

Klimawandel und Trinkwasser- versorgung – Ergebnisse der Langzeitforschung an Talsperren

Die Klimaerwärmung ist heute in aller Munde und damit auch die Frage, ob es denn künftig genug Wasser geben wird. Doch die Sorge um mengenmäßig ausreichendes Trinkwasser ist nur eine Seite des Problems. Auch die Qualität unseres wichtigsten Lebensmittels ist zunehmend durch den Klimawandel bedroht.

VON HEIDEMARIE HORN, WOLFGANG HORN, KERSTIN RÖSKE UND ISOLDE RÖSKE

SOMMER 2002: Ein Hochwasser ungewöhnlichen Ausmaßes überflutet auch die Talsperre Saidenbach im sächsischen Erzgebirge, die den Großraum Chemnitz mit Trinkwasser versorgt. Innerhalb weniger Tage ergießen sich mehr als 25 Prozent des normalen Jahreszuflusses in den Stausee und das Sechs- bzw. Elffache der üblichen Phosphor- und Partikelmengen werden hineingespült, gefährden die Qualität des Rohwassers und erfordern von den Wasserwerkern höchsten Einsatz.

Sommer 2003: Der Wasserspiegel der Talsperre sinkt unaufhörlich. Nach monatelanger Trockenheit liegt er am Jahresende 14 Meter unter dem Hochwasserüberlauf, und die Talsperre besitzt nur noch 33 Prozent ihres möglichen Wasservolumens. Nährstoffe und Planktonorganismen, also kleinste Algen, Tiere und Bakterien, akkumulieren sich im immer enger werdenden Stauraum, das kühle, saubere Tiefenwasser schrumpft zu einem kleinen Rest am Beckengrund zusammen. Ein ganzes Jahr wird es dauern, bis das Stauziel erreicht und die Talsperre endlich wieder voll ist.

Sind das wirklich nur Ausnahmen, so genannte Jahrhundertereignisse? Das Hochwasser 2002 war das dritte innerhalb von elf Jahren im Erzgebirge und wiederholte sich 2013 mit beinahe gleicher Intensität. Auch Trockenheit und starke

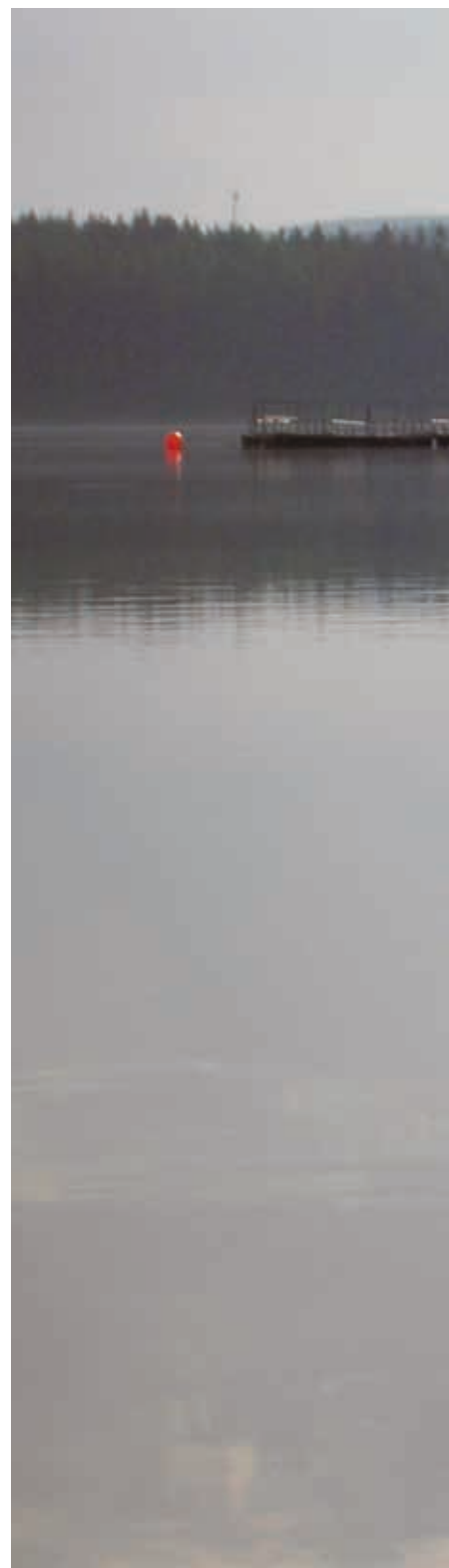


ABB. W. HORN

Die Talsperre Saldenbach im sächsischen Erzgebirge.



