

2.7 Versalzung von Gewässern

HEIKE ZIMMERMANN-TIMM

SALINIZATION OF INLAND WATERS: *Salinization is caused by natural factors (e.g. the soil content of catchment areas, atmospheric deposition and climate) and by anthropogenic activities (e.g. agriculture and mining). Some consequences are the increase of salt content, and the enrichment of single toxic ions. Aquatic organisms are adapted to freshwater, marine and brackish environments; they use different energy-consuming mechanisms to regulate the ion concentrations. With an increase in salinization the number of organisms increases but there is a decrease in diversity. Extremely saline environments are dominated by micro-organisms; this is the reason why we find relatively short food chains, low turnover rates and differences in matter flux in these environments. Nutrient-rich environments with low oxygen concentrations result. Investigations of salted rivers showed that desalinization is possible if the causes of the salinization are halted - this means in many cases the implementation of technical developments (e.g. irrigation in agriculture; leaching procedures in mining). Freshwater is the most important resource for life and deficiencies can result in economic and social conflicts.*

Sämtliche Binnengewässer der Erde, dazu gehören auch salzreiche Binnengewässer, bedecken weniger als 2% der Erdoberfläche, also ca. $2,5\text{--}2,8 \times 10^6 \text{ km}^2$ (MEYBECK 1995). Die darin enthaltene Wassermenge beträgt etwa $2,8 \times 10^5 \text{ km}^3$; sie ist ungleichmäßig über die Kontinente verteilt.

Der Untergrund des Einzugsgebietes mit Karbonat oder Silikat, die atmosphärische Deposition und das Klima wirken auf den Wasser- und Stoffhaushalt. Das Klima ist die wichtigste natürliche Einflussgröße. Übersteigt der Niederschlag im humiden Klima die Verdunstung, kommt es zu einer »Verdünnung«. Im ariden Klima ist dagegen die Verdunstung größer, Wasser wird »eingeeengt« und es kommt zur Aufsalzung. Daneben kann sich die Konzentration der Ionen im Wasser als Folge anthropogener Einträge vergrößern. »Anomalien« kommen aber auch in Braungewässern durch die Bindung der Kationen an Huminstoffe sowie in küstennahen Seen durch Eintrag von Gicht und Salz aus dem Meerwasser vor. Manche Binnengewässer sind salziger als das Meer. Organismen, die an diese – aus menschlicher Sicht – extremen Umweltbedingungen angepasst sind, werden je nach ihrem Salzbedürfnis als gemäßigt bis extrem halophil – salzliebend – bezeichnet, wobei das Ausmaß der Halotoleranz zusätzlich auf das Spektrum der potentiell erschließbaren Lebensräume Einfluss nimmt. Wenn auch auffällige makroskopische Standorte wie Salzseen, salzhaltige Quellen, Meerwassersalinen eher selten sind, so ist doch zu bedenken, dass nach geologischen Befunden saline Gewässer einst sehr große Gebiete bedeckten und die Evolution halotoleranter und halophiler Organismenformen begünstigt haben. Salzhaltige Standorte und halophile Organismen hat man insofern bisher zu Unrecht vergleichsweise wenig beachtet.

Salzgehalt

Der Salzgehalt, auch Salinität genannt, ergibt sich aus der Summe der im Wasser gelösten Ionen - den Kationen Na-

trium (Na^+), Kalium (K^+), Magnesium (Mg^{2+}), Calcium (Ca^{2+}) sowie den Anionen Chlorid (Cl^-), Sulfat (SO_4^{2-}), Karbonat (CO_3^{2-}). Die Salinität wird üblicherweise als Salzkonzentration [mg/l], Prozent [%] oder Leitfähigkeit [mS/cm] angegeben. Binnengewässer weisen ein sehr breites Konzentrationsspektrum von wenigen bis hin zu fast 330.000 Milligramm Salz je Liter Wasser auf; der globale Mittelwert liegt bei 120 Milligramm Salz je Liter (WETZEL 1983). Eine Klassifikation der Binnengewässer folgt nach dem Grad der Salinität – drei Systeme seien an dieser Stelle dem Salzgehalt zugeordnet (Tab. 2.7-1).

