



Wie funktioniert ein See?

Zur Limnologie von Seen

1	Was ist ein See?	2
2	Was ist Wasser?	2
	2.1 Das Wassermolekül	2
	2.2 Wasser ist bei 4 °C am schwersten	2
	2.3 Wasser als Säure und als Base	3
3	Die Jahreszeiten	4
4	Sauerstoff	5
5	Der biologische Kreislauf	6
6	Nährstoffkreislauf (Phosphor und Stickstoff)	8
	6.1 Phosphor steuert das Algenwachstum	8
	6.2 Verschiedene Formen des Stickstoffs	9
7	Fische	10
8	Sanierungsmassnahmen	12
	8.1 Siedlungsentwässerung	13
	8.2 Landwirtschaft	13
	8.3 See-interne Sanierungsmassnahmen	14
9	Referenzen	15

1 Was ist ein See?

Nach dem bekannten Limnologen des 19. Jahrhunderts, A. Forel, ist ein See "ein Reservoir, in dem sich Wasser aus oberirdischem Abfluss sammelt, in einer Senke im Boden, in einem Becken ausgebildet im Erdmantel oder gestaut hinter einem Damm". Zur Abgrenzung gegenüber Teichen, Weihern und Tümpeln wird der Begriff See heute häufig enger gefasst: Seen sind stehende Gewässer, die so tief sind, dass in regelmässigen zeitlichen Abständen aufgrund der Wärmeeinstrahlung von oben oder durch den Wärmeverlust in der kalten Jahreszeit zwei verschiedene warme Wasserkörper entstehen, zwischen denen der Gas-, Nährstoff- und Wärmetransport eingeschränkt ist.

2 Was ist Wasser?

Wasser ist ein ganz spezieller Stoff. Nur die Kenntnis seiner sehr spezifischen Eigenschaften erlaubt es uns das Verhalten der Seen zu verstehen.

2.1 Das Wassermolekül

Für Chemiker ist Wasser H_2O . H_2O -Moleküle sind Teilchen mit asymmetrischer Ladungsverteilung, die sich elektrostatisch leicht an andere Stoffe binden (polare Eigenschaft des Wassers). Wasser löst und transportiert Salze und Nährstoffe, aber auch Schadstoffe sowie Gase, z.B. Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid (CO_2). Letzteres wird in Verbindung mit einem Wassermolekül auch zu einer schwachen Säure. Ohne Sauerstoff gäbe es auch im Wasser keine höheren Lebensformen.

2.2 Wasser ist bei 4 °C am schwersten

Wenn die Temperaturen sinken, werden die meisten Stoffe immer dichter. Wasser ist die grosse Ausnahme: Es ist bei 4 °C am schwersten (Abbildung 1). Unter 4 °C wird es wieder leichter. In fester Form beansprucht es wesentlich mehr Raum als in flüssiger Form – auch das ist ungewöhnlich. Bei 0 °C beträgt die Dichte von reinem Eis 0.9168 g/cm^3 und diejenige von flüssigem Wasser $0,99987 \text{ g/cm}^3$. Daher schwimmt Eis auf dem Wasser. Wäre es umgekehrt, würden die stehenden Gewässer unserer Breiten im Winter von unten nach oben zufrieren. Da das schwerste Wasser nach unten sinkt, liegt die Temperatur in der Tiefe der Seen häufig bei 4 °C oder etwas darüber; denn die Erdwärme heizt das Tiefenwasser auch auf.

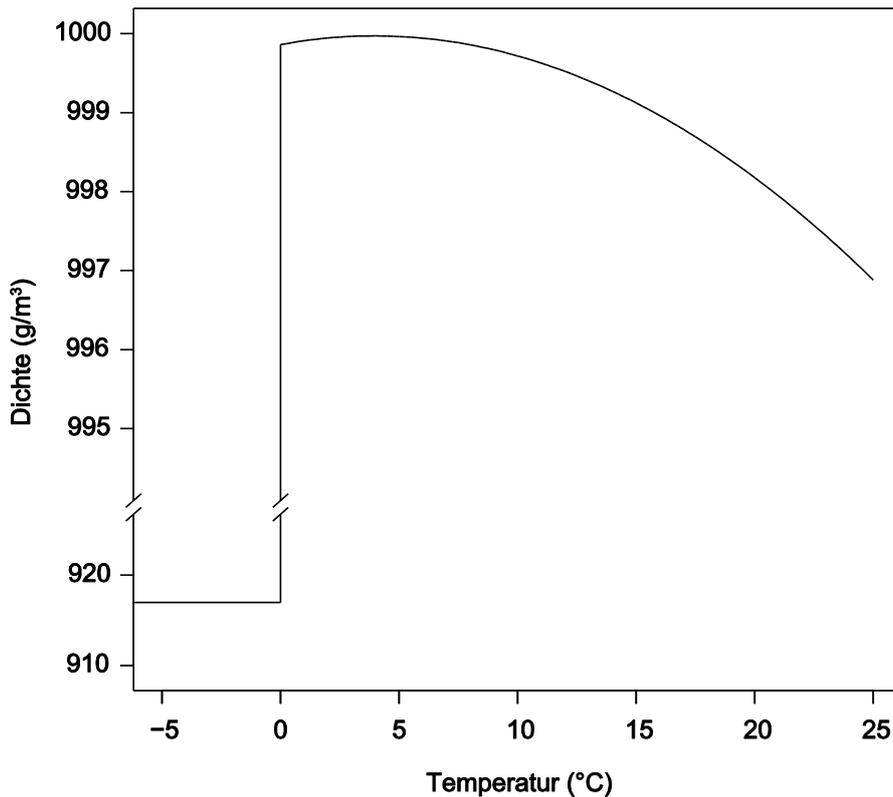


Abbildung 1 Die Dichte reinen Wassers ist abhängig von der Temperatur

2.3 Wasser als Säure und als Base

Säuren und Basen reagieren mit dem Wasser und bestimmen damit auch die Lebensräume der Pflanzen und Tiere in den Seen. Auch der Transport von Stoffen – beispielsweise Carbonaten – wird dadurch beeinflusst. Säuren sind Moleküle, die im Wasser dissoziieren. Dissoziieren heisst: die Säure spaltet sich auf in einen negativ geladenen und einen positiv geladenen Molekülteil. Die Abspaltung von H^+ -Ionen wird Protolyse genannt (die H^+ -Ionen entsprechen Protonen). Die polaren Eigenschaften des Wassers unterstützen diesen Vorgang der Protolyse. Das H^+ -Ion bindet sich an ein Wassermolekül (H_2O), das mit weiteren Wassermolekülen einen positiv geladenen Verbund bildet. Je mehr solch positiv geladene Verbände das Wasser enthält, desto saurer ist es. Mass für den Säuregehalt des Wassers ist der pH-Wert. pH 7 ist neutral, Werte unter 7 bezeichnen saures Wasser, Werte oberhalb 7 basisches Wasser.

Auch das Wassermolekül selbst kann dissoziieren. Dabei entstehen ein H^+ -Ion und ein OH^- -Ion. Wenn nun eine Base – bestehend aus Molekülen, die H^+ -Ionen an sich binden können – ins Wasser gelangt, sind die OH^- -Ionen in der Überzahl und das Wasser wird basisch.

CO_2 löst sich im Wasser. Ein kleiner Teil davon bildet mit H_2O Kohlensäure H_2CO_3 . Reines Wasser, dessen Gas-Austausch mit der Atmosphäre – diese enthält 0,038% CO_2 – im Gleichgewicht steht, ist deshalb leicht sauer. Der pH-Wert würde knapp unter 6 liegen.

Für die meisten Gewässerorganismen unserer Breiten ist der Bereich von pH 6 bis 9 unproblematisch. In der Schweiz gibt es aber viele Einzugsgebiete mit kalkhaltigen Mineralien. Wenn diese verwittern, lösen sich Karbonate im Wasser. Diese dämpfen die pH-Schwankungen des Wassers. Die Wasserlebewesen haben sich daran gewöhnt, und so liegt der optimale pH-Bereich für sie eher zwischen pH 7.5 und 8.5.

3 Die Jahreszeiten

Während der warmen Jahreszeit wird der See durch die erhöhte Sonneneinstrahlung von oben her erwärmt (Abbildung 2). Das Oberflächenwasser dehnt sich wie alle erwärmten Substanzen etwas aus, das heisst seine Dichte nimmt ab und es schwimmt auf dem kühleren Tiefenwasser. Die obere, wärmere Schicht, Epilimnion genannt, wird im Verlauf des Sommers weiter aufgeheizt und weitet sich nach unten aus. Die Winde erfassen und mischen nur noch diese obere Schicht. Wellen zwischen den beiden Schichten bewirken Turbulenzen an der Grenzlinie: es entsteht eine Zwischenschicht, Metalimnion genannt, die je nach Windeinfluss und Wärmeeinstrahlung mehr oder weniger ausgedehnt ist. Die Temperatur in dieser Schicht nimmt von oben nach unten stark ab. Das Tiefenwasser oder Hypolimnion ist gleichmässig kalt; in den Seen des Alpenrandes und -vorlandes liegt die Temperatur bei 4 bis 6 °C.

Mit fortschreitender Abkühlung im Herbst und Winter nimmt der Dichteunterschied vom Epilimnion zu Hypolimnion ab. Die Durchmischung der oberen Schicht erreicht je nach Geometrie des Sees und je nach Windeinfluss zunehmend auch grössere Tiefen und erfasst im Idealfall schliesslich den gesamten Wasserkörper. Der See ist dann in jeder Tiefe gleich warm (homotherm; Abbildung 2). Dieser Zustand der Vollzirkulation wird in kleineren, windexponierten Gewässern bereits im Herbst erreicht, in grossen, tiefen Seen häufig erst im Winter oder Frühjahr (siehe Kasten Vollzirkulation). Die Zirkulation ist wichtig für die Verteilung der Stoffe: Nährstoffe werden im zirkulierenden Wasserkörper gleichmässig verteilt und Sauerstoff wird von oben nach unten transportiert. Die Zeit, während der ein See aufgrund der Wärmezufuhr geschichtet ist, heisst Schichtungsperiode oder (Sommer-) Stagnationsphase.

Vollzirkulation: Die Vollzirkulation kann aus verschiedenen Gründen gelegentlich oder immer ausfallen. Das ist beispielsweise der Fall, wenn der See nur fast homotherm wird oder wenn die Windstärken nicht ausreichen. Ein dauernder Ausfall der Vollzirkulation ist häufig eine Folge temperaturunabhängiger Dichteunterschiede zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser bei gleichzeitig geringer Windexposition. Ursache der temperaturunabhängigen Dichteunterschiede sind Konzentrationsunterschiede gelöster Substanzen. Eine hohe Algenproduktion kann durch die Bindung von viel Kohlendioxid (siehe Kapitel Stoffhaushalt) eine Störung des chemischen Karbonatgleichgewichtes bewirken: Gelöstes Kohlendioxid ist im Wasser eine schwache Säure; wenn es durch die Algen aufgenommen wird, steigt der pH-Wert, das Wasser wird stärker basisch. Das Gleichgewicht von Hydrogenkarbonat/Karbonat ($\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$) verschiebt sich mehr Richtung Karbonat und wenn das Wasser genügend hart ist, d.h. genügend grosse Konzentrationen an Calciumionen (Ca^{2+}) enthält, fällt Kalzit (Calciumkarbonat) aus. Das Kalzit und die abgestorbene Biomasse sedimentieren; die Biomasse wird während des Sedimentationsvorganges abgebaut und setzt Kohlendioxid frei, der pH-Wert sinkt und das Kalzit wird wieder auflöst. Dies entspricht einem aktiven Transport von Calcium und Hydrogenkarbonat aus dem Oberflächen- ins Tiefenwasser: das Tiefenwasser wird wegen der grösseren Konzentration dieser Stoffe entsprechend dichter.

Anschliessend an die herbstliche Vollzirkulation kann im Winter bei einigen Seen eine inverse Schichtung beobachtet werden. Wenn sich die obersten Seeschichten unter 4 °C abkühlen, werden sie leichter und schwimmen auf dem wärmeren Wasser. Einige Seen zeigen deshalb auch zwei Zirkulationsperioden, eine erste im Herbst und eine zweite im Frühjahr (Abbildung 2).

Bei sehr flachen Seen kann das Epilimnion wegen der Wärmezufuhr durch Einstrahlung schon im Verlaufe des Sommers soweit wachsen, dass es die Sedimente erreicht. Je nach Windeinfluss wird das Wasser dann bereits im Sommer bis auf Grund durchmischt.

Schichtungs- und Durchmischungsverhalten eines Sees hängen von zahlreichen äusseren Faktoren ab. Dazu gehören nebst morphometrischen (Beckenform, Volumen und Tiefe) und geographischen (schützende Geländeformen, wie Berge, Inseln, Lage des Beckens zur Hauptwindrichtung, Höhe über Meer) auch meteorologische Faktoren (Windhäufigkeit und -stärke, Sonnenscheindauer). Die Vielfalt dieser äusseren Faktoren charakterisiert die Seen, und macht sie zu Individuen.

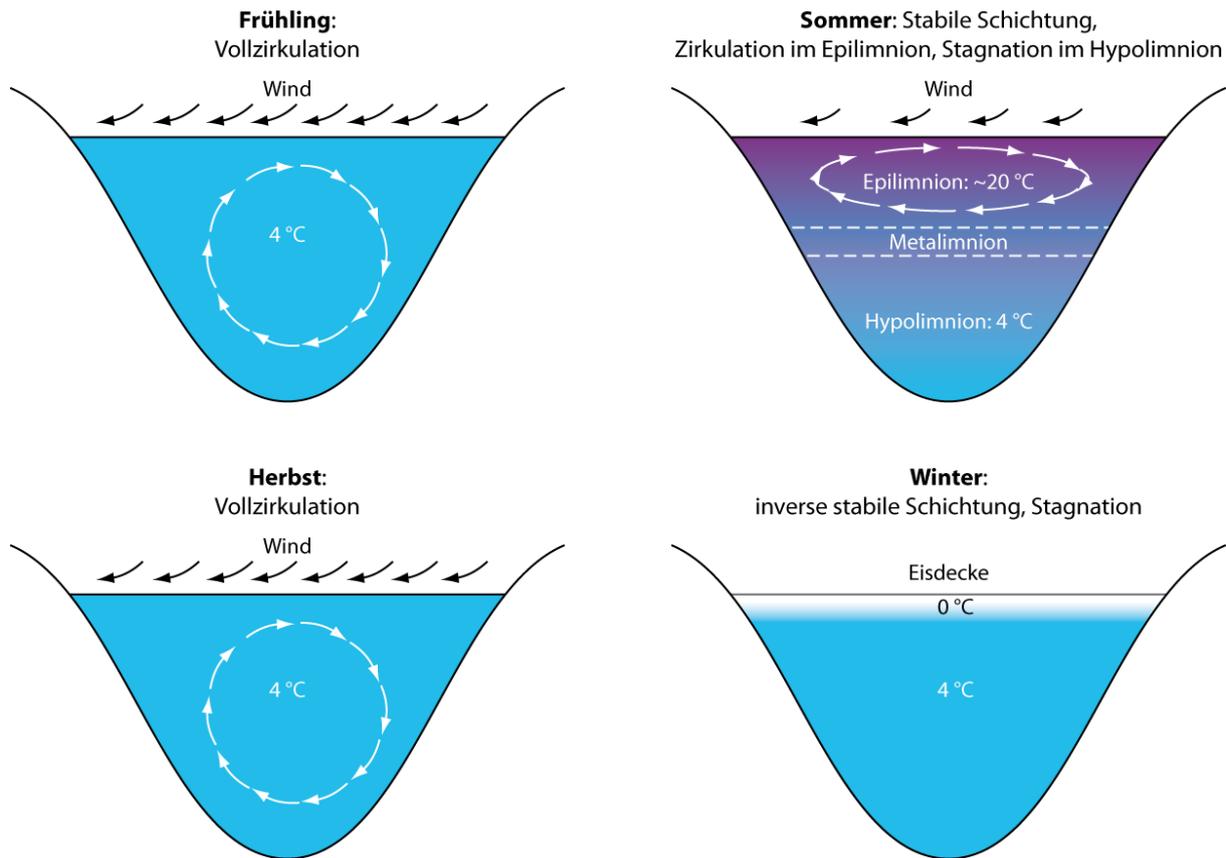


Abbildung 2 Saisonaler Verlauf des Schichtungs- und Zirkulationsverhaltens eines Sees.

4 Sauerstoff

Ohne Sauerstoff gibt es kein höheres Leben: Sauerstoff gelangt durch die Diffusion aus der Atmosphäre ins Wasser. Beschleunigt wird dieser Vorgang durch den Wind, der durch die im Wasser erzeugten Turbulenzen den Sauerstoffeintrag ins Wasser fördert. Da die Windenergie auch zu einer Durchmischung der Wassersäule führt, wird der Sauerstoff in die tieferen Wasserschichten transportiert. Zusätzlich wird der Sauerstoff durch sauerstoffreiche Zuflüsse bis in die Tiefe verfrachtet.

Die Photosynthese der Pflanzen und Algen liefert ebenfalls Sauerstoff (siehe Kapitel Der biologische Kreislauf). An sonnigen Tagen wird viel Sauerstoff produziert. Falls mehr Sauerstoff im Wasser gelöst wird, als das aufgrund der physikalischen Rahmenbedingungen (Temperatur und Luftdruck) normalerweise der Fall ist, führt dies zu einer Sauerstoffübersättigung, insbesondere wenn bei ruhigem Wetter der Sauerstoff nicht schnell genug durch die Wasseroberfläche in die Atmosphäre diffundieren kann.

Sauerstoff wird durch die Atmung verbraucht. Nicht nur Tiere und Mikroorganismen atmen, sondern auch Pflanzen und Algen. Bei eingeschränkter Photosynthese durch Lichtmangel nehmen diese darum Sauerstoff aus der Umgebung auf. In nährstoffreichen Seen mit erhöhter Algenproduktion kann die Sauerstoffkonzentration während der Nacht oder an trüben Tagen stark absinken.

Auch der Abbau abgestorbener Pflanzen und Tiere durch Mikroorganismen (Mineralisation) verbraucht Sauerstoff (siehe Kapitel Nährstoffkreislauf, Phosphor und Stickstoff). Da im Sommer und Herbst kaum Sauerstoff ins Tiefenwasser gelangt (siehe Kapitel Die

Jahreszeiten), kann in nährstoffreichen Seen der Sauerstoffvorrat im Tiefenwasser aufgebraucht werden. In manchen nährstoffreichen Seen kann auch im Metalimnion ein erhöhter Sauerstoffverbrauch durch die Mineralisation entstehen, was zu einem metalimnischen Sauerstoffminimum bzw. -defizit führen kann.

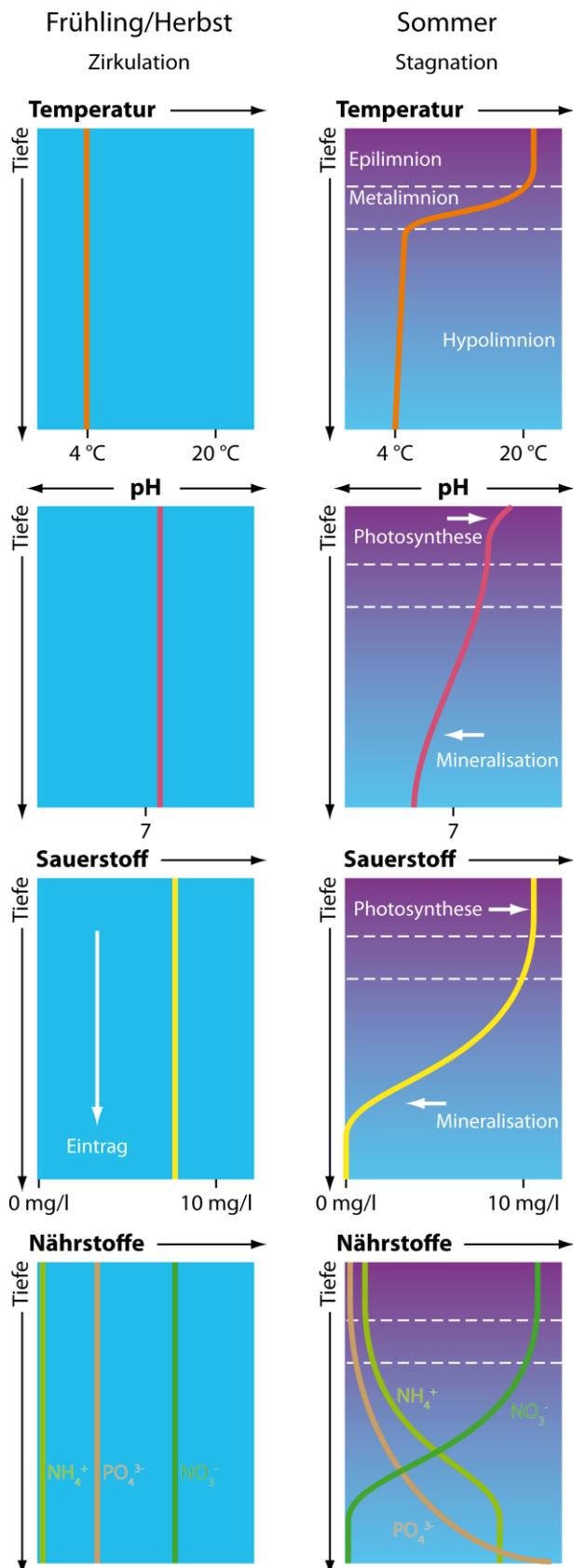
5 Der biologische Kreislauf

Von entscheidender Bedeutung für den Zustand und die Entwicklung eines stehenden Gewässers und damit auch für dessen Stoffhaushalt ist die Vegetationsperiode. Produzenten sind die grünen Pflanzen und die in Seen freischwebenden, kleinen Algen (Phytoplankton). Sie benötigen Wasser, Nährstoffe und Kohlendioxid zum Aufbau von organischem Material, bestehend aus Zucker, Stärke und Cellulose (Primärproduktion). Sie entnehmen das Kohlendioxid dem Wasser in Form von CO_2 oder HCO_3^- . Als "Abfallprodukte" werden dabei Sauerstoff (O_2) und Hydroxyl-Ionen (OH^-) freigesetzt. In Abhängigkeit von der Produktionsintensität steigen daher Sauerstoff-Konzentration und pH-Wert mehr oder weniger stark an (Abbildung 3). Die Algenproduktion ist abhängig von Licht und Wärme und ist daher während der Stagnationsphase meist besonders ausgeprägt. Das Licht ist für das Algenwachstum jedoch nur in den obersten Schichten intensiv genug; die Primärproduktion beschränkt sich daher weitgehend auf das Epilimnion. Bei Seen mit geringer Produktion ist das Wasser in den obersten Schichten meist weniger trüb und das Licht erreicht dann auch tiefere Wasserschichten.

