

1

Verbreitung, Entstehung und Typisierung von Seen

1.1 Zahl und Größe der Seen

Die Erfassung der Seen weltweit und auch in Deutschland ist bei Weitem nicht abgeschlossen. Aktuelle Schätzungen zum Anteil der Seen an der gesamten Landfläche übersteigen deutlich die Angaben in den meisten Lehrbüchern, die von lediglich knapp 2 % Flächenanteil ausgingen. Besonders die kleinen Gewässer sind unzureichend erfasst, sodass Seen als tiefste Punkte in der Landschaft wahrscheinlich eine bislang unterschätzte Rolle für den regionalen und globalen Stoffhaushalt spielen.

1.1.1 Seen weltweit

Ordnet man die Binnenseen nach ihrer Größe, so ergibt sich ein systematischer Zusammenhang zwischen der Anzahl und der Größe. Insgesamt gibt es viele Seen in der Klasse der kleinen und nur wenige große Seen. Im globalen Maßstab ergibt sich bei doppelt-logarithmischer Auftragung der Zahl der Seen gegen ihre Flächensumme eine Steigung von -1 (Meybeck 1995; Lehner und Döll 2004). Dies bedeutet, dass jede Größenklasse etwa die gleiche Flächensumme hat. Der Zusammenhang zwischen Größe und Zahl erlaubt eine Extrapolation in den Bereich der sehr kleinen Seen, die im üblichen kartografischen Maßstab nicht mehr darstellt werden und daher nicht vollständig erfasst sind. Downing et al. (2006) haben die weltweite Gesamtzahl und die Flächen der Seen aufgrund der bekannten Daten neu geschätzt und dabei die Vielzahl der kleinen Seen und künstlichen Wasserreservoirs besonders berücksichtigt. Danach ergibt sich eine globale Summe der Seenflächen von 4,2 Mio. km², die sich auf 304 Mio. natürliche Seen verteilt. Davon sind 277 Mio. Seen sehr klein und haben eine Fläche zwischen 0,1 und 1 ha. Die größeren Stauseen haben eine Wasserfläche von 260 000 km². Die Fläche der kleinen landwirtschaftlichen Wasserreservoirs wird auf >77 000 km² geschätzt. Damit sind ungefähr 3 % der Landoberfläche mit Wasser bedeckt.

Nach Meybeck (1995) gibt es in der Größenklasse mit Seeflächen von 0,1 - 1 Mio. km² nur einen Binnensee, das Kaspische Meer (393 898 km²), etwa 1000 große Seen im Größenbereich von 100–1000 km², entsprechend der Größe des Bodensees, und eine einstellige Millionenzahl von Seen zwischen 1–10 ha. Der Anteil der glazialen Seen >1 ha wird geschätzt auf 3,25 Mio. mit einer Gesamtfläche von 1,25 Mio. km². Der weltweit tiefste See ist der Baikalsee (1642 m) in Russland gefolgt vom Tanganjikasee (1470 m) in Afrika. Der Flächenanteil

der Oberflächengewässer an der Gesamtfläche liegt in seenreichen Ländern über 10 %, in seenarmen Ländern unter 1 %. Nach Meybeck (1995) beträgt der Weltdurchschnitt an den nicht gletscherbedeckten Landflächen 6,8 %, auf dem skandinavischen Schild 12,2 %, in Finnland 9,4 %, in Norwegen 13,9 %, in Schweden 8,6 %, im südbaltischen Tiefland 2,2 %, auf dem kanadischen Schild 10,3 % und in Patagonien 3,0 %. In Deutschland sind 1,8 % der Gesamtfläche mit Seen bedeckt, wobei dieser Wert durch die Vielzahl neu entstehender Tagebauseen in den Braunkohlegebieten weiter steigt.

1.1.2 Seen in Deutschland

Die Seen in Deutschland sind im Auftrag des Umweltbundesamtes in einer Dokumentation zusammenfassend dargestellt worden (Nixdorf et al. 2004). Abb. 1.1 zeigt eine Übersicht zur räumlichen Verteilung natürlicher und künstlicher Seen. Der Datensatz wurde unter verschiedenen Fragenstellungen statistisch ausgewertet (Hemm et al. 2002; Hemm und Jöhnk 2004). Danach sind in Deutschland 12 000 Standgewässer erfasst, davon 969 natürliche und künstliche Seen mit einer Flächengröße >50 ha einschließlich Baggerseen, Tagebauseen, Talsperren und Speicherbecken. Hemm und Jöhnk (2004) extrapolierten die Gesamtzahl der Seen mit einer Mindestgröße von 1 ha in Deutschland auf 30 000 (Abb. 1.2) gegenüber vorherigen Schätzungen von 15 000–20 000.

Schleswig-Holstein gehört mit seinen über 300 Seen zu den seenreichen Bundesländern Deutschlands. In der Größe >50 ha gibt es in Schleswig-Holstein etwa 65 natürliche Seen sowie an der Nordseeküste Speicherbecken und Seen, die im Zuge der Landgewinnung in der Marsch entstanden sind. Die Gesamtfläche wird auf 245 km² geschätzt (Mathes 2008). Für das Bundesland Mecklenburg-Vorpommern wird eine Gesamtfläche der Standgewässer von 720 km² angegeben (LUNG-MV 2001), die 3,1 % der Landesfläche darstellen. Größtes Seengebiet ist die Mecklenburgische Seenplatte, die sich weiter in das Bundesland Brandenburg zieht. Die Zahl der Standgewässer >1 ha beträgt ca. 2000, davon 1400 Kleinseen in

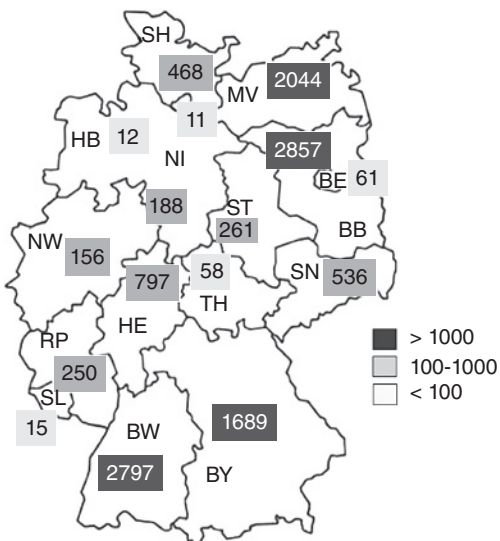


Abb. 1.1 Zahl der erfassten stehenden Gewässer in den deutschen Bundesländern (Hemm und Jöhnk 2004).

