



SeeWandel

SeeWandel Faktenblatt No. 01 | September 2021

Leben im Bodensee –
gestern, heute und morgen



Universität
Zürich ^{UZH}

Die Burgunderblutalge im Bodensee – dominierende Bewohnerin oder seltener Gast?

Derzeit wird die Wahrscheinlichkeit einer dauerhaften Etablierung der Burgunderblutalge mit regelmäßigen Massenvorkommen im Freiwasser des Bodensee-Obersees von SeeWandel-Forschenden des Projekts „Gründe für das Wachstum von *Planktothrix rubescens* im Zürich- und Bodensee“ als gering eingestuft. Kommt es jedoch während mehrerer Jahre in Folge zu einer sehr schwachen Durchmischung des Sees, könnte dies zu Massenentwicklungen führen.

Eine Nutzung des Seewassers für die Trinkwasserversorgung wird selbst bei Massenvorkommen als unproblematisch angesehen, sofern die Wasserwerke über die nötigen Aufbereitungsschritte verfügen. Die klimabedingte Verlängerung der Badesaison bis in den Spätherbst erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass Badende mit den Giftstoffen der Burgunderblutalge in Kontakt kommen.



Was ist die Burgunderblutalge?

Die Burgunderblutalge mit dem wissenschaftlichen Namen *Planktothrix rubescens* ist ein millimeterlanges Cyanobakterium mit unverzweigten Zellfäden, die in einer Wasserprobe mit bloßem Auge sichtbar sind (Abb.1). Die typische rote Färbung entsteht aufgrund des rötlichen Phycoerythrins, einem Hilfspigment der Photosynthese. Während viele Cyanobakterien bevorzugt in nährstoffreicheren Gewässern vorkommen, entwickelt die Burgunderblutalge besonders in großen, tiefen und nährstoffarmen Seen der nördlichen Hemisphäre Massenvermehrungen (sog. Algenblüten). Viele dieser Seen zeigen klimabedingt drastische Veränderungen der physikalischen und chemischen Bedingungen, die sich oft negativ auf klassische Algengruppen wie Schlund- oder Kieselalgen auswirken. Die Burgunderblutalge hingegen verfügt, wie viele andere Cyanobakterien auch, über eine Reihe von physiologischen Eigenschaften, die sie zum erfolgreichen Konkurrenten von klassischen Algen macht, besonders in sich schnell ändernden Systemen [4]:

- Die Burgunderblutalge kann **zellintern gelagerte Giftstoffe¹ produzieren, die ins Wasser abgegeben werden, wenn die Zellen zerstört werden**. Für Menschen und tierische Organismen sind sie potenziell giftig.
- **Angepasst an geringe Lichtintensitäten hält sie sich bevorzugt in der Sprungschicht² von tiefen geschichteten Seen auf** (im Bodensee in einer Tiefe von ca. 15 Metern). Klassische Algen können unter diesen Lichtbedingungen nur spärlich wachsen. Somit entgeht die Burgunderblutalge dem hohen Konkurrenzdruck im lichtdurchfluteten Oberflächenwasser.
- Gasvesikel (zylinderförmige, luftgefüllte Zellstrukturen) verleihen der Burgunderblutalge Auftrieb und erlauben ihr die **aktive Regulierung ihrer Position in der Wassersäule** [1].
- Bei für die Photosynthese unzureichenden Lichtbedingungen, kann die Burgunderblutalge zur **Energiegewinnung Aminosäuren aus dem Wasser aufnehmen und so auch kürzere Phasen der Dunkelheit überstehen**. Allerdings kann sie im Gegensatz zu vielen anderen Cyanobakterien keinen elementaren Stickstoff fixieren und ist auf Nitrat oder Ammonium als Stickstoffquelle angewiesen.



Abb. 1: Unter dem Mikroskop sind die bis zu millimeterlangen, unverzweigten Zellfäden der Burgunderblutalge sehr gut erkennbar. Bild: Limnologische Station Kilchberg, Universität Zürich.

Infobox

Ihr Name verdankt die Burgunderblutalge einer Legende und führt auf ihr erstes beschriebene Vorkommen im Murtensee (CH) im Jahr 1825 zurück: 1476 besiegten die Eidgenossen in der Schlacht bei Murten das Heer von Karl dem Kühnen, Herzog von Burgund. Später wenn sich das Wasser des Murtensees rot färbte, glaubte die Bevölkerung es sei das Blut, der in der Schlacht gefallenen Burgunder. Dabei handelte es sich um eine Algenblüte der Burgunderblutalge.

¹ Dazu gehören: Cyanopeptoline, Anabaenopeptine, Aeruginosine und Microcystine [2]. Die Microcystine gehören zu den am besten untersuchten Substanzen und können von der Burgunderblutalge in unterschiedlichen Varianten produziert werden [5].

² Übergangsbereich in einem geschichteten See zwischen oberer und unterer Wasserschicht mit einem sehr stark abnehmenden Wassertemperaturgradienten bei zunehmender Wassertiefe.



Massenvermehrung erstmals 2016

Im Herbst 2016 bis Frühling 2017 wurde die Burgunderblutalge erstmals massenhaft im Freiwasser des Bodensee-Obersees beobachtet und ist seit 2017 bis dato nur noch in geringen Vorkommen nachweisbar. Die Nährstoffverhältnisse im Bodensee haben sich seit der Eutrophierungsphase stark zum Vorteil der Burgunderblutalge verändert. Während die Phosphorkonzentration seit 1980 kontinuierlich abgenommen hat, ist der Stickstoffgehalt in Form von Nitrat annähernd unverändert geblieben. Untersuchungen von 2015 bis 2018 zeigen keine abrupten Veränderungen der Phosphor- und Stickstoffkonzentrationen im Bodensee, die das Massenauftreten im Jahr 2016 erklären könnten. Auffällig war jedoch die äußerst schwache Durchmischung im Frühjahr in den Jahren 2013 bis 2017. Warum diese Serie schwacher Durchmischung förderlich gewesen sein kann, lässt sich anhand des typischen Wachstumsmusters der Burgunderblutalge aus anderen Gewässern wie z.B. dem Zürichsee (CH) erklären [4].



Durchmischung spielt entscheidende Rolle

Basierend auf Langzeituntersuchungen der Limnologischen Station Kilchberg (Universität Zürich) konnte für den Zürichsee gezeigt werden, dass die Wachstumsdynamik der Burgunderblutalge eng mit der saisonalen Durchmischung bzw. der thermischen Schichtung eines Sees verbunden ist [8].

Bei stabilen Schichtungsverhältnissen positioniert sich die Burgunderblutalge mithilfe der Gasvesikel bevorzugt in der Sprungschicht (Abb. 2 [3a]). Eine stabile Sprungschicht mit geeigneten Lichtbedingungen ist für den Aufbau einer Population entscheidend. Zu hohe Lichtintensitäten können das Wachstum hemmen oder sogar zum Absterben der Zellfäden führen. Mit abnehmender Lichteinstrahlung und zunehmender oberflächlicher Durchmischung wird die Burgunderblutalge in das Oberflächenwasser gezwungen (Abb. 2 [4a]) und bildet bei Massenvorkommen einen rötlichen Oberflächenfilm (Abb. 3). Es kommt zum „Burgunderblut-Phänomen“.

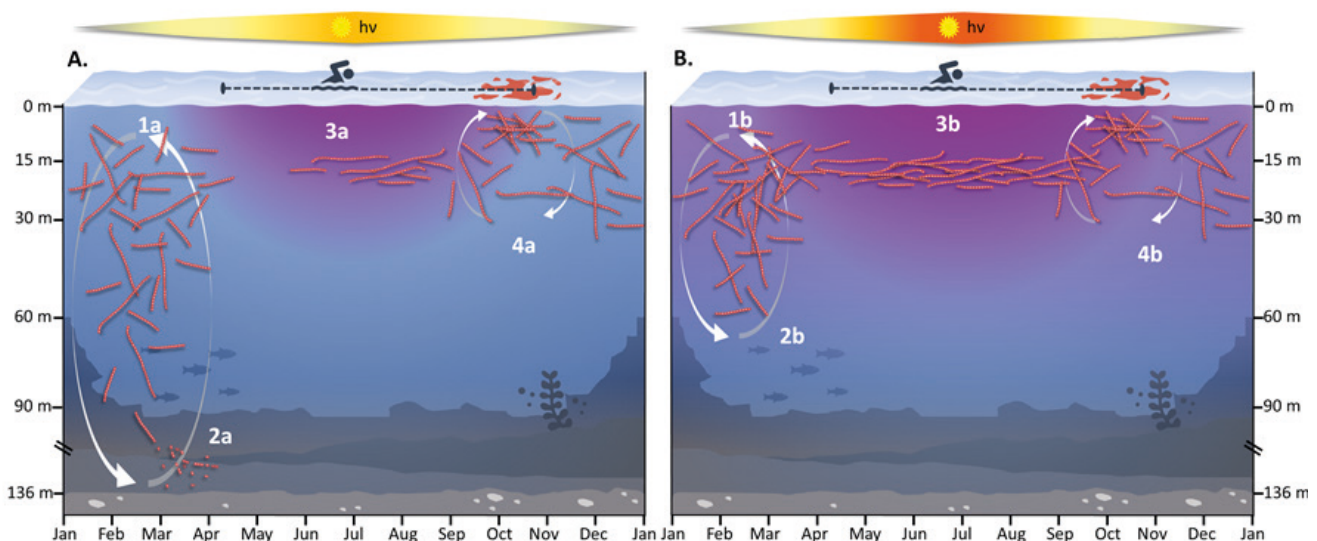


Abb. 2: Das Wachstumsmuster der Burgunderblutalge während einer vollständigen Durchmischung (A) und während einer abgeschwächten Durchmischung (B) der Wassersäule des Sees. (1a-3a) Eine vollständige Durchmischung bewirkt, dass die Gasvesikel kollabieren und ein Großteil der Population abstirbt, da der Aufstieg ins Oberflächenwasser nicht mehr möglich ist. Sehr geringe Bestandsdichten im Frühsommer sind die Folge. (1b-3b) Ist die Durchmischung abgeschwächt, überlebt der Großteil der Population und Bestandsdichten sind bereits im Frühjahr sehr hoch. (4a, 4b) Sowohl bei vollständiger als auch abgeschwächter Durchmischung kommt es im Herbst zu oberflächlichen Durchmischungen und es kann sich ein rötlicher Oberflächenfilm ausbilden. Grafik: Knapp & Posch 2021.



Abb. 3: Das „Burgunderblut-Phänomen“: An der Wasseroberfläche bildet die Burgunderblutalge einen rötlichen Film.
Bild: Limnologische Station Kilchberg, Universität Zürich.

Bei einer vollständigen Durchmischung des Sees werden die Gasvesikel durch den zunehmenden hydrostatischen Druck der Wassersäule zerstört (Abb. 2 [1a-2a]). Die stärksten heute bekannten Gasvesikel [1], widerstehen dem Wasserdruck bis in eine Tiefe von ungefähr 100 Metern (maximale Tiefe Bodensee-Obersee: 251 Meter). Die Zellfäden gelangen dann aus der Tiefe nicht mehr in

lichtdurchflutete Bereiche und sie sterben mit der Zeit ab. Dabei freigesetzte Toxine sind aufgrund der großen Tiefe und der Verdünnung im Wasserkörper ungefährlich. Somit kommt es zu hohen Verlusten in der Population [6] und die Burgunderblutalge erreicht erst im Spätsommer wieder Bestandsdichten, die sich mit Feld- und Labormethoden nachweisen lassen.

Bei einer schwachen Durchmischung ist die Wahrscheinlichkeit zu überleben für die Burgunderblutalge deutlich höher. Überlebt ein Großteil der Population die Durchmischungsphase im Frühjahr, führt dies bereits im Frühsommer zu hohen Bestandsdichten in der Sprungschicht (Abb. 2 [1b-4b]).