Der Abbau von organischem Material verantwortlich wird von Konsumenten und Destruenten durchgeführt. Die Konsumenten ernähren sich überwiegend von lebendem organischem Material. Zu ihnen gehören praktisch alle tierischen Organismen im See: die im Wasser freischwebenden Tiere (Zooplankton), Fische und schliesslich die Fauna des Gewässergrundes. Die Destruenten, vor allem Bakterien und Pilze, leben überwiegend von totem organischem Material; bei diesem Abbau werden Sauerstoff oder bei Sauerstoffmangel andere Oxidationsmittel, wie z.B. Nitrat, verbraucht (Abbildung 3). Ein grosser Teil des Primärproduktes wird innerhalb des Epilimnions umgesetzt und abgebaut. Die dabei freigesetzten Nährstoffe stehen den Primärproduzenten erneut zur Verfügung.

Das meist schmale Metalimnion kann aufgrund des grossen Temperatur- und Dichteunterschiedes zu einer Sedimentationsbarriere werden; kleinere Partikel und Organismen sind zu leicht und dringen nicht ins schwerere Hypolimnion ein; es kommt zur Akkumulation organischen Materials. Falls genügend Licht in diesen Bereich eindringt, ist sogar eine lokal erhöhte Produktion mit Sauerstoffüberschuss möglich. Da aber auch Destruenten gehäuft auftreten, wird bei stärker belasteten Seen im Herbst aufgrund des verstärkten Abbaus häufig ein lokales Sauerstoffdefizit beobachtet (metalimnisches Minimum).

Der nicht abgebaute Rest des Primärproduktes sinkt in das Hypolimnion ab und wird dort unter Sauerstoffverbrauch – solange wie der im Frühjahr eingebrachte Sauerstoffvorrat reicht – weiter abgebaut (Abbildung 3). Bei grosser Primärproduktion oder kleinem Hypolimnion kann dies zu vollständigem Sauerstoffschwund in der Tiefe führen. Der weitere Abbau ohne Sauerstoff unter Verwendung anderer Oxidationsmittel (anaerober Abbau) führt zur Anreicherung von reduzierten Verbindungen – Ammonium, Schwefelwasserstoff, Methan, etc. – die zum Teil giftig sind. Zusätzlich wird für die Oxidation der reduzierten Verbindungen Sauerstoff verbraucht, sobald dieser nach der Zirkulation im Tiefenwasser wieder vorhanden ist. In Abhängigkeit von der Konzentration an reduzierten Verbindungen spricht man deshalb von einem Sauerstoffdefizit, das in negativen Sauerstoffkonzentrationen ausgedrückt wird.



Mit den absinkenden organischen und anorganischen Partikeln werden Nährstoffe in die Tiefe verfrachtet. Folge dieses vertikalen Stofftransportes ist eine fortschreitende Verarmung des Epilimnions an Substanzen, sofern diese nicht durch Zuflüsse von aussen ergänzt werden. Dem steht eine entsprechende Stoffanreicherung im Hypolimnion gegenüber. Damit wird Primärproduzenten im Epilimnion ein zunehmender Anteil von Nährstoffen entzogen – zumindest bis zur nächsten Phase der Zirkulation (Abbildung 3). Die Bioproduktion kann deshalb im Verlaufe der Stagnationsphase abnehmen, insbesondere wenn die Nährstoffkonzentrationen bereits im Frühjahr nicht sehr gross sind.

Nur ein geringer Teil des Primärproduktes gelangt in die Sedimente. Die Zusammensetzung der Sedimente hängt ab von der Menge des im See selbst produzierten organischen Materials, vom Stoffhaushalt des Wasserkörpers, insbesondere von den Abbaubedingungen im Hypolimnion und schliesslich von Art und Menge des in den See eingeschwemmten Materials. Die Sedimente sind daher ein Abbild des Zustandes eines Gewässers. Da die einmal abgelagerten Substanzen ihrerseits immer wieder von neuem Material überdeckt werden, kann durch Bohrungen in den Sedimenten älteres Material erfasst und somit auch die zeitliche Entwicklung des Gewässerzustandes zurückverfolgt werden. Die im Sediment abgelagerten Pflanzenfarbstoffe werden über längere Zeitperioden konserviert; sie dokumentieren Ausmass und Artenverteilung der Algenproduktion. Über den atmosphärischen Eintrag gelangen Pollen in die Gewässer und Sedimente. Die Analyse dieser Pollen lässt Rückschlüsse auf den Pflanzenbestand in der Umgebung und dadurch auch auf die klimatische Entwicklung der letzten paar tausend Jahre zu.

Abbildung 3 Typische Tiefenprofile während der Vollzirkulation resp. Stagnation von Wassertemperatur, pH-Wert, gelöstem Sauerstoff und den Nährstoffen Ammonium (NH_4^+), Nitrat (NO_3^-) und Phosphat (PO_4^{3-}).

6 Nährstoffkreislauf (Phosphor und Stickstoff)

Die einzelnen lebensnotwendigen Stoffe für die Primärproduktion werden in sehr unterschiedlichen Mengen benötigt. Für ein ideales Wachstum der pflanzlichen Zelle sind Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Phosphor (P), Schwefel (S), Magnesium (Mg), Kalium (K), Natrium (Na), Calcium (Ca), Silizium (Si) und verschiedene Spurenelemente (Fe, Co, Cu, Mo, Zn, B, V, Mn) erforderlich. Das optimale Verhältnis der wichtigsten Elemente für das Algenwachstum kann aus der Zusammensetzung der durchschnittlichen Algenbiomasse (Trockensubstanz) annäherungsweise bestimmt werden. Normiert auf ein Teil P ergibt sich das Verhältnis

$$\begin{array}{cccccccccc} \text{C} & : & \text{H} & : & \text{O} & : & \text{N} & : & \text{P} & : & \text{Mg} & : & \text{K} & : & \text{S} & = \\ 106-126 & : & 175-265 & : & 55-110 & : & 16 & : & 1 & : & 2,5 & : & 1,8 & : & 1,6. \end{array}$$

In Seen sind C, H und O meist im Überschuss vorhanden. Die übrigen Stoffe liegen aber öfters in einem nicht idealen Verhältnis vor. Wenn der Bedarf grösser ist als das Angebot, wird die Bioproduktion begrenzt, in den Schweizer Seen typischerweise durch P.