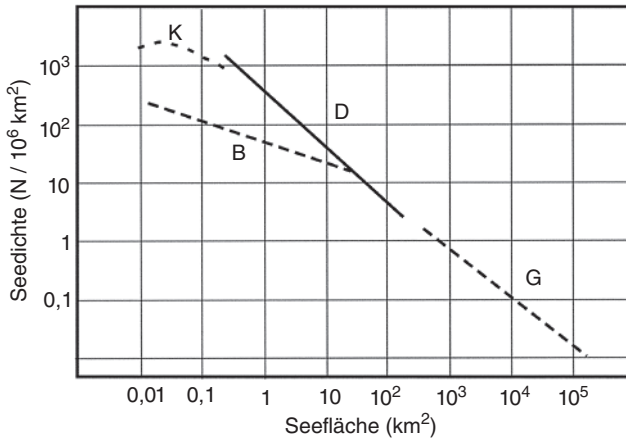


Abb. 1.2 Dichte der Seen (Anzahl pro 1 Mio. km²) in Größenklassen der Seefläche nach Hemm und Jöhnk (2004). Die Dichte der großen Seen der Welt (G) und der natürlichen Seen in Deutschland (D) folgen ungefähr derselben Verteilungsfunktion bei Bezug auf die normierte Fläche von 1 Mio. km². Um die Zahl der Seen in Deutschland für eine gegebene Größenklasse zu bekommen, müssen die flächennormierten Werte der Seedichten mit 0,375 multipliziert werden (Fläche Deutschland: 357 000 km²). Die Daten für kleine Seen <5 ha sind unzureichend erfasst (K). Die Braunkohlentagebauseen verschiedener Größe haben eine andere Häufigkeitsverteilung. (B): verglichen mit den Naturseen gibt es relativ weniger kleine als große Tagebauseen.

der Größenklasse 1–10 ha und >500 künstliche Seen (Baggerseen, Fischteiche, Torfstiche, Flachspeicher). Die Zahl der kleinen, runden Sölle (wassergefüllte und trockene Toteislöcher) wird auf landesweit 60 000 geschätzt. In Berlin und Brandenburg gibt es ca. 3000 Seen >1 ha und insgesamt mehr als 10 000 Seen, mit einer Gesamtfläche von ca. 600 km². In den glazial überformten Regionen prägen langsam fließende Flussabschnitte und durchflossene, meist flache Seen (Flusseen) die Gewässerlandschaft der Flüsse Spree/Dahme und Havel. Die Anzahl der Gewässer und der Seeflächen wird im seenreichen Bundesland Brandenburg durch die Flutung nicht mehr genutzter Tagebaue in der Lausitz stark zunehmen. Die beiden größten Seen in Niedersachsen, das Steinhuder Meer und der Dümmersee, entstanden als Thermokarstseen in Senkungstrichtern, die infolge postglazialer Erwärmung vor 12 000–14 000 Jahren aus lokalen Permafrost-Eiskörpern entstanden sind. Thermokarst-Seen sind verbreitet in den küstennahen Tieflandgebieten der arktischen Klimazone. In Hessen gibt es insgesamt 773 Seen und Talsperren mit einer Fläche von >1 ha, davon 81 >10 ha. Die Seen sind nicht natürlichen Ursprungs, sondern künstlich geschaffen. Einige sind durch Abgrabungen von Kies (Baggerseen) oder von Kohle (Tagebauseen) entstanden. Bei anderen wurden aus Gründen des Hochwasserschutzes oder der Niedrigwassererhöhung Fließgewässer aufgestaut und so Talsperren angelegt (HLUG 2007). Für das Gebiet Niederrhein in Nordrhein-Westfalen sind 21 Stillgewässer als Wasserkörper mit einer Fläche zwischen 0,5 und 1,2 km² ausgewiesen. Von den 21 Wasserkörpern der Kategorie „Seen“ sind nur zwei natürlichen Ursprungs. Regional einzigartig sind die Eifel-Maare in Rheinland-Pfalz, die im Abschnitt über vulkanische Seen dargestellt werden. Die übrigen Seen in Rheinland-Pfalz, wenige Stauseen und die Westerwälder Seenplatte, haben nur eine geringe Ausdehnung. Alle größeren Standgewässer (>50 ha) in Sachsen sind künstlichen Ursprungs. Dazu

gehören Talsperren und wasserwirtschaftliche Speicher. Durch die Flutung von Tagebauen entstehen gegenwärtig prägende Seenlandschaften in der Lausitz und im Mitteldeutschen Raum. In Sachsen-Anhalt dominieren ebenfalls die künstlichen Standgewässer vor allem mit den Talsperren im Harz und den Bergbauseen. Die größten Gewässer sind derzeit der aus mehreren Teilseen bestehende Goitzschese (13,3 km²), der aus einem Tagebau bei Bitterfeld entstanden ist, und der aus der Saale gefüllte Geiseltalsee (18,5 km²). In der Altmark befindet sich mit dem Arendsee der größte natürlich entstandene See Sachsens (5,14 km²). In Thüringen gibt es keine größeren natürlichen Seen. Von den 171 Talsperren und Rückhaltebecken in Thüringen hat die Bleichlochtalsperre die größte Fläche (9,2 km²) und das größte Stauvolumen (215 Mio. m³). Die natürlichen Seen der beiden süddeutschen Länder Bayern und Baden-Württemberg sind im Wesentlichen die großen und kleinen Voralpenseen und die Karseen im Bayerischen Wald und im Schwarzwald. Daneben gibt es eine Vielzahl von Toteislöchern und -seen, vor allem in der Peripherie der großen Voralpenseen wie die Osterseen südlich des Starnberger Sees und die Buchenseen im Randbereich des Bodensees. Von der Vielzahl der postglazialen Karseen in den deutschen Mittelgebirgen sind im Schwarzwald zehn und im Bayerischen Wald drei noch nicht verlandet. Sie liegen in 700–1100 m Höhe. Einige davon sind großflächig mit schwimmenden Schwingrasen bedeckt und sind wegen der hohen Gehalte an gelösten organischen Substanzen dystrophe Seen (Steinberg et al. 2001). Die im Buntsandstein gelegenen Schwarzwaldkarseen und die drei Seen im Bayerischen Wald sind Weichwasserseen mit geringem Kalkgehalt und wurden durch die Einwirkung von saurem Regen bis zu pH-Werten von 4–5 versauert (Steinberg et al. 1988; Jüttner et al. 1997). Tab. 1.1 zeigt eine Übersicht über die jeweils größten Seen in Deutschland, Österreich und der Schweiz.

