

Abb. 1.8-1: Übersicht über die größten Binnenseen der Erde. Die zwei größten hier gezeichneten Wasserreservoirs (Schwarzes Meer, Kaspische See) enthalten Salzwasser (aus RUTTNER 1962).

1.8 Natürliche Oberflächengewässer als Reservoir für die globale Versorgung mit Süßwasser

MAX M. TILZER

Preservation of natural surface waters as sources of freshwater: Especially because of the multitude of ecological problems associated with large reservoirs and the imminent exhaustion of groundwater aquifers, natural surface waters continue to represent essential sources of drinking water. However, their usefulness is frequently compromised by their irregular geographic distribution which poorly agrees with water demands. In order to enhance drinking water supply, improvement of the integrity of freshwater ecosystems is paramount to extensive treatment of raw water. Although in wealthy industrial countries the quality of many surface waters has substantially improved over the past few decades, degradation of freshwater ecosystems continues in lesser developed countries. This poses particularly severe problems as a consequence of population growth which cannot be matched by increased freshwater allocation. Successful management strategies of surface freshwater bodies should be based on the reversal of their degradation, which as a rule, is mainly due to excessive inputs of nutrients and/or of noxious substances.

Owohl nur kleine Anteile des insgesamt genutzten Süßwassers als Trinkwasser dienen, bereitet die Trinkwasserversorgung besondere Probleme, weil die Qualitätsanforderungen an Trinkwasser wesentlich höher sind als für andere Nutzungsformen. Im weltweiten Durchschnitt wird der größte Anteil allen Süßwassers in der Landwirtschaft verbraucht. Eine ausreichende Verfügbarkeit von Süßwasser ist daher auch eine Grundvoraussetzung für die Sicherung der Welternährung (POSTEL 2003)¹. Die Anteile des Wasserverbrauchs für die verschiedenen Nutzungsformen weisen erhebliche regionale Unterschiede auf, die einerseits vom Klima, andererseits von der Volkswirtschaft (relative Anteile

verschiedener Sektoren) abhängen (Tab. 1.8-1).

In zahlreichen Ländern liefert nach wie vor Grundwasser das meiste Rohwasser für die Trinkwasseraufbereitung (vgl. Kap. 1.9: Kohlfahl et al.). In ariden und semi-ariden Klimazonen wird überdies in zunehmendem Maße versucht, das Problem der Wasserverknappung durch die Errichtung von Stauhaltungen zu lösen. Weltweit gibt es bereits etwa 40.000 große Stauseen. Nicht zuletzt, weil diese in vielfacher Hinsicht erhebliche Probleme erzeugen (vg. Kap. 2.7: Nestmann & Stelzer), besitzen natürliche Oberflächengewässer auch weiterhin besondere Bedeutung als Süßwasserreservoirs, insbesondere für die Trinkwasserversorgung.

Aus: WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für alle? 3. Auflage (2011)
Hrsg.: Lozán J. L., H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe & C.-D. Schönwiese

Im nachfolgenden Kapitel werden wichtige Gesichtspunkte im Zusammenhang mit der Nutzung natürlicher Oberflächengewässer für die Süßwasserversorgung aufgezeigt. Die Hauptthese ist dabei, dass die Integrität der Ökosystemfunktionen natürlicher Oberflächengewässer der wichtigste Garant für ihre Eignung als nutzbare Wasserreservoirare darstellt.

Verteilung und Umsatz von Süßwasser

Etwa die Hälfte aller Binnenseen sind Salzseen². Lediglich 0,38% allen Süßwassers auf der Erde befinden sich in Binnenseen. Diese sind weltweit extrem ungleich verteilt (Abb. 1.8-1). So befinden sich 18% des insgesamt in Seen vorhandenen Süßwassers im Baikalsee. Ungefähr gleich viel in den nordamerikanischen Großen Seen zusammen genommen (WETZEL 2001, HERDENDORF 1990).

Poolgrößen alleine geben aber kein realistisches Bild über die Verfügbarkeit von Süßwasser für Nutzungen durch den Menschen. Denn lediglich das im Umsatz befindliche Süßwasser kann durch den Menschen genutzt werden (Tab. 1.8-2). Es ist dies im Wesentlichen der Oberflächenabfluss, der pro Jahr weltweit 41.000 km³ ausmacht.

Tab. 1.8-1: Verteilung des Süßwasserverbrauchs in % auf Haushalte, Landwirtschaft und Industrie. In Agrarländern sowie in Regionen mit überwiegend trockenem Klima (Afrika, Asien) ist der Anteil der künstlichen Bewässerung am Gesamt-Süßwasserbedarf höher als in Industrieländern (Europa, Nordamerika) und/oder in überwiegend agrarischen Regionen mit dominierend feuchtem Klima (Südamerika; nach WBGU 1997).

Kontinent	Landwirtschaft	Industrie	Haushalt
Afrika	88	5	7
Asien	85	9	6
Europa	31	55	14
Nordamerika	49	42	9
Südamerika	59	23	18
Weitweit	70	23	7

¹ Etwa 40% der an Land erzeugten Lebensmittel werden auf bewässerten Flächen produziert, die nur 18% der weltweit landwirtschaftlich genutzten Flächen ausmachen (POSTEL 2003).

² In den 1990er Jahren wurden 80–85% des Süßwasserbedarfs von Saudi Arabien aus Grundwasser gedeckt, das im Wesentlichen aus fossilen Reserven besteht (Al-IBRAHIM 1993). Die nicht nachhaltige Nutzung von Grundwasser zur Deckung des Süßwasserbedarfs beschränkt sich aber keineswegs auf Länder in ariden Klimazonen. Als Folge kommt es zum Absenken des Grundwasserspiegels. Ein besonders krasses Beispiel ist der Raum von Beijing (Hebei-Provinz), wo der Grundwasserspiegel pro Jahr um ca. 3 m, in manchen Gebieten um bis zu 6 m abgesenkt wird (BROWN 2010).

⁴ Die regionalen Disparitäten in der Süßwasserversorgung zwischen den reichen und den armen Ländern werden durch zwei Faktoren verschärft: (1) In den armen Ländern ist die Wasserqualität meist schlecht, wodurch sich die verfügbare Menge weiter verringert und Krankheiten auftreten (Typhus, Cholera) (2) Insbesondere in den großen Städten gehen infolge von unzureichender Versorgungs-Infrastruktur (vor allem leckere Rohrleitungen) erhebliche Wassermengen verloren.

³ Salzseen entstehen immer dann, wenn Wasserverluste infolge von trockenem (aridem) Klima ausschließlich auf Verdunstung beruhen. Das Tote Meer weist mit 33,7% (d.h. 8,6-mal so hoch wie der Ozean) den höchsten Salzgehalt aller Binnenseen auf. Der Salzgehalt des Aralsees hat infolge der Verringerung des Zuflusses in den vergangenen Jahrzehnten von ca. 1,4% auf 10% zugenommen, mit verheerenden Auswirkungen auf Flora und Fauna. Die Fischerei ist zusammengebrochen, was zu einem Kollaps der Wirtschaft in der Region geführt hat (MICKLIN 2007).

