



Leibniz-Institut für
Gewässerökologie
und Binnenfischerei

Seen im Klimawandel

Diagnosen und Prognosen aus der Langzeitforschung

IGB Dossier



Seen im Klimawandel

Diagnosen und Prognosen aus der Langzeitforschung

1. *Einleitung: Seen im Klimawandel*
2. *Grundlagen: physikalische, chemische und biologische Prozesse in Seen*
3. *Veränderungen: konkrete Auswirkungen des Klimawandels auf Seen*
4. *Fazit und Zukunftsprognose*

1. Einleitung: Seen im Klimawandel

Seen spielen für uns Menschen sowohl als Lebensgrundlage als auch kulturell eine wichtige Rolle. Sie werden für ganz unterschiedliche Zwecke genutzt und aufgesucht. Seen erbringen zahlreiche sogenannte Ökosystemleistungen, zum Beispiel als Trinkwasserreservoir für Menschen und Nutztiere, für die landwirtschaftliche Bewässerung und zum Hochwasserschutz. Sie sind Grundlage für die Berufs- und Sportfischerei sowie die Binnenschifffahrt und dienen der Erholung und dem Tourismus (Baden, Bootsfahrten, Angelfischerei etc.). Neben diesem praktischen Nutzen können Seen entscheidend für das Mikroklima im jeweiligen Einzugsgebiet sein und sind zudem Hotspots der Artenvielfalt. Seen sind somit ein wichtiges Natur- und Kulturgut und werden als ästhetisches Landschaftselement sehr geschätzt. Kurzum: Seen und Menschen stehen in einem eng verflochtenen Verhältnis – beide beeinflussen einander. Die SeenforscherInnen am Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) untersuchen die Langzeitentwicklungen und die grundlegenden natürlichen Prozesse in und an diesen Gewässern sowie den menschlichen Einfluss auf Seen.

Einen besonderen Fokus legen sie dabei auf die Auswirkungen des Klimawandels. KlimatologInnen prognostizieren einen Anstieg der globalen Lufttemperaturen und eine Zunahme von extremen Wetterereignissen, wie zum Beispiel Hitzewellen, Starkregen und Sommerstürme (IPCC 2013). Die internationale Gemeinschaft hat 2015 auf der UN-Klimakonferenz in Paris (UNFCCC, COP 21) beschlossen, die globale Erwärmung der Lufttemperatur

im Mittel auf unter 2 °C des vorindustriellen Levels zu begrenzen. Dabei soll eine Erwärmung von 1,5 °C möglichst nicht überschritten werden, um die Risiken der Klimaerwärmung zu minimieren. Für Oberflächengewässer fehlt ein solcher Grenzwert bislang. **Langzeitdaten belegen jedoch, dass die sommerlichen Oberflächentemperaturen von Seen zwischen 1985 und 2009 alle zehn Jahre um weltweit durchschnittlich 0,34 °C gestiegen sind (O'Reilly et al. 2015), bereits in diesem kurzen Zeitraum von 24 Jahren also um mehr als die Hälfte des tolerierbaren Anstiegs von 1,5 °C.**

Wie genau die Gewässer und ihre Lebensgemeinschaften auf diesen „Klimastress“ reagieren und ob ihre ökosystemare Gesundheit und Stabilität gefährdet sind, sind wichtige Fragen der Klimafolgenforschung an Gewässern. Die Zusammenhänge und Interaktionen in Seeökosystemen sind jedoch äußerst komplex, weshalb Pauschalaussagen kaum möglich und nicht durch wissenschaftliche Ergebnisse gedeckt sind. Seen können je nach Typ und Einzugsgebiet ganz unterschiedlich auf die Klimaerwärmung reagieren. Das *IGB Dossier* zeigt daher auf, welche grundlegenden Entwicklungen zu erwarten sind und legt dar, wie wahrscheinlich das Eintreten bestimmter Szenarien ist.

Im folgenden Kapitel werden zunächst einige Grundlagen der physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse von Seen in gemäßigten Breiten (die Klimazone, in der auch Deutschland liegt) beschrieben. Anschließend werden aktuelle Ergebnisse aus der seenspezifischen Klimafolgenforschung vorgestellt.

2. Grundlagen: physikalische, chemische und biologische Prozesse in Seen

2.1 Physikalische Prozesse in Seen: der jährliche thermische Zyklus

Seen in gemäßigten Zonