha); Y: Yarmouk; N: direkter Niederschlag; **Abflüsse:** D: Damm bei Deganya, Auslass See Genezareth; LK: lokale Konsumenten; NWC: Nationaler Wasserversorger (Mekorot Co.); E: Evaporation.

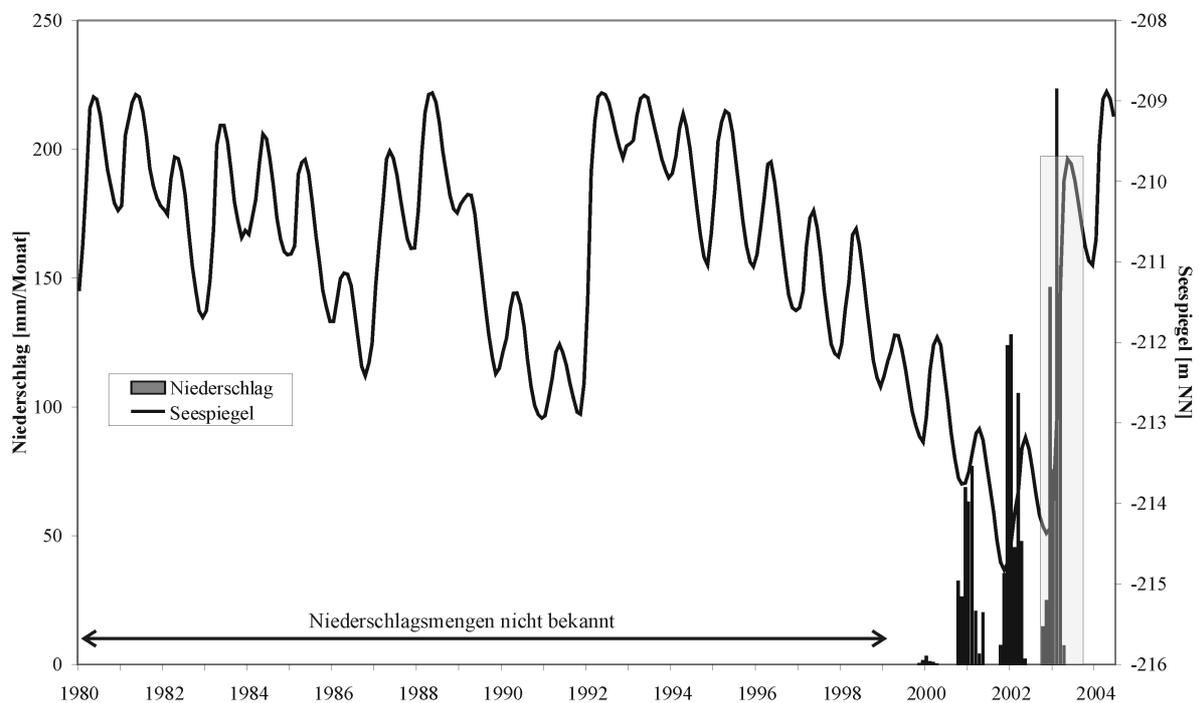


Abb. 8-1: Seespiegelentwicklung seit 1980. Grau hinterlegt ist der Bilanzzeitraum von Herbst 2002 bis Herbst 2003. (Daten: Nishri – KLL, 2004)

Volumen- und Massenbilanzen des Systems See Genezareth sind besonders für einen kurzen Zeitraum von einem Jahr stark fehlerbehaftet. Andererseits ergibt sich aus der Betrachtung der Ergebnisse ein homogenes und logisches Bild. Die Möglichkeit einer Korrelation der unspezifizierten Zutritte mit den Quellgebieten sowie deren hydrochemischen und hydraulischen

Charakteristika ist auf Basis der vorliegenden Bilanz nahe liegend, jedoch nicht belegbar. Auf Grund der Unsicherheiten bei der Berechnung der Volumen- und Stoffmengenbilanz (Anhang B3) wird auf eine weitere Interpretation der Daten verzichtet.

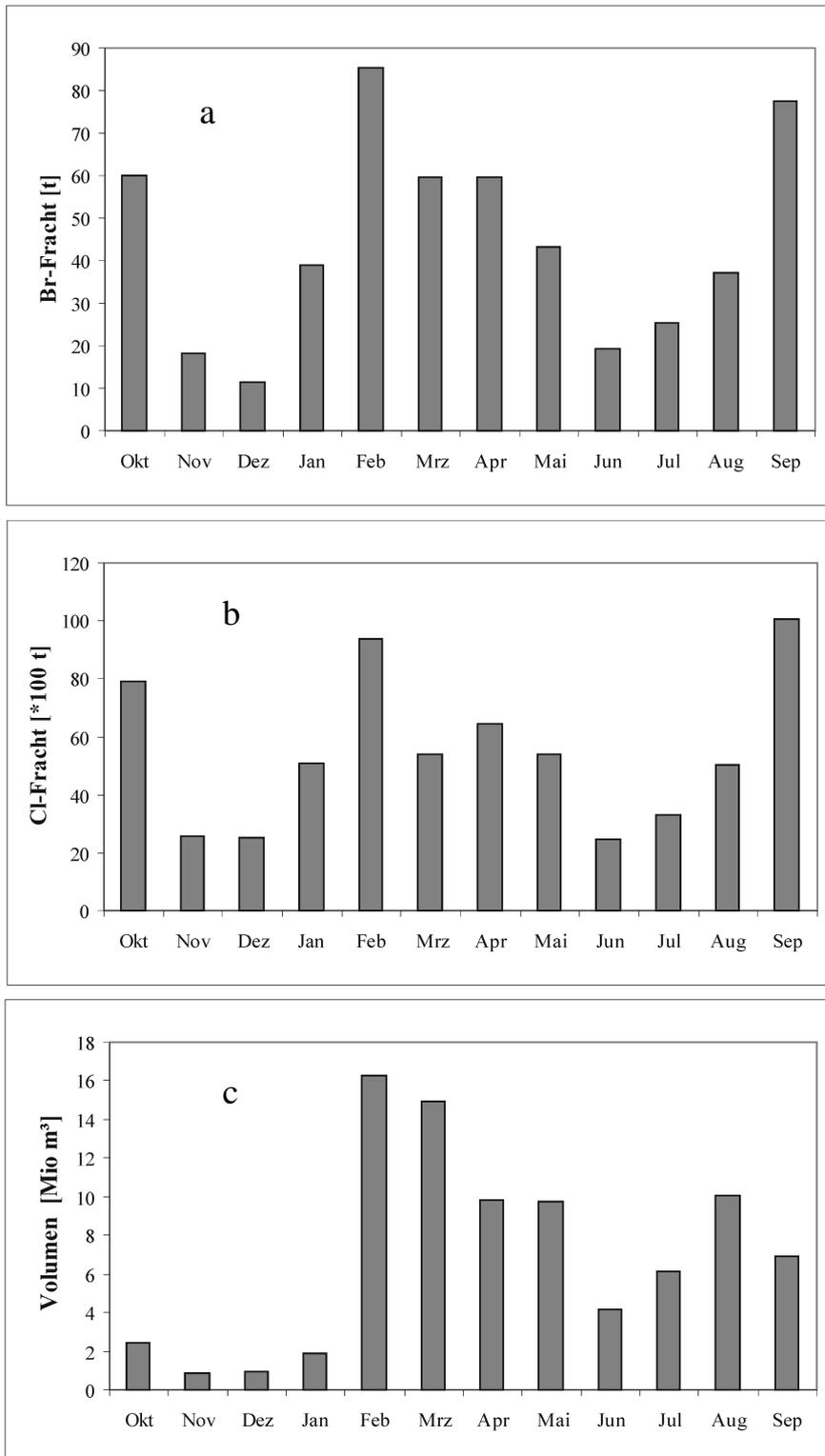


Abb. 8-2: zeigt die bilanzierten Werte der monatlichen a) Volumina, b) Cl-Fracht und c) Br-Fracht der unspezifizierten Zutritte.

