

Aus: Lozán et al. (1998): Warnsignal Klima - Das Klima des 21. Jahrhunderts. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg. 90-97.

Klima und Binnenseen

José L. Lozán, Josef Merkt & Hans-Joachim Pachur

CLIMATES AND LAKES: Lakes have always changed in size and volume over geological periods of time due to climatic influences. The extreme dry conditions found presently in the Sahara Region have caused many former lakes and rivers to completely evaporate. The prevailing regional climates from the past can be determined from deposits beneath lakes. They provide evidence of earlier climatic changes as well as alterations in the vegetation. In addition, they give historical indications of early human activities, such as the first evidence of the use of coal and oil, introductions of new cultivated plant species, and emissions of pesticides and heavy metals. In this paper, changes in several important lakes and inland seas, such as the Caspian Sea, Aral Sea, Dead Sea, Lake Titicaca, and the Great Salt Lake, will be outlined. The example of the Great Salt Lake shows that tectonic factors strongly influence the characteristics of inland bodies of water. The water levels in the Dead and Aral Seas have decreased due to the use of water for agricultural projects bringing catastrophic consequences to the drainage area of the Aral Sea. Tectonic movements in land masses and anthropogenic impacts can greatly outweigh climatic influences.

Seen haben sich in geologischen Zeiträumen in ihrer Größe und Ausdehnung aufgrund klimatischer Schwankungen immer wieder verändert. Seen sowie Fließgewässer sind wichtige Glieder im hydrologischen Kreislauf der Erde. Sie sind wichtige Wasserreservoirs und oft von wirtschaftlicher Bedeutung. Seen sind von Intensität der Niederschläge und Abflüsse einerseits und Verdunstung andererseits abhängig. In der letzten Kaltzeit (Eiszeit) verringerte sich die Verdunstung durch die Abkühlung. Das Verhältnis zwischen Niederschlag und Verdunstung verschob sich in vielen Regionen zugunsten der Niederschläge. Die Größe derjenigen Seen und Binnenmeere, die in den damaligen gemäßigten Breiten lagen und nicht oder nur wenig durch die Vereisungen betroffen waren, nahmen zu. So dehnte sich der Kaspisee weit über seine heutigen Grenzen nach Nordwesten und Norden aus und wurde mehr als doppelt so groß wie heute. In Regionen niedriger Breiten wie Nordafrika und Australien gab es Seen und Flüsse, die heute möglicherweise infolge einer Verschiebung der Klimazonen völlig trocken liegen.

Mit Hilfe der Seeablagerungen ist die Rekonstruktion zumindest des regionalen Klimas möglich. Seen sind als tiefste Bereiche und Erosionsbasen ihrer Landschaften verlässliche Sedimentarchive und damit »Klimazeugen« der jüngeren Vergangenheit. Neben klimatischen Entwicklungen kann aus den abgelagerten Sedimenten die anthropogene Umweltbelastung nachvollzogen werden. In diesem Kapitel werden einige wichtige Seen – aufgegliedert nach Kontinenten – bezüglich ihrer klimatisch bedingten Änderungen kurz beschrieben.

Afrika

Die Sahara ist heute die größte Wüste der Welt. Mehrere Untersuchungen (SONNTAG et al. 1979, PACHUR

1987) zeigen jedoch, daß sich das Klima der Sahara in den letzten 25 000 Jahren mehrmals geändert hat. Es hat ein Wechsel von semi-aridem zu aridem, dann feuchtem und schließlich aridem Klima stattgefunden. Während des feuchten Klimas war die Sahara durch Seen und Flüsse sowie ein ausgedehntes Entwässerungssystem charakterisiert. Ihre damaligen Lagen und Verläufe sind heute durch Luft- und Satellitenaufnahmen oder mit Hilfe von Sedimentuntersuchungen rekonstruierbar (vgl. Kap. 1.9). In der Ost-Sahara war die Austrocknung am stärksten; dort kann z.Z. sogar von einer Hypertrockenheit gesprochen werden. Aufgrund der Tatsache, daß die Regenfronten in erster Linie vom Atlantik kamen, war die Ostseite benachteiligt, da die Regenmengen von Westen nach Osten abnahmen. Auch die Vegetation im Osten war nicht so dicht wie im Westen und die Trockenperioden dauerten länger und begannen früher.

Die Untersuchungen u.a. von PACHUR (1987), PACHUR & WÜNNEMANN (1996) geben Details über den Beginn und Verlauf des feuchten Klimas und die anschließende Austrocknung der Ost-Sahara (vgl. Abb. 1.13-1). Süßwasser- und Brackwasserseen existierten über mehrere tausend Jahre. Flüsse waren bis zu 800 km lang; sie entstanden nördlich und östlich der Tibesti Gebirge und bildeten dabei kleine Seen oder flossen bis in die Mittelmeer-Region. Die von der südlichen Seite des Tibesti Gebirges kommenden Flüsse speisten den Tschadsee; andere flossen südwestlich und mündeten in den Atlantik. In Meidob (Vulkanisches Gebirge in der Ost-Sahara) befanden sich mehrere Seen, deren Entwässerungssystem zur Bildung anderer Seen und mehrerer Wadis (Bäche mit unregelmäßigem Wassertransport) führten, die dem Nil zuflossen. Auch in der libyschen und nubischen Wüste gab es Seen mit lokalen Entwässerungssystemen. BAUMHAUER (1991) befaßte

sich mit der Entwicklung der damaligen Seen und Flüsse in Nordost-Niger. Er stellte fest, daß der Charakter auch von benachbarten Seen verschieden sein kann; der Zoo Baba See hatte Süßwasser und der etwa 70 km entfernte Dibella See brackisches Wasser mit starker Salinitätsschwankung. Er vermutet, daß der Zoo Baba See mehr Süßwasser durch eine größere Verbindung zum Grundwassersystem erhielt.

