

# Warum wird was im *Aktionsprogramm zur Sanierung oberschwäbischer Seen* untersucht?

Die naturwissenschaftliche Disziplin, die sich mit mit fließenden und stehenden Süßgewässern befasst, ist die **Limnologie**.

Dort bedient man sich chemischer, physikalischer und biologischer Untersuchungsmethoden.

Im *Aktionsprogramm zur Sanierung oberschwäbischer Seen (Seenprogramm)* werden sowohl **Seen** als auch **Weiherr** in Augenschein genommen.

Erstere sind natürliche Gebilde. Sie entstanden in Oberschwaben am Ende der letzten Eiszeit, der Würm, vor rund 10.000 Jahren. Weiherr sind – im süddeutschen Sprachgebrauch – künstliche Stillgewässer. Während des Mittelalters haben in Oberschwaben vor allem Klöster und Adelshäuser Weiherr angelegt. Man verfolgte damit vielfältige Zwecke, so unter anderem die für die vielen Fastentage des mittelalterlichen Kirchenjahres notwendige Fastenspeise Fisch aufzuziehen.

## Physikalische Richtgrößen:

- Die **Temperatur** von **Wasserproben** misst man mit elektronischen Messsonden (z.B. Multisonde WTW OXI 330). Damit kann man gleichzeitig die Temperatur und den Sauerstoffgehalt einer Wasserprobe erfassen.  
Die Wassertemperatur in Stillgewässern, vor allem tieferen Seen, ist wegen der Dichteanomalie des Wassers von Bedeutung. Wasser hat bei 4°C seine größte Dichte und Wasser dieser Temperatur sammelt sich am Grund von Seen.  
Dies zieht folgendes Phänomen nach sich:  
Oberflächennahes Wasser in Seen und Weiherrn wird durch den Wind ständig umgewälzt. So entsteht ein von oben nach unten kontinuierlich verlaufender, abnehmender oder zunehmender Wärmegradient. Bei Stillgewässern mit einer großen Tiefe prägt sich im Sommer und im Winter eine Wärmesprungschicht aus. Diese entsteht in der Tiefe, in welcher der Wind seine das Wasser umwälzende Wirkung nicht mehr entfalten kann. An der nur wenige Zentimeter umfassenden Wärmesprungschicht kann die Temperatur des Wasser im Sommer um mehrere °C abfallen und im Winter um mehrere °C ansteigen. Im Herbst und im Frühjahr, wenn aufgrund der Abkühlung bzw. Erwärmung die oberflächlichen Wasserschichten die gleiche Temperatur wie die tieferen angenommen haben, wälzt der Wind die gesamten Wassermassen vom Grund bis zur Oberfläche um. Solche Stillgewässer nennt man **dimiktisch**. Weniger tiefe Seen können mehrmals im Jahr umgewälzt werden. Sie sind dann **polymiktisch**\*. Die meisten Seen und alle Weiherr im *Seenprogramm* entsprechen diesem Typus.  
Für die ökologische Charakterisierung von tieferen Stillgewässern ist es insofern wichtig zu wissen, ob und wie häufig sie im Jahr umgewälzt werden, als bei solchen Umschichtungen in den Tiefenbereichen vorhandene Pflanzennährstoffe an die Oberfläche verfrachtet werden und mitunter ein starkes Algenwachstum anfachen. Bei diesen Ereignissen werden aber auch die dem Gewässergrund nahen sauerstofffreien oder -armen Wasserschichten wieder mit Sauerstoff angereichert. In der Folge dessen werden abgestorbene organische Substrate zumindest teilweise in ihre mineralischen Bestandteile aufgelöst.
- Den **Sauerstoffgehalt** in den Wasserproben erfasst man mit Messsonden des oben genannten Typs.  
Bedeutungsvoll sind die Sauerstoffgehalte, die man entlang einer Wassersäule am jeweils tiefsten Punkt eines Sees oder Weiherr misst.

---

\* Neben di- und polymiktischen Stillgewässern kennt man auch monomiktische. Zu diesen zählt unter anderem der Bodensee, der nur einmal im Jahr nämlich im Winter umgewälzt wird. Diese Umwälzung blieb in den vergangenen Jahren mehrmals aus. Als Grund dafür wird die Veränderung des Klimas angenommen.