Ursachen und Probleme

Unter Versalzung versteht man einen Anstieg der Salinität auf Grund natürlicher oder anthropogener Einflüsse. Nach TOWNSEND & HILDREW (1994) SOWIE PICKET & WHITE (1985) handelt es sich hierbei um eine Störung, die eine Veränderung der Umweltbedingungen und damit einhergehend eine Veränderung der biologischen Lebensgemeinschaft bedingt.

Die Versalzung von stehenden und fließenden Gewässern kann natürlich oder auch anthropogen begründet sein:

- Einleitung von Abwässern, beispielsweise Bergbauabwässern aus chlorid- und sulfathaltigen Nebengesteinen oder Abwässern von Kommunen, Industrie und Landwirtschaft,
- Bewässerung in Trockengebieten zur landwirtschaftlichen Nutzung bei fehlender Entwässerung,
- Ersatz flachwurzelter Steppenpflanzen durch tiefwurzelter Kulturpflanzen, wobei Salze an die Oberfläche gelangen können (WILLIAMS 1987),
- Fehlen / Verkleinern von Zu- und Abfluss,
- Klimatische Veränderungen gekoppelt mit einer erhöhten Verdunstung und geringeren Niederschlägen,
- Schwefeleinträge über SO_2 aus fossilen Brennstoffen und
- Tausalze (NaCl , MgCl_2).

Während der Gesamtsalzgehalt und die Ionenzusammensetzung in den Binnengewässern der Erde sehr unter-

Tab. 2.7-1: Klassifikation der Binnengewässer (nach HAMMER 1986). Die Zahlen der rechten Spalte geben den Salzgehalt in g/l für die jeweilige Höchstgrenze der Kategorie an

Redeke-Välikangas (1933)	Venedig-System (1959)	Beadle (1943), GAMMER et al. (1983)	Salzgehalt [g/l]
Süßwasser	Süßwasser	Süßwasser	0,5
oligohalin		subsalin	3,0
	oligohalin		4,0
α -mesohalin	mesohalin		8,0
β -mesohalin			16,5
		hyposalin	20,0
polyhalin	polyhalin		30,0
	euhalin		40,0
	> 40	mesosalin	50,0
	hyperhalin	hypersalin	>50,0

schiedlich sind, weist das Meerwasser überall einen relativ konstanten Salzgehalt auf. Auch die Ionenzusammensetzung ist in allen Meeren gleich, wobei Natrium- und Chloridionen dominieren. Eine meerwasserähnliche Ionenzusammensetzung wird als thalassisch, eine unähnliche als athalassisch bezeichnet. Athalassische Gewässer sind dadurch gekennzeichnet, dass sie in jüngster geologischer Vergangenheit keine Verbindung zum Meer hatten, oder dass sie nach der marinen Phase ausgetrocknet waren, bevor sie wieder überflutet wurden.

Im Gegensatz zu den Bewohnern mariner Lebensräume, die eine konstante Salinität vorfinden, stellen für die Organismen in Binnengewässern die starken Schwankungen des Gesamtsalzgehaltes und der Ionenzusammensetzung ein großes Problem dar. Die Wirkung des Salzes beruht neben der Veränderung des osmotischen Druckes auch auf der Toxizität einzelner Ionen.