PACHUR & WÜNNEMANN (1996) untersuchten die Sedimente ehemaliger Seen der nubischen Wüste und in den Meidob-Bergen, die heute völlig ausgetrocknet sind. Durch Analyse der entnommenen Sedimentkerne rekonstruierten sie das dortige Klima. Aufgrund von Radiokarbon-Untersuchungen (^{14}C) der untersten Schichten dieser Sedimente startete bei den in ca. 1 100 m Höhe gelegenen Seen die limnische Sedimentation vor über 10 000 Jahre vor unserer Zeitrechnung (v.u.Z.). Bei den tiefer gelegenen Seen begann die Sedimentation um ca. 7 300 v.u.Z. Die Autoren vermuten, daß das feuchte Klima in den Gebirgen früher anfang; der Zeitunterschied entsprach wahrscheinlich der nötigen Zeit zur Erhöhung des Grundwasserspiegels und Bildung eines Entwässerungssystems. Ähnliches wurde in der gebirgigen Region Tibesti festgestellt.

Abb. 1.13-1 zeigt die Ergebnisse eines der untersuchten Sedimentkerne aus einem ehemaligen See auf den Meidob Bergen in einer Höhe von 1 100 m. Dar-

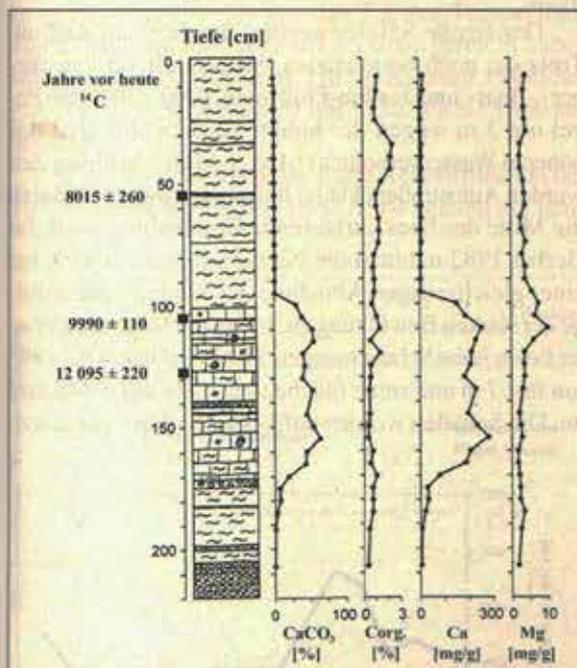


Abb. 1.13-1: Radiokarbonuntersuchung in einem Sedimentkern (220 cm) aus einem ehemaligen See in der Ost-Sahara. Veränderung des Gehalts an Kalzium-Karbonat, Kalzium und Magnesium sowie organischen Kohlenstoffen

aus ist das Alter des untersuchten Materials aufgrund von Radiokarbonmessungen sowie sein Gehalt an einigen chemischen Substanzen (Kalziumcarbonat, CaCO_3 ; organische Kohlenstoffe, C_{org} ; Kalzium, Ca und Magnesium, Mg) zu ersehen. PACHUR & WÜNNEMANN zeigen ferner die im Sedimentkern häufigsten Kieselalgen (Diatomeen) und Muschelkrebse (Ostracoden) in Abhängigkeit von der Konzentration an Kalziumkarbonat.

Der Tschadsee, der an der südlichen Grenze der Sahara liegt, weist z.Z. je nach Jahreszeit eine Fläche von 10 000 bis 20 000 km^2 auf. Nach SERVANT & SERVANT (1980) wies der Tschadsee während der feuchten Klimaperiode etwa 4 000 v.u.Z. eine Fläche von ca. 400 000 km^2 und einer um 30–40 m größeren Wassertiefe als heute auf; er war flächenmäßig etwa so groß wie der heutige Kaspische Meer. Die damalige Größe des Tschadsees ist durch die noch zu erkennende damalige Uferlinie und gefundene Fischfossilien rekonstruierbar.

Vor allem in der Sahel- und nördlichen Sudan-Zone gibt es Salzseen, die durch Austrocknung gefährdet sind. Diese Gewässer sind für eine Reihe von an Wasser gebundenen Vogelarten von Bedeutung. Sollte sich die aquatische Situation infolge Klimaerwärmung schnell verändern, werden neben den Enten und Limikolen, teilweise auch Reiher, Störche und vor allem alle an Röhrichte gebundenen Singvögel sowie innerafrikanische und internationale Zugvögel betroffen sein. Es gibt bereits heute für Arten wie Pupurreiher, Weißstorch und Schilfrohrsänger Indizien für einen Zusammenhang zwischen Jahrgangsstärken und ökologischen Verhältnissen in der Sahel- und Sudanzone (vgl. Kap. 3.24).

Amerika

Der Große Salzsee (»Great Salt Lake«) liegt in Nord-Utah (USA) und ist zusammen mit dem kleinen Servien- und dem Utah-Lake ein Überrest des prähistorischen Sees Bonneville (Abb. 1.13-2a). Sedimentuntersuchungen zeigen, daß dieser große See bereits vor über 25 000 Jahren existierte; seine Fläche betrug vor ca. 15 000 Jahren bei einer Tiefe von über 300 m über 50 000 km^2 . Er war damit der größte See Nordamerikas, enthielt Süßwasser, beherbergte eine vielfältige Flora und Fauna und lag damals 1 550 m (heute bei 1 275 m, vgl. Abb. 1.13-2c) über dem Meeresspiegel; über den Snake und Columbia River hatte er damals eine Verbindung zum Pazifik (VAUGHN 1994).