Besonders während sonnenreicher und warmer Sommermonate kann man dann ebenso wie bei der Wassertemperatur einen Gradienten wahrnehmen, der in einer bestimmten Tiefe einen Sprung macht. Bis dorthin hin gelangt genügend Sonnenlicht, um den Prozess der Fotosynthese von Algen in Gang zu halten. Dabei entsteht der Sauerstoff in dieser Schicht, die man als **Epilimnion** bezeichnet. Fischer sprechen in diesem Zusammenhang von der **Nährschicht**, weil dort die Primärbiomasse gebildet wird, die für den Fischertrag wesentlich ist.

Im **Hypolimnion**, das unter dem Epilimnion liegt, finden nur noch heterotrophe, Sauerstoff zehrende Prozesse statt. Dabei werden abgestorbene organische Substrate mineralisiert oder, wenn der Sauerstoff aufgebraucht ist, zu Faulschlamm zersetzt. Für Fischer ist dies daher die **Zehrschicht**. Sauerstoff, den man im Hypolimnion misst, ist nicht biogenen Ursprungs sondern durch Diffusion aus dem Epilimnion dorthin gelangt.

Die vertikale Ausdehnung des Hypolimnions ist ein Indikator für die Belastung von geschichteten Stehgewässern mit Pflanzennährstoffen. Als Faustformel kann man sagen: Je größer das Hypolimnion eines Sees oder Weihers in seiner vertikalen Ausdehnung dimensioniert ist, um so stärker ist er belastet und um so geringer ist sein gewässerökologischer Wert einzuschätzen. Durch ein ausgedehntes Hypolimnion wird vor allem der Lebensraum von Fischen eingeschränkt, die auf ein sauerstoffhaltiges Milieu als Lebensraum angewiesen sind.

- Ein weiterer in der praktischen Limnologie berücksichtigter physikalischer Parameter ist der **pH-Wert**. Die kalkreichen Oberflächengewässer Oberschwabens verfügen in der Regel über ein ausgeprägtes Vermögen, um nach oben und unten abweichende pH-Werte abzupuffern.

In nährstoffreichen Seen, vor allem aber Weihern, kann es während sonnenreicher warmer Sommertage mitunter zu extrem hohen pH-Werten kommen.

Die Ursache dafür ist die sog. **biogene Entkalkung**:

Das für die Fotosynthese notwendige Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) entnehmen Algen und höhere Wasserpflanzen in der Regel von Einträge aus der Atmosphäre. Wenn durch hohe biogene Produktion ein Kohlendioxidmangel entsteht, dann entziehen Algen und Wasserpflanzen diesen, den im Wasser gelösten Calciumhydrogenkarbonatmolekülen  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Bei diesem Prozess scheiden sie unlösliches Calciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) aus, das man unter anderem als bräunlichen Überzug an der Unterseite von Schwimmblattpflanzenblättern erkennen kann. Dabei handelt es sich um eine Ionenaustauschreaktion. Sie muss durch das Ausschleusen von negativ geladenen OH-Ionen aus den Pflanzenzellen in das umgebende Wasser neutralisiert werden. Das führt dann zu alkalischen pH-Werten, die mitunter extreme Werte erreichen können (pH-Wert von 10,8 gemessen im Sommer 2014 und 2015 im Rohrsee). Derartige *Laugen* schädigen Fische und besonders ihre Brut. Bei hohen pH-Werten in Gewässern entsteht für aquatische Organismen vor allem für Fische ein weiteres Problem. Das Verhältnis von Ammonium zu Ammoniak ( $\text{NH}_4^+$  zu  $\text{NH}_3$ ) verschiebt sich zu Gunsten von Ammoniak. Dieses wasserlösliche Gas wirkt schon in geringen Konzentrationen auf Fische toxisch.

- Die vor allem in Zuflüssen gemessene **elektrische Leitfähigkeit** ist eine physikalische Richtgröße, die bei der Eingrenzung von punktuellen Belastungsquellen wertvolle Dienste leistet. Punktuelle Belastungsquellen schütten meist Wasser mit höherer elektrischer Leitfähigkeit aus und lassen sich so identifizieren und lokalisieren.
- Aus der Eintrübung eines Stillgewässers kann man auf dessen Besiedelungsdichte mit Algen schließen. Je größer diese Dichte ist, um so geringer ist die **Sichttiefe** eines Sees oder Weihers. Die **Sichttiefe** wird mit der sog. Secchischeibe ermittelt und in cm oder Meter ausgewiesen.