Tab. 1.1 Seen in Deutschland, Österreich und Schweiz jeweils nach Fläche geordnet (nach BMLFUW-WIEN 2005). Seefläche, Tiefenmaximum, Seevolumen, Verweilzeit

	A_0 (km ²)	z_{\max} (m)	V_0 (Mio. m ³)	τ_w (Jahre)
Bodensee	473	254	48 522	4,2
Deutschland				
Müritz	112,6	31,0	737	
Chiemsee	79,9	73,4	2048	1,3
Schweriner See	61,5	52,4	787	10,1
Starnberger See	56,4	127,8	2999	21,0
Ammersee	46,6	81,1	1750	2,7
Plauer See	38,4	25,5	300	
Kummerower See	32,6	23,3	263	1,6
Größer Plöner See	30,0	58,0	373	3,0
Steinhuder Meer	29,1	2,9	40	2,8
Schaalsee	23,4	71,5	328	15,0
Selenter See	22,4	35,8	294	15,3

(fortgeführt)

Tab. 1.1 (Fortsetzung)

	A_0 (km ²)	z_{\max} (m)	V_0 (Mio. m ³)	τ_w (Jahre)
Österreich				
Neusiedler See	315	1,8	320	1,0
Attersee	46,2	169	3 943	7,1
Traunsee	24,4	191	2 188	1,04
Wörthersee	19,4	85	816	10,5
Mondsee	13,8	68	497	1,7
Millstätter See	13,3	141	1 204	9,0
Wolfgangsee	12,8	113	667	3,9
Ossiacher See	10,8	52	206	1,8
Hallstätter See	8,6	125	538	0,5
Achensee	6,8	133	481	0,6
Weißensee	6,5	99	226	11,0
Wallersee	6,1	23	76	0,8
Schweiz				
Genfer See	580	310	89 000	11,4
Neuenburgersee/Lac de Neuchâtel	215	153	14 000	8,2
Lago Maggiore	210	372	37 000	4,0
Vierwaldstättersee	114	214	11 900	3,4
Zürichsee	88,2	136	3 900	1,1
Luganersee	48,7	288	6 600	2,0
Thunersee	47,7	215	6 500	1,9
Bielersee	39,5	74	1 200	0,16
Zugersee	38,4	198	3 200	14,7
Brienzersee	29,8	260	5 200	2,7
Walensee	24,2	150	2 500	1,4
Lac de Morat	22,8	46	600	1,6

1.1.3 Seen in Österreich und der Schweiz

Von den ca. 9000 Seen Österreichs (Löffler 1981) haben 13 eine Fläche >5 km². Die tiefsten Seen in Tirol, dem Salzburger Land Seefläche, Tiefenmaximum, Seevolumen, Verweilzeit und Oberösterreich wie der Attersee, Wolfgangsee, Traunsee und Achensee sind nährstoffarm und haben sehr klares Wasser mit hohen Sichttiefen. Die Anzahl von Talsperren und Speichern mit mehr als 10 Mio. m³ Stauinhalt liegt bei 35. Im Nationalpark Neusiedler See gibt es zahlreiche salzige „Lacken“, die bis 0,7 m tief sind und im Sommer regelmäßig austrocknen. Die Salzanreicherung der aus Eislinsen entstandenen Seen resultiert aus den hohen Temperaturen und geringen Niederschlägen sowie dem kapillaren Aufstieg von Grundwasser.

Der größte Schweizer See ist der Genfer See (581 km²) mit einem Schweizer Anteil von 343 km². Die Seen in der Schweiz resultieren aus der besonderen topografischen Struktur, die durch die Vergletscherung während der Eiszeiten überformt wurde. Die Gesamtzahl wird mit 1500 Seen angegeben – ein bedeutender Teil entfällt auf kleinere Bergseen. Insgesamt sind ungefähr 4 % der Oberfläche der Schweiz von Seen bedeckt. Es gibt 51 Speicher und Talsperren mit mehr als 10 Mio. m³.

1.2 Seentypen nach der Entstehungsart

Hutchinson (1957) zählt zehn Haupttypen der Entstehungsarten von Seebecken: tektonische Becken, Seen vulkanischen Ursprungs, Seen durch Erdrutschbewegungen, glazial gebildete Seen, Solutionseen, Seen fluviatiler Entstehung, Seebeckenbildung durch Wind-einwirkung, Küstenseen, Seen hinter organischen Akkumulationsdämmen, Seen in Meteoritenkratern und künstliche Seen. Zu den künstlichen Seen zählen Biberstaudammseen, Talsperren, Staudämme und Abgrabungsseen wie Baggerseen, Tagebauseen und Steinbruchseen. Insgesamt werden 76 verfeinerte Typen unterschieden (Hutchinson 1957). In Deutschland kommen einige der genannten Entstehungstypen nicht vor oder spielen nur eine marginale Rolle, wie z. B. tektonische Seebecken und Vulkankraterseen.

1.2.1 Tertiäre und tektonische Seen

Die größten und ältesten Seebecken sind als tektonische Seen durch Bewegung der Erdkruste und die dadurch auftretenden Risse und Grabenbrüche im Tertiär entstanden. Auf der Erde gibt es etwa 30 große Grabenbruchseen. Der Baikalsee, der tiefste See der Erde, enthält den weltweit größten Süßwasserkörper mit ca. 20 % des Süßwassers aller Binnenseen der Welt. Das Kaspische Meer ist ein Reliktsee, d. h. es handelt sich um ein vom Ozean (Tethys) abgetrennten Meeresteil. Dieses Gewässer ist in Größe und Wasservolumen mit anderen Binnengewässern kaum vergleichbar und wird bei übergreifenden statistischen Auswertungen normalerweise nicht einbezogen.

Die größten und tiefsten Seen der Welt sind auch die ältesten: Baikal, Tanganjika, Malawi, Issyk-Kul (Tab. 1.2). Entstanden im Tertiär, zeigen sie eine lange Entwicklung mit wechselnden Wasserspiegelniveaus, die in paläolimnologischen Untersuchungen rekonstruiert wurden. In Deutschland waren tektonische Vorgänge bei der Bildung nur weniger Seen beteiligt. So werden die Becken des Königssees und des Überlinger Teils des Bodensees auf tektonische Gräben zurückgeführt (Kiefer 1972; Siebeck 1982). Die endgültige Beckengestaltung geschah jedoch durch nachfolgende glaziale Überformung. Der Neusiedler See in Österreich ist nach Löffler (1974, 1981) „eine tektonische Bildung der ausklingenden Würmzeit“, jedoch kein Restbecken des marin-reliktären Pannon-Brackwassersees. Der nur 1,8 m tiefe Neusiedler See war seit dem 14. Jahrhundert viermal vollständig ausgetrocknet.

1.2.2 Glaziale Seen

Weltweit sind die glazial entstandenen Seebecken am häufigsten. Bei großen Seen (>100 km²) liegt der Flächenanteil bei 50 %, während bei kleinen Seen ein Anteil bis 77 %

Tab. 1.2 Basisdaten der großen tektonischen und ältesten Seen (Meybeck 1995; Kawanabe et al. 1999; Kira 1993, 1994, 1995; Kozhova und Izmost'eva 1998).