Von diesem Gesamtabfluss, der sich aus den Niederschlägen auf die Landflächen, abzüglich der Verdunstung ergibt, stehen tatsächlich aber nur zwischen 9.000 und 12.000 km³ für den Menschen zur Verfügung, der Rest ist aus den unterschiedlichsten Gründen nicht nutzbar. Diese Größe stellt das erneuerbare Wasserpotenzial dar. Im weltweiten Durchschnitt stehen pro Person derzeit 1.450 m³ Süßwasser jährlich für sämtliche Nutzungsformen zur Verfügung (ENGELMANN et al. 2000). Pro Person und Jahr sollten aber mindestens 1.700 m³ Wasser nachhaltig bereitgestellt werden. Insbesondere in Ländern in semi-ariden und ariden Klimazonen wird dieses Ziel bei weitem nicht erreicht (Tab. 1.8-3). Der zusätzliche Bedarf an Süßwasser wird meist durch die Nutzung fossiler Grundwasservorkommen gedeckt³. Doch selbst in Deutschland liegt die Verfügbarkeit von Süßwasser an der unteren Grenze des erforderlichen Bedarfs (GLEICK 1993, ENGELMANN et al. 2000).

Ein besonderes Problem besteht darin, dass gerade in jenen Regionen, in welchen das größte Bevölkerungswachstum herrscht, auch die größten Defizite bei der Versorgung mit Süßwasser bestehen (GLEICK 1993)⁴. Die Zunahme der Weltbevölkerung beträgt der-

Tab. 1.8-2: Poolgrößen und Umsatzzeiten der wichtigsten Wasserreservoirare auf den Kontinenten und in der Atmosphäre (nach WETZEL 2001 und anderen Quellen)

Reservoir	Gesamtpool (1.000 km ³)	Umsatzzeit
Gletschereis	24.230	1.000–100.000 Jahre
Salzseen	94	?
Süßwasserseen	125	17 Jahre
Flüsse	1,2	16 Tage
Atmosphäre	12,5	8,9 Tage

zeit pro Jahr etwa 76 Mio. oder 1,1%. Über 99% dieses Wachstums findet in den armen Ländern statt, während die Bevölkerung in den Industrieländern stagniert oder sogar abnimmt (TILZER 2008). Obwohl sich das Bevölkerungswachstum seit den 1980er Jahren verlangsamt hat, wird für das Jahr 2050 mit einer Weltbevölkerung von 8–10,5 Mrd. gerechnet. Derartige Schätzungen sind aber mit großen Unsicherheiten behaftet (United States CENSUS BUREAU 2010). Allein für eine ausreichende Nahrungsmittelversorgung werden in semi-ariden Klimazonen pro Person und Jahr 800 m³ Wasser benötigt (FALKENMARK 1997). Es besteht daher in den armen Ländern bereits jetzt ein erheblicher Nachholbedarf an Süßwasser. Für die Sicherung einer angemessenen Trinkwasser- und Nahrungsmittelversorgung müsste aus diesem Grunde die Süßwasserversorgung in den kommenden Jahrzehnten wesentlich stärker zunehmen als die Weltbevölkerung.

Die Komplexität der globalen Süßwasserkrise

Die bisherigen Überlegungen haben sich auf die Mengen verfügbaren Wassers konzentriert. Auf diese Weise erhält man aber ein unvollständiges Bild. Im Vergleich zur Frage der Energieversorgung weist die Wasserproblematik einen ungleich höheren Komplexitätsgrad auf. Hierbei stehen vor allem die folgenden Gesichtspunkte im Vordergrund (TILZER 2001):

- *Erneuerbar, aber begrenzt:* Obwohl Wasser eine erneuerbare Ressource darstellt, ist seine Gesamtverfügbarkeit durch nachhaltige Maßnahmen nicht substantiell zu steigern, weil seine Erneuerungsraten durch den klimaabhängigen hydrologischen Kreislauf bestimmt werden.
- *Wasser ist essentiell für das physische Überleben:* Während wir zumindest im Prinzip auch ohne Energieträger lebensfähig sind, stellt Wasser unser wichtigstes Lebensmittel dar und ist eine unverzichtbare Voraus-

- setzung für die Erzeugung von Nahrungsmitteln.
- *Wasser ist eine nicht substituierbare Ressource:* Während man im Falle der Energie – zumindest theoretisch – durch eine Diversifizierung von Energiequellen (vor allem in Richtung auf erneuerbare Energieträger) eine Entschärfung des Problems herbeiführen kann, gibt es für Wasser keinen Ersatz. Als einzige Strategie bleibt daher eine Steigerung der Nutzungseffizienz des vorhandenen Süßwassers.
- *Der Wasserbedarf kann nur lokal gedeckt werden:* Im Gegensatz zur Elektrizität kann vor allem Trinkwasser nicht über größere Strecken transportiert werden⁵.
- *Die Verfügbarkeit ist von der Wasserqualität abhängig:* Wasser unzureichender Qualität kann durch den Menschen nicht genutzt werden, wobei die Qualitätsanforderungen für verschiedene Nutzungsformen unterschiedlich sind. Wegen der stringenten Qualitätsanforderungen an Trinkwasser ist die Regeneration von Abwasser keine tragbare Option, um die Versorgung mit Süßwasser zu steigern⁶.
- *Süßwasser hat eine Mehrzahl von Funktionen:* Die Sicherung bzw. Wiederherstellung bestimmter Wasserfunktionen erfordert unterschiedliche Managementstrategien, die untereinander im Widerstreit stehen.

Für eine differenzierte Betrachtung der Wasserproblematik sind daher qualitative Überlegungen von ebenso großer Bedeutung wie die Betrachtung verfügbarer Wassermengen. Im Falle von Oberflächengewässern ist die Wasserqualität untrennbar mit der Integrität ihrer Ökosystemfunktionen verknüpft. Die Gefährdung der Ökosystemfunktionen werden in den Kap. 2.1: Koschel et al. und 2.8: Hupfer 6 Kleeberg) im Einzelnen dargestellt. Hier wollen wir uns zunächst mit den Bedingungen in ungestörten Seen beschäftigen und im Anschluss daran mit dem Vorgang der zivilisations-

Tab. 1.8-3: Die Verfügbarkeit von Süßwasser in einigen ausgewählten Ländern der Erde im Jahr 2000. Die Länder sind in drei Gruppen angeordnet: Über 1.700 m³ je Person und Jahr: ausreichend Wasser (**rechts**), unter 1.700 m³ je Person und Jahr: begrenzte Verfügbarkeit (**Mitte**), unter 1.000 m³ je Person und Jahr: Akuter Wassermangel (**links**). Nach ENGELMANN et al. (2000).

Land	m ³	Land	m ³	Land	m ³
Kuwait	10	Großbritannien	1.207	Indien	1.882
Libyen	107	Südafrika	1.238	Iran	2.031
Saudi Arabien	111	Somalia	1.337	Deutschland	2.080
Israel	346	Libanon	1.463	USA	8.902
Ägypten	851	Peru	1.559	Österreich	10.898

⁵Als Obergrenze für den Transport von Trinkwasser können ca. 300 km angesehen werden.

⁶Auch die Entsalzung von Meerwasser kann in Zukunft für die weltweite Trinkwassergewinnung mengenmäßig wegen ihres enormen Energiebedarfs im globalen Maßstab keine signifikante Rolle spielen.

bedingten Überdüngung (*Eutrophierung*), welche zu einer Herabsetzung der Nutzbarkeit von Oberflächengewässern für die Trinkwassergewinnung und andere Nutzungsformen führt.

Ökosystemfunktionen und ihre Bedeutung für die Nutzbarkeit von Oberflächengewässern

Oberflächengewässer können im Hinblick auf ihren Stoffhaushalt als asymmetrische Reaktoren interpretiert werden. In Fließgewässern ist diese Asymmetrie in erster Linie in ihrem Längsverlauf ausgebildet, vor allem im Hinblick auf die Stoffzufuhr durch die fließende Welle und den Stoffexport in weiter stromabwärts gelegene Bereiche. Auch in stehenden Gewässern besteht eine horizontale Asymmetrie zwischen Zu- und Abfluss. Wesentlich wichtiger ist aber hier eine stark ausgeprägte vertikale Asymmetrie zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser. Vertikale Asymmetrien spielen dagegen in Fließgewässern wegen der ständigen Durchmischung des Wassers in der Regel keine Rolle. Diese Unterschiede haben weit reichende Konsequenzen für die Auswirkungen eingetragener Wasserinhaltsstoffe

auf Seen und Flüsse.

Stoffkreisläufe und natürliche Eutrophierung

Man kann zwischen konservativen und dynamischen Wasserinhaltsstoffen unterscheiden. Bei den *konservativen Stoffen* handelt es sich in erster Linie um Salze, deren Konzentrationen im Wesentlichen durch Verdünnungseffekte bestimmt werden (ihre Bedeutung für die Wasserqualität wird in Kap. 2.10: Martens 6 Wichmann und 2.12: Dieter behandelt). *Dynamische Wasserinhaltsstoffe* sind in den Stoffhaushalt von Gewässern einbezogen und weisen daher mitunter erhebliche räumliche und zeitliche Variabilitäten auf.

Wir wollen hier im Folgenden ausschließlich dynamische Wasserinhaltsstoffe behandeln, weil nur diese für biologische Umsetzungen von Bedeutung sind. Die für das Geschehen in Seen mit Abstand wichtigsten dynamischen Wasserinhaltsstoffe sind die gelösten anorganischen Nährsalze, vor allem Phosphat, Nitrat und Ammonium. Ihre Verfügbarkeit bestimmt den Gesamtumfang der in einem Ökosystem durch den autotrophen Prozess der Primärproduktion gebildeten lebenden

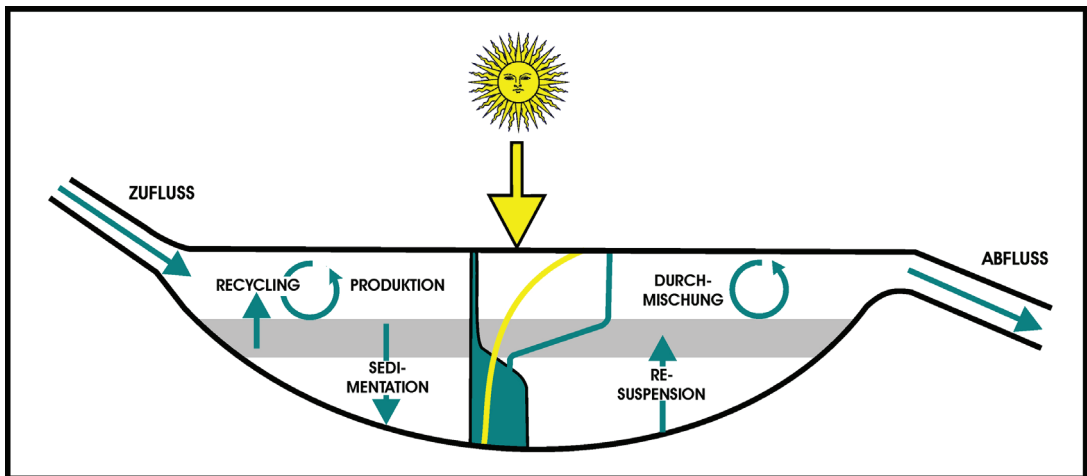


Abb. 1.8-2: Schema der für den Stoffhaushalt relevanten Vorgänge in einem stehenden Gewässer während der Sommerschichtung. **Gelb:** Energieeintrag durch die Sonnenstrahlung (sichtbares Licht und Wärme), **blau:** Wasserbewegungen und **grün:** Stoffflüsse. Die oberflächennahen Wasserschichten werden häufig durchmisch, die thermische Sprungschicht (graue Schattierung) verhindert infolge steiler vertikaler Dichtegradienten eine vertikale Durchmischung tieferer Wasserschichten und der im Wasser gelösten und suspendierten Inhaltsstoffe fast vollständig. Durch die **Produktion** werden die begrenzenden Nährstoffe (**grüne Fläche**) in den oberflächennahen Wasserschichten aufgezehrt. Der Produktionsprozess kann danach lediglich durch interne Regeneration (**Recycling**) aufrechterhalten werden. Die durch den Sinkstofffluss (**Sedimentation**), welcher etwa 20% der Primärproduktion beträgt, wird organisches Material aus der produzierenden Wasserschicht entfernt. Die nach oben gerichteten Stoffströme von gelöster (Auftrieb) und partikulärer Substanz (**Resuspension**) sind während der geschichteten Periode um Größenordnungen geringer als der nach unten gerichtete Sinkstofffluss. Als Folge der herbstlichen Abkühlung wird die Temperaturschichtung abgebaut und der Wasserkörper vertikal durchmisch. Dies führt zu einer Rückführung der im Tiefenwasser gelösten Nährsalze sowie zu einer homogenen Verteilung des Planktons über die gesamte Wassersäule. In seichten Gewässern kommt es überdies zu einer Intensivierung der Resuspension von partikulären Stoffen von der Sedimentoberfläche (Original).

Substanz (*Biomasse*), welche die Nahrungsgrundlage für eine komplexe Nahrungskette darstellt und die Umweltbedingungen im Gewässer mitbestimmt. Dieser Komplex wird als *Trophiegrad* bezeichnet. *Oligotrophe Gewässer* sind infolge ihres geringen Nährstoffgehalts durch geringe Biomassen und geringe Produktivität, *eutrophe Gewässer* durch große Biomassen und hohe Produktivität gekennzeichnet.