## Chemische Richtgrößen:

- **Orthophosphat**  $PO_4^{3-}$  im Fachjargon als **PO4-P** bezeichnet und **Gesamt-Phosphat Ges-P**. In Binnengewässern spielt PO4-P als stofflicher Pflanzennährstoff eine Schlüsselrolle. Im Sinne des Liebig'schen Minimalprinzips ist es in der Regel derjenige stoffliche Faktor, der für das Wachstum von Algen und Wasserpflanzen ausschlaggebend ist. Das heißt, dass nur soviel pflanzliche Biomasse in einem See oder Weiher aufwachsen kann, wie PO4-P vorhanden ist.  
Der PO4-P-Gehalt wird fotometrisch bestimmt nach DIN 38 405 - D11 – 1 (*Deutsche Einheitsverfahren...*).  
Der Gehalt von PO4-P wird in der Limnologie nicht als PO4-Ion, sondern als Phosphorgehalt in einem PO4-Ion ausgewiesen. Ein Mol ( $PO_4^{3-}$ ) hat eine Masse von 95 gr. Als PO4-P ausgewiesen entspricht dies 31 gr.  
**Ges-P** ist aller Phosphor, der aus einer unfiltrierten Wasserprobe durch einen sauren Aufschluss in einem Mikrowellenherd (MLS 1200) in PO4-P überführt worden ist. Ges-P wird dann analytisch als PO4-P erfasst.  
Beim Ges-P kann es sich um Phosphor aus Organismen (DNA, ATP, Strukturelemente, u.a), aber auch um Phosphor aus Schlamm- oder mineralischen Partikeln handeln. PO4-P und Ges-P werden in  $\mu\text{g/l}$  bzw.  $\text{mg/m}^3$  angegeben.
- **Ammonium**  $NH_4^+$  als **Ammonium-Stickstoff (NH4-N)** und **Nitrat**  $NO_3^-$  als **Nitrat-Stickstoff (NO3-N)** sind weitere stoffliche Faktoren, die für das Wachstum von Algen und Wasserpflanzen wesentlich sind.  
Beide Substanzen analysiert man photometrisch mit entsprechenden Reagenzien (z.B. Spectroquant von Merck). Ausgewiesen werden NH4-N und NO3-N analog wie PO4-P. Gelegentlich kommt es vor, dass in einem Stillgewässer die anorganischen Stickstoffressourcen zum Minimumfaktor werden. In solchen Fällen besiedeln dann oft bestimmte Blaualgenspezies Seen und Weiher, die in der Lage sind, ähnlich den Knöllchenbakterien bei Schmetterlingsblütlern atmosphärischen Stickstoff ( $N_2$ ) in NH4-N zu überführen. Beispiele dafür sind Formen der Gattung Nostoc. Gewässer können sich in solchen Fällen autonom mit Stickstoff düngen.  
NH4-N und NO3-N werden in  $\text{mg/l}$  angegeben.
- Ein wichtiger biochemischer Parameter ist der **Chlorophyll-a-Gehalt** in einer Wasserprobe - abgekürzt im Laborjargon (**CHA**)  
CHA gilt als Maßzahl für die Algenbiomasse. Chlorophyll-a wird aus einem Filtrerrückstand extrahiert und fotometrisch quantitativ bestimmt.  
Die aus Algen bestehende Primärbiomasse in Stillgewässern weist man als Chlorophyll-a-Gehalt in  $\mu\text{g/l}$  oder  $\text{mg/m}^3$  aus.  
Algen sind Bestandteile des **Planktons** von Seen oder Weihern.  
Unter **Plankton** fasst man alle Organismen zusammen, deren Beweglichkeit wesentlich von der Wasserströmung vorgegeben ist. Zum Plankton zählen auch kleine Fische und Fischlarven.  
Im Rahmen des *Seenprogramms* werden bei Bedarf die aus Wasserproben gewonnenen Planktonspezies nach einer mikroskopischen Analyse entsprechend einem fünfklassigen Häufigkeitsschlüssel erfasst und dokumentiert. Der ist wie folgt beschaffen:
- Häufigkeitsklasse 1: Einzelfund (wird nur in bemerkenswerten Fällen dokumentiert)
- Häufigkeitsklasse 2: Spezies tritt in wenigen aber mehr als einem Exemplar auf (wird nur in bemerkenswerten Fällen dokumentiert)
- Häufigkeitsklasse 3: Spezies ist bestandsbildend

- Häufigkeitsklasse 4: Spezies tritt massenhaft auf
- Häufigkeitsklasse 5: Spezies bildet eine sog. Blüte (sie verdrängt alle andere Spezies vollständig oder nahezu vollständig)

Zu Interpretation von Planktonanalysen sei folgendes angemerkt:

Im Gegensatz zum Saprobien-system, das bei der Gütebeurteilung von Fließgewässern angewandt wird, lassen sich aus einem ein-, zwei- oder dreimaligen Befund einer Planktonflora oder -fauna kaum Schlussfolgerungen auf den gewässerökologischen Zustand eines Sees oder Weihers ziehen. Es gibt nur wenige Planktonspezies bzw. Gruppen von Phyto- oder Zooplanktern, die weiterreichendere Schlussfolgerungen zum gewässerökologischen Zustand von Stillgewässern zulassen.

Aussagekräftiger in dieser Hinsicht ist vielmehr eine Übersicht über die zeitliche Entwicklung von Planktonfaunen und -flore z.B. über den Untersuchungszeitraum eines Jahres. Dabei stehen folgende Aspekte im Vordergrund:

- Welche Sukzession von Planktonorganismen etablieren sich im Laufe eines Jahres in einem See oder Weiher?
- Kommt es zu Algenblüten und wenn ja, aus welche Arten setzen sich diese zusammen? Scheiden diese Arten Substanzen aus, die auf Fische oder Badegäste toxisch wirken können
- Kommen in der Population des Phytoplanktons Formen vor, die von Kleinkrebsen gefressen werden können? Kleinkrebse sind ein wichtiges Bindeglied in der trophischen Pyramide eines Sees oder Weihers (siehe hierzu: Schwoerbel: *Einführung in die Limnologie*, S. 189 ff).

Neben dem Plankton erfasst man für gewässerökologische Beurteilungen von Seen und Weihern auch Makrophytenbestände. Dies geschieht im Zuge einer einmaligen Kartierung. Unter Makrophyten versteht man in der Limnologie höhere Wasserpflanzen. Die unterteilt man in emerse, und submerse. Bei Ersteren liegen überwiegende Anteile der Pflanzen über dem Wasserspiegel, so z.B. bei Seerosen und Schilf. Bei Letzteren befinden die Pflanzen gänzlich unter dem Wasserspiegel. Darunter fallen besonders die Laichkräuter. Sie sind wichtige Lebens- und Schutzräume für Zooplankter, aber auch Laichgründe für Fische.

Oberflächengewässer sind in **hydrologische Einzugsgebiete** eingefügt.

Die sind das Umfeld von Seen, Weihern, Flüssen und Bächen. Ein zu Boden gefallener Regentropfen kann theoretisch, dem natürlichen Gefälle des Geländes folgend, in diese abfließen. Die hydrologischen Einzugsgebiete von größeren Oberflächengewässern sind von Amts wegen bereits in speziellen Karten (orohydrografische Karten) erfasst. Die von Kleineren muss man durch Begehungen im Gelände in Augenschein nehmen.

Die hydrologischen Einzugsgebiete sind für die Beurteilung von Seen und Weihern insofern von Bedeutung, als vornehmlich aus ihnen die Stoffe in Seen und Weihern gelangen, die das Wachstum von Algen und Wasserpflanzen verursachen.

Das vordringliche Problem von Seen und Weihern in Kulturlandschaften, so auch in Oberschwaben, ist eine über das natürliche Maß hinausgehende **Eutrophierung**. Mit diesem Terminus beschreibt man in der Limnologie generell die natürliche, aber auch unerwünschte und schädliche Nährstoffanreicherung in Stillgewässern. In einem engeren Sinn spricht man von **Eutrophierung** aber auch dann, wenn man den übermäßigen Nährstoffeintrag in Gewässer meint.

Entsprechend ihrer Nährstoffgehalte kategorisiert man Stillgewässer in:

- **oligotrophe** (mit geringen Gehalten an Pflanzennährstoffen und großer Sichttiefe),
- **mesotrophe** (mit mittleren Gehalte an Pflanzennährstoffen und mittlerer Sichttiefe),
- **eutrophe** (mit hohen Gehalten an Pflanzennährstoffen und geringer Sichttiefe) und
- **polytrophe** (mit sehr hohen Gehalten von Pflanzennährstoffen und sehr geringer Sichttiefe).