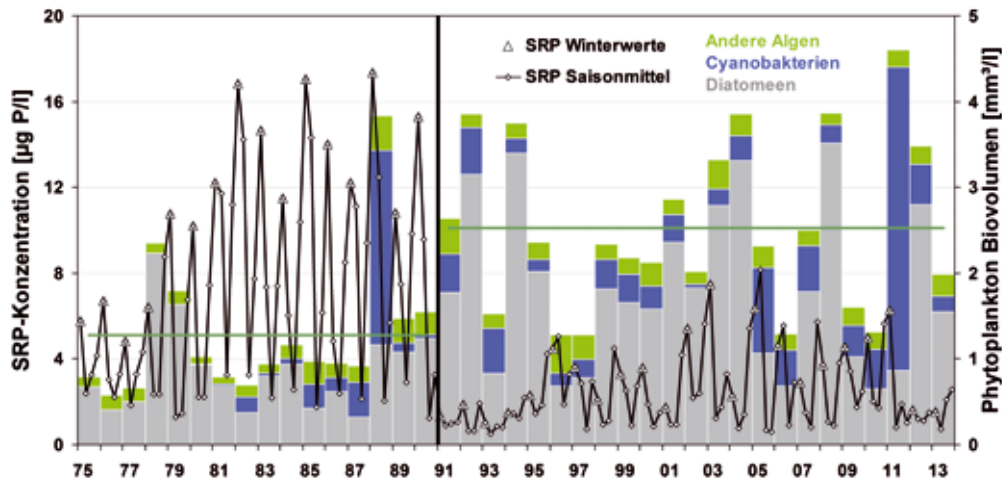


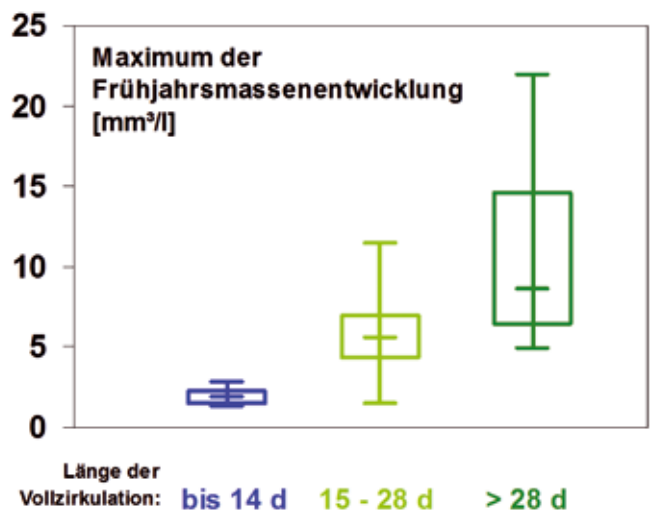
Abb. 1: Die mittleren saisonalen Freiwasserkonzentrationen des Orthophosphates (SRP) sowie die Jahresmittel der zwei wichtigsten Phytoplanktongruppen der Talsperre Saidenbach seit 1975. Für das Orthophosphat wurde für jede „Jahreszeit“, d. h. für die Zeit der Eisbedeckung (= Winterwert), der Frühjahrsvollzirkulation, der Sommerschichtung und der Herbstvollzirkulation, ein Saisonmittel berechnet. Die Winterwerte, beim SRP in der Regel die höchsten im Jahr, wurden besonders gekennzeichnet. Die grünen, waagerechten Linien geben das langjährige Mittel des Phytoplanktons vor und nach 1990 an. Die Untersuchungen erfolgten bis 1985 wöchentlich, danach im zweiwöchigen Abstand.