Die erwähnte vertikale Asymmetrie stehender Gewässer beruht vor allem auf zwei Prozessen (Abb. 1.8-2):

- *Energie* wird dem Gewässer in zweierlei Form zugeführt. Als Strahlung von der Sonne⁷ und als kinetische Energie, vor allem durch den Wind. Beide haben aber entgegengesetzte Wirkungen: Während die Strahlung durch Erwärmung zu einer vertikalen

Schichtung⁸ der Wassersäule führt, hat die kinetische Energie eine relative Homogenisierung des Wasserkörpers zur Folge. Während des Sommers überwiegt der Einfluss der Strahlung, während des Winters kann die Erwärmung durch Strahlungsenergiezufuhr die homogenisierende (durchmischende) Wirkung des Windes nicht ausgleichen.

- Als Folge des Lichtgradienten innerhalb der Wassersäule von stehenden Gewässern ergibt sich eine *vertikale Differenzierung* der biologischen Prozesse: Die Produktion organischer Substanz durch das Phytoplankton durch den Prozess der Photosynthese in oberflächennahen Wasserschichten (der *euphotischen Zone*) und der Abbau organischer Substanz in der zehrenden (*aphotischen*) Zone⁹. Tote organische

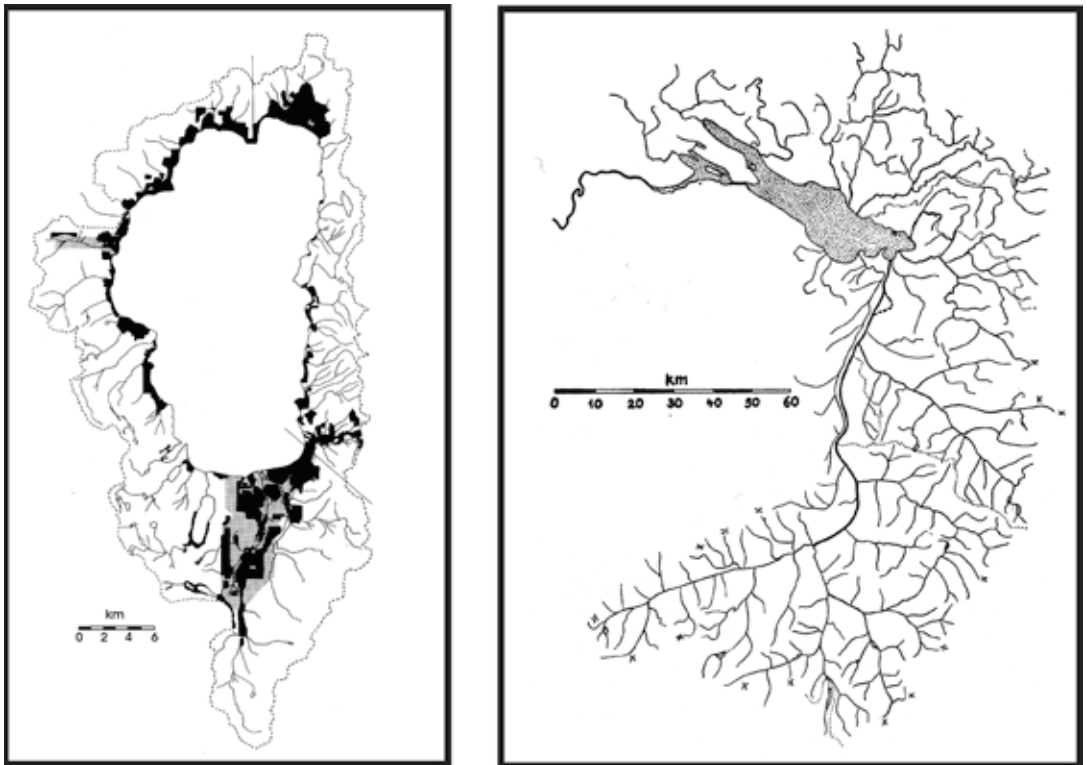


Abb. 1.8-3: Größenvergleich der Wasser-Einzugsgebiete von Lake Tahoe (1.310 km²; Seeoberfläche 499 km²) und Bodensee (11.500 km²; Seeoberfläche einschließlich Untersee 539 km²): Der Lake Tahoe besitzt wegen seiner größeren Tiefe mit 156 km³ ein dreimal so großes Wasservolumen wie der Bodensee (insgesamt 48,4 km³). Die Wasseraufenthaltszeit beträgt im Bodensee ca. 4,5 Jahre, im Lake Tahoe 650 Jahre. Die schwarz ausgewiesenen Flächen werden genutzt (Siedlungen, Parks, Golfplätze, Verkehrsflächen).

⁷Über 50% der die Erdoberfläche erreichenden Sonnenstrahlung ist Wärmestrahlung, etwa 46% können durch die Photosynthese genutzt werden. Diese wird auch in klarem Wasser absorbiert und führt zu seiner Erwärmung der obersten Wasserschicht.

⁸Durch ihre Erwärmung verringert sich die Dichte oberflächennaher Wasserschichten, wodurch die vertikale Durchmischung der Wassersäule verhindert oder doch zumindest erschwert wird.

⁹Die euphotische Zone erstreckt sich bis zu einer Tiefe, in welcher noch 1% der an der Gewässeroberfläche einfallenden Lichtstrahlung vorhanden ist, was eine positive Kohlenstoffbilanz durch Überwiegen der Photosynthese über den Abbau organischen Materials erlaubt. Die Dicke der euphotischen Zone hängt von der Lichtdurchlässigkeit des Wassers ab und beträgt in den meisten Binnenseen zwischen weniger als 1 m und 15 m.

Partikel sinken zum Seeboden. Während der vertikalen Durchmischung wirkt besonders in seichten Seen die *Resuspension* (Aufwirbelung) von Bodensedimenten dem Ablagerungsprozess entgegen. Gelöste Nährstoffe werden in allen Gewässern bei vertikaler Durchmischung des Wassers gleichmäßig über die Wassersäule verteilt.

Infolge der Verarmung oberflächennaher Wasserschichten an gelöstem und suspendiertem Material durch Aufzehrung durch das Phytoplankton und den vertikalen Sinkstofffluss während der sommerlichen Schichtungsperiode verlassen weniger Stoffe den See über den Abfluss als ihm aus dem Einzugsgebiet zugeführt werden. Als Ergebnis reichern sich Nährstoffe auch bei gleich bleibender äußerer Nährstoffzufuhr langfristig im See an. Dieser Vorgang wird als *natürliche Eutrophierung* bezeichnet (WETZEL 2001).

Die zivilisationsbedingte Eutrophierung von Gewässern

Als Folge zivilisatorischer Eingriffe auf die Gewässer selber, wie auch auf ihr Einzugsgebiet, kommt es zu erheblichen Veränderungen im Stoffhaushalt von Binnengewässern. Vor allem den Untersuchungen von VOLLENWEIDER (1968, 1975, 1976) ist die Erkenntnis zu verdanken, dass die Empfindlichkeit von Binnengewässern gegenüber stofflichen Belastungen von Grundmerkmalen der betroffenen Systeme abhängt. VOLLENWEIDER hat das dynamische Verhalten von Wasserinhaltsstoffen für Nährsalze mit düngender (eutrophierender) Wirkung beschrieben. Der Schwerpunkt lag auf *Phosphat*, welches in der überwiegenden Mehrzahl der Binnengewässer der produktionsbegrenzende Nährstoff ist¹⁰. Die von ihm entwickelten Prinzipien können aber *mutatis mutandis* auch auf andere sich dynamisch verhaltende Wasserinhaltsstoffe angewandt werden. Es überrascht, dass dies bisher noch kaum geschehen ist. Derartige Überlegungen könnten wichtige wissenschaftliche Grundlagen für das Management der Gewässergüte liefern.