Der Bodensee ist wie der Zürichsee monomiktisch, d.h. er durchläuft in der Regel einen saisonalen Zyklus bei dem das Wasser jährlich im Frühjahr vollständig vertikal durchmischt und im Sommer und Herbst thermisch geschichtet wird. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die Burgunderblutalge im Bodensee ein ähnliches Wachstumsmuster aufweist.



Folgen für ein Ökosystem bei Massenvorkommen

In Bezug auf die Biomasse hat die Burgunderblutalge das Potenzial zur dominierenden Art in einem Seeökosystem zu werden. Die zellinternen Giftstoffe und die Form der Zellfäden machen sie für das Zooplankton zu keiner relevanten Nahrungsquelle [5], daher besitzt sie auch kaum natürliche Fressfeinde. Die Anreicherung der Gifte entlang der Nahrungskette ist deshalb sehr unwahrscheinlich und konnte bisher unter naturnahen Bedingungen auch nicht nachgewiesen werden. Dafür kann sie jedoch zu einer Senke für Nährstoffe wie Phosphor oder Stickstoff werden, die in ihrer Biomasse gebunden bleiben und dadurch kann es zu einer Verarmung entlang der verschiedenen Nahrungsstufen im Nahrungsnetz kommen. In vielen geschichteten Seen ist die Durchmischung essenziell für den Transport von Nährstoffen aus der Tiefe in die oberen Wasserschichten [9]. Bei ungenügender Durchmischung werden unzureichend Nährstoffe nach oben transportiert. Gleichzeitig überleben höhere Anteile der Burgunderblutalgenpopulation, die nun direkt mit anderen Primärproduzenten³ um den wenigen verfügbaren Phosphor konkurrieren. Im Zürichsee beispielsweise konnte während der Algenblüte im Frühjahr ein drastischer Rückgang zentrischer Kieselalgen, Goldalgen und Schlundalgen beobachtet werden [9].

³ Organismen, die aus Kohlenstoff und Wasser mit Hilfe von Sonnenlicht Biomasse erzeugen.



Folgen für die Nutzung eines Sees bei Massenvorkommen

Baden im See

Während der thermischen Schichtung besteht eine klare Trennung zwischen dem Lebensraum der Burgunderblutalge und dem Badebereich. In dieser Zeit ist sie in der Regel in einer Wassertiefe von 12 bis 15 Metern positioniert, es besteht also keine direkte Expositionsgefahr. Wird sie aber durch Lichtmangel in der Sprungschicht oder Sturmereignisse und interne Wellen an die Wasseroberfläche gedrückt, besteht für Mensch und Tier das Risiko direkt mit den Giftstoffen in Kontakt zu kommen [3]. Bereits bei Hautkontakt können gesundheitliche Folgen (z.B. Hautreizungen) nicht ausgeschlossen werden. Das Trinken von unbehandeltem Seewasser ist dann unbedingt zu vermeiden. Kritische Situationen entstehen vermehrt aufgrund des klimabedingten Temperaturanstiegs, der die Badesaison vielerorts bis in den späten Herbst verlängert. Eine Überschneidung

von Badesaison und Risikozeitraum für *Planktothrix*-Blüten an der Wasseroberfläche wird wahrscheinlicher und vergrößert auch erheblich die Gefahr für direkte Kontakte mit dem Toxin.

Trinkwassernutzung

Zur Aufbereitung von Oberflächenwasser wird in Deutschland, Österreich und der Schweiz vielfach das Verfahren der Ozonung eingesetzt. Zusätzlich werden in nachgeschalteten Filtern die partikulären Inhaltsstoffe entfernt und das Wasser z.B. durch Chlor, Chlordioxid oder UV-Bestrahlung desinfiziert. Durch dieses „Multibarrierensystem“ wird das vollständige Zurückhalten der Giftstoffe der Burgunderblutalgen gewährleistet. Eine toxische Wirkung ist im aufbereiteten Trinkwasser nicht mehr nachweisbar.



Kann sich die Burgunderblutalge zu einem dominierenden Organismus im Bodensees etablieren?

Ob *Planktothrix rubescens* in einem See größere Bestandsdichten ausbilden kann, hängt von zahlreichen Faktoren ab. Viele Faktoren stehen mit den klimabedingten Veränderungen in großen Seen des Alpenraumes in Verbindung [6, 8, 9]. Einige dieser Auswirkungen sind auch im Bodensee zu beobachten:

- Die klimabedingte Erwärmung des Bodensees und die damit verbundene, früher eintretende, längere und stabilere thermische Schichtung sowie die verminderte Durchmischungstiefe dürften sich vorteilhaft für die Entwicklung der Burgunderblutalge auswirken.
- Aus Unterwasser-Lichtmessungen im Jahr 2018 geht hervor, dass die Burgunderblutalge in der Sprungschicht zeitweise geeignete Lichtbedingungen vorfinden kann.
- Der Bodensee verfügt über ausreichend hohe Nitratkonzentrationen, die der Burgunderblutalge als Stickstoffquelle dienen könnte.

Allerdings weist der Bodensee auch Charakteristika auf, die eine Entstehung von Algenblüten der Burgunderblutalge erschweren:

- Trotz schwacher Durchmischung in den Jahren 2013 bis 2017, reichte die Durchmischung immer noch bis in eine Wassertiefe von über 100 Meter. Der dort herrschende Wasserdruck zerstört ihre Gasvesikel und dezimiert die Population erheblich.
- Die Sprungschicht scheint im Vergleich zum Zürichsee weniger kompakt und stabil zu sein, wodurch der Burgunderblutalge eine stabile Positionierung in der Wassersäule erschwert wird.
- Basierend auf den Lichtmessungen im Jahr 2018, zeigten sich innerhalb von zwei Wochen Schwankungen bei der Eindringtiefe des Lichts von bis zu 10 Metern. Die Burgunderblutalge kann ihre vertikale Position nur langsam

verändern und hätte Schwierigkeiten den großen Schwankungen ihres bevorzugten Lichtklimas zu folgen.

- Im Bodensee ist die Burgunderblutalge wohl stark phosphorlimitiert. Die Phosphorkonzentrationen im Bodensee sind bis in große Tiefen sehr gering. Selbst bei einer abgeschwächten Durchmischung (z.B. bis 100 Meter) gelangt sie nicht in Bereiche mit erhöhten Phosphorkonzentrationen.

Manche Bereiche des Bodensee-Obersees, wie die Bregenzer Bucht oder Gewässer, die mit dem Hauptbecken verbunden sind wie der Überlinger See oder Gnadensee, bieten der Burgunderblutalge potenziell einen geeigneteren Lebensraum. Die geringere Durchmischungstiefe, die Verfügbarkeit von Phosphor und geeignete Schichtungs- und Lichtbedingungen könnten eine Massentwicklung fördern. Dadurch können sie als Ausgangspunkte für eine Besiedlung des Bodensee-Obersees dienen.

Im Bodensee-Obersee können unerwartete Nährstoffeinträge, z.B. durch Hochwasserereignisse dazu führen, dass die Burgunderblutalge kurzzeitig die Phosphorlimitierung umgehen kann. Finden sich während oder kurz nach solchen Ereignissen passende Schichtungs- und Lichtbedingungen, kann dies zu plötzlichen Massentwicklungen führen.

Vieles weist auf einen weiteren Anstieg der Luft- und Wassertemperaturen mit Auswirkungen auf die Intensität der Durchmischung und die Stoffflüsse im Bodensee hin. Als Folge kann es auch vermehrt zu beträchtlichen Schwankungen der Produktivität mit unvorhersehbaren Massentwicklungen der Primärproduzenten kommen. Sofern die Burgunderblutalge eine stabile Sprungschicht und geeignete Lichtbedingungen vorfindet, könnte sie davon profitieren. Die Veränderungen durch den Klimawandel machen Vorhersagen über saisonale Dynamiken im See allerdings zunehmend schwieriger.

Es sprechen Gründe für und gegen weitere Massentwicklungen der Burgunderblutalge im Bodensee-Obersee. Derzeit wird die Wahrscheinlichkeit einer dauerhaften Etablierung der Burgunderblutalge im Freiwasser des Bodensee-Obersees von den SeeWandel-Forschenden als gering beurteilt. Eine abschließende Einschätzung, ob sich die Burgunderblutalge zu einem dominierenden Organismus im Bodensee etablieren wird, wird voraussichtlich nicht möglich sein, da die klimabedingten Veränderungen selbst in sehr gut untersuchten Seeökosystemen kaum vorausgesagt werden können.



Management und Maßnahmen

Schreiten die klimatischen Veränderungen und ihre Effekte auf Gewässer weiter voran, kann dies zu drastischen Veränderungen der thermischen Schichtung des Sees und der Nährstoffverteilung führen. Damit entstehen neue Probleme im Management der Gewässer. Um die Klimawandel bedingten Auswirkungen frühzeitig zu erkennen und ihnen entgegen wirken zu können, ist ein umfassendes Monitoring Programm erstrebenswert.

Monitoring physikalischer und chemischer Parameter:

Die gesamtheitliche Analyse von Temperaturdaten, Sauerstoff- und Phosphorkonzentrationen ist die Basis, um festzustellen, ob die Burgunderblutalge geeignete Verhältnisse vorfindet.

Monitoring Burgunderblutalge:

- **Hochauflösende Messprofile** sind für die genaue Charakterisierung der saisonalen Dynamik und vertikalen Verbreitung nötig. Beispielsweise mit Messschritten in 0.5 Meter-Abständen. Die Burgunderblutalge befindet sich bei thermischer Schichtung manchmal lediglich innerhalb eines Bereichs von einem Meter. Wird diese Schicht bei der Beprobung von Standardtiefen nicht beprobt, kann die Burgunderblutalge übersehen werden.
- Auch die **Berücksichtigung der Sichttiefe des Sees** ist sinnvoll. Der Bodensee ist sehr klar, das Licht dringt tief in das Wasser ein. Dies beeinflusst auch die Wassertiefe, in der die Burgunderblutalge ein geeignetes Lichtklima vorfindet. Ein Monitoring bis in eine Tiefe von mindestens 30 Metern wäre daher für den Bodensee empfehlenswert.
- Zudem empfiehlt es sich **Messsonden, mit einer Kalibrierung zur Erkennung der Burgunderblutalgen** zu verwenden, da ohne eine entsprechende Kalibrierung die Burgunderblutalge fälschlicherweise anderen Algengruppen zugeordnet wird (meist den Schlundalgen).
- In Bereichen des Bodensees, in denen die **Burgunderblutalge einen potenziell geeigneteren Lebensraum** vorfindet (z.B. Bregenzer Bucht, Überlingersee, Gnadensee), ist die **Beobachtung ihrer Entwicklung** besonders wichtig, um frühzeitig die Entstehung von Algenblüten im Hauptbecken einschätzen zu können.

Lichtmessungen:

Zeitlich hochauflösende (mindestens zweiwöchentliche) Messungen der Unterwasserstrahlung erlauben eine Einschätzung, ab wann die Burgunderblutalge aus der Sprungschicht in den oberflächlichen Wasserkörper aufsteigen wird. Liegen diese Daten vor, kann auch vorausgesagt werden, wann sich rötliche Filme auf der Seeoberfläche bilden werden.

Sensibilisierung der Öffentlichkeit:

Bei Massenvorkommen ist, damit keine Gefährdung durch die Burgunderblutalge ausgeht, **schnelles Handeln gefordert**. Eine offizielle Information der lokalen Bevölkerung durch professionelle Informationstafeln der Behörden vor allem an Badestellen, ist dabei sehr wichtig. Erfahrungen vom Zürichsee aus dem Jahr 2020 zeigen, dass **kurzfristig ausgesprochene Warnungen an die Bevölkerung teilweise nur bedingt wahrgenommen** werden und eine Herausforderung darstellen. Es empfiehlt sich, vorgängig Kommunikationspfade festzulegen und Informationsmaterial bereitzuhalten. Auch ist es nützlich, die lokale Bevölkerung und Vertreter von kommunalen Ebenen über das Vorkommen giftiger Organismen im See zu informieren und Ansprechpersonen frühzeitig zu definieren.