	A_0 (km ²)	z_{\max} (m)	V_0 (km ³)	Alter (Jahre)
Afrika				
Tanganjika	32 900	1471	18 900	20 Mio.
Malawi	22 490	709	6140	2 Mio.
Victoria	68 460	92	2700	20 000
Asien				
Totes Meer	1020	433	188	
Caspi	374 000	1025	78 200	>5 Mio.
Baikal	31 500	1637	23 000	20 Mio.
Aral	64 100		1020	>5 Mio.
Issyk-Kul	6240	702	1730	25 Mio.
Biwa	681	104	27,6	2 Mio.
N.-Amerika				
Tahoe	500	501	156	2 Mio.
S.-Amerika				
Maracaibo	13 010		280	36 Mio.
Titicaca	8562	284	903	2,8 Mio.

erreicht wird (Meybeck 1995). Die großflächigen Gletscherauflagen auf dem kanadischen Schild und den Gebirgen Skandinaviens mit den angrenzenden Sedimentationsflächen der umgebenden baltischen Länder haben zur Ausformung Zehntausender kleiner und großer Seebecken geführt (glaziale Erosions- und Moränenseen). Die Ostsee war nach dem Ende der Eiszeit zeitweise ein Süßwasser führender Binnensee und ist aktuell ein Schelfmeer mit ausgeprägtem Brackwassergradienten (Hupfer 2010). In den angrenzenden Ländern von Finnland bis nach Norddeutschland blieben nach dem Rückzug der Vergletscherung ausgedehnte Seenplatten zurück, die bis zu 10 % der Gebietsfläche einnehmen. Hier liegen die größten Seen Europas, der Ladoga- und der Onega-See im westlichen Russland und die großen südschwedischen Seen. In Nordamerika entsprechen diesen die Großen Seen des Lorenzstromgebietes und Kanadas (Tab. 1.3). Die Hudson Bay als zentrales Becken ist ein Gegenstück der Ostsee.

Ehemals vergletscherte Gebirge gibt es auf allen Kontinenten (Tab. 1.3). Nach dem Verschwinden der Gletscher blieben Fjordseen und Vorlandseen (*piedmont lakes*) in den temperierten Klimazonen Skandinaviens, des englischen Seegebietes (*lake districts*), der Alpen, der neuseeländischen und australischen Südalpen, der Anden in Patagonien (Chile und Argentinien), der Rocky Mountains in Nordamerika, der Gebirge Zentral- und Nordasiens und in Form der *loughs/lochs* in Irland und Schottland zurück.

Die Fjordseen sind die tiefsten Glazialseen (>500 m). Sie entstehen durch tief greifende Erosion im Verlauf enger Gebirgstäler und haben steile Uferwände und flache Böden. Wenn die Gletscher aus einem Gebirgstal in das flache Vorland hinaustreten, verläuft die Eismasse in die

Tab. 1.3 Große, glazial entstandene und glazial überformte Seebecken: (a) Meybeck 1995; (b) Ambrosetti und Barbanti 1999; (c) Geller 1992; Murdie et al. 1999; (d) Willén 1984; (e) Viner 1987.

	A_0 (km) ²	z_{\max} (m)	V_0 (km) ³	t_w (Jahre)	Seealter/ Entstehung (Jahre)
Kanadischer Schild (a)					
Oberer See (engl. Lake Superior)	82 100	405	12 200	180	8000
Huronsee	59 500	223	3500	48	8000
Michigansee	57 750	281	4800	31	8000
Großer Bärensee (engl. Great Bear Lake)	31 326	446	2200		
Großer Slavensee (engl. Great Slave Lake)	28 568	614	2088		tektonisch
Anden-Vorland (c)					
Lago Argentino	1410	500			
Lago General Carrera, Chile/Buenos Aires, Argentina	1892	586	>500		tektonisch
Lago O'Higgins, Chile/San Martín, Argentinien	1013	836			
Lago Nahuel Huapi, Argentinien	531	464			
Lago Llanquihue, Chile	871	317	159	74	
Neuseeland (e)					
Lake Taupo	616	165	59	10,6	vulkanisch
Lake Waikatiu	289	380			
Lake Wanaka	180	311			
Lake Hawea	141	392			
Fjordseen, Norwegen					
Mjøsa See	365	444	56,2		
Røssvatnet See	219	231	14,8		
Tyrifjord See	139	288	13,1		
Tunnsjøen See	100	222	8,7		
Tinnsjø See	51	460	9,7		
Hornindalsvatnet See	50	514	12		
Baltische Seen (a,d)					
Ladogasee, Russland	18 130	225	908		>8000
Onegasee, Russland	9700	127	292		>8000
Vänernsee, Schweden	5648	106	152	8,8	6500
Vätternsee, Schweden	1912	128	74	58	6500
Mälarensee, Schweden	1096	66	14	2,3	6500

(fortgeführt)

Tab. 1.3 (Fortsetzung)

	A_0 (km) ²	z_{\max} (m)	V_0 (km) ³	t_w (Jahre)	Seealter/ Entstehung (Jahre)
Alpen-Vorland (b)					
Genfer See, CH–F	580	310	89	11,4	>10000
Bodensee (Obersee), D–A–CH	473	254	48,5	4,15	
Gardasee, I	370	346	49	26,6	
Lago Maggiore, I–CH	210	372	37	4,1	
Comersee, I	146	410	22,5	4,5	

Breite, wird damit flacher und übt einen geringeren Erosionsdruck aus. Daraus entstehen breit ausgedehnte Seebecken von geringerer Tiefe. Der Gardasee und einige Andenfußseen (Lago Argentino, L. Buenos Aires) haben sowohl tiefe, schmale Fjordseeanteile und ausgedehnte, flache Vorlandbecken, die nach dem Heraustreten aus der Talenge in die Breite verlaufen.