Externe Stoffzufuhr und Wassererneuerung

Die in Binnengewässern ablaufenden Prozesse sind auf das Engste mit dem umgebenden Wassereinzugsgebiet verknüpft. Dieses liefert nicht nur Wasser, sondern auch gelöste Inhaltsstoffe, welche die Abläufe der

biologischen Prozesse entscheidend beeinflussen. Die Stoffflüsse innerhalb eines Oberflächengewässers werden stark durch die Gestalt und Größe des betreffenden Wasserkörpers bestimmt:

- *Einzugsgebiet*: Die Größe des Einzugsgebiets und seine Wasserbilanz, im Verhältnis zum Volumen des in ihm liegenden Gewässers bedingt die Geschwindigkeit der Wassererneuerung im Gewässer (Abb. 1.8-3). Die Wasserbilanz des Einzugsgebietes wiederum hängt von der Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung ab, die im Wesentlichen vom Klima bestimmt wird. Die aus dem Wassereinzugsgebiet dem See insgesamt zugeführten Stoffmengen hängen zusätzlich von der Freisetzung von Stoffen pro Flächeneinheit des Wasser-Einzugsgebietes ab. Sie sind daher von dessen naturgegebenen Eigenschaften (Bodentypus, Vegetationsbedeckung) und zusätzlich sehr wesentlich von der Intensität der menschlichen Nutzung abhängig, welche die zivilisationsbedingte Freisetzung von Stoffen bestimmt. Der wichtigste Eutrophierungsfaktor ist das Phosphat, das vor allem aus häuslichem Abwasser stammt. Pro Person und Tag werden mit den Exkrementen 12 g Stickstoff und 2,25 g Phosphorsalze freigesetzt (VOLLENWEIDER 1968). Nach dem Einsatz phosphorhaltiger Enthärter in Waschmitteln (der Chelatbildner *Natrium Triphosphat*) hat sich die Phosphatbelastung annähernd verdoppelt, was weltweit zu einer Verschärfung der Eutrophierungsproblematik geführt hat (KHAN & ANSARI 2005). Die Freisetzungsraten von Stoffen aus dem Boden des Einzugsgebiets ist in hohem Maße substanzspezifisch. Während etwa Phosphate in den meisten Böden effektiv festgehalten werden, können signifikante Anteile (15–25%) von etwa als Dünger aufgebrauchten Stickstoffverbindungen ausgeschwemmt und auf diese Weise in Oberflächengewässer gelangen (GÄCHTER & FURRER 1972). Aus diesem Grund sind Abwässer die wichtigsten Phosphorquellen und landwirtschaftlich genutzte Böden die wichtigsten Stickstoffquellen.
- *Atmosphäre*: Insbesondere im Falle großer Binnenseen spielt auch die Seeoberfläche selber eine wichtige Rolle für die Stoffbilanzen. Denn in zunehmendem Maße stammen signifikante Anteile des in die Oberflächengewässer eingetragenen Stoffs aus Niederschlägen. Diese können aus industriellen Ballungsräumen oder landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten über Hunderte von Kilometern

¹⁰Das LIEBIG'sche Gesetz des Minimums besagt, dass jener Nährstoff das Wachstum autotropher Organismen begrenzt, dessen Verfügbarkeit am weitesten hinter den Erfordernissen eines Organismus zurücksteht. Welcher Nährstoff das Wachstum begrenzt, hängt nicht von seiner absoluten Konzentration, sondern vom Mengenverhältnis der Nährstoffe zueinander ab. Im Gegensatz zu Binnenseen spielt im Ozean und auf dem Land in der Regel Stickstoff die Hauptrolle als begrenzender Nährstoff.

verfrachtet werden, ehe sie in Form von Regen oder Schnee in den Boden oder direkt in das Gewässer eingetragen werden. Die wichtigsten atmosphärischen Stoffeinträge sind Schwefel- und Stickoxide, die bei Lösung in Wasser Säuren bilden. Schwefeloxide stammen vor allem aus der Verbrennung minderwertiger Braunkohle. Stickoxide stammen zusätzlich aus Düngemitteln für die Landwirtschaft. Atmosphärische Stoffeinträge durch Niederschläge bewirken eine Versauerung von Gewässern (SCHINDLER 1988, siehe auch z.B. HULTBERG & HULTENGREN 1999). Stickoxide wirken außerdem als Dünger und tragen in Seen, deren Produktion durch Stickstoff begrenzt ist, wesentlich zu deren Eutrophierung bei, wie dies für den Lake Tahoe (USA) gezeigt worden ist (JASSBY et al. 1994)¹¹.

Die Belastbarkeit von stehenden Gewässern durch externe Stoffzufuhr

VOLLENWEIDERS Modell hat zum Ziel, die Belastbarkeit von Binnengewässern mit eingetragenen Nährsalzen aus ihrem Verhalten im Gewässer zu quantifizieren, basierend auf einfachen Merkmalen von Einzugsgebiet und Gewässer. Zumindest im Prinzip wird die Akkumulation von Planktonbiomasse während der Vegetationsperiode durch die am Beginn der Periode mit Temperaturschichtung vorhandene Menge des produktionsbegrenzenden Nährstoffs bestimmt, der demzufolge völlig aufgezehrt wird. Die düngende Wirkung eines eingetragenen Stoffes kann daher auf die Konzentration dieses Stoffes während der winterlichen Durchmischungsphase bezogen werden. Der *Trophiegrad* kann aber auch durch die durchschnittliche Nährsalzkonzentration definiert werden (Abb. 1.8-5). Der Produktionsprozess wird nach Aufzehrung des begrenzenden Nährstoffs durch die Regeneration (das Recycling) des

produktionsbegrenzenden Nährstoffs aufrechterhalten, ohne dass es zu einer weiteren Zunahme der Biomasse kommt¹². Die oberflächennahen Konzentrationen nicht produktionsbegrenzender Nährsalze nehmen zwar ebenfalls während der Vegetationsperiode ab, werden