Stauspiegelabsenkung machten 2011 den Talsperrenbetreibern wieder sehr zu schaffen. Und doch sind das nur die (noch immer) seltenen Extremereignisse. Daneben, schleichend und selbst für den Fachmann schwer von den normalen, zwischenjährlichen Schwankungen abzugrenzen, schlugen sich die Änderungen im Klima aber auch langfristig auf die Beschaffenheit unseres Trinkwassers nieder. Eine Arbeitsgruppe der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig untersucht seit 1975 die Auswirkungen natürlicher und menschlicher Einflüsse auf die biotische Struktur von Stauseen, deren Eigenschaften wichtige Kriterien der Wassergüte darstellen. Mit der dabei gewonnenen, auf Grund ihrer zeitlichen Länge, Kontinuität und Umfassenheit weltweit außergewöhnlichen Datenreihe kommt sie zu unerwarteten Ergebnissen.

Nährstoffrückgang und Phytoplanktonzunahme – ein Widerspruch?

Im Wasser ist es wie auf dem Feld: Es kann nur so viel wachsen, wie die Menge des vorhandenen Nährstoffes es zulässt. In Saidenbach, wie in den meisten Gewässern Mitteleuropas, begrenzt fast ausschließlich der Phosphor das Wachstum des Phytoplanktons. Obwohl er pro Liter nur in Mikrogrammmengen vorkommt, war seine Konzentration doch bis Ende der 1980er Jahre so hoch, dass die Talsperre nach her-

Abb. 2: Solange noch Nährstoffe vorhanden sind, ist das Maximum der Frühjahrsmassenentwicklung des Phytoplanktons (erfasst als über die gesamte Tiefe gemittelte Biovolumenkonzentration) in der Talsperre Saidenbach davon abhängig, wie lange die Frühjahrsvollzirkulation dauert.



kömmlichen Modellen als eutroph – also hochproduktiv – eingestuft wurde. Mit diesen Phosphormengen ergaben sich zwischen 1975 und 1990 im Mittel Konzentrationen von 1,3 mm³ Phytoplankton-Biovolumen pro Liter (Abb. 1). Dieser niedrig erscheinende Wert darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass bei Massenentwicklungen durchaus mehr als 30 mm³ Algenbiovolumen pro Liter Rohwasser in Einzeltiefen auftreten können.

Mit der Wiedervereinigung wurden ab Sommer 1990 alle phosphorhaltigen Waschmittel durch phosphorfremde ersetzt – mit der Konsequenz, dass die Phosphorkonzentration im Talsperrenwasser plötzlich um ca. 60 Prozent zurückging (Abb. 1). Theoretisch wurde die Talsperre dadurch mesotroph. Paradoxerweise verringerte sich jedoch die Algenproduktion keineswegs – im Gegenteil: von 1991 bis 2013 wurden durchschnittlich 2,5 mm³ Phytoplankton pro Liter beobachtet (Abb. 1), also fast das Doppelte!

Milde Winter verlängern das Frühjahrswachstum

Diese Erhöhung des Jahresmittels wurde vor allem durch verstärkte Frühjahrsmassenentwicklungen verursacht. Diese treten unmittelbar nach Eisauflauf während der so genannten Frühjahrs-Vollzirkulation auf, einer Zeit tiefer Durchmischungen, wenn sich die inverse, winterliche Temperaturschichtung des Wassers auflöst. Akteure dieser Frühjahrsblüte sind stets schwere, d. h. Turbulenz bedürftige Kieselalgen (Diatomeen). Sie reichern sich mit allem während der

Winterzeit nicht genutzten Phosphor an und beginnen ihr Wachstum, sobald das Licht ungehindert vom Eis wieder ins Wasser dringt. Weil die Temperaturen bei nur etwa 4 °C liegen und das Lichtangebot noch immer sehr gering ist, wachsen sie aber nur langsam. Es dauert sechs bis sieben Tage, ehe sich die Population verdoppelt. Mit Einsetzen der Sommerschichtung lässt dann die Turbulenz des Wassers drastisch nach, und die Diatomeen sinken rasch zu Boden. Der bis dahin noch nicht für das Wachstum genutzte Phosphor im Zellinneren wird mit ins Sediment genommen und somit produktionsunwirksam.