Biologische Wirkung der Versalzung und Anpassung der Organismen

Die im Abschnitt Salzgehalt angeführten Ionen sind zu den »konservativen« Substanzen zu rechnen, die von den Organismen nicht oder in nur geringer Menge im Vergleich zum Angebot benötigt werden. Um im aquatischen Lebensraum existieren zu können, müssen Lebewesen über die Fähigkeit verfügen, Unterschiede in der Ionenkonzentration von Körperflüssigkeit und Umgebungswasser auszugleichen oder innerhalb eines gewissen Bereichs einigermaßen konstant zu halten. Entsprechend werden folgende Organismengruppen unterschieden:

- Poikilosmotische Organismen, Meerwasserbewohner – Ionenkonzentration der Körperflüssigkeit passt sich dem Umgebungswasser an,
- Hypertonische Organismen, Süß- und Brackwasserbewohner – Ionenkonzentration der Körperflüssigkeit liegt über der des Umgebungswassers,

- Hypotonische Organismen, Bewohner hypersaliner Lebensräume – Ionenkonzentration der Körperflüssigkeit liegt unterhalb der des Umgebungswassers.

Die Regulation der Konzentration der Körperflüssigkeit ist ein lebenswichtiger und oft energieaufwändiger Prozess. Der Regulationsaufwand steigt mit zunehmendem Salzgehalt an und er hat großen Einfluss auf die aquatische Biozönose. Eine Veränderung der Salinität des Umgebungswassers greift auf verschiedenen Ebenen in das Ökosystem ein, sie betrifft das Individuum und die Population in ihrer Existenz, ihrer Generationszeit und Reproduktionsfähigkeit sowie die gesamte Lebensgemeinschaft in ihrer Komplexität und Funktionsweise. Salzreiche Gewässer führen zu artenarmen, aber individuenreichen Lebensgemeinschaften – hinsichtlich der Individuendichte können auf Art-niveau betrachtet häufig Extremwerte erreicht werden. Mit zunehmender Salzkonzentration kommt es zum Ausfall von Arten und einer Zunahme salzresistenter Formen. Süßwasserorganismen können daher manchmal durch Einwanderer aus dem Brackwasser und dem Meer ersetzt werden. Häufig dominieren Bakterien und einzellige Organismen gegenüber mehrzelligen Organisationsformen im salzigen Lebensraum.

Procaryonten, Organismen ohne echten Zellkern, sind im Süßwasser und in hypersalinen Gewässern verbreitet. Es gibt Formen, die im Salzwasser oder im Süßwasser vorkommen und solche, die im Bereich starker Salzschwankungen leben, indem sie beispielsweise durch die Absonderung von Ectoin und Betain an diesen Lebensraum adaptiert sind. Gerade bei den Bakterien zeichnet sich jedoch häufig ab, dass deren Vorhandensein nicht unbedingt mit bakterieller Aktivität gleichzusetzen ist. Die Nitrifikation ist ein Beispiel für einen Abbauprozess, der mit steigender Salinität zurückgeht, obgleich man viele Nitrifikanten im Gewässer nachweisen kann.

Die Eucaryonten sind Pflanzen und Tiere mit echtem Zellkern und starker Kompartimentierung durch Membra-

nen. Innerhalb der Pflanzen wurden die Algen und hier vor allem die Kieselalgen (Diatomeen) besonders gut untersucht. Diese reagieren auf Änderungen der Salzkonzentration – bereits ab 100 Milligramm Chlorid je Liter (0,18 Promille) – mit einem Wechsel der Artenzusammensetzung. Indikatorarten für den Salzgehalt lassen sich in halophobe Arten (Süßwasseranzeiger) und halophile Arten (Salzwasseranzeiger) einteilen. Unter den in Salzgewässern vorkommenden Arten sind mesohaline Formen zu unterscheiden, die einen mäßig versalzen Lebensraum bevorzugen und jene, die im hyperhalinen Lebensraum, das heißt unter extrem versalzen Bedingungen leben können. Höhere Pflanzen reagieren auf Veränderungen der Salzkonzentration sehr viel empfindlicher. *Elodea canadensis* (kanadische Wasserpest) beispielsweise reduziert schon bei 100 Milligramm Chlorid je Liter (0,18 Promille) die Photosynthesenettoproduktion. Toxisch wirken auf die höheren Pflanzen vor allem Magnesium- und Kaliumchlorid (NOBEL & KOHLER 1978). Auch der Wasserhahnenfuß, *Ranunculus fluitans*, geht mit zunehmender Salzbelastung zurück.