8.3 Betrachtung der diffusiven und advektiven Stoffflüsse

8.3.1 Ergebnisse und Diskussion

Diffusiver Stofftransport durch das Seesediment basiert auf Konzentrationsgradienten im Porenwasser. Die Betrachtung dieses Flusses in den Regionen, in denen er gemessen wurde (Stiller, 1994; Dror et al., 1999), unter Einbeziehung neuerer geophysikalischer Messungen, ermöglicht eine Abschätzung der diffusiv und advektiv in den See zutretenden Mengen (Anhang C) an Chlorid. Dabei wird ein Zustrom entlang von Störungen prinzipbedingt nicht mitbewertet. Die jährliche Menge, die darüber dem See zutritt, beläuft sich auf ein Minimum von 22×10^6 kg Cl pro Jahr. Diese Menge entspricht einem Cl-Zustrom von $5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, oder anders ausgedrückt einem Anstieg der durchschnittlichen Chloridität des Seewassers (260 mg/l) bei einem durchschnittlichen Volumen von $4,2 \times 10^9 \text{ m}^3$ um 2 %. Diese Menge liegt am Rand der analytischen Nachweisgrenze und ist somit nicht detektierbar.

Stiller (1994) schätzt den gekoppelten diffusiv/advektiven Zustrom, integriert auf die Gesamtgrundfläche des Sees, auf 9×10^6 kg Cl pro Jahr. Die Bohrungen KIN U8, KIN D4, KIN F5 und A-G (Stiller, 1994) weisen ähnliche Konzentrationsgradienten auf, während die Lokation E einen erhöhten Gradienten aufweist (Abb. C1). Im Gegensatz dazu ist die Chloridität bereits 10 cm unter dem Seegrund in den Bohrungen Fuliya (1,15 g/l) und Tiberias (14 g/l) konstant (Dror et al., 1999) (Abb. C1). In diesen Regionen steigt salinares Wasser aktiv auf und repräsentiert den lokalen Salzwasserspiegel im Sediment. Beide Bohrlöcher sind nahe des Ufers abgeteuft und die Porenwasserchemie (Cl/Br Verhältnis) ist denen der landseitig gelegenen Quellgruppen sehr ähnlich. Diese sind beide hydraulisch mit dem See verbunden (Rimmer et al., 1999). Ein advektiver Fluss (q_v) ist von Dror et al. (1999) in den Bohrungen Fuliya (0,56 m/a) und Tiberias (0,25 m/a) bestimmt worden. Daher ist es höchst wahrscheinlich, dass die Porenwässer hydraulisch an die Aquifersysteme der Quellgruppen angeschlossen sind und der Fluidfluss deren saisonalen Schwankungen unterliegt. Stiller et al. (1975) haben einen sehr viel geringeren advektiven Fluss von 0,04 m/a in der Bohrung A (Abb. C1) (Tab. C1) im zentralen Teil des Sees bestimmt. Diese großen Unterschiede reflektieren die unterschiedlichen Fließsysteme innerhalb und außerhalb des Grabens *sensu stricto*. Weil die Regionen außerhalb des Grabens an die Aquifere angeschlossen sind, treten in den Bohrungen KIN F5 (2.5 g/l) und KIN U8 (3.3 g/l) hohe Chloriditäten auf. Innerhalb des Grabens ist die Chloridität in 4 m Sedimenttiefe in KIN D4 (1.7 g/l) am niedrigsten (Stiller, 1994). Daher wird angenommen, dass westlich der geographischen Länge 254 (NIG) die Advektion der dominante Prozess ist und innerhalb des Grabens *sensu stricto* die Diffusion die Hauptrolle spielt.

8.4 Bilanzierung zutretender Grundwässer auf Grundlage der Änderungen der Ce-Anomalien in der Wassersäule

8.4.1 Ergebnisse und Diskussion

Die Änderungen der Ce-Anomalien an der Sediment-Wasser-Grenzfläche wurden genutzt, um einen Netto-Strom von Wasser aus dem Sediment in das Hypolimnion zu bestimmen (Anhang D). Unter der Annahme, dass der Zustrom überall im See gleich ist, wurde eine Mindestmenge von $44 \times 10^6 \text{ m}^3$ Wasser bestimmt, die jährlich unkontrolliert dem See zuströmen. Unter der weiteren 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 mindestens $17,4 \times 10^6 \text{ kg Cl}$ pro Jahr in den See.