Gleichzeitig mit der Phosphorabnahme ab 1990 begann europaweit eine Serie besonders milder Winter. Die Talsperre war deutlich kürzer mit Eis bedeckt, was zu längeren Vollzirkulationen führte – praktisch also eine Verlängerung des Frühjahrs auf Kosten des Winters. Dadurch konnte in diesen Jahren der in den Algen gespeicherte Phosphor vollständig in Biomasse umgesetzt und das vorhandene Nährstoffpotential ganz ausgenutzt werden. So kam es zu erhöhten Phytoplanktonkonzentrationen (Abb. 2).

Heiße Sommer fördern das Cyanobakterienwachstum

Obwohl das Phosphorangebot nun im Sommer deutlich geringer ist, kommt es auch in dieser Zeit zu keinem Rückgang der Phytoplanktonmenge. Zwar tritt die Kieselalge *Fragilaria crotonensis*, die bis 1990 im Hochsommer vorherrschte und an episodisch auftretende Teilzirkulationen gut angepasst ist, deutlich seltener auf. Der Grund dafür sind neben dem geringeren Phosphorangebot auch die höheren Oberflächentemperaturen und größere Temperaturgradienten zwischen Oberfläche und Grund, die die Wasserstabilität deutlich erhöhen, so dass durch verstärkte Sedimentation deren Massenaufkommen verhindert wird. Das verschaffte aber zugleich den Cyanobakterien einen Konkurrenzvorteil: Sie treten nun verstärkt auf, und in vielen Jahren nach 1990 fällt ihre Biomasse höher aus als zuvor (Abb. 3). Diese früher als

Blualgen bezeichneten Prokaryoten werden traditionell und funktionell zum Phytoplankton gestellt. Sie gehören zu den ältesten noch existierenden Organismen auf der Erde und demonstrieren damit ihre hohe Anpassungsfähigkeit, getragen auch von der Vielzahl an Arten, die sie umfassen. Alle zusammen kennzeichnen einige gemeinsame Eigenschaften, die ihnen insbesondere unter den Bedingungen der Eutrophierung und Klimaerwärmung Vorteile verschaffen, so z. B. ihre Vorliebe für warme und stabil geschichtete Gewässer. Bei Wassertemperaturen deutlich über 20 °C wachsen sie generell schneller als die meisten eukaryotischen Algen. Obwohl sie

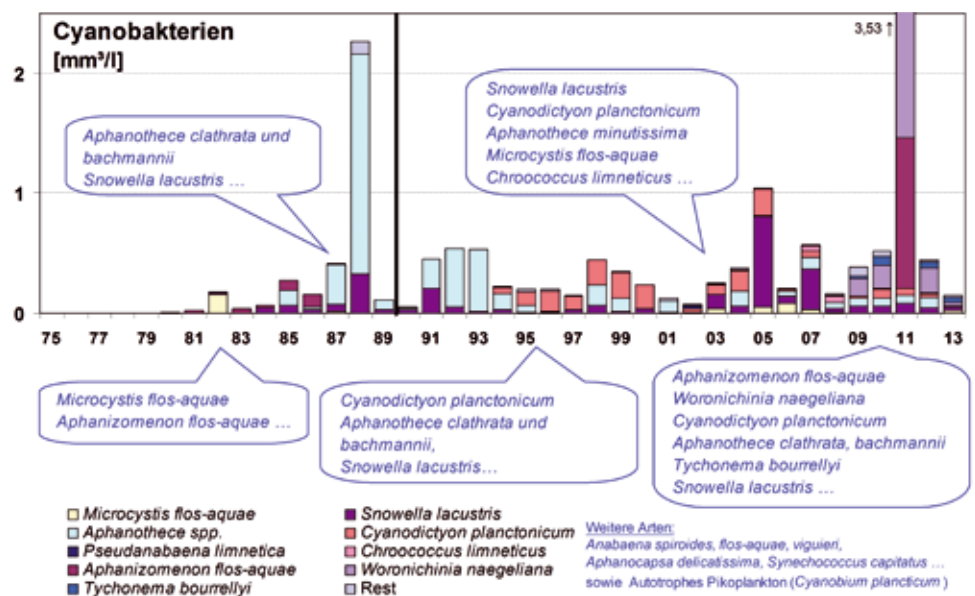


Abb. 3: Die qualitativen und quantitativen Veränderungen der Cyanobakteriengemeinschaft (Jahresmittel des Biovolumens der dominanten Arten) in der Talsperre Saidenbach seit 1975.