Impressum

Im Rahmen des SeeWandel Forschungsprojekts „P6: Gründe für das Wachstum von *Planktothrix rubescens* im Zürich- und Bodensee – Vergleich der Langzeitdaten, experimentelle Ansätze und genetische Analysen“ wurde die Fragestellung untersucht, ob sich die Burgunderblutalge zu einem dominierenden Organismus im Nahrungsnetz des Bodensees etablieren könnte. Die aus dem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse sind Grundlage des SeeWandel-Faktenblatts #1: „Dominierende Bewohnerin oder seltener Gast?“ Weiterführende Informationen sind verfügbar auf: www.seewandel.org.

„SeeWandel: Leben im Bodensee – gestern, heute und morgen“ untersucht den Einfluss von Nährstoffrückgang, Klimawandel, gebietsfremder Arten und anderer Stressfaktoren auf das Ökosystem Bodensee, seine Biodiversität und Funktionsweise, sowie die menschliche Nutzung am See.

Herausgeber

SeeWandel
PD Dr. Piet Spaak
Überlandstrasse 133
CH-8600 Dübendorf
E-Mail: seewandel@seewandel.org

Auskunft und Kontakt

Universität Zürich, Limnologische Station,
Institut für Pflanzen- und Mikrobiologie
Prof. Dr. Thomas Posch
Seestrasse 187 | CH-8802 Kilchberg
E-Mail: posch@limnol.uzh.ch

Autorinnen und Autoren

- Deborah Knapp, Limnologische Station, Universität Zürich
- Gaëlle Pauquet, Amt für Wasser und Energie St.Gallen
- Thomas Posch, Limnologische Station, Universität Zürich

Mit Unterstützung von

- Josephine Alexander, SeeWandel
- Roland Schick, Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung
- Christine Schranz, Bayerisches Landesamt für Umwelt
- Piet Spaak, SeeWandel
- Lukas Taxböck, Amt für Wasser und Energie St.Gallen

In den SeeWandel Faktenblättern werden die Einschätzungen der Autorinnen und Autoren und des Herausgebers vertreten. Sie müssen sich nicht zwingend mit jenen von anderen SeeWandel Projektpartnern decken.



Literaturverzeichnis

- [1] Bright DI, Walsby AE (1999) The relationship between critical pressure and width of gas vesicles in isolates of *Planktothrix rubescens* from Lake Zürich. *Microbiology* 145(10):2769-2775
- [2] Dittmann E, Fewer DP, Neilan BA (2013) Cyanobacterial toxins: biosynthetic routes and evolutionary roots. *FEMS Microbiology Reviews* 37(1):23-43
- [3] Fromme H (2006) Gesundheitliche Bedeutung von Cyanobakterientoxinen in Badegewässern. In: Toxinbildende Cyanobakterien (Blaualgen) in Bayerischen Gewässern. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Materialienband Nr. 125, 27-44
- [4] Knapp D, Posch T (2021) Die Burgunderblutalge im Zürichsee. Populationsdynamik und Einfluss des Klimawandels. *Aqua & Gas* N°4 | 2021: 14-21
- [5] Kurmayer R, Deng L, Entfellner E (2016) Role of toxic and bioactive secondary metabolites in colonization and bloom formation by filamentous cyanobacteria *Planktothrix*. *Harmful Algae* 54:69-86
- [6] Posch T, Köster O, Salcher MM, Pernthaler J (2012) Harmful filamentous cyanobacteria favoured by reduced water turnover with lake warming. *Nature Climate Change* 2(11):809-813
- [7] von Gunten U (2003) Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water Research* 37:1443-1467
- [8] Yankova Y, Villiger J, Pernthaler J, Schanz F, Posch T (2016) Prolongation, deepening and warming of the metalimnion change habitat conditions of the harmful filamentous cyanobacterium *Planktothrix rubescens* in a prealpine lake. *Hydrobiologia* 776(1):125-138
- [9] Yankova Y, Neuenschwander S, Köster O, Posch T (2017) Abrupt stop of deep water turnover with lake warming: Drastic consequences for algal primary producers. *Scientific Reports* 7(1):13770