Mit Hilfe von Sedimentkernen an verschiedenen Stellen des gesamten Seebeckens wurde die Geschichte des prähistorischen Sees rekonstruiert. Unterschiedliche Aschen aus zeitlich bekannten vulkanischen Eruptionen ergänzten die aus Radiokarbon- und Sauerstoffisotopenmessungen gewonnenen Informationen (Abb. 1.13-

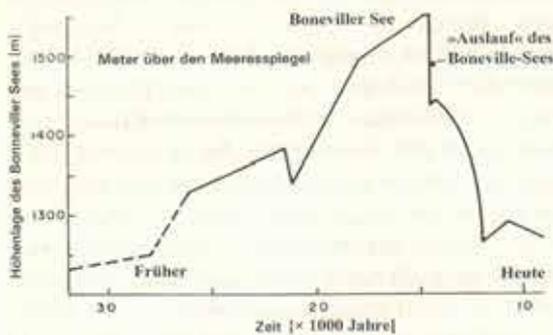
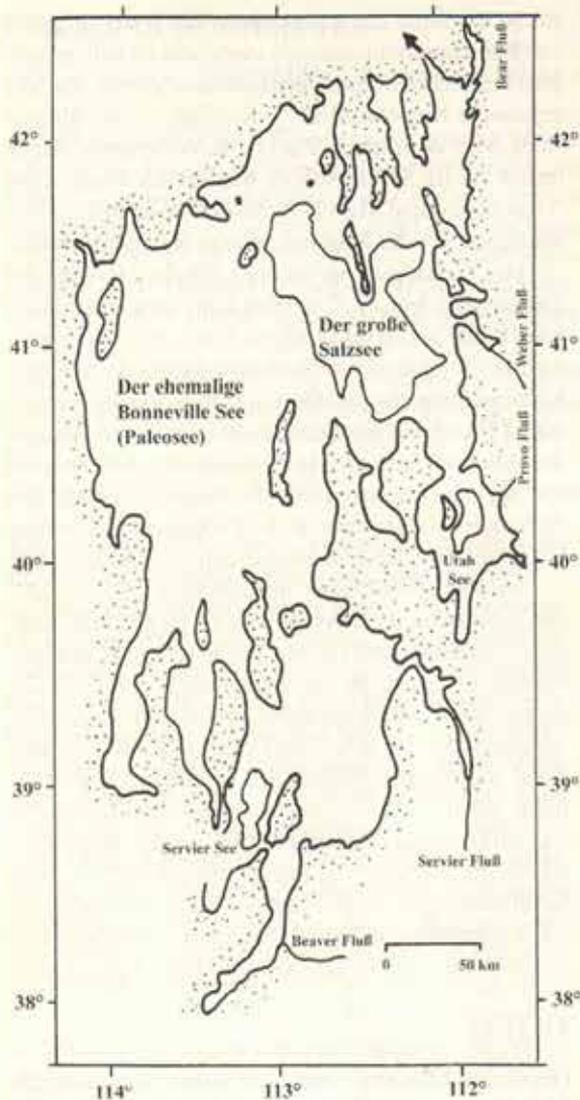


Abb. 1.13-2: Oben (a): Der Paläosee Bonneville und die Restseen »Großer Salzsee«, »Servier See« und »Utah See«. Unten (b): Veränderung der Höhenlage des Bonneville Sees der vergangenen 25 000 Jahre. Rechts (c): Schwankungen der Höhenlage des »Großen Salzsee« während der letzten 160 Jahre

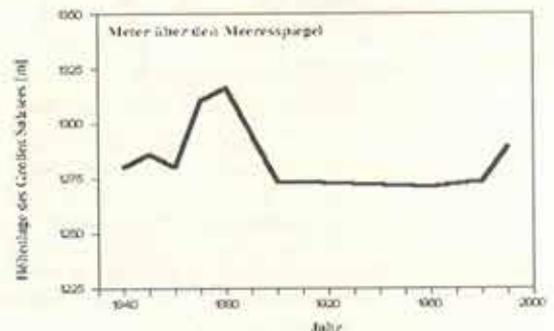
2b). Vor ca. 14 500 Jahren sank der Seespiegel aufgrund geomorphologischer Änderung des nördlichen Beckenrandes in kurzer Zeit um rund 100 m (OVIATT 1997, OVIATT et al. 1994). Ein späterer Klimawechsel mit Rückgang der Niederschläge und Zunahme der Verdunstung führte etwa am Ende der letzten Kaltzeit zur rapiden Reduktion seiner Fläche und Bildung des »Great Salt Lake«. Seiner Größe und dem hohen Salzgehalt (Tab. 1.13-1) verdankt er heute seinen Namen.

Tab. 1.13-1: Gegenüberstellung der Ionenzusammensetzung des Wassers (%) im »Great Salt Lake« (GSL), »Toten Meer« und im Ozean (aus VAUGHN 1994)

	Natrium	Chlorid	Sulfate	Magnesium	Kalzium	Σ
GSL	14,1	7,6	2,0	1,1	0,02	24,8
Totes Meer	17,5	3,3	0,7	3,4	1,4	26,3
Ozean	1,94	1,08	0,27	0,13	0,04	3,5

Sein Salzgehalt ist bedeutend höher als im Meer und leicht niedriger als im Toten Meer. Natriumchlorid macht ca. 90% der Ionenzusammensetzung aus. Aufgrund des extrem hohen Salzgehalts können nur Organismen mit einer hohen Salztoleranz wie der Salzkrebs *Artemia salina* und die Blaualge *Dunaliella salina* gedeihen. Ferner kommen dort salzliebende Bakterien der Gattungen *Halobacterium* und *Halococcus* vor, die mindestens 12% Natriumchlorid für das Wachstum benötigen.

Der Große Salzsee verfügt über keinen Abfluß. Trotz der noch bestehenden Wasserzuflüsse von Weber-, Bear- und Jordan-Fluß sank 1900–1982 der Pegel um 3 m wegen der hohen Verdunstung und des höheren Wasserverbrauchs (Abb. 1.13-2c). In dieser Zeit wurden Autostraßen, kleine Industrien sowie eine durch die Mitte des Sees verlaufende Eisenbahn gebaut. Im Herbst 1982 nahmen die Niederschläge um 45% bei einer gleichzeitigen Abnahme der Verdunstung infolge der starken Bewölkung zu. In darauf folgenden Winter fielen hohe Schneemengen. Der Pegel nahm bis 1986 um fast 7 m und seine Fläche von 4 248 auf 6 345 km² zu. Die Schäden wurden auf US \$ 285 Mio. geschätzt.