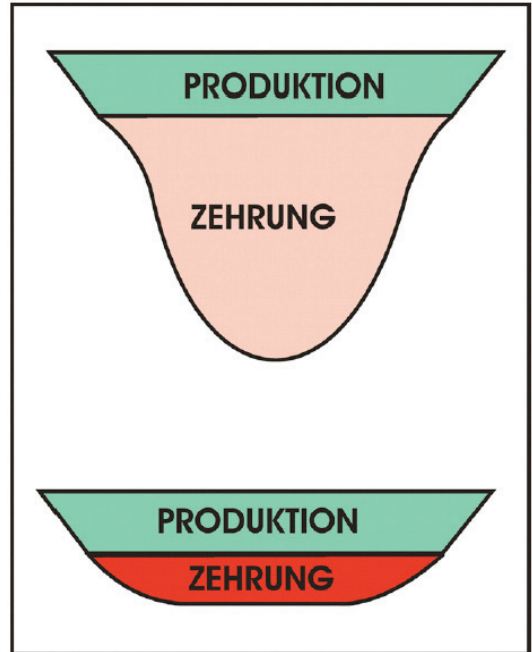


Abb. 1.8-4: Vergleich der Sauerstoffzehrung infolge des Abbaus organischer Sinkstoffe im Tiefenwasser zweier Seen gleicher Produktivität, jedoch unterschiedlicher Tiefe. In tiefen Seen hat die aphotische (lichtlose) Zone ein größeres Wasservolumen und dementsprechend ein größeres Reservoir an gelöstem Sauerstoff als in einem flachen See. Selbst bei gleicher Produktivität in der durchleuchteten (euphotischen) Zone und dementsprechend identischem Sinkstofffluss wird die Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser eines tiefen Sees weniger abnehmen als in einem flachen See (nach THIENEMANN 1928).

¹¹Etwa 60% des in den Lake Tahoe eingebrachten Stickstoffs stammen aus der Atmosphäre und sind wesentlich an seiner fortschreitenden Eutrophierung beteiligt. Die gesteigerte Zufuhr von Stickoxiden hat im Lake Tahoe einen progressiven Übergang von Stickstoff- zu Phosphorbegrenzung zur Folge (JASSBY et al. 1994).

¹²Nährsalze werden vor allem durch das Phytoplankton fressende tierische Plankton (Zooplankton) regeneriert, indem die anorganischen Abbauprodukte ihrer Nahrung an das Wasser abgegeben werden.

¹³Grundsätzlich lässt sich die maximal mögliche Biomasse in Abhängigkeit aus der Konzentration der Nährstoffe am Beginn der Wachstumsperiode vorhersagen: Im Phytoplankton besteht das Gewichtsverhältnis von Kohlenstoff zu Phosphor ca. 40:1. Etwa 10% des Frischgewichts fallen auf den Kohlenstoff. Theoretisch könnte sich daher aus 1 g Phosphor eine Biomasse von 400g bilden. Tatsächlich wird diese maximale Tragfähigkeit (carrying capacity) wegen der gleichzeitig auftretenden Verluste nicht erreicht. Im Bodensee beträgt die Maximalbiomasse nur 15–20% der aus der maximalen Phosphorkonzentration zu erwartenden Tragfähigkeit (TILZER & BEESE 1988).

¹⁴Rechnerisch ergibt sich die Wasseraufenthaltszeit aus dem Quotienten Seevolumen, dividiert durch die jährliche Abflussmenge. Tatsächlich unterscheiden sich Wasseraufenthaltszeiten innerhalb von stehenden Gewässern erheblich. Sie sind in der Regel nahe der Oberfläche am geringsten und in der Tiefe am größten, da das Wasser an der Oberfläche zufließt und oberflächennahes Wasser den See wieder verlässt. Tiefenwasser wird im Gegensatz dazu meist lediglich während der Durchmischungsphasen ausgetauscht, die häufig in Zeiträume mit geringen Niederschlagsmengen fallen.

aber in der Regel nicht völlig aufgezehrt¹³. Während der Durchmischungsphase wird dieses Nährsalzdefizit durch Eintrag von Nährsalzen aus dem Tiefenwasser wiederum aufgefüllt.

Die Belastbarkeit von stehenden Gewässern ist von der Wassererneuerungsrate innerhalb des Gewässers und seiner durchschnittlichen Tiefe abhängig:

- **Wasser-Aufenthaltszeit:** Aus der Beziehung zwischen der Gesamtwasserzufuhr aus dem Einzugsgebiet und dem Gewässervolumen ergibt sich die durchschnittliche Aufenthaltszeit des Wassers innerhalb des Oberflächengewässers¹⁴. Der Vergleich des Bodensees mit dem etwa gleich großen, aber etwa dreimal so tiefen Lake Tahoe kann als anschauliches Beispiel genutzt werden (Abb. 1.8-3). Das Einzugsgebiet des Bodensees beträgt 11.500 km², jenes des Lake Tahoe, einschließlich der Seeoberfläche 1.310 km². Letzteres erhält überdies wesentlich weniger Niederschläge als das Bodensee-Einzugsgebiet. Als Folge beträgt die durchschnittliche Wasseraufenthaltszeit im Bodensee ca. 4,5 Jahre, jene des Lake Tahoe aber 650 Jahre. Sind Nährsalze erst einmal in einen See mit langer Wassererneuerungszeit gelangt, verbleiben sie lange in diesem und können infolge ihrer intensiveren internen Regeneration eine stärkere Wirkung entfalten als in Seen, deren Wasser rasch ausgetauscht wird. In Systemen mit hohen Durchflussraten werden außerdem die zugeführten gelösten Nährsalze in der Regel im Zubringer stärker verdünnt als in solchen mit geringen Durchflussraten. Außerdem verlassen sie das System wieder relativ rasch. Aus beiden Gründen ist die Belastbarkeit von Gewässern mit geringer Wasseraufenthaltszeit größer

als in solchen mit langen Wasseraufenthaltszeiten. Stehende und fließende Gewässer können – hydrologisch betrachtet – als Endpunkte eines Kontinuums aufgefasst werden: Ein Fluss kann als Gewässer mit extrem kurzer Wasseraufenthaltszeit und ein See als ein Fluss mit extrem langer Wasseraufenthaltszeit betrachtet werden. Flüsse sind in der Regel stärker belastbar als stehende Gewässer.

- **Durchschnittliche Wassertiefe:** Gelöste und absinkende partikuläre organische Substanzen werden im Wasser großer und tiefer Seen stärker verdünnt als in kleinen flachen. Als Folge kommt es in tiefen Seen zu einer geringeren Sauerstoffzehrung als in flachen. Dieser wichtige Sachverhalt wurde bereits von AUGUST THIENEMANN (1882–1960), einem der Pioniere der Limnologie, erkannt (THIENEMANN 1928). Wir kommen auf die Bedeutung des Sauerstoffschwunds im Tiefenwasser noch zurück (Abb. 1.8-4). Andererseits benötigen aber Sinkstoffe umso längere Zeit, um auf den Seeboden zu gelangen, je tiefer ein See ist. Als Folge kann in tiefen Seen ein größerer Anteil von ihnen während des Sinkprozesses in der Wassersäule durch Mikroben abgebaut werden als in flachen Seen und dabei ein Großteil der anorganischen Nährsalze regeneriert werden (DILLON & RIGLER 1974).