Die meisten Seen und Weiher in Oberschwaben sind in einem eutrophen, einige wenige in einem meso- oder polytrophen Zustand. Die Trophie von Seen und Weihern bestimmt man in der Regel nach einem Verfahren, das die *Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser* entwickelt hat (LAWA (Hrsg.): *Gewässerbewertung stehender Gewässer*). Dabei wird der Ges-P-, der Chlorophyll-a-Gehalt und die Sichttiefe im Frühjahr und im Sommer berücksichtigt.

Die Belastbarkeit von vornehmlich flachen Stillgewässern im Hinblick auf ihre Eutrophierung kann mit Hilfe des Modells der **Critical Loading  $L_c$**  abgeschätzt werden, das Vollenweider entwickelt und 1976 veröffentlicht hat. Dem liegt folgende empirische Formel zugrunde:

$$L_c = 10 \cdot q_s \cdot (1 + (z/q_s)^{0.5})$$

Dabei ergibt sich die kritische Belastung  $L_c$  mit Ges-P in  $\text{mg}/\text{m}^2$  und Jahr.  $q_s$  ist ein Faktor, den man errechnet aus dem Quotienten der mittleren Tiefe eines Sees oder Weihers dividiert durch die Verweildauer des zufließenden Wassers der Zuflüsse in Jahren. Letzteres ist der Kehrwert der Wasseraustauschrate. Der  $L_c$  markiert somit den Grenzwert oberhalb dessen mit der Entwicklung eines Stillgewässers hin zu einem ungünstigeren trophischen Status zu rechnen ist. Aus diesem Grund kommt den Zuflüssen bei der Beurteilung und Sanierung von Seen und Weihern große Bedeutung zu. Viele der oben genannten Richtgrößen misst man daher auch in Wasserproben, die man aus diesen Zuflüssen gezogen hat.

Zur Berechnung des **Critical Loadings** sind folgende Richtgröße zu erheben:

- Menge einem See oder Weiher zufließenden. Im Rahmen unserer Erhebungen erfassen wir den Zufluss den Stillgewässern bei jeder Probennahme in l/s. Dies sind Schätzwerte und mit einer entsprechenden Unsicherheit behaftet. Da man starke Hochwässer bei Probennahmen nur selten antrifft, dürfte unser über das Jahr gemittelte Zufluss geringer sein als der Tatsächliche. Demnach dürfte auch unser in den Berichten errechneter Faktor *Critical Loading überschritten um das...* den Tatsächlichen unterschreiten.
- Die tatsächliche Belastung mit Ges-P-Phosphat pro  $\text{m}^2$  und Jahr. Diese lässt sich errechnen aus dem Jahresmittelwert des Phosphoreintrages.

Das Modell der **Critical Loading** ist in der einschlägigen Literatur kritisiert worden. Zwischenzeitlich gibt es Modelle, mit deren Hilfe man die kritische Belastbarkeit von stehenden Gewässern präziser ermitteln kann. Dabei muss man aber Parameter berücksichtigen, die wir im Rahmen unserer Untersuchungen nicht erheben können. Insofern sind die von uns gemachten Angaben zur **Critical Loading** als Hinweis für die Größenordnung der Belastung von Seen und Weihern zu sehen.

## Literatur

- Fachgruppe Wasserchemie in der Gesellschaft Deutscher Chemiker (Hrsg):  
Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung. Dritte,  
völlig neubearbeitete Auflage. Weinheim Bergstraße (Verlag Chemie, GmbH) 1960. Ständig  
ergänzte Loseblattsammlung. ISBN 978-3-527-19010-2
- LAWA (Hrsg.): Gewässerbewertung stehender Gewässer – vorläufige Richtlinie für die  
Erstbewertung von natürlich entstandenen Seen nach trophischen Kriterien. Schwerin April  
1999. ISBN: 3-88961-225-3
- Schwoerbel, Jürgen und Heinz Brendelberger: Einführung in die Limnologie. 10. Aufl. Berlin und  
Heidelberg (Springer Spektrum) 2013. ISBN: 978-3-8274-2153-1
- Vollenweider, R.A. : Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake  
eutrophication. In: Ist. Ital. Idrobiol. 33. 1976, pp 53-83