6.1 Phosphor steuert das Algenwachstum

Unter natürlichen Bedingungen gelangt Phosphor nur durch die Auflösung von phosphorhaltigen Mineralien (z.B. Apatit) in die Binnengewässer. Die Konzentrationen an Phosphor sind dann so gering, dass dieser die Schlüsselrolle des produktionsbegrenzenden Faktors spielt. Zeitweilig können allerdings andere Parameter eine Steuer-Rolle übernehmen, so z.B. Stickstoffverbindungen, Kieselsäure (Si) oder Lichtmangel durch Eigenbeschattung dichter Algenteppiche. Nach dem zweiten Weltkrieg hat die Belastung der Flüsse und Seen mit ungereinigtem Abwasser stark zugenommen. Insbesondere der Phosphor aus den Fäkalien und den damals neu auf den Markt gekommenen phosphorhaltigen Waschmitteln führte zu einer Überdüngung der Seen. Durch die Intensivierung der Viehwirtschaft gelangten auch mehr phosphorhaltiger Mist und Gülle auf die Felder und über Abschwemmung und Erosion in die Gewässer. Phosphor war daher in geringerer Masse produktionsbegrenzender Faktor und die Primärproduktion der Seen stieg stark an. Dank dem Ausbau der Abwasserreinigung, dem Verbot von Phosphat in Textilwaschmitteln und den Anstrengungen der Landwirte sind die Phosphorkonzentrationen in den meisten Seen seit anfangs der Achtzigerjahre aber sehr deutlich [gesunken](#).

Beim vollständig aeroben Abbau (Mineralisierung) der Algenmasse werden Kohlenstoffanteile in Kohlendioxid, Wasserstoffanteile in Wasser, Stickstoffanteile in Nitrat und Phosphoranteile in Phosphat umgewandelt; bei all diesen Umwandlungen wird Sauerstoff verbraucht. 1 kg Phosphor führt zur Produktion einer Biomasse von 100 kg Algen (Trockensubstanz); die Mineralisierung dieser Algen benötigt die gesamte in 15'000 m³ Wasser gelöste Sauerstoffmenge, unter der Annahme das der Sauerstoffgehalt rund 10 mg O₂/l beträgt.

Der Phosphorgehalt seinerseits wird durch die Algenproduktion beeinflusst. In gering produktiven und tiefen Seen mit genügend Sauerstoffvorrat aus der Zirkulationsphase wird das absinkende organische Material weitgehend im Wasserkörper mineralisiert; nur ein geringer Anteil davon gelangt in die Sedimente. Dieser Anteil und der darin enthaltene Phosphor sind dem Stoffhaushalt des Wasserkörpers jedoch für immer entzogen, allerdings unter der Bedingung, dass das Tiefenwasser dauernd und ohne künstliche Anreicherung genügend Sauerstoff enthält. Das Gesamtsystem bleibt im Gleichgewicht, solange die Phosphorzufuhr aus dem Einzugsgebiet durch die Bindung in die Sedimente und den Austrag über den Abfluss kompensiert wird.

Wird dieses Gleichgewicht durch zu hohe Nährstoffzufuhr aus dem Einzugsgebiet gestört, steigen die Phosphorgehalte im See und damit die Primärproduktion an. Mit zunehmender Produktion gelangen steigende Mengen organischer Substanzen in das Sediment. Es sammelt sich im Sediment ein zusätzlicher Nährstoffvorrat an.

Wenn die Primärproduktion zu gross wird, verbraucht der Abbau organischer Substanz (Mineralisierung) den Vorrat an Sauerstoff im Tiefenwasser, insbesondere bei wenig tiefen Seen (Abbildung 3). Schon bei Sauerstoffkonzentrationen von weniger als 4 mg O₂/l über dem Seeboden können biochemische Reaktionen einsetzen, welche die Einlagerung von Phosphor in die Sedimente hindern oder eine verstärkte Rücklösung des eingelagerten Phosphors aus dem Sediment in die Wasserphase fördern. Spätestens nach der nächsten Zirkulationsperiode steht dieser wieder als Nährstoff zur Verfügung. Die Produktionsprozesse werden durch diese interne Düngung zusätzlich gefördert.

Ammonifikation – Nitrifikation – Denitrifikation:
In wenig belasteten Seen ist Ammonium (NH₄⁺) nur in Spuren unter 40 µg/l N vorhanden. Es entsteht beim Abbau organischer Stickstoffverbindungen (= Ammonifikation). Algen und höhere Wasserpflanzen verwerten Ammonium (Ammonium-Assimilation) zu organisch gebundenem Stickstoff. Bei aeroben Verhältnissen, das heisst bei ausreichender Sauerstoffversorgung, bauen Bakterien das Ammonium in Nitrit und weiter in Nitrat um (= Nitrifikation). Bei anaeroben Verhältnissen, das heisst bei Sauerstoffmangel, wird Nitrat zu Nitrit und über Stickoxide (beispielsweise Lachgas) bis zu elementarem Stickstoff umgewandelt (= Denitrifikation). Die Denitrifikation tritt in stärker belasteten Seen intensiver auf. Nitrit ist für Fische giftig. Es ist aber bei allen Prozessen meist nur kurzfristig als Übergangsstufe vorhanden. Saubere Gewässer enthalten nur Spuren von Nitrit. Hohe Nitritkonzentrationen entstehen meist durch Abwasser oder Störungen im biologischen Abbau.

6.2 Verschiedene Formen des Stickstoffs

Wenn der Phosphor bei hohen Konzentrationen die Bioproduktion nicht mehr limitiert, kann Stickstoff zum limitierenden Faktor werden. Einige Blaualgenarten können ein Stickstoffdefizit umgehen, indem sie Stickstoff in seiner elementaren Form als N₂-Gas, welches sich auch in geringem Mass im Wasser löst, umwandeln und in ihrem Stoffwechsel einbauen. Bei der Mineralisation dieser Algen wird Stickstoff als lösliches Nitrat frei.

Mit der Ammoniaksynthese nach Haber-Bosch (1910) kann atmosphärischer Stickstoff in wasserlösliche Stickstoffverbindungen umgewandelt werden. Durch Oxidation des Ammoniaks ist auch die Herstellung von Nitraten möglich. Stickstoffdefizite in der Landwirtschaft werden seither durch den Eintrag von sogenanntem Kunstdünger (Ammoniumnitrat) behoben. Wegen der Zunahme des Einsatzes dieser Dünger, der wachsenden Viehwirtschaft und der Abwasserreinigung sind die Konzentrationen stickstoffhaltiger Verbindungen in den Gewässern insbesondere seit den fünfziger Jahren angestiegen. Auch der atmosphärische Eintrag ist nicht vernachlässigbar.

Stickstoff ist ein wichtiger Bestandteil von Proteinen und Nukleinsäuren und ist deshalb nicht nur für Pflanzen und Algen lebensnotwendig, sondern auch für alle anderen Lebewesen. Die wichtigsten im Wasser gelösten anorganischen Stickstoffverbindungen sind Nitrat (NO₃⁻), Nitrit (NO₂⁻), Ammonium (NH₄⁺), Ammoniak (NH₃) und molekularer Stickstoff (N₂) (siehe Kasten Ammonifikation – Nitrifikation – Denitrifikation).

Auch Lachgas (N₂O) lässt sich in stehenden Gewässern als Zwischenprodukt biologischer Prozesse nachweisen. Molekularer Stickstoff stammt aus der Luft und ist als apolares Gas nur schlecht wasserlöslich. Ammoniak hingegen ist ein aggressives, basisches Gas, das sich in Wasser auch in grossen Mengen gut löst. Die Verbindung von Ammoniak mit einem Säureproton (H⁺-Ion) wird Ammonium genannt. In Gewässern steht Ammonium im chemischen Gleichgewicht mit Ammoniak; mit höheren Temperaturen und erhöhtem pH nimmt der Ammoniakanteil zu.