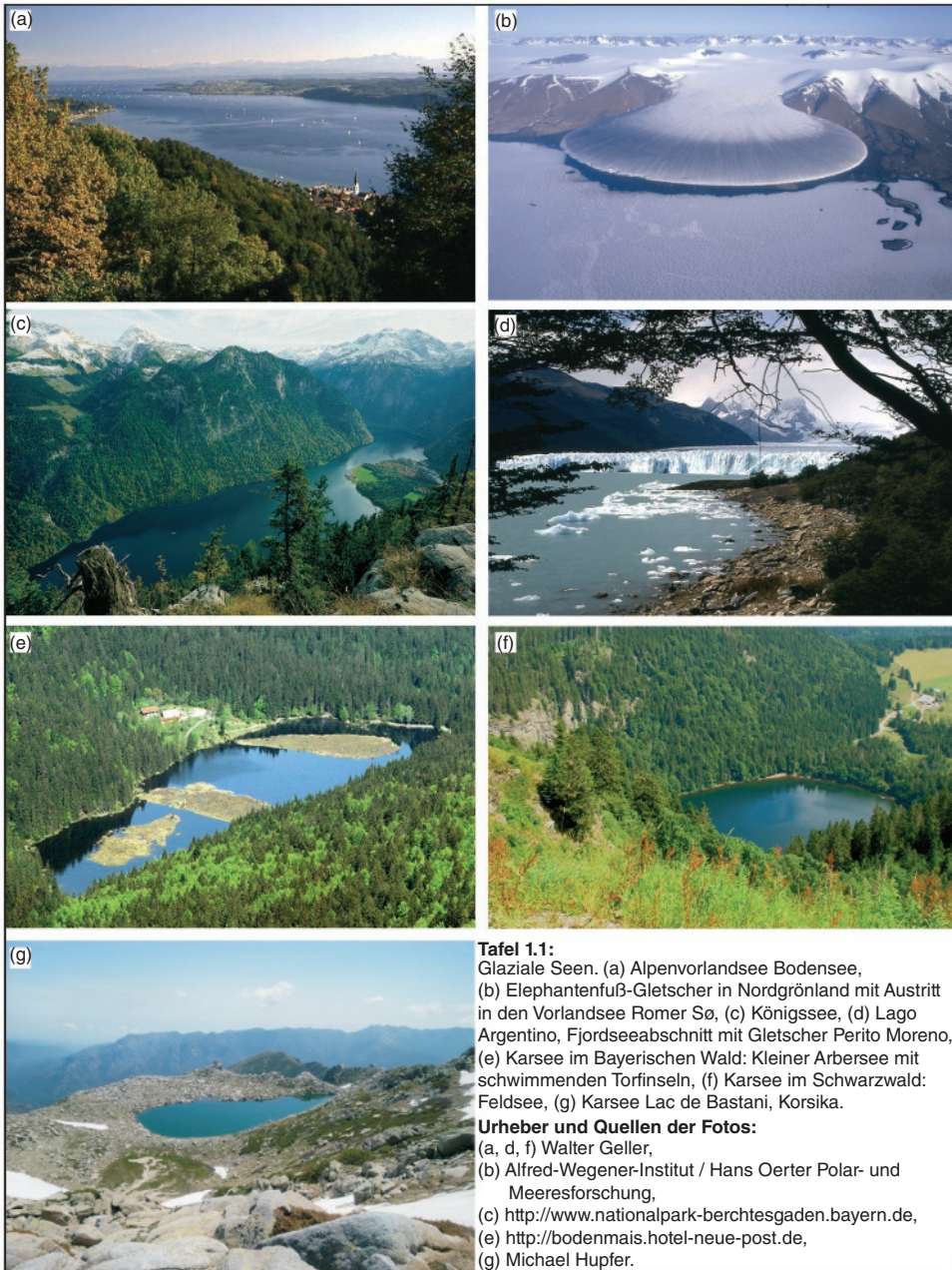
Der Rückzug der Gletscher ließ vielgestaltige Moränenseen zurück: Seen vor Moränenstauen und eine große Zahl von kleinen, meist kreisrunden Toteisseen, die nach dem verspäteten Abschmelzen von zunächst abgedeckten Toteisblöcken verblieben. Zungenbecken (*finger lakes*) in einem Tal vor der Endmoräne bilden die terminale Lage des letzten Gletschervorstoßes ab. Karseen liegen im geologisch ungleichmäßigen Verlauf von vergletscherten Tälern in unterschiedlichen Höhen und sind ein in Hochgebirgen verbreiteter Seentyp. In sind verschiedene Ausprägungen glazialer Seen dargestellt.

In Deutschland sind die durch eiszeitliche Erosion entstandenen Glazial-Seebecken die weitaus häufigsten. So finden sich die Seenplatten in Ostholstein, Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg und die Voralpenseen im Bereich der jeweils letzten Glazialausdehnung, der Weichselvereisung in Nord- und der Würm-Eiszeit in Süddeutschland (Abb. 1.3; s. a. Henningsen und Katzung 1998). Kleine Karseen kommen auch in den ehemals vergletscherten Mittelgebirgen vor. Beispiele sind der Feldsee im Schwarzwald und der Arbersee im Bayerischen Wald. Enge, steilwandige Fjordseen beschränken sich auf wenige Beispiele, wie Königssee und Überlinger See. Die flächenmäßig größten Glazialseen sind die Gebirgsvorlandseen, wie der Bodensee-Obersee, die bayerischen Voralpenseen und deren Äquivalente der anderen Alpenländer. Die glaziale Erosion auf uneinheitlichen Flächen schafft zergliederte Seebecken und ausgewaschene Rinnenbecken in Altmoränen wie die Seenplatten in Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg.

In Österreich sind die größeren Seen glazialen Ursprungs – mit Ausnahme des Neusiedler Sees. Die Seen der Schweiz mit Seeflächen von mehr als 5 km² sind ebenfalls glazial entstanden (vgl. Tab. 1.1). Die glazialen Seen sind die wasserreichsten Seen in Mitteleuropa. In Deutschland, der Schweiz und Österreich haben insgesamt fünf Seen Wasserinhalte von mehr als 10 km³ und 14 Seen Volumina von 1–10 km³.

1.2.3 Vulkanische Seen

Seen vulkanischen Ursprungs (Calderaseen, Kraterseen, Maare) sind weltweit verbreitet und treten gehäuft in den Randzonen der Kontinentalplatten auf (Tafel 1.2). Die Gesamtzahl



wird von Meybeck (1995) mit 1100 bei einer Fläche von 3150 km² angegeben. Calderaseen mit umgebendem Ringgebirge, oft einer zentralen Insel und Durchmessern bis mehreren Dutzend Kilometern, entstehen in den Einsturzbereichen von entleerten Magmakammern (Crater Lake/Oregon, Toba-See /Sumatra). Kraterseen sind wassergefüllte Vulkanschlote mit Durchmessern von nur wenigen hundert Metern. Auf aktiven Vulkanen zeigen sie oft

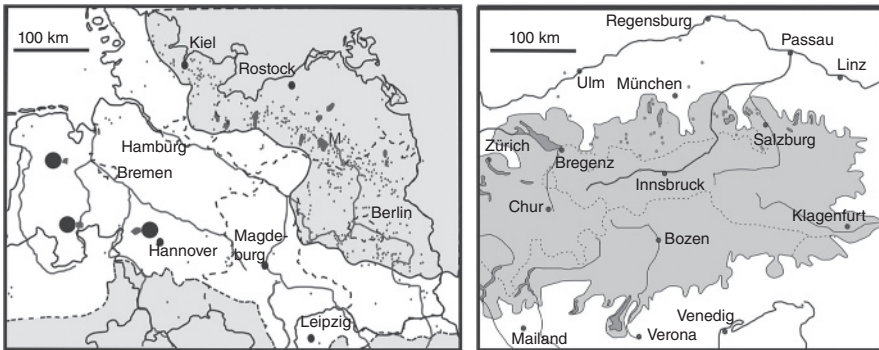


Abb. 1.3 Maximale Ausdehnung der Weichsel-Vereisung in Norddeutschland und des Würm-Glazials im mittleren Alpenraum (grauhinterlegt). Gekennzeichnet sind die Seen >10 ha in Deutschland nach Hemm und Jöhnk (2004) sowie die größeren Seen Müritz (M), westlich von Hannover die Thermokarstseen Steinhuder Meer (S) und Dümmersee (D), westlich von Bremen das Zwischenahner Meer (Z), ein Erdfallsee über einem Salzstock (Quellen: Gams 1937; Henningsen und Katzung 1998; Hemm und Jöhnk 2004; Geologische Bundesanstalt Wien: <http://www.geologie.ac.at/RockyAustria/eiszeiten.htm>).

chemisch und physikalisch extreme Verhältnisse, können stark schwefelsaures Wasser enthalten und zeitweise verschwinden („verkochen“). Die Maarseen entstehen ohne direkten vulkanischen Ausbruch durch singuläre, phreatomagmatische Wasserdampfexplosionen, die sprengtrichterartige Seebecken (Maare) hinterlassen.

Die durch die Bildung von Kratern und Calderen entstandenen Seebecken sind steilwandig und im Verhältnis zu ihrer Oberfläche sehr tief. Das Einzugsgebiet der Maarseen ist klein und entspricht der Ausdehnung des umgebenden Ringwalls. Daher bilden die Maarseen im Aufbau ihrer Sedimentschichten die sich ändernden klimatischen Verhältnisse ungewöhnlich klar ab. Da sie außerdem mit >10 000 bis 2 Mio. Jahren älter sind als die postglazialen Seen, stellen die Sedimente ein wertvolles Archiv für paläolimnologische Analysen dar (Scharf und Björk 1992; Schrenk-Bergt et al. 1998).

In Deutschland gibt es einige Seen mit vulkanischem Ursprung in der Vulkaneifel (Meyer 1986). Das Becken des Laacher Sees ist eine Calderabildung, die vor ca. 11 000 Jahren entstand. Dieser Ausbruch hatte die 250-fache Stärke des Ausbruchs vom Mount St. Helens (1980) und verteilte ca. 20 km³ Bimsmaterial weiträumig in Europa (Baales et al. 2002). Die Maarseen sind in Deutschland der einzige häufig vorkommende vulkanische Seentyp. Die der Eifel wurden von A. Thienemann (1882–1960) erstmals limnologisch bearbeitet und erlaubten mit ihren sehr verschiedenen Tiefen, Nährstoff- und Sauerstoffgehalten (Tab. 1.4) die Entwicklung der Seentypen-Lehre nach der Trophie und dem Mischungsverhalten (Thienemann 1928). Echte Kraterseen im engeren Sinn sind in Deutschland nur der Windsborner See und das Hinkelsmaar.

1.2.4 Karst- und Solutionseen

Durch die Auflösung von Kalkgestein und Salzlagern entstehen Höhlen und unterirdische Wasserläufe, die als Dolinen zu Einbruchtrichtern führen können. Im Karst fließt



Tafel 1.2:
 (a) Kratersee Rano Kao, Osterinsel, mit schwimmender Pflanzendecke, (b) Maarseen in der Eifel, Dauner Maare (Gemündener, Weinfelder, Schalkenmehrener) (c) Plitvicer Seen, natürliche Stauseen Gavanovac und Kaluderovac hinter Kalksinterdämmen, (d) Erdfallsee Arendsee.
 (e) Toteisseen: Osterseen-Gruppe (vorn), bestehend aus 20 Seen mit einer Gesamtfläche von 2,2 km² zwischen Starnberger See (hinten) und Iffeldorf;
 (f) Braunkohlentage- bauseen: Lausitzer Seenkette mit Skadossee (vorn rechts), Sedlitzer See (hinten rechts), Geierswalder (Koschen) See (Mitte links), Senftenberger See (hinten links) mit je ca. 10 km² Seefläche.

Urheber und Quellen der Fotos:
 (a) Walter Geller,
 (b) Martin Schildgen, wikimedia/commons,
 (c) Minestrone, wikimedia/commons,
 (d) Michael Hupfer
 (e) Michael Knall, wikimedia/commons,
 (f) Peter Radke, lmbv_1281.jpg.

das Wasser durch subterrane Wasserführungen ab, sodass sich in Karstdolinen nur nach Starkregenfällen zeitweise Wasser ansammeln kann. Dort, wo mit Carbonat und CO₂ übersättigte Wässer aus dem Karst an die Oberfläche treten, können durch Ausfällung gelösten Kalks Sinterablagerungen entstehen, die ständig wachsende Staudämme und natürliche Staubecken bilden wie bei den Plitvicer Seen (Tafel 1.2).

Tab. 1.4 Die wichtigsten Seen/Maare der Vulkaneifel: Oberfläche, Volumen, maximale Tiefe, Mischungsverhalten und maximale Tiefe der saisonalen Durchmischung der meromiktischen Seen, Trophiezustand und geschätztes Alter (Scharf 1987).

	Fläche (ha)	Volumen (Mio. m ³)	Z _{max} (m)	Mixis (m)	Trophie	Alter (10 ³ Jahre)
Laacher See/Caldera	331,5	106	53	holomikt.	meso-eu	12,9
Pulvermaar	33,5	12,8	70	<24	meso	15–20
Weinfelder Maar	15,9	4,3	52	holomikt.	oligo- meso	20–30
Gemündener Maar	7,5	1,3	39	<30	meso	30±4
Ulmener Maar	5,5	1,3	35	<30	eutroph	11
Schalkenmehrener Maar	21,9	2,5	21	holomikt.	eutroph	20–30
Holzmaar	5,8	0,6	20	holomikt.	meso-eu	60
Meerfelder Maar	24,8	2,3	18	polymikt.	polytroph	29
Immerather Maar	4,0	0,06	2,5	polymikt.	polytroph	40–70

Durch Grundwasser aufgelöste Höhlungen in Salzstöcken können durch Einsturz zur Bildung von Erdfallseen (Subrosionsseen) führen. In Norddeutschland existieren zahlreiche Salzstöcke als Überreste des Zechsteinmeeres. Beispiele sind das Zwischenahner Meer, mit 5,5 km² der drittgrößte See in Niedersachsen, und der Arendsee in der Altmark (Sachsen-Anhalt) mit 5,14 km². Die Erdfall-Ereignisse, die den Seen die heutige Größe und Gestalt gaben, sind historisch belegt. Der Arendsee entstand durch zwei Erdfallereignisse in den Jahren 822 und 1685, der Erdfallsee im Gebiet des Heiligen Meeres im Jahr 1913. Eine weitere Gruppe von Erdfallseen („Kutte“) gibt es im Thüringer Zechstein-Salinar bei Bad Salzungen. Neben den natürlichen Erdfallseen sind ähnliche Einsturzlöcher über alten Untertagebauten im Kalisalz bekannt geworden.

1.2.5 Fluviale Seen

Im Auenbereich von Tieflandflüssen sammelt sich das in den oberen Flussabschnitten erodierte Material an. Diese Akkumulation führt bei natürlichen Tieflandflüssen zu ständigen Verlagerungen der Flussläufe. Dabei werden alte Flusschlingen vom neuen Flussverlauf abgeschnitten und als stehende Altwässer zu Fluss begleitenden Auenseen. Weltweit wird die Zahl der fluvialen Seen auf ca. 530 000 mit einer Gesamtfläche von 218 000 km² geschätzt (Meybeck 1995). Bezogen auf die Gesamtheit der flussbegleitenden Auenflächen von weltweit 3,4 Mio. km², in denen diese Seen liegen, ergibt sich ein Flächenanteil von 5,9 %.

In den dicht besiedelten Ländern Europas ist der natürliche Mechanismus der Verlagerungen der Flussbetten mit einhergehenden Bildungen von Altwässern aus abgeschnittenen Flusschlingen, die ehemals oft noch durchflossenen waren, gestört. Baumaßnahmen wie die „Rheinkorrektion“ durch Tulla zu Beginn des 19. Jahrhunderts begründeten den Stromverlauf mit Durchstichen der Flusschlingen. Die abgeschnittenen Flusschlingen

(Altwässer) unterliegen einem Verlandungsprozess, der schneller abläuft, als dies unter natürlichen Bedingungen geschehen würde. Danach erfolgten Flussbegradigungen und Eindeichungen auch keine neuen Altgewässer mehr entstehen, ist langfristig mit deren Verschwinden zu rechnen. Man bemüht sich, diese durch Rekultivierungsmaßnahmen wieder an den Fluss anzuschließen oder Ersatzbiotope zu schaffen.