Die Folgen von Wasser-Erneuerungszeit und Seetiefe können sich daher zum Teil gegenseitig aufheben. Beide Parameter sind außerdem nicht völlig unabhängig voneinander, da die meisten tiefen Seen lange Wasseraufenthaltszeiten aufweisen. Beides erschwert die Vorhersagbarkeit der Belastbarkeit von Seen durch externe Nährstoffzufuhr. Die praktische Erfahrung hat gezeigt,

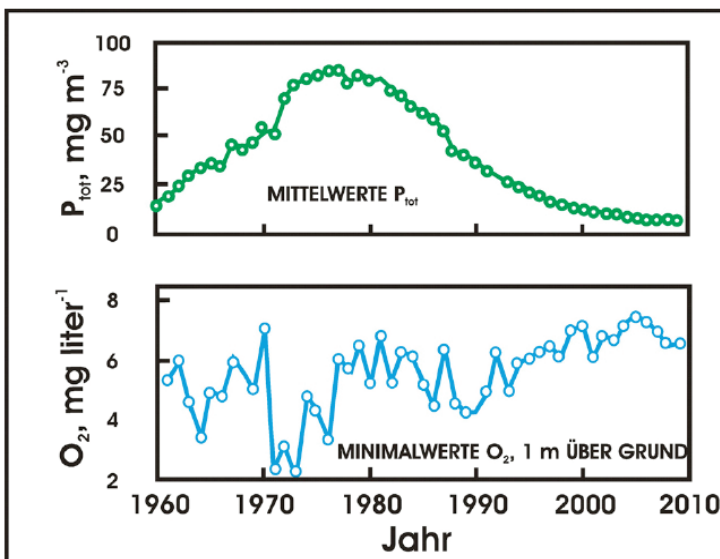


Abb. 1.8-5: Entwicklung der durchschnittlichen Konzentrationen an Gesamtposphor im Freiwasser des Bodensees (oberes Bild) und der Konzentration an gelöstem Sauerstoff über dem Seegrund an der tiefsten Stelle (unteres Bild) zwischen 1960 und 2009. Während der 1970er Jahre bestand die Gefahr der vollständigen Aufzehrung des gelösten Sauerstoffs über dem Seegrund. Dies hätte zur Freisetzung von Phosphat aus dem Bodensediment führen können, was zu einer internen Düngung und damit zu einer drastischen Beschleunigung des Eutrophierungsprozesses geführt hätte. Nach IGKB 2010.

dass in der Regel Seen mit kurzen Wasseraufenthaltszeiten stärker belastbar sind als solche mit geringer Wassererneuerung, auch wenn diese tief sind (VOLLENWEIDER 1975).

Der Trophiegrad eines Gewässers, der sich aus der nährstoffbedingten Tragfähigkeit (*Carrying Capacity*) des Gewässers ergibt, lässt sich am einfachsten durch eine maximale Phytoplankton-Biomasse während der Vegetationsperiode definieren. Ein einfach zu messendes Maß ist dabei die maximale Chlorophyllkonzentration¹⁵. Durch zivilisatorische Einflüsse haben eutrophierte Seen vor allem aus den folgenden Gründen eine geringere Wasserqualität als oligotrophe Seen:

- Hohe Phytoplanktondichten bewirken eine Trübung des Wassers. Im Uferbereich bilden sich Algenwatten.
- In stark gedüngten Seen bilden sich Blüten von Cyanobakterien aus, die toxische Substanzen ausscheiden können (CHORUS & BARTRAM 1999).
- In den lichtlosen Tiefenwasserschichten kommt es durch den Abbau der absinkenden organischen Partikeln zu einer gesteigerten Aufzehrung des gelösten Sauerstoffs (*Abb. 1.8-4*). Dies hat eine erhöhte Phosphorzufuhr zur Folge, da unter sauerstofffreien Bedingungen Phosphat löslich wird und aus dem Bodensediment freigesetzt wird (*»interne Düngung«*).

Die Nutzbarkeit von künstlich eutrophierten Gewässern ist aus den folgenden Gründen herabgesetzt:

- Der erhöhte Schwebstoffgehalt und die erhöhten Konzentrationen gelöster organischer Substanzen erfordern einen höheren Aufwand bei der Aufbereitung von Trinkwasser.
- Das erhöhte Nahrungsangebot hat eine Zunahme der Fischerträge zur Folge, aber die Qualität der nutzbaren Fischbestände nimmt ab.
- Die Eutrophierung von Seen führt zu einer Verringerung ihrer ästhetischen Qualität, welche sich negativ auf ihre Nutzung für die Erholung auswirkt. Cyanobakterien-Toxine setzen ihre Nutzbarkeit als Badesegewässer herab oder machen diese unmöglich.

Durch die Analyse von Daten aus einer großen Anzahl von Gewässern und theoretischen Überlegungen (siehe oben) hat VOLLENWEIDER (1976) ein semi-empirisches Modell erstellt, auf Grund dessen für jeden beliebigen See, basierend auf der mittleren Tiefe und der Wassererneuerungszeit, *kritische Belastungsgrenzen* für Phosphor und Stickstoff errechnet werden können. Diese dürfen nicht überschritten werden, wenn es gilt,

eine nachhaltige Beeinträchtigung der Wasserqualität des Systems infolge von Eutrophierung zu vermeiden. Grundlage dieser Belastungsgrenzen ist im Prinzip die Definition einer maximal tolerierbaren winterlichen Maximalkonzentration des betreffenden Wasserinhaltsstoffes, welche als unabhängige Variable vorgegeben wird. Derartige kritische Belastungsgrenzen stellen wichtige Planungsgrundlagen für das Management von See-Einzugsgebietssystemen dar.

Ausblick: Definition kritischer Belastungsgrenzen als Grundlage für ein nachhaltiges Management der Wasserqualität

Die Eignung von Oberflächengewässern, vor allem als Trinkwasserreservoir, hängt sehr wesentlich von der Integrität ihrer Ökosystemfunktionen ab. In den Industrieländern des Nordens ist als Ergebnis erfolgreicher, auf wissenschaftlichen Untersuchungen basierender Maßnahmen, in den abgelaufenen Jahrzehnten eine nachhaltige Verbesserung eingetreten. Ein besonders eindrucksvolles Fallbeispiel ist der Bodensee, dessen Phosphorbelastung infolge der Errichtung von Kläranlagen mit 80% Phosphorelimination sowie der Ableitung der ufernahen Phosphate durch eine Ringkanalleitung drastisch verringert werden konnte. Nach einem dramatischen Eutrophierungsprozess während der 1960er und 1970er Jahre, der um 1980 seinen Höhepunkt erreicht hatte, ist der heutige Gewässergütezustand vergleichbar mit jenem der 1950er Jahre (*Abb. 1.8-5*). Allerdings ist die Erholung von Gewässern bisher wesentlich weniger gut verstanden als ihre Reaktion auf Belastungen (TILZER et al. 1991). In den Entwicklungs- und Schwellenländern hingegen verschlechtert sich die Situation laufend weiter.