Bei den tierischen Organismen hängt die Salztoleranz ähnlich wie bei den Pflanzen von der Organisationsform ab. Auch hier scheinen die einzelligen Lebewesen (Protozoen) sehr viel toleranter zu sein als die Vielzeller. Die kritische Verbreitungsgrenze scheint bei 5.000 Milligramm Chlorid je Liter Wasser (9 Promille) zu liegen. Besonders gut sind unter den Einzellern die Ciliaten untersucht; vor allem die freischwimmenden Formen eignen sich als Indikatoren, sie werden entsprechend ihrer Toleranz gegenüber der Salzlast in fünf Klassen eingeteilt. Auch vielzellige tierische Organismen reagieren sehr sensibel auf hohe Salzbelastungen, so können beispielsweise Schwämme, Moostierchen und Muscheln völlig verschwinden. Mehrere Fischarten gelten dagegen als unempfindlich gegenüber erhöhten Salzkonzentrationen. Dazu gehören z.B. die diadromen Arten, also Fische, die zum Laichen vom Meer ins Süßwasser wandern, wie der Lachs (*Salmo salar*) und die Meerforelle (*Salmo trutta* f. *trutta*) oder umgekehrt vom Süßwasser ins Meer, wie der Aal (*Anguilla anguilla*). Auch Barsche (*Tilapia*) werden als resistent eingestuft.

Salzreiche Lebensräume

Stehgewässer - Seen und Lacken

Natürliche Salzseen entstehen als Endseen oder vulkanische Seen in Verbindung mit salzführenden geologischen Schichten über dem Grundwasser, die beim Austrocknen sogenannte Salzpfannen hinterlassen. Salzreiche Zuflüsse, geringe Niederschläge sowie eine große Verdunstung können ihre Entstehung begünstigen.

In manchen Seen ist das **Tiefenwasser** (Hypolimnion) nicht nur thermisch sondern auch chemisch isoliert vom Metalimnion. In diesem Falle weist es einen höheren Salzgehalt als die darüber liegenden Wasserschichten auf. Der dadurch bedingte Dichtegradient ist oftmals größer als der thermische und verhindert ganzjährig eine vollständige Durchmischung (Vollzirkulation) des Wasserkörpers. Solche als meromiktische Seen bezeichnete Gewässer weisen eine nicht durchmischte Wasserschicht – ein Monimolimnion – auf, die auf Grund der fehlenden Zirkulation häufig einen Ort erhöhter Nährstoffkonzentrationen, aber eines geringen Sauerstoffgehaltes oder gar Sauerstoffmangels darstellt.

Salzlacken oder Sodalacken, wie sie beispielsweise im Osten Österreichs im Seewinkel aber auch in Ungarn sowie Asien und Ostafrika vorkommen, enthalten auf Grund salzhaltiger Sedimente große Mengen an Natriumkarbonat (Soda), sie werden von Regen und/oder Grundwasser gespeist und unterliegen damit saisonalen Veränderungen. Als seichte Mulden, 30–50 cm tief, können solche Lacken ohne Grundwasseranbindung austrocknen und es bedarf starker Niederschläge, um sie wieder aufzufüllen. Im Seewinkel weisen Weiße Lacken mit hohen Sodaanteilen kaum Pflanzenwuchs und viele Schwebpartikel auf; die Schwarzen Lacken, die stark bewachsen sind, enthalten organisches Material und wenig Soda.

Die **anthropogen bedingte Versalzung** von Binnenseen und ihre Folgen soll am Beispiel des **Aralsees**, des **Toten Meeres** und des **Tschadsees** erläutert werden.

Der **Aralsee**, der durch die Flüsse Amu-Darja und Syr-Darja gespeist wird, war mit einer Fläche von 68.000 km² bis zum Jahre 1960 der viertgrößte Binnensee der Erde. Heute existiert er praktisch nicht mehr. Grund sind das Abzweigen von Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung und die Verdunstung, die zu einer starken Aufsalzung des verbleibenden Wassers führen. Eine ausführliche Darstellung der Problematik folgt in Kap. 2.9.

Ein anderes Beispiel ist das **Tote Meer**, das im nördlichen Teil des afrikanisch-syrischen Grabenbruchs liegt und etwa 320 m Tiefe aufweist. Es liegt in einem abflusslosen Becken, etwa 392 m unter dem Meeresspiegel. Sein Wasser ist eine fast gesättigte Salzlösung mit etwa 330 g Salz pro Liter. Als Anion überwiegt Chlorid, als Kation Magnesium. Der Zufluss durch den Jordan überlagerte früher das Seewasser von Norden her auf Grund seiner geringeren Dichte. Die Überlagerung verhinderte eine tief reichende vertikale Zirkulation. Durch zunehmende Nutzung des Flusswassers für Bewässerungszwecke kommt dieser Prozess heute zum Erliegen und seit 1979 konnte erstmals eine Vollzirkulation registriert werden.

Der **Tschadsee**, der an der südlichen Grenze der Sahara liegt, hat infolge der Saheldürre seit 1970 etwa 50 % seines mittleren Zuflusswassers verloren, bei einem

Niederschlagsverlust von etwa 25%. Gegenwärtig weist er je nach Jahreszeit eine Fläche von 10.000–20.000 km² auf. Ein eindeutiger Zusammenhang mit der globalen Klimaänderung liegt nicht vor. In jedem Fall trägt auch hier die landwirtschaftliche Bewässerung zu einer Reduktion des Wasservolumens bei.

Fließgewässer – Flüsse und Ästuarie

Fließgewässer haben einen natürlichen Salzgehalt, der im wesentlichen durch Boden und Klima über Niederschlag und Verdunstung geprägt ist. Im gezeiten-beeinflussten Mündungsbereich der Flüsse, in den **Ästuaren**, steigt der Salzgehalt meistens vehement an und bedingt in Abhängigkeit des Flutstromes einerseits und des Oberwasserabflusses andererseits den Salzgehalt. In diesem Übergangsbereich können sich vor allem hypertonische Organismen behaupten – limnische und marine Formen, die über einen engen ökologischen Toleranzbereich verfügen, sterben in Folge des veränderten Salzgehaltes ab. Dies kann, verbunden mit der langen Verweilzeit des Wasserkörpers im ästuarinen Lebensraum, während der warmen Sommermonate zu Sauerstoffdefiziten führen.

Die **anthropogen bedingte Versalzung von Fließgewässern** soll am Beispiel der **Werra-/Weser-Region** (Deutschland) erläutert werden. Die Versalzung dieser Flüsse ist auf Abwässer der Kaliindustrie zurückzuführen. Vor allem nach 1968 wurde durch ein direktes Einleiten von salzreichen Abwässern in die Werra eine erhöhte Salzkonzentrationen nachgewiesen – bis zu 40 Gramm Chlorid wurden je Liter Wasser (72,26 Promille) gemessen. Daraus ergab sich eine Artenverarmung der Flussfauna und –flora. Die »unharmonische« Ionenzusammensetzung mit hohen K⁺ oder Mg²⁺ Gehalten und starken Konzentrationsschwankungen infolge von unregelmäßigen Einleitungen wirkten toxisch. In manchen stark versalzten Gebieten hatten sich Meeres- und Brackwasserorganismen wie beispielsweise der Flohkrebs *Gammarus tigrinus*, die Grünalge *Enteromorpha intestinalis* und die Kieselalge *Chaetoceros mülleri* ausgebreitet. Geänderte technische Maßnahmen sowie Betriebsstillegungen führten zu einer Reduktion der Salzlast Ende der 1990er Jahre. Inzwischen nehmen vielerorts die Süßwasserorganismen wieder zu, und man kann eine zunehmende Artendiversität bemerken.

Nahrungsgefüge

Mit zunehmender Salzbelastung kommt es zum Ausfall von Arten und entsprechend weniger komplex und kurz geschlossen ist das Nahrungsgefüge – das heißt, Salzseen weichen in ihrem Nahrungsgefüge vom Normaltyp ab.

Sodaseen, beispielsweise der Nakuru See in Kenia, umfassen als Primärproduzenten fast ausschließlich die

Blaualge *Spirulina platensis*. Diese Alge ist in diesem sehr flachen See für den Kleinen Flamingo (*Phoenicomaia minor*), der dort in riesigen Schwärmen auftritt und die Nahrung mit dem Schnabel abseilt, ein ausgezeichnetes Futter. Der Flamingo teilt sich die Nahrung zu gleichen Teilen mit dem Buntbarsch *Tilapia oreochromis*, der die Algen ebenfalls direkt aufnimmt. Alle weiteren Konsumenten der Primärproduktion sind von geringer Bedeutung, so dass wir im Nakuru-See die nicht häufigen Nahrungsketten Algen-Fische und Algen-Vögel finden.

In stark salzigen natriumchloridhaltigen Seen, wie im Great Salt Lake, Utah (USA), und in Salinen ist die Lebensgemeinschaft vorwiegend auf Bakterien, die Geißelalge *Dunaliella salina* und den bis zu 15 mm großen Salinenkrebse *Artemia* beschränkt. Auch hier liegt wiederum ein sehr einfaches Nahrungsgefüge vor, ähnlich wie für die Sodalacken in der österreichisch-ungarischen Tiefebene.

Regeneration versalzter Gewässer nach Reduktion der Salzlast

Die Regeneration versalzter Gewässer nach Rückgang der Salzlast ist möglich. Sie erfolgt relativ langsam über Jahre hinweg und hängt von der Wassererneuerungszeit ab – je kürzer diese ist, um so schneller kommt es zur Reduktion der Salzlast. Somit ist in Fließgewässern im Vergleich zu Seen ein Ausdünnen in kürzerer Zeit zu erwarten. Davon abgesehen sind Fließgewässer dadurch begünstigt, dass Organismen aus unbeeinflussten Flussabschnitten, zum Beispiel oberhalb der Salzeinleitung, über die Organismendrift oder aktive Wanderung stets nachgeliefert werden und somit rasch eine Besiedlung des Flusses stattfinden kann.

Schlussbetrachtung

Die Zunahme der Weltbevölkerung sowie die Zunahme des Lebensstandards werden die sozialen Konflikte um das Medium Wasser erhöhen. Daher ist ein sorgfältiger Umgang mit dieser Ressource auf verschiedenen Ebenen notwendig – im Haushalt, in der Landwirtschaft und in der Industrie. Wohlüberlegter und maßvoller Einsatz werden an Bedeutung gewinnen müssen und damit einhergehend sind technische Entwicklungen wie beispielsweise in der landwirtschaftlichen Produktionstechnik, aber auch im Bergbau bei Laugungsverfahren oder der Lagerung von Abraum erforderlich. Reversibel scheint der Zustand der von der Kaliindustrie verunreinigten Gewässer im Wesereinzugsgebiet, aber am Beispiel des Aralsees wird uns klar, dass die Versalzung auch irreversible Zustände bedingen kann, die sich nicht nur im Verlust biologischer Vielfalt und Funktionsfähigkeit äußern, sondern auch eine Vielzahl unvorhersehbarer sozialer Konflikte nach sich ziehen ♦