vorwiegend Indikatoren für ein großes Nährstoffangebot im Wasser sind, sind viele ihrer Arten auch an das Wachstum bei niedrigsten Phosphorkonzentrationen angepasst. Zudem ist in Saidenbach zwar der Phosphorimport von außen stark zurückgegangen, durch die verminderte Kieselalgensedimentation im Sommer entfällt jetzt aber in dieser Zeit der Phosphortransfer in das Sediment. Die trophogene Schicht wird daher zwar deutlich weniger mit Phosphor beliefert, er verbleibt jedoch dort und kann intensiver im internen Kreislauf genutzt werden.

Cyanobakterien sind vor allem deshalb unerwünscht, weil sie Giftstoffe bilden, so genannte Toxine. Alle bekannten, Wasserblüten bildenden Vertreter sind in der Lage, Hepato- oder Neurotoxine zu produzieren. Auffallend nach 1990 waren



Abb. 4: Die Talsperre Saldenbach während der Cyanobakterienblüte 2011 im Herbst. Hauptvertreter waren damals die beiden Arten *Woronichinia naegeliana* und *Aphanizomenon flos-aquae*.

dabei nicht nur die größeren Massenentwicklungen einzelner Arten, sondern auch die Zunahme der Diversität der Cyanobakterien (Abb. 3), was ihre ständige Anpassung an die sich ändernden Bedingungen widerspiegelt, sowie das (Wieder-) Auftreten „berüchtigter“ Wasserblüten bildender Formen (z. B. *Woronichinia naegeliana*, *Aphanizomenon flos-aquae*; Abb. 4). Den Cyanobakterien wurde stets große Aufmerksamkeit geschenkt, aber erst die modernen molekulargenetischen Methoden eröffneten in der letzten Zeit ganz neue Einsichten. Mittels DNA-Isolierung, Vervielfältigung durch Polymerase-Kettenreaktion (PCR) und anschließender Sequenzierung der PCR-Produkte kann man problematische Arten besser differenzieren und identifizieren.

Welche Rolle spielt das Zooplankton?

Die Zooplankter, insbesondere die Crustaceen, Primärkonsumenten im Nahrungsnetz und damit wichtiger Verlustfaktor für das Phytoplankton, wurden ebenfalls seit 1975 regelmäßig erfasst. Auch diese sind stark von den erhöhten Wassertemperaturen und den veränderten Schichtungsverhältnissen betroffen, ihr Aufkommen wird in Saldenbach aber noch immer in erster Linie von den Friedfischen gesteuert, die sich vom Zooplankton ernähren. Die Zunahme der sperrigen Kieselalgen und der schlecht verdaubaren, koloniebildenden Cyanobakterien stellt zudem kein verbessertes Futterangebot für die Crustaceen dar. Nicht übersehen darf man aber, dass die kleinen, gut fressbaren und deshalb bevorzugten nanoplanktischen Algen, wachstumsstarke Phosphorkonkurrenten im Sommer, durch das in dieser Zeit immer gut entwickelte Crustaceenplankton auf niedrigem

Niveau gehalten werden. Dessen Fraß trägt so indirekt zu einer Stabilisierung der Cyanobakteriengemeinschaft bei.

Das Sediment – Stabilisierungsfaktor oder Quelle für interne Nährstoffzufuhr?