1.2.6 Künstliche Seen

Künstliche, vom Menschen geschaffene Seen entstehen als wasserführende Hohlformen vor allem beim Anstau von Flüssen, bei der Tagebaugewinnung von Rohstoffen wie Kies, Stein, Ton, Lehm, Braunkohle und Erz, oder als Fisch- und Speicherteiche. In der Zusammenstellung von Hemm und Jöhnk (2004) werden für die künstlichen Standgewässer in Deutschland vorläufige Zahlen genannt. Der Erfassungsgrad, insbesondere der kleinen, künstlichen Standgewässer, ist zwischen den Bundesländern sehr unterschiedlich.

1.2.6.1 Talsperren und Stauseen

Talsperren sind Stauanlagen, die über den Querschnitt des gestauten Wasserlaufes hinaus den Talquerschnitt abriegeln. Als Speicher werden dagegen Gewässer bezeichnet, die parallel zu einem Flusslauf in die Aue eingetieft und deren Wasserzuleitung aus einem Fließgewässer im natürlichen Gefälle und/oder Pumpenbetrieb erfolgt. Kleine Talsperren für die Gewinnung von Betriebswasser wurden im Harz oder im Erzgebirge schon vor mehreren Jahrhunderten gebaut. In Deutschland werden Talsperren zur Trink- und Brauchwassergewinnung, zum Hochwasserschutz und zur Energieerzeugung verwendet. Die meisten Talsperren in Deutschland werden in Nordrhein-Westfalen, Sachsen und Thüringen betrieben. Die größte Talsperre ist die Bleiloch-Talsperre in Thüringen mit einem Stauinhalt von 215 Mio. m³ Wasser. In Deutschland gehören zu der Kategorie „große Talsperren“ (>15 m Staumauer, >1 Mio. m³) ca. 320 Gewässer.

1.2.6.2 Kiesbaggerseen

Einen gewissen Ausgleich für das Verschwinden der natürlichen Altwässer in den Flussauen stellen Bühnenfelder und durch Kiesabbau geschaffene Baggerseen als künstliche Auenseen dar. In der Regionalplanung werden die verschiedenen Aspekte verbunden: Richtplanung zur Flussraumaufweitung und erweiterte Rheinauen am Alpenrhein (Amt für Raumentwicklung Graubünden 2006), Regionalplanung am mittleren Oberrhein (Regionalverband-Mittlerer-Oberrhein 2006), Entwicklung der Rheinauengewässer in Rheinland-Pfalz (Otto und Weibel 1999), am Niederrhein (NUA-NRW 2007), an der Weser (Henneberg und Schilling 1998), an der mittleren Elbe (AG KABE 2000) und an der Donau im Abschnitt des Donaurieds von Neu-Ulm bis Donauwörth (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz 1999).

Für die Kategorien der „Baggerseen“ und „Kiesseen“ sind bei Hemm und Jöhnk (2004) 1079 Standgewässer angegeben. Genauere Daten sind nur für Teilgebiete verfügbar. So wird im Gesamtökologischen Gutachten für das Donauried für eine Gesamtfläche von 417 km² die Zahl von 663 Baggerseen aus dem bisherigen Abbau von Kies und Sand genannt, die mit einer Fläche von 1843 ha ca. 4,7 % des Gesamtgebietes einnehmen. Der jährliche Abbau

Tab. 1.5 Zahl und Flächen der Kiesbaggerseen, abgeschlossener und laufender Betrieb sowie geplante oder genehmigte Abbauf Flächen. Schätzwerte am Oberrhein in Klammern bezogen auf eine mittlere Seegröße von 10 ha nach Westermann (1996).

Region/Land	Kiesbaggerseen (Anzahl)	Wasserflächen (km ²)	Planung (km ²)	Jahr	Quelle
Mittlere Elbe/SA, BB	33	47,7	206	2000	AG KABE 2000
Donauried/BY	663	18,4	3,95	2009	Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (1999)
Oberrhein/BW	150	16		1990	Westermann 1996
Oberrhein/BW	335	50 (33)	4,5	2004	LAFU-BW 2004
Niederrhein/NW	120–140			2000	Patt und Städtler (2000)
Donau–Bodensee/ BW	283	–28		2004	LAFU-BW 2004

von 2,8 Mio. t hat einen Flächenbedarf von 25 ha, der im Wesentlichen die Zunahme der Seenflächen beschreibt. Die Fläche der Abgrabungsseen dieses Gebietes würde sich damit in einem Jahrhundert verdoppeln.

In Tab. 1.5 sind Zahlenangaben zu regionalen Teilgebieten an Rhein, Elbe und Donau zusammengestellt, in denen mehr als 1000 Kiesbaggerseen mit einer geschätzten Gesamtfläche von etwa 150 km² erfasst wurden. Weitere Gebiete an der Weser in Niedersachsen und in den Rheinniederungen von Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen sind in ähnlicher Größenordnung anzusetzen: 120–140 Kiesbaggerseen allein im Regierungsbezirk Köln nach Eckartz-Nolden (2000). Eine Schätzung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Gwosdz und Röhling 2001) kommt zu einem Wert von 12–13 km² des jährlichen Flächenbedarfs für den Abbau von Sand und Kies in Deutschland, bei dem der weitaus größere Anteil auf den Nassabbau in Flussniederungen entfällt. Bei gleichbleibender Rate der Umwandlung von Auen in Baggerseeflächen würde dies zu einer Verdopplung in ca. 25 Jahren führen.

1.2.6.3 Braunkohletagebauseen

Nach Angabe des Bundesumweltamtes wird die Seenlandschaft Deutschlands infolge des Braunkohletagebaus um über 500 Seen reicher. Einige Restseen werden zu den größten Seen Deutschlands gehören. So würde der Hambacher See (Nordrhein-Westfalen) nach seiner Füllung, die allerdings erst in ca. 100 Jahren abgeschlossen sein wird, mit einer Seefläche von 40,4 km² und einem Seevolumen von $5,3 \times 10^9$ m³ nach dem Bodensee der zweitgrößte See Deutschlands sein. Mit dem Stand vom Jahr 2003 waren in Deutschland 575 Braunkohletagebauseen erfasst (Hemm und Jöhnk 2004), davon sind etwa Hundert größer als 50 ha. Die vorhandenen und noch entstehenden Tagebauseen der drei großen Braunkohlereviere in Deutschland, im rheinischen, mitteldeutschen und im Lausitzer Revier (Tafel 1.2(f)), bereichern die deutsche Seenlandschaft – gemessen an der Zahl großer Seen – um etwa 30 %. In der Lausitz wird Europas größte künstliche Wasserlandschaft entstehen. Der

Geiseltalsee (Sachsen-Anhalt) wurde durch Überleitung aus der Saale geflutet und ist seit 2010 mit fast 19 km² der flächenmäßig größte Tagebausee in Deutschland. Der bislang geplante Tagebausee Hambach würde mit bis zu 400 m der tiefste See Deutschlands sein. Die Bergbaufolgegewässer sind in Klapper et al. (2001) detailliert dargestellt und werden hier nicht weiter behandelt.