Die Mengen des Cl-Zustromes, die aus der Änderung der Ce-Anomalie in der Wassersäule bestimmt wurden, sind mit denen vergleichbar, die aus dem diffusiv und advektiv basierten Transport berechnet wurden. Der Zustrom, der entlang von Störungen und anderen hochpermeablen Zonen eintritt, ist nicht betrachtet worden, obwohl er indirekt in der Ce Bilanz enthalten ist. Andererseits reagiert die Ce Bilanz sensitiv auf die angenommenen Durchschnittsgehalte an Ce im Hypolimnion. Das heißt, beide Berechnungsweisen ergeben nur Mindestmengen für den Cl-Zustrom in den See an.

Es gibt seit Jahrzehnten Versuche, die unspezifizierten Zutritte in den See Genezareth zu bilanzieren. Langzeitbilanzierungen auf Zeiträume von mehreren Dekaden (z.B. Rimmer & Gal, 2003) zeigen unter allen Versuchen die kleinsten Unsicherheiten. Jedoch ist eine Aussage in Bezug auf die Charakterisierung der Schüttungsdynamik der unspezifizierten Zutritte nicht möglich. Neben verschiedenen anderen Autoren benennen Nishri et al. (1999), Klein-BenDavid et al. (2005) und Mero (1978) die unspezifizierten Zutritte jeweils mit $61 \times 10^6 \text{ m}^3$, $65 \times 10^6 \text{ m}^3$ und $90 \times 10^6 \text{ m}^3$ pro Jahr. Mit diesen Angaben stimmt das bilanzierte Volumen von etwa $84 \times 10^6 \text{ m}^3$ pro Jahr gut überein. Die an die Tabgha Quellgruppe angeschlossene Region Barbutim schüttet jährlich etwa $16 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Mercado and Mero, 1984) und repräsentiert damit ein Viertel des unspezifizierten Zuflusses. Allerdings sind indirekt bestimmte Schüttungsmengen von *off-shore* Quellen wie Barbutim sehr kritisch zu betrachten, denn neben Bestimmungsschwierigkeiten unterliegen sie den charakteristischen saisonalen und langfristigeren Fluktuationen des speisenden Aquifersystems.

Die Unsicherheiten bei der Bilanzierung von Stoffflüssen sind ungleich größer als die reiner Volumenabschätzungen, besonders in sehr großen hydrologischen Systemen wie dem des See Genezareth (Assouline, 1993; Rimmer & Gal, 2003). Unabhängig davon geben unter anderem

Mero (1978), Smith et al. (1989) und Goldman et al. (2004) jährliche Cl-Frachten für die unspezifizierten Zutritte in der Größenordnung von 65×10^6 kg bis 90×10^6 kg an. Dror et al. (1999) geben weiterhin einen Zutritt von $0,65 \times 10^6$ kg Br durch unbekannte Quellen an. Die für das Jahr 2002/03 bilanzierte Cl- (66×10^6 kg) als auch Br-Fracht ($0,54 \times 10^6$ kg) stimmt mit denen dieser Autoren nahezu überein.

Im Gegensatz dazu sind die Ergebnisse aus den Berechnungsansätzen des (1) diffusiven und advektiven Zustroms sowie über (2) die Änderung der Ce-Anomalie in der Wassersäule viel niedriger. Betrachtet man sich jedoch die Angaben von Rimmer & Gal (2003) bezüglich der Unsicherheiten bei einer Stoffmengenbilanzierung, so sind die Bilanzergebnisse äußerst kritisch zu betrachten und liegen innerhalb der Spannweite der Gesamtunsicherheit (1σ).

Der Zustrom an Chlorid durch den Seegrund ist definitiv $>20 \times 10^6$ kg/a, ohne eine obere Grenze als sicher zu kennen.