Gewässersedimente werden im Allgemeinen als Senke angesehen, in der von außen eingetragene und im System selbst produzierte Stoffe deponiert und über oxidative Sperrschichten „begraben“ werden. In der Talsperre sedimentieren seit 1989 im Mittel knapp 2 Kilo Trocken(!)-masse pro Quadratmeter und Jahr. Durch den Abbau organischer Stoffe kommt es jedoch auch zur Freisetzung und Rückführung der Nährstoffe, vor allem, wenn das System überlastet und der Sauerstoff knapp wird, wie z. B. am Ende der Sommerstagnation. Insbesondere die Kontaktschicht zum überstehenden, sauerstoffhaltigen Wasser ist hinsichtlich Bakteriendichte und enzymatischer Aktivität durchaus vergleichbar mit dem Belebtschlamm biologischer Abwasserbehandlungsanlagen. Zwar schlagen in tiefen, thermisch geschichteten Gewässern wie der Talsperre Saldenbach die Temperaturänderungen des Klimas bislang nicht bis in das Bodensediment der Tiefenzone durch, jedoch können schon veränderte Zirkulations- und Schichtungszeiten und der anders geartete „Planktonregen“ einen Einfluss auf die Organismen des Stoffabbaus haben. Deshalb wurde der chemischen und mikrobiologischen Zusammensetzung dieser Grenzzone im Forschungsvorhaben besondere Beachtung geschenkt. Auch hier brachte der Einsatz moderner biochemischer und molekular-genetischer Methoden (CARD FISH, Pyrosequenzierung, DGGE u. a.) neue Erkenntnisse und enthüllte nicht nur eine enorme Diversität unter den *Bacteria* und *Archaea* im Sediment, sondern auch eine große Anzahl noch unbekannter, bisher nicht klassifizierbarer Mikroorganismen.

Klimaerwärmung kontra Re-Oligotrophierung

Man weiß heute, dass die Klimaerwärmung die Symptome der Eutrophierung in Gewässern verschärft, und führt das vor allem auf die Zunahme des externen und internen Nährstoffangebotes, aber auch auf die größere thermische Wasser-

stabilität sowie veränderte Nahrungsnetzstrukturen zurück, also eher auf die indirekten als die direkten Auswirkungen erhöhter Luft- und Wassertemperaturen. Im Falle der Talsperre Saldenbach wird deutlich, dass Klimaänderungen aber noch über weitere Mechanismen eingreifen können. Allein die veränderten saisonalen Durchmischungs- und Schichtungsverhältnisse verbesserten die Wachstumsbedingungen für die Diatomeen im Frühjahr und für die Cyanobakterien im Sommer so entscheidend, dass die mögliche Re-Oligotrophierungseffekte nach 1990, d. h. der erhoffte Rückgang der Algenmenge auf Grund der 60-prozentigen Nährstoffreduktion, völlig verhindert wurde. Die bis dahin gültigen Kriterien für eine Begrenzung der Phytoplanktonproduktion sind jetzt nicht mehr ausreichend, um die bisherige Wasserqualität aufrechtzuerhalten.

Wie wichtig ist Langzeitforschung?

Schon Goethe wusste: „Der Tag gehört dem Irrtum und dem Fehler, die Zeitreihe dem Erfolg und dem Gelingen.“ Die langjährigen Beobachtungen bestätigen die Komplexität der Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökosystemstruktur in Talsperren. Natürliche und vom Menschen verursachte Einflüsse greifen ineinander, verstärken oder kompensieren sich. Die unerwarteten Veränderungen in der Talsperre Saldenbach sind ein eindrucksvoller Beweis dafür, dass ökologische Langzeitforschung notwendig ist, um die Folgen globaler Veränderungen aufzuklären. Mit einem Datensatz von „nur“ 22 Jahren, also ohne die Jahre vor 1990, wäre die große Bedeutung klimagesteuerter Einflüsse nicht sichtbar und nachvollziehbar geworden. So ist die Einstellung vieler naturwissenschaftlicher Langzeitbeobachtungen wenig verständlich. ■

DIE AUTOREN

Dr. Heidemarie Horn, Dr. Wolfgang Horn und Dr. Kerstin Röske (2014 ausgeschieden) sind bzw. waren wissenschaftliche Mitarbeiter im Vorhaben „Die biotische Struktur von Stauseen“ der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Prof. Dr. Isolde Röske (i. R.) ist Professorin für Angewandte Mikrobiologie an der Technischen Universität Dresden, Leiterin des Vorhabens und Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig.

Literatur und WWW

Arbeitsgruppe „Die Biotische Struktur von Stauseen“ der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig: www.saw-leipzig.de/forschung/projekte/die-biotische-struktur-von-stauseen

H. Horn, L. Paul, W. Horn, D. Uhlmann und I. Röske, Climate change impeded the re-oligotrophication of the Saldenbach Reservoir, in: International Review of Hydrobiology (eingereicht).