Für US \$ 71 Mio. ließ der Staat Dämme und eine Pumpstation bauen. Infolge klimatischer Schwankungen sank der später wieder ab (VAUGHN 1994).

Der *Titicaca-See* liegt auf dem Gebiet des peruanischen und bolivianischen Altiplano, weist eine Fläche von 8 448 km² mit einer mittleren Tiefe von etwa 100 m auf und ist damit der größte See Südamerikas. Aufgrund seiner Höhenlage von 3 810 m gilt er als der am höchsten gelegene schiffbare See der Welt. Der jährliche Wasserzulauf der 25 Flüsse beträgt 8,25 km³ und der aus den Niederschlägen 7,9 km³; der größte Teil (ca. 90%) dieser Wassermenge geht durch Verdunstung verloren (CARMOUZE 1981). Weniger als 5% davon fließt durch den Desaguadero ab. Daher kann der *Titicaca-See* als ein beinahe geschlossener See angesehen werden. Infolge der Höhenlage des Sees ist die solare Einstrahlung hoch. Seine Größe und die niedrige Wassertemperatur (11–14°C) erlauben eine hohe Wärmeaufnahme während der warmen Monate (Okt–Nov.). Die Wärmeabgabe während der Wintermonate (Juni–Juli) bewirkt ein mildes Klima in der Region (CARMOUZE 1983) und begünstigt den Anbau z.B. von Gerste und Weizen.

Die Phase nach 1500 war feucht, was als Manifestation der »Kleinen Eiszeit« auf dem Altiplano gelten kann und zu einer merklichen Erhöhung des Pegels führte. Man glaubt, daß zur Zeit der spanischen Kolonisierung der Seespiegel bis vor das Tor der Tempelstadt Tiahuanaco etwas 35 m höher als heute gereicht haben soll. Nach THOMPSON et al. (zit. in KESSLER 1994) begann eine trockene Periode um 1720, die bis 1860 andauerte.

KESSLER (1994) hat eine grobe Rekonstruktion der *Titicaca*pegel für die Zeit 1800–1984 anhand der jähr-

lichen Eisakkumulation des benachbarten Quelccaya-Gletschers vorgenommen. Mit der Periode 1915–1984, für die Messungen der Wasserstände regelmäßig durchgeführt werden, stimmen seine Ergebnisse recht gut überein (Abb. 1.13-3). Nach der drastischen Senkung des Pegels bis etwa 1860 ist um 1880 ein Anstieg zu erkennen, das bis ca. 1920 anhielt. Ab 1920 wurde der Pegelanstieg stärker und der Wasserstand erreichte ein noch höheres Niveau, das mit einigen Schwankungen bis jetzt erhalten geblieben ist (Abb. 1.13-3).

Asien

Kaspisee und Aralsee sind die größten Seen in Asien. Sie haben mit dem Schwarzen Meer und Asowschen Meer aufgrund ihrer Entstehung und ersten Entwicklungen vieles gemeinsames. Diese beiden Binnenseen sind Reste des jungtertiären Tethys-Meerces (vgl. Abb. 1.13-4); sie entstanden durch Landhebungen. Aus der Ionenzusammensetzung ihres Wassers ist der marine Einfluß noch heute ersichtlich. Eine ursprüngliche Verringerung des Salzgehaltes von Aralsee und Kaspisee ist die zeitliche Folge des Zuflusses von Süßwasser im Laufe vieler tausend Jahre (Tab. 1.13-2). Seitdem entwickelte sich die Fauna in diesen Gewässern unabhängig voneinander; bedingt durch die natürliche Senkung des Salzgehaltes haben nur wenige Arten überlebt. Diese Reliktformen stellen lebende Fossile dar, die zur Rekonstruktion des Klimas dieser Gewässer von großer Bedeutung sind (ZENKEVITCH 1963). Wie später erklärt wird, nimmt der Salzgehalt des Aralsees seit 1960 aufgrund von Wasserentnahmen aus seinen beiden Zuflüssen schnell ab.

Der *Kaspisee* ist heute mit ca. 436 000 km² und einem Wasservolumen von ca. 77 000 km³ der größte See der Welt. Im Mittel ist er 180 m tief, wobei der südliche Teil des Sees mit einer mittleren Tiefe von 325 m das tiefere Gebiet ist. Wesentlich tiefer ist das Schwarze Meer, das im Mittel 1 271 m tief ist. Bemerkenswert ist die Höhenlage des Kaspisees; zur Zeit liegt er mit -27 m deutlich unter dem Meeresspiegel. Seine Anrainerländer sind Aserbaidschan, Iran, Kasachstan, Rußland und Turkmenistan. Der See hat große wirtschaftliche Bedeutung für die Region; so erzielt die Fischerei einen jährlichen Ertrag von ca. 400 000 t. Infolge der starken Nord-Süd-Ausdehnung des Sees (1 200 km) gibt es erhebliche Temperaturunterschiede. Der nördliche flache Teil friert während der Wintermonate teilweise zu und wird im Sommer an

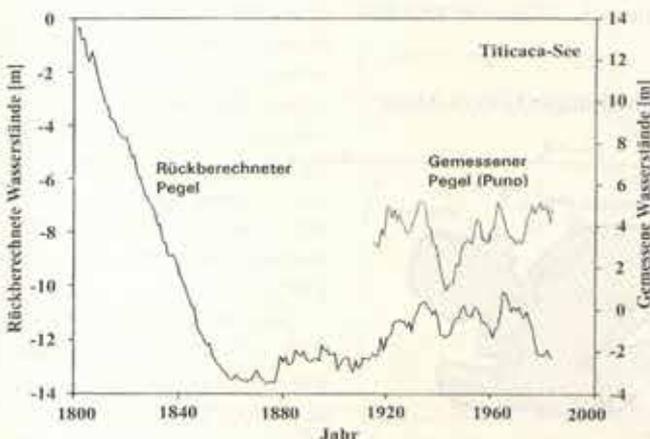


Abb. 1.13-3: Schwankungen des Niveaus des *Titicaca*-Sees: a) Messungen am Pegel Puno (1920–1984), b) Rekonstruktion des Seespiegels ab 1800 nach KESSLER (1994)