1.3 Morphometrische Kenngrößen von Seen

Die morphometrischen Eigenschaften eines Sees werden mit Kenngrößen beschrieben (Box 1.1). Wichtige Grundlage zur Ermittlung der Kenngrößen ist eine Tiefenkarte (bathymetrische Karte). Aus der Tiefenkarte werden hypsographische Kurven als Flächen-Tiefen-Beziehung bzw. als Volumen-Tiefen-Beziehung erstellt (Abb. 1.4). Werden die Achsen normiert, können verschiedene Seen hinsichtlich ihrer Beckenform miteinander verglichen werden. Die Volumen-Flächen-Relation zeigt, wie groß der potenzielle Einfluss des Sedimentes auf den Wasserkörper ist. Je flacher der See, desto größer ist die Kontaktfläche eines bestimmten Wasservolumens mit dem Sediment.

Ein sehr wichtiges Kennzeichen für einen See sind die maximale (z_{\max}) und die mittlere Seetiefe (z_m). Die mittlere Tiefe ist der Quotient aus Seevolumen V_s (in m³) und Wasserfläche eines Sees A_s (in m²). Die relative Tiefe (z_r) beschreibt den prozentualen Anteil der maximalen Tiefe am Durchmesser eines Seeflächen äquivalenten Kreises. Die meisten Seen haben relative Tiefen <2 % des mittleren Seedurchmessers, sehr tiefe und daher meistens auch vom Wind schlechter durchmischte Seen >4 %. Beim Pulvermaar in der Eifel beträgt die relative Tiefe 10,3 %, beim Königssee 7,4 %, beim Arendsee in Sachsen-Anhalt 1,9 % und beim Müggelsee in Berlin 0,25 %. Weitere Kenngrößen geben Auskunft über den Einfluss des Einzugsgebietes. Dazu wird die Uferlänge (UL) ermittelt. Aus dem Verhältnis der Uferlänge (UL) zum Umfang eines Kreises, dessen Fläche mit der des Sees (A_s) identisch ist, ergibt sich die Uferentwicklung eines Sees (UE). Je buchtenreicher ein Gewässer, desto größer ist seine „Verzahnung“ mit dem Umland. Bei dem nahezu kreisrunden Pulvermaar beträgt die Uferentwicklung 1,0, während am Plöner See (Schleswig-Holstein) ein Wert von 2,2 erreicht wird. Der Umgebungsfaktor (UF) gibt die Relation der Fläche des Einzugsgebietes (A_E) und des Sees (A_s) wieder. Das Pulvermaar hat einen kleinen UF von 1,4,

Box 1.1 Kenngrößen von Seen

Mittlere Tiefe (z_m)	$z_m = V/A_s$	A_s Seefläche
Uferentwicklung (UE)	$UE = U_s/U_K$	A_K Flächengleicher Kreis
Umgebungsfaktor (UF)	$UF = A_E/A_s$	A_E Fläche Einzugsgebiet
Verweilzeit (τ_w)	$\tau_w = V_s/Q_z$	U_s Seeumfang
Relative Tiefe (z_r)	$z_r (\%) = \frac{100 * z_{\max}}{2 * \sqrt{(A_K/\pi)}}$	U_K Umfang flächengleicher Kreis
		Q_z Zufluss (m ³ /Tag)

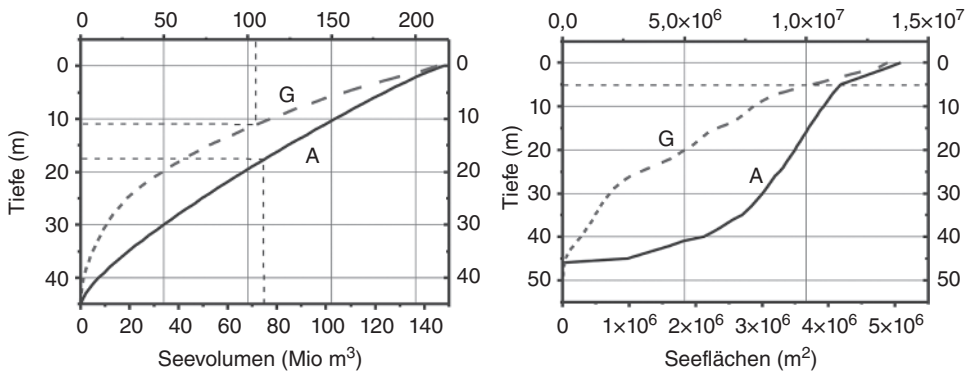


Abb. 1.4 Tiefenverteilung des Seevolumens (links) und der Seeflächen (rechts) vom Tiefsten zur Oberfläche im Goitschensee (G – obere Skala – gestrichelte Linien) und im Arendsee (A – untere Skala – durchgezogene Linien). Die Schwerpunkttiefe (z_g) liegt im Arendsee (18 m) tiefer als im Goitschensee (11 m). Der litorale Flachwasserbereich bis ca. 6 m Tiefe zeigt die im Arendsee natürlich entstandene Uferbank, der Goitschensee hat ausgedehnte flache Bereiche und vier tiefere Teilbecken.

der Bodensee von 22, der Königssee (Bayern) von 25 und der Müggelsee (Berlin) mit dem sehr großen Einzugsgebiet der Spree einen Faktor von 959. Je größer der Umgebungsfaktor, desto stärker wirkt das Einzugsgebiet auf das Gewässer und umso schwieriger ist es, Belastungsquellen zu identifizieren. Von herausragender Bedeutung für die Wasserqualität, die Bilanzierung und für Managementmaßnahmen ist die Verweilzeit des Wassers. Es ist die Zeit, in dem der Wasserkörper des Sees theoretisch einmal erneuert wird. Sie entspricht der theoretischen „Füllzeit“ des Seebeckens und ergibt sich aus dem Quotienten von Seevolumen (V_S) und Zufluss (Q_Z). Die theoretische mittlere Wassererneuerungszeit kann von der realen Erneuerungszeit abweichen, wenn die Verdunstung die Niederschläge übersteigt und der Seeabfluss kleiner ist als der Zufluss. Die für den hydrologischen Wasseraustausch besser treffende Kenngröße, Seevolumen (V_S)/Abfluss (Q_A), ist in der Limnologie weniger gebräuchlich. Die Verweilzeit ist ein entscheidendes Kriterium, ob gewässerinterne Maßnahmen zur Eutrophierungsminderung sinnvoll sind (Hupfer und Scharf 2002) und wie schnell der See auf Belastungsänderungen aus dem Einzugsgebiet reagieren kann. In Deutschland gibt es allerdings von nur 3,4 % aller größeren Seen (>50 ha) Daten zur Wassererneuerungszeit.