Nitrat (NO_3^-), Ammonium (NH_4^+) und Nitrit (NO_2^-) sind ebenfalls gut wasserlöslich. Ammoniak und Nitrit sind für einige Lebewesen giftig. In Oberflächengewässern sind die Nitrate mengenmässig am wichtigsten.

Nebst den anorganischen Stickstoffverbindungen sind im Zusammenhang mit dem Leben in den Seen auch viele organische Stickstoffverbindungen relevant und somit auch in den verschiedenen Abbaustadien der Mineralisation. Nach vollständiger Mineralisation steht Stickstoff aber in anorganischer Form zur Verfügung und steht den Primärproduzenten wiederum für die Synthese organischen Materials zur Verfügung (Abbildung 3).

Im Meer ist Stickstoff der limitierende Faktor, nicht Phosphor. Die Einträge aus den Flüssen haben die Bioproduktion insbesondere in küstennahen Regionen stark gefördert, ebenfalls mit negativen Folgen für den Sauerstoffhaushalt.

7 Fische

In der Schweiz gibt es ein grosses Spektrum an unterschiedlichen Seetypen. Dank dieser Vielfalt kommen insgesamt rund 70 verschiedene Fischarten in unseren Seen vor. Keiner kann jedoch von allen Fischarten bewohnt werden. Insbesondere die Tiefe, die Maximaltemperatur des Oberflächenwassers und die Produktivität beeinflussen die natürliche Fischartenzusammensetzung in den Seen massgebend. Anhand dieser Parameter können die Seen auch grob klassifiziert werden (Kasten Vereinfachte Klassifizierung der Schweizer Seen für Fische):

- **Die Besiedlungsgeschichte:** Sie setzt die Rahmenbedingung für die Arten, die nach der letzten Eiszeit vor ca. 15'000 Jahren überhaupt in die Schweiz einwandern konnten. Dies gelang nur diejenigen Arten, welche die letzte Eiszeit in einem nahen Refugium überlebt hatten. Weiter hängt die heutige Artenzahl von der Fähigkeit dieser Arten ab, unsere Seen überhaupt erreichen zu können. Die Besiedlungsgeschichte erklärt somit z.B., weshalb im Tessin eine andere Fischartengemeinschaft anzutreffen ist als nördlich der Alpen.
- **Die Temperatur des Wassers:** Die Wassertemperatur ist einer der wichtigsten Umweltfaktoren für Fische [4]. Wie auch in Fliessgewässern [5] benötigen gewisse Fische, insbesondere die Salmoniden (z.B. Seeforelle oder Seesaibling), kühles Wasser, das im Sommer die 20°C Marke nicht oder nur selten übersteigt. Andere Fische wie die Cypriniden (z.B. Rotaugen oder Schleie) bevorzugen wärmeres Wasser.
- **Die Tiefe der Seen:** Die Fische nutzen die physikalischen Eigenschaften des Wassers und die daraus resultierende Schichtung (siehe hierzu auch Kapitel 3), indem die kälteliebenden Arten sich im kühleren Tiefenwasser aufhalten und die wärmeliebenden Arten die oberflächennahen Schichten besiedeln. Somit ist die Fischartenzusammensetzung eines Sees stark von dessen maximaler Tiefe abhängig [6-10]. Typische Freiwasser-Fischarten sind insbesondere in grossen und tiefen Seen häufig, wie die Felchen im Norden und die Agone im Süden.
- **Die Produktivität der Seen:** Eine erhöhte Produktivität (vgl. Kapitel 5 und 6) führt oft zu einer Verschiebung der Häufigkeiten der Fischarten in Richtung der Perciden (z.B. Egli) und Cypriniden (z.B. Rotaugen oder Brachse) [8]. Gleichzeitig kann die Biomasse von gewissen Arten stark zunehmen, während andere Arten seltener werden.

Vereinfachte Klassifizierung der Schweizer Seen für Fische

- Tiefe oder flache oligotrophe alpine Seen, mit kühlem Oberflächenwasser werden durch Salmoniden wie Forellen und/oder Seesaiblingen dominiert. Typische Begleitarten sind die Elritze und die Groppe.
- Tiefe oligotrophe voralpine Seen mit mittlerer maximaler Temperatur des Oberflächenwassers, die ein ausgeprägtes Pelagial besitzen und eine ausgeprägte Temperaturschichtung aufweisen, werden durch Felchen oder Agonen dominiert. Einzigartig in der Schweiz ist dabei eine sehr hohe Artenvielfalt bei den Felchen, die zu einem grossen Teil in nur 15'000 Jahren nach der Eiszeit in den grossen voralpinen Seen entstanden ist [1-3]. Am Ufer sind Flussbarsche, Rotaugen und Hasel häufig. Viele verschiedene Begleitarten können vorkommen (potentiell grösstes Artenspektrum).
- Eher flache mesotrophe Seen, die noch eine Temperaturschichtung aufweisen, können mit einer mittleren bis hohen maximalen Temperatur des Oberflächenwassers, werden meistens von Flussbarschen und verschiedenen karpfenartigen Fischen dominiert. Gewisse Salmoniden können noch natürlicherweise vorkommen.
- Wenig tiefe mesotrophe Flachlandseen mit warmer Temperatur des Oberflächenwassers ohne Hypolimnion und ohne Pelagial. Diese Seen werden durch karpfenartige Fische dominiert (z.B. Schleie, Karpfen, Brachsen, Rotaugen).

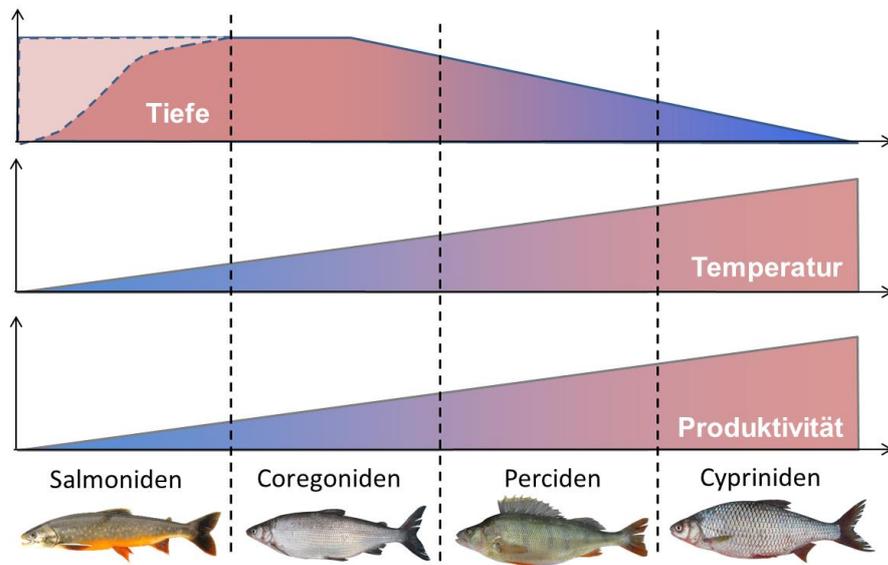


Abbildung 4 Vereinfachte Darstellung der alpinen Seetypen mit den dominierenden taxonomischen Fischgruppen.