Tab. 1.13-2: Gegenüberstellung der Ionenzusammensetzung des Wassers im Schwarzen Meer, Kaspisee und Aralsee (bis vor 1960) mit der im Ozean (aus ZENKEVITCH 1963)

	Ozean	Schwarz Meer	Kaspisee	Aralsee
Salzgehalt (‰)	35,0	18,6	12,8	10,6
CaSO ₄	3,94	2,58	6,92	14,98
MgSO ₄	6,40	7,11	23,56	25,87
KCl	1,69	2,99	1,21	2,05
NaCl	78,32	79,72	62,15	56,07
MgCl, MgBr ₂	9,44	9,07	4,54	0,82
CaCO ₃ , CO ₃	0,21	1,59	1,24	0,21
Summe	100,00	103,06	99,62	100,00

Tab. 1.13-3: Entwicklung einiger Parameter im Aralsee ab 1960 nach den wasserbaulichen Veränderungen (aus GOLUBEV 1996)

Jahr	Wasserstand [m]	Fläche [km ²]	Volumen [km ³]	Salzgehalt [‰]
1960	53,3	67 900	1 090	10,6
1965	52,5	63 900	1 030	10,5
1970	51,6	60 400	970	11,1
1975	49,4	57 200	840	13,7
1980	46,2	52 500	670	16,5
1985	42,0	44 400	470	23,5
1990	39,0	38 000	300	29,0

der Oberfläche 24 °C warm; dagegen schwankt die Temperatur der Wasseroberfläche im südlichen Teil zwischen 9 °C im Februar und 27 °C im August. Sein Wasserspiegel weist starke Schwankungen auf. Danach sank der Pegel des Kaspisees von 1917 bis 1925 um 70 cm. Später (1925–1929) nahm er um 60 cm wieder zu. Eine stärkste Abnahme um 180 cm erfolgte im Zeitraum 1929–1941. Während der Zeit 1942–1977 ging der Pegel um 1,3 m weiter zurück. Von 1978–1994 stieg er wieder um 2,5 m an. Dadurch wurden 40 000 km² verschieden genutzter Fläche überschwemmt. Nach dem Rückgang des Seepegels 1996–1997 um 0,25 m entspannte sich



Abb. 1.13-4: Das Tethys-Meer während des mittleren Miozäns (Tertiär). Das Gebiet hatte eine weite Verbindung zum Meer und war mit einer marinen Mittelmeer-Fauna besiedelt, nach ZHIZHENKO (aus ZENKEVITCH 1963)

die Lage wieder. Nach GOLUBEV (1996) schwankte der Wasserspiegel ab 6. Jh. v.u.Z. sogar zwischen -20 und -34 m; dies ist zu 90% durch natürliche Änderungen des fluvialen Zuflusses erklärbar (GOLYTSIN & PANIN, zit. in GOLUBEV 1996). GOLYTSIN (1995) gab an, daß geologische und geodynamische Faktoren im Zusammenhang mit den Seeschwankungen nur eine geringe Rolle spielen. Der mittlere jährliche Wasserzufluß für 1900–1985 betrug ca. 300 km³, wobei die Wolga ca. 75% davon liefert. 40–50 km³ werden jährlich entnommen; davon stammen ca. 50% aus dem Einzugsgebiet der Wolga. Ohne diese Entnahme würde der Seespiegel ca. 1,5 m höher liegen (KUKSA, zit. in GOLUBEV 1996).

Weiter östlich, in der mittelasiatischen Wüste, liegt der Aralsee, der über keinen Abfluß verfügt. Seine Wasserbilanz wird im wesentlichen von der Verdunstung und dem Wasserzufluß bestimmt. Er ist der viertgrößte See der Welt. 1960 wies er eine Wasserfläche von ca. 67 900 km², ein Wasservolumen von ca. 1 090 km³ und einen Salzgehalt von ca. 10,6 g/l (vgl. Tab. 1.13-3) auf. Infolge der seit 1960er Jahren zunehmenden Inanspruchnahme des Wassers aus seinen beiden Zuflüssen, Amu- und Syr-Darya (Republiken Karakalpakstan, Usbekistan und Turkmenistan) betrug 1990 seine Fläche nur noch 38 000 km² und sein Wasserpegel sank im gleichen Zeitraum um 14 m (GOLUBEV 1996); er liegt z.Z. bei 39,0 m über dem Meeresspiegel (vgl. Tab. 1.13-3). Auch wenn klimatische Schwankungen für diese Entwicklung zusätzlich eine Rolle gespielt haben können, beruht die Austrocknung des Aralsees in erster Linie auf der Wasserentnahme. Die Beeinträchtigung seines ökologischen Systems ist allein infolge des Anstiegs des Salzgehalts erheblich. Viele endemische Arten finden keine Lebensgrundlage mehr. Fischarten wie der Stör (*Acipenser nudiventris*), der Asiatische Schaufelstör (*Pseudoscaphirhynchus* spp) und die Aralforelle (*Salmo trutta aralensis*) sind praktisch verschollen. Durch die politischen Änderungen seit 1991 hat sich die Situation bei der Suche nach einer Lösung verschärft, da eine Einigung nun durch die fünf neuen Anliegerstaaten erzielt werden muß (PAVLOVSKAYA 1995).

Das entnommene Wasser wird zur Bewässerung ausgedehnter Baumwollkulturen verwendet, deren Fläche bis auf ca. 7,4 Mio. ha zugenommen hat. Um dies zu ermöglichen, war die Durchführung großer wasserbau-

licher Maßnahmen in beiden Flußsystemen erforderlich. Das Wasser wird teilweise in Überschuß auf die Anbauflächen gepumpt. Es fließt teilweise in die Flüsse zurück. Als Folge der Verdunstung steigen der Salzgehalt im Gesamteinzugsgebiet und durch die Verwendung von Pestiziden auch die Kontamination stark an, was die dortige eigenartige Fauna extrem gefährdet. Die effektive Nutzung des Wassers beträgt nur 55–65%; in der Wüste sind aufgrund der Menge des gepumpten Wassers Seen mit Flächen von mehreren 1 000 km² entstanden. Über 1 Mio. ha Land wurde durch Versalzung unbrauchbar.

Der *Baikal*-See liegt wie die großen ostafrikanischen Seen in einem tektonischen Graben zwischen zwei Kontinental-Platten. Mit steilen Flanken und über 1 700 m Tiefe (tiefster See der Erde) und in einem Taiga-bestandenen Gebirge hat der mehrere Millionen Jahre alte See keine so spektakulären Änderungen seiner Ausdehnung erlebt wie Aral- und Kaspisee. Wegen seines geologischen Alters und der über 400 Tierarten, die nur in diesem Gewässer leben, ist er in jüngster Zeit ein internationales Studienobjekt geworden, das wichtige Klimainformationen für Sibirien erwarten läßt.

Das *Tote Meer* befindet sich zwischen Israel und Jordanien und weist eine Fläche von 1 049 km² auf. Die

Wassertiefe beträgt in Norden 399 m und in Süden nur ca. 3 m. Es liegt etwa 396 m unterhalb des Mittelmeeres und stellt damit den tiefsten Punkt der terrestrischen Landschaft dar. Am Toten Meer wurde 9 000 v.u.Z. Jericho – wahrscheinlich die älteste Stadt der Erde – gegründet. Schon damals diente es aufgrund des hohen Salzgehalts der Salzgewinnung (vgl. *Tab. 1.13-3*). Infolge der langen geschichtlichen Entwicklung gibt es eine Fülle von Aufzeichnungen über dieses Gewässer. Damit rekonstruierten KLEIN & FLOHN (1987) die Schwankungen des Wasserstandes für die Zeit von 1 100–1 800 n.u.Z. (*Abb. 1.13-5*). Zuverlässige Angaben über den jährlichen Wasserstand liegen ab 1800 vor (*Abb. 1.13-5*). Danach ergeben sich in diesem Zeitraum erhebliche Schwankungen, die über 20 m betragen. Die Phase der »kleinen Eiszeit« nach 1500 ist mit einer Erhöhung des Wasserspiegels als Folge der Zunahme der Niederschläge verbunden.

Seit 1964 entnehmen beide Anrainerländer für Bewässerungsprojekte große Wassermengen aus dem Jordan, dem wichtigsten Zufluß, mit negativen Auswirkungen. KLEIN & FLOHN (1987) schätzten den Rückgang des Wasserspiegels von 1964–1984 auf 24,3 cm/Jahr. Infolgedessen erfuhr der Jahrhundert lang geschichtete See (meromiktisch, ohne Vollzirkulation) in den 1980er

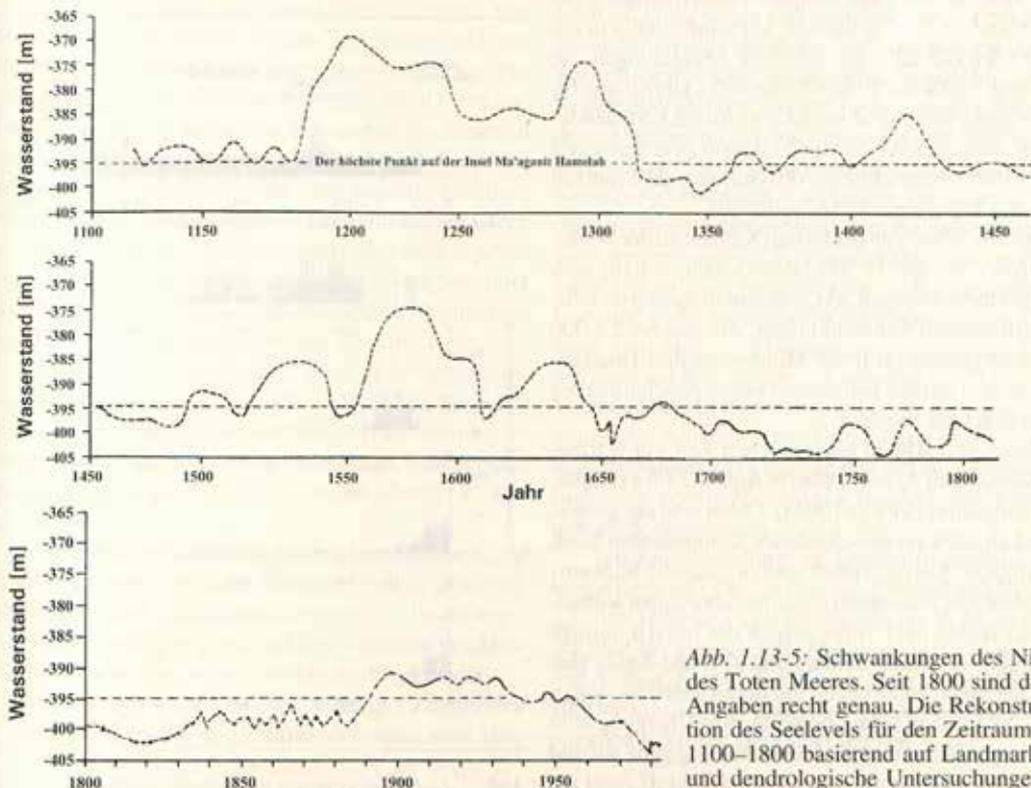


Abb. 1.13-5: Schwankungen des Niveaus des Toten Meeres. Seit 1800 sind die Angaben recht genau. Die Rekonstruktion des Seelevels für den Zeitraum 1100–1800 basierend auf Landmarken und dendrologische Untersuchungen (für mehr Details vgl. KLEIN & FLOHN 1987)

Jahren zum ersten Mal eine Vollzirkulation, die zu Änderungen der chemischen Verhältnisse führte.

Europa

Die meisten natürlichen europäischen Seen sind im mittelbaren oder unmittelbaren Zusammenhang mit der letzten Kaltzeit entstanden. Sie sind daher weniger als 20 000 Jahre alt und verdanken ihre Existenz dem Klimawandel. Nur wenige ältere sind vulkanischen Ursprungs (Maarseen) oder durch Einbruch entstanden.

Aufgrund der kontinentalen Größe im Vergleich zu Asien, Afrika und Amerika liegen fast alle europäischen Seen im gemäßigt humiden Klimabereich. Ihre Wasserspiegel und Uferlinie sind gegenüber den nordafrikanischen, australischen und den großen asiatischen Seen relativ »beständig«, weil die hydrologischen Änderungen seit der letzten Kaltzeit sanfter verliefen. Dennoch wechseln die Zusammensetzung und die Struktur der Sedimente der Seen seither immer wieder. Sie zeichnen in ihren Komponenten aus biologischen Resten und chemisch gefällten Mineralien die Umweltveränderungen durch Klima und die Beeinflussung durch den Menschen wie ein Archiv auf. Die kleinen Seen reagieren dabei rascher und vor allem empfindlicher als die großen, die durch ihre riesigen Wasservolumen abgepuffert sind. In einigen kleinen, verhältnismäßig tiefen Seen finden sich jahresgeschichtete Ablagerungen, die – wie in den grönländischen Eiskernen – jahrgenaue Informationen von globalen und regionalen Klimaänderungen, aber auch Asche von Vulkanausbrüchen sowie Spuren durch menschliche Aktivität von der Steinzeit bis in das Industriezeitalter enthalten.

Der Übergang von der letzten Kaltzeit zu der Warmzeit, in der wir seit 11 500 Jahren leben, vollzog sich nicht in einem einzigen Akt, sondern in mehreren Jahrhunderte langen Schwankungen, die während 5 000 Jahren aufeinander folgten. Mindestens drei Tundren-(Kalt-)zeiten werden von ebenso vielen Abschnitten mit warmem Klima abgelöst.

Dauer und Ablauf einer solchen Zeit mit wärmerem Klima, dem Alleröd, wird in *Abb. 1.13-6* exemplarisch vorgeführt (MERKT 1994a). Dabei sind die gemessenen Lamellen aus verschiedenen Komponenten Sand, Schluff/Ton, Kalzit, Siderit und organische Substanz dargestellt, die zusammen einzelne Jahreslagen aufbauen. Von rechts nach links zeigen die letzten dünnen Schichten von Sand, Schluff und Ton und Kalzit den Ausgang einer Tundrenzeit an, deren spärliche Vegetation die Erosion wenig hemmte. Am Übergang zum wärmeren Alleröd hört die Sandschüttung ganz auf und die sporadische Zufuhr von Ton und Schluff zeigt an, daß die Vegetation dichter wird: Ein Birken-Kiefern-

wald dehnt sich aus (Änderungen der Vegetation erkennt man durch die Pollenanalyse). Das Auftreten von organischer Substanz und vor allem des Eisenminerals Siderit, sowie ruhige Feinschichtung belegen warme Sommer, eine kalte Jahreshälfte mit Eisdecke, ohne Stürme und heftige Niederschläge. Gleichwohl deutet die Wellenform der Dicke der Sideritschichten darauf hin, daß das Klima ebenfalls leichte Schwingungen auf der Jahrhundertskala aufwies. Unvermittelt wird über 100 Jahre lang Kalzit (Kalkkristalle) aus dem Flachwasser erodiert und in die Tiefe des Sees transportiert. Hier kündigt sich ein instabiles Klima an. Nun nimmt zuerst wieder die Erosion von Ton und Schluff, dann auch von Sand zu, worin sich der Niedergang des Taiga-Waldes und die Rückkehr der Tundra widerspiegelt. Dann erlischt die Produktion von organischer Substanz und die Fällung von Sideritkristallen, zuletzt endet die Jahresschichtung unter dem Einfluß des Tundrenklimas (*Abb. 1.13-6*, links).

Das Alleröd hat 625 Jahre gedauert, der Übergang zur nachfolgenden Tundrenzeit kündigte sich etwa 130 Jahre vorher an. Der eigentliche Umschlag vollzog sich jedoch in weniger als 50 Jahren. Das Ende dieser letzten Tundrenzeit verlief nach 1 140 Jahren noch drastischer: in allenfalls 20 Jahren, wahrscheinlich aber viel rascher,

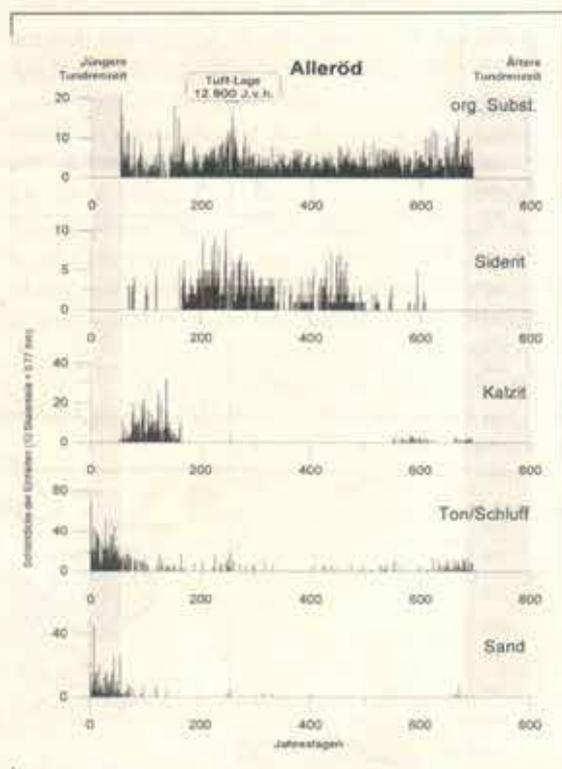


Abb. 1.13-6: Information aus einem Sedimentkern aus der warmen Periode Alleröd (Hämelsee, bei Hannover)

stieg die Temperatur sprunghaft um 5–7 °C, um nach weiteren 120 Jahren abermals abzufallen und 100 Jahre später allmählich zur heutigen Warmzeit aufzusteigen.

In Abb. 1.13-6 ist die Asche des Ausbruchs des Laacher-See-Vulkans manifestiert, der vor 12 900 Jahren, 200 Jahre vor dem Ende des Alleröd stattfand (MERKT 1994b), und dessen Aschenlage eine wichtige Zeitmarke in den Seen zwischen Turin und Gotland ist. Während der folgenden 8–10 Jahre wurden vermehrt Ton/Schluff und sogar Sand und Kalzit abgelagert. Etwa wie zu Beginn der nachfolgenden Tundrenzeit, wodurch für kurze Zeit eine ähnliche Klimaverschärfung angezeigt ist. Diese kurzfristige Änderung der Witterung durch vulkanische Aerosole wurde in mehreren deutschen und schweizer Seen gefunden.

Auch in der humiden Klimazone Mitteleuropas, mit einer heute durchweg positiven Bilanz von Niederschlag, gab es in der Vergangenheit spürbare hydrologische Schwankungen. Für jeweils kurze Zeit – bis wenige Jahrhunderte lang – zeigen viele europäische Seen wiederholt erniedrigte Wasserspiegelstände. Da eine Reihe dieser Seen weder Zufluß noch Abfluß hat, sondern aus dem Grundwasser gespeist sind, müssen solche Tiefstände der Seespiegel klimatische Ursachen gehabt haben, also auf zeitweise verringerte Niederschläge zurückgehen. Neueren Untersuchungen von KLEINMANN et al. (1997) zufolge handelte es sich um kurzfristige extreme Tiefstände, unterbrochen von Perioden mit normalen Wasserständen, nicht um jahrhundertlange Trockenzeiten. Sie kamen anscheinend aber zeitweise so gehäuft vor, daß heute der Eindruck anhaltender Niederschlagsdefizite entsteht. Niedrige Wasserstände verursachten bei Seen mit steilen Ufern nur unwesentliche Veränderungen. Bei sehr flachen Seen hingegen, wie Müritz, Dümmer und Federsee, oder Seen mit flachen Uferbänken (Bodensee, Starnberger See usw.) führten schon geringe Absenkungen zum Trockenfallen großer Flächen, die von den jungsteinzeitlichen- und bronzezeitlichen Menschen besiedelt wurden. Beim nachfolgenden Steigen des Seespiegels wurden diese Siedlungen überschwemmt, bald zerstört und von jüngeren Seeablagerungen überdeckt und konserviert.

Diese Zeugnisse früherer Klimaänderungen machen deutlich, daß die natürliche Klimavariabilität größer ist, als wir nach unserem historisch begrenzten Erfahrungsbereich vermuten, und daß die Natur entgegen den klassischen Vorstellungen sehr wohl »Sprünge macht«.

Seeablagerungen enthalten neben den Zeugnissen natürlicher Umwelt- und Klimaänderungen viele Hin-

weise auf die Aktivitäten des Menschen. Dies nicht nur aus der Zeit der Industrialisierung, die sich durch Rußpartikel aus der Verbrennung von Kohle und Öl und erhöhte Konzentrationen an Pestiziden und Schwermetallen kenntlich macht. Schon seit mehr als 7 000 Jahren manifestiert sich die Anwesenheit des wirtschaftenden Menschen in den Seeablagerungen durch Holzkohlepartikel, Vegetationsänderungen durch Waldbrand, Kulturpflanzen und Ackerunkraut, durch Erosion aus Waldrodung und Ackerbau, Überdüngung der Seen mit der Folge von Algenblüten usw. (CLARK et al. 1989).

Schlußbetrachtung

Seen werden durch regionale und globale Klimaveränderungen langfristig beeinflusst und gelten als Barometer des Klimas; ihre Pegel variieren in Abhängigkeit vom Verhältnis Niederschlag-Verdunstung. Extreme Fälle stellen die ehemaligen Seen in der Ostsahara dar, die heute völlig trocken liegen, da die dortigen Niederschläge auf Null oder nur wenige mm/Jahr gesunken sind. Die vorhersagte Erwärmung kann z.B. dazu führen, daß sich die Wüste in der Sahara-Region noch weiter vergrößern wird; weitere Seen werden schneller austrocknen. Einige dieser Seen dienen heute z.B. als Rastplatz für Zugvögel. Eine Beschleunigung der Erwärmung kann zur Folge haben, daß sich viele Arten nicht schnell genug auf diese Änderungen einstellen können. Aus den Seesedimenten kann die klimatische Geschichte einer Region über mehrere tausend Jahre zurück verfolgt werden. Aber Seen innerhalb einer Region können sich aufgrund der Geologie und des unterirdischen Grundwassers unterschiedlich verhalten. Die unterschiedlichen Veränderungen der in diesem Kapitel behandelten Seen zeigen, daß die Klimaveränderungen weltweit nicht gleichmäßig verlaufen. Je nach geographischer Lage und vorherrschender Windrichtung sowie Entfernung zum Meer und Höhenlage reagieren die einzelnen Seen auf Klimaänderung verschieden. Tektonische Veränderungen (Bewegung der Erdkruste sowie Senkung oder Anhebung des Erdbodens) stellen langfristige Einflußfaktoren dar, die sich mit den klimatischen Einflüssen verwischen und eine Rekonstruktion des Klimas stark erschweren.

Seit Intensivierung der Landwirtschaft in semi-ariden Regionen werden wichtige Flüsse durch Baumaßnahmen verändert und ihr Wasser für Bewässerungsprojekte verwendet. Der Wasserspiegel vieler Seen – wie Aralsee, Kaspisee und Totes Meer – nimmt dadurch ab. Der klimatische Einfluß wird durch diese anthropogenen Faktoren stark überlagert ♦