Maßnahmen zur Gewässersanierung oder -restaurierung mit dem Ziel der Sicherung von Süßwasserressourcen sind technisch aufwendig, kostspielig und erfordern überdies erheblichen administrativen Aufwand. Diese Voraussetzungen sind in den meisten Entwicklungs- und Schwellenländern nicht gegeben. Aus diesem Grunde wären präventive Strategien in jeder Hinsicht ein günstigerer Ausweg, um eine Verschlechterung der Wasserqualität erst gar nicht eintreten zu lassen. Für die meisten Seen in den armen Ländern ist es dafür aber bereits zu spät. Es ist daher eine wichtige Aufgabe der Wissenschaft, auf der Grundlage von em-

¹⁵Die Trübung des Wassers kann als erster grober Parameter zur Abschätzung des Trophiegrads eines Gewässers dienen, unter der Voraussetzung, dass diese nicht auf mineralischen Schwebstoffen beruht. Sie kann sehr einfach durch das Versenken einer weißen Scheibe (der Secci-Scheibe) bestimmt werden. Durch eine statistische Analyse einer großen Anzahl von Einzelmessungen gemeinsam mit Chlorophyllgehalt und vertikalem Lichtabfall können verlässliche Aussagen über den Chlorophyllgehalt eines Gewässers und damit seines Trophiegrads gemacht werden (TILZER 1988).

pirischen Untersuchungen und realistischen Modellen kritische Belastungsgrenzen auch für wichtige Schadstoffe zu definieren. Diese könnten dann als Grundlage für erfolgreiche und Kosten sparende Managementstrategien dienen.

Literatur

- AL IBRAHIM A.A. (1991): Excessive use of groundwater resources in Saudi Arabia: Impacts and policy options. *Ambio* 20: 34-37.
- BROWN L.R. (2010): Aquifer depletion. In *The Encyclopedia of Earth*, Jan. 23, 2010. www.eoearth.org
- CHORUS I. & BARTRAM J. (1999): Toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring and management. Published on behalf of the World Health Organization. Spon Press, London.
- DILLON P. J. & F. H. RIGLER (1974): The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnol. Oceanogr.* 19: 767-773.
- ENGELMANN R., B. DYE & P. LEROY (2000): Mensch, Wasser. Report über die Entwicklung der Weltbevölkerung und die Zukunft der Wasservorräte. Hrsg. von der Deutschen Stiftung Weltbevölkerung, Balance Verlag, 123 pp.
- FALKENMARK M. (1997): Meeting water requirements of an expanding population. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 352: 929-936.
- GÄCHTER R. & O.J. FURRER (1972): Der Beitrag der Landwirtschaft zur Eutrophierung der Gewässer in der Schweiz. I. Ergebnisse von direkten Messungen im Einzugsgebiet verschiedener Vorfluter. *Schweiz. Z. Hydrologie* 34: 41-70.
- GLEICK, P. H. (ed.) (1993): *Water in Crisis. A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Oxford University Press, Oxford. 473 pp.
- HERDENDORF C. E. (1990): Distribution of the world's large lakes. In: TILZER M. M. & C. SERRUYA (eds.): *Large Lakes. Ecological Structure and Function*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York: 3-38.
- HULTBERG H. & S. HULTENGREN (1999): Lake Gårdsjön: Site for research into air pollution and ecosystems. English translation: Malcolm Berry ; Gårdsjöstiftelsen. - Stockholm : Institutet för vatten- och luftvårdsforskning (IVL); Stenungsund : Naturcentrum, 1999. 24 pp.
- KHAN T.A. & ANSARI A.A. (2005): Eutrophication: An ecological perspective. *The Botanical Review* 71: 449-482.
- IGKB (INTERNATIONALE GEWÄSSERSCHUTZ-KOMMISSION FÜR DEN BODENSEE) (2009): *Limnologischer Zustand des Bodensees. Bericht Nr. 27*, 100 pp.
- JASSBY A. D., J. E. REUTER R. P. AXLER, C. R. GOLDMAN & S. H. HACKLEY (1994): Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus in the annual nutrient load of Lake Tahoe (California-Nevada). *Water Resources Research.* 30(7): 2207-2216.
- LEISINGER K.M. (2000): Die sechste Milliarde. Weltbevölkerung und nachhaltige Entwicklung. C. H. Beck, München. 362 pp.
- MICKLIN P. (2007): The Aral Sea disaster. *Annu. Rev. Planet. Sci* 2007: 47-72.
- POSTEL S. (2003): *Rivers for life: Managing water for people and nature*. Island Press, Washington, D.C.
- RUTTNER F. (1962): *Grundriss der Limnologie*, 3. Auflage., Walter de Gruyter & Co., Berlin. 332 pp.
- SCHINDLER D. W. (1988): Effects of acid rain on freshwater ecosystems. *Science* 239: 149-157.
- THIENEMANN A. (1928): Der Sauerstoff im eutrophen und oligotrophen See. Ein Beitrag zur Seetypenlehre. *Die Binnengewässer* 4, 175 pp.
- TILZER M. M. (1988): Secchi disk - chlorophyll relationships in a lake with highly variable phytoplankton biomass. *Hydrobiologia* 162: 163-171.
- TILZER M. M. (2001): Die synergistische Wirkung von Wasserverknappung und Wasserverschmutzung – Ein Kernproblem des 21. Jahrhunderts. In F. Brickwedde [Ed.] *Wasser im 21. Jahrhundert – Perspektiven, Handlungsfelder, Strategien*. 6. Internationale Sommerakademie St. Marienthal, Deutsche Bundesstiftung Umwelt: 65-84
- TILZER M. M. (2008): Überbevölkerung und demographische Schrumpfung. Eine Herausforderung für das Überleben der menschlichen Zivilisation. In Herzog-Schröder, G., Gottwald, F.-Th. & Walterspiel, V. [Eds.], *Fruchtbarkeit unter Kontrolle? Zur Problematik der Reproduktion in Natur und Gesellschaft*. 19-56.
- TILZER M. M., BEESE, B. (1988): The seasonal productivity cycle of phytoplankton and controlling factors in Lake Constance. *Schweiz. Z. Hydrol.* 50/1: 1-39.
- TILZER M. M., U. GAEDKE, A. SCHWEIZER, B. BEESE & T. WIESER (1991): Interannual variability of phytoplankton productivity and related parameters in Lake Constance: No response to decreased phosphorus loading? *J. Plankton Res.* 13: 755-777.
- UNITED STATES CENSUS BUREAU (2011): *International data basis. World population information*. www.census.gov.
- VOLLENWEIDER R. A. (1968): *Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication*. Paris, Rep. OECD, DAS/CSI/68, 27, 192 pp. *Bibliographie*: 61 pp.
- VOLLENWEIDER R. A. (1975): Input-output models, with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweiz. Z. Hydrol.* 37: 53-84.
- VOLLENWEIDER R. A. (1976): Advances in defining critical levels for phosphorus in Lake Eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 33: 53-83.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (1997): *Welt im Wandel. Wege zu einem nachhaltigen Umgang mit Süßwasser*. Springer, Berlin. 419 pp.

*Prof. Dr. Max M. Tilzer
Universität Konstanz
Aquatische Ökologie, Fachbereich Biologie
D-78457 Konstanz
max.tilzer@t-online.de*