Auch der Mensch übt auf verschiedenste Weise einen Einfluss auf die Fischartenzusammensetzung der Seen aus. Dies begann bereits bei der Besiedlung, die sehr stark durch den Mensch geprägt wurde. Die Karpfen wurden schon von den Römern von Asien nach Mitteleuropa gebracht. In den letzten Jahrzehnten führte insbesondere die fischereiliche Bewirtschaftung dazu, dass viele neue Fischarten die Schweiz besiedeln konnten (z.B. Zander oder Blackbass). Heute entsprechen die durch den Mensch eingeführten Arten einem Anteil von über 20% der Fischarten, die in der Schweiz vorkommen. Ausserdem verändert der Mensch die Umweltbedingungen massgebend. Die Klimaerwärmung wirkt sich z.B. direkt auf die Wassertemperatur der Seen und somit auch auf die Fischgemeinschaften aus. Auch die Beeinflussung der Hydrologie der Seen (z.B. die Nutzung durch die Wasserkraft und den damit zusammenhängenden zu starken Wasserstandsschwankungen oder die Stabilisierung des Wasserstandes und die somit fehlende Dynamik der Seen), die Verbauung der Seeufer und der Wellenschlag von Booten führen zu einem Verlust der Jungfischhabitate. Schliesslich ist auch die Beeinträchtigung der Wasserqualität inkl. Mikroverunreinigungen zu erwähnen.

Für die Fischartenzusammensetzung war in den letzten Jahrzehnten auch die Belastung vieler Seen durch Phosphor und Stickstoff (siehe Kapitel 6) von Bedeutung. Sie führte in den 50er bis 80er Jahren zu einer erhöhten Produktivität, die bei einer zu hohen Belastung einen

Sauerstoffmangel im Tiefenwasser verursachte (siehe Kapitel 4). Dies hatte verschiedene und zum Teil komplexe Auswirkungen auf die Fischfauna. Bei einer gering bis moderat erhöhten Produktivität und so lange keine massive Sauerstoffzehrung auftrat, führte dies zu einer Verschiebung der Häufigkeiten der Fischarten [11]. Die Biomasse vieler Arten, insbesondere auch von gewissen für die Fischerei relevanten Fischarten (z.B. Flussbarsch und gewisse Felchenarten) nahm aufgrund des höheren Phosphor- und Stickstoffgehalts zu [6, 12, 13]. Auch die Anzahl bestimmter vom Menschen eingeführte Arten nahm oft stark zu (z.B. Zander). Einzelne Arten, insbesondere solche, die an nährstoffarme Gewässer angepasst sind (z.B. bestimmte Felchenarten), wurden aber durch diese Veränderungen bereits bedroht [3]. Bei einer starken Eutrophierung, die durch das Auftreten von Sauerstoffmangel im Tiefenwasser begleitet wird, akzentuierten sich die oben genannten Prozesse. Dabei verloren insbesondere kälte- und tiefenangepassten Arten ihren Lebensraum und starben meistens aus. In der Tat sind während dieser Eutrophierungsphase über 30% der vor hundert Jahren in der Schweiz lebenden Felchenarten ausgestorben [3]. Mit der Einführung der Kläranlagen und dem Phosphatverbot in Textilwaschmitteln hat sich jedoch seit den 80er Jahren die Wasserqualität der Seen wieder stark verbessert, sodass sich die Produktivität vieler Seen heute wieder ihrem ursprünglichen Zustand nähern, mit der Folge, dass sich auch die Fischartenzusammensetzung wieder verschoben hat. Allerdings mit dem Unterschied, dass heute bestimmte Arten ausgestorben sind.

Die Produktivität der Seen hat folglich einen direkten Einfluss auf die Häufigkeit und die Biomasse der Fische und beeinflusst somit die Fischerei direkt. Insbesondere bei einer moderat erhöhten Produktivität der Seen profitiert die Felchen- und Eglifischerei stark von den anthropogen veränderten Bedingungen. Die Tatsache, dass die Bestände in vielen Seen mit Besatzmassnahmen erhalten werden mussten und dass gerade bei den Felchen viele Arten ausgestorben sind, zeigt jedoch, dass eine unnatürlich hohe Produktivität für die Fauna der Seen starke negative Auswirkungen hat. Durch die Anstrengungen im Gewässerschutz und der Rückkehr vieler Seen zu einer natürlichen Produktivität konnte das Artensterben jedoch gebremst werden.

8 Sanierungsmassnahmen

Mit dem Nährstoffanstieg ab circa 1950 stieg in vielen Seen auch die Bioproduktion an, mit all den in Kapitel Abbildung 2 Saisonaler Verlauf des Schichtungs- und Zirkulationsverhaltens eines Sees.

Sauerstoff erwähnten negativen Auswirkungen auf den Sauerstoffgehalt, insbesondere im Tiefenwasser und in den Sedimenten. Die Gewässerschutzgesetze vom 8. Oktober 1971 und vom 24. Januar 1991 versuchten durch die Förderung der Abwasserreinigung in den Einzugsgebieten und durch Vorschriften über den Seezustand die Situation in den Seen zu verbessern.

Die [Gewässerschutzverordnung](#) vom 28. Oktober 1998 legt in Anhang 2 Ziffer 13 die Anforderungen an den Zustand der Seen fest:

"Der Nährstoffgehalt darf höchstens eine mittlere Produktion von Biomasse zulassen; besondere natürliche Verhältnisse bleiben vorbehalten." Zudem gilt: "Der Sauerstoffgehalt des Wassers darf zu keiner Zeit und in keiner Seetiefe weniger als 4 mg/l O₂ betragen; er muss zudem ausreichen, damit wenig empfindliche Tiere wie Würmer den Seegrund ganzjährig und in einer möglichst natürlichen Dichte besiedeln können. Besondere natürliche Verhältnisse bleiben vorbehalten."

8.1 Siedlungsentwässerung

Dauerhafte Erfolge im Bemühen um die Verbesserung des Gewässerzustandes sind nur durch See-externe Massnahmen möglich. Mit geeigneten Massnahmen werden die aus dem Einzugsgebiet stammenden Belastungen beseitigt oder minimiert. Dazu gehören unter anderem das Fernhalten von geklärtem oder ungeklärtem Abwasser durch Ringleitungen und die chemische Abwasserreinigung zur Verringerung des Phosphorgehaltes. In der Schweiz ist die Phosphorelimination durch Simultanfällung für Abwasserreinigungsanlagen im Einzugsgebiet der Seen seit 1967 durch den Bundesrat dringend empfohlen und seit 1971 gesetzlich vorgeschrieben. Einige grössere Anlagen im Einzugsgebiet stark belasteter Seen wurden zusätzlich mit einer Flockungsfiltration ausgerüstet; mehr als 90% des Phosphors werden dadurch aus dem Abwasser entfernt.

Eine weitere Möglichkeit, Phosphate vom See fernzuhalten, besteht in der Verringerung in Wasch- und Reinigungsmitteln. Durch das Phosphatverbot in Textilwaschmitteln und der Begrenzung in den übrigen Reinigungsmitteln wurde der jährliche Phosphatverbrauch in der Schweiz seit 1986 um mehr als 3'000 t reduziert. Dies führte zu einem Rückgang des Phosphorgehaltes im häuslichen Rohabwasser von circa 30%; wegen der langen Erneuerungszeit des Wassers in einigen Seen reagierten diese mit Verzögerungen bis zu mehreren Jahren.

8.2 Landwirtschaft

Diffuse Nährstoffeinträge können leider nicht mit technisch einfachen Mitteln verringert werden. So kann der Nährstoffeintrag aus landwirtschaftlich genutzten Böden nur durch zeitgerechte, dem Bedarf der Pflanzen und der Beschaffenheit des Bodens angepasste Düngung und Bearbeitung reduziert werden.

[Artikel 62a des Gewässerschutzgesetzes](#) (GSchG) sieht vor, dass der Bund Abgeltungen an Massnahmen der Landwirtschaft zur Verhinderung der Abschwemmung und Auswaschung von Stoffen leisten kann, wenn die Massnahmen zur Erfüllung der Anforderungen an die Wasserqualität der ober- und unterirdischen Gewässer erforderlich sind. Das Parlament hat eine entsprechende Gesetzesänderung 1998 beschlossen. Ein Konzept zur Verminderung der Phosphorbelastung von oberirdischen Gewässern aus der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung wurde von BLW und BUWAL im Dezember 1998 publiziert. Die kantonalen Fachstellen in den Bereichen Landwirtschaft und Gewässerschutz wurden entsprechend informiert. Seit 1999 werden Projekte im Einzugsgebiet belasteter Seen unterstützt. Zu diesem Zweck finanziert der Bund den Grossteil der Kosten und Mindererträge, welche betroffenen Landwirtschaftsbetrieben durch die Verminderung der Stoffeinträge entstehen. Die Arbeitsgruppe Nitrat des Bundes organisiert die Umsetzung. Eine Grundlagensammlung zu Artikel 62a GSchG beschreibt die Vorgehensweise für die Durchführung von Projekten. Der Bund trägt den Hauptanteil der Kosten der landwirtschaftlichen Massnahmen, den restlichen Betrag sowie die Kosten der Umsetzung teilen sich Kantone, Gemeinden, Wasserversorger und Sponsoren. Dem Bund obliegt die Oberaufsicht. Die Kantone gestalten die konkreten, zielgerichteten Projekte und setzen diese um. Für die Verbesserung des Seezustandes sollen mit gezielten Massnahmen – in Abhängigkeit der Sanierungserfordernisse – die Verluste im Zuströmbereich (Z_0) in einem ersten Schritt soweit reduziert werden, dass die Phosphorgehalte 40 μg Gesamt-Phosphor pro Liter durchmischtem Freiwasser nicht mehr überschreiten. Ziel ist es, den Gesamt-Phosphorgehalt in den Seen unter 20 μg pro Liter durchmischtem Freiwasser zu halten.

Für die [Reduktion des Phosphoreintrages](#) wurden bisher für den Sempachersee, den Baldeggersee und den Hallwilersee Projekte bewilligt und durchgeführt. Zusammen mit den

See-internen Massnahmen (Zirkulationshilfe und Belüftung mit Sauerstoff) war der Erfolg überraschend deutlich (siehe [Entwicklung der Phosphorkonzentration](#)).

8.3 See-interne Sanierungsmassnahmen

Wo eine wirksame Sanierung durch See-externe Massnahmen allein nicht möglich ist, wird versucht, mit See-internen Massnahmen nachzuhelfen. See-interne Verfahren haben jedoch ohne gleichzeitige oder vorgängige Sanierung des Einzugsgebietes keinen dauerhaften Erfolg; sie müssen dann ständig durchgeführt oder regelmässig wiederholt werden.

In der Schweiz wurden bisher folgende steinerne Massnahmen mit Erfolg angewendet:

- **Tiefenwasserableitung:** Normalerweise fliesst während der Sommerstratifikation nur nährstoffarmes und sauerstoffreiches Oberflächenwasser aus Seen ab. Bei der Tiefenwasserableitung wird mit einem Rohr nährstoffreiches und sauerstoffarmes Tiefenwasser gefasst und aus dem See abgeleitet; in den meisten Fällen mündet das Rohrende direkt in den Seeabfluss.
- **Zirkulationshilfe:** Durch Einbringen von Luft in groben Blasen über dem Seegrund wird ein Auftrieb des Tiefenwassers bewirkt, der die natürliche Zirkulation unterstützt. Diese Massnahme hilft vor allem bei Seen, die nicht stark windexponiert sind. Eine schwächere Schichtung, die z.B. auf chemisch bedingten Dichteunterschieden beruht, kann damit ebenfalls durchbrochen werden.
- **Belüftung:** Durch feinblasiges Einbringen von Luft oder Sauerstoff ins Tiefenwasser wird während der Stagnationsphase einer übermässigen Sauerstoffzehrung entgegengewirkt.

Durch Massnahmen wie Tiefenwasserableitung oder Einleiten von nährstoffarmem Wasser wird der Phosphorgehalt direkt beeinflusst. Zirkulationshilfe und Belüftung sollen indirekt auf den Phosphorgehalt wirken, indem sie den Rückhalt in den Sedimenten durch die Sauerstoffanreicherung im Tiefenwasser verbessern.

Oft werden see-interne Massnahmen kombiniert. Keines dieser Verfahren ist universell auf jeden See anwendbar. Die Auswahl der im Einzelfall geeigneten Verfahren richtet sich nach den individuellen Eigenschaften eines Sees. Voraussetzung ist die genaue Analyse des Gesamtsystems (See und Einzugsgebiet).

9 Referenzen

1. Steinmann, P., *Monographie der schweizer Koregonen*. Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie, 1950. **12+13**(1+2).
2. Kottelat, M. and J. Freyhof, *Handbook of European Freshwater Fishes*. 2007, Cornol, Switzerland: Publications Kottelat.
3. Vonlanthen, P., et al., *Anthropogenic eutrophication drives extinction by speciation reversal in adaptive radiations*. Nature, 2012. **482**: p. 375-362.
4. Abegglen, C. and H. Siegrist, *Micropolluants dans les eaux usées urbaines. Etape de traitement supplémentaire dans les stations d'épuration*, 2012, Office fédéral de l'environnement: Bern.
5. Verneaux, J., *Cours d'eau de Franche-Comté (massif du Jura) - Recherches écologiques sur le réseau Hydrographique du Doubs - essai de biotypologie*, in *Faculté des Sciences et des Techniques* 1973, Université de Besançon: Besançon. p. 261.
6. Mehner, T., et al., *Composition of fish communities in German lakes as related to lake morphology, trophic state, shore structure and human-use intensity*. Freshwater Biology, 2005. **50**: p. 70-85.
7. Mehner, T., et al., *Lake depth and geographical position modify lake fish assemblages of the European 'Central Plains' ecoregion*. Freshwater Biology, 2007. **52**: p. 2285-2297.
8. Argillier, C., et al., *APPROCHE TYPOLOGIQUE DES PEUPELEMENTS PISCICOLES LACUSTRES FRANÇAIS. II. STRUCTURATION DES COMMUNAUTÉS DANS LES PLANS D'EAU D'ALTITUDE INFÉRIEURE À 1 500 M*. Bull. Fr. Pêche Piscic., 2002. **365/366**: p. 389-404.
9. Brucet, S., et al., *Fish diversity in European lakes: geographical factors dominate over anthropogenic pressures*. Freshwater Biology, 2013. **58**(9): p. 1779-1793.
10. Gassner, H., et al., *Development of a Fish Based Lake Typology for Natural Austrian Lakes >50 ha Based on the Reconstructed Historical Fish Communities*. Internat. Rev. Hydrobiol., 2005. **90**(4): p. 422-432.
11. Hartmann, J. and W. Nümann, *Percids of Lake Constance, a Lake Undergoing Eutrophication*. Journal Fisheries Research Board of Canada, 1977. **34**: p. 1671-1677.
12. Argillier, C., et al., *Development of a fish-based index to assess the eutrophication status of European lakes*. Hydrobiologia, 2013. **704**: p. 193-211.
13. Persson, L., et al., *Shifts in fish communities along the productivity gradient of temperate lakes-patterns and the importance of size-structured interactions*. Journal of Fish Biology, 1991. **38**: p. 281-293.

11. Februar 2016

Kontakt: wasser@bafu.admin.ch

Internet: [Wasserqualität in den Schweizer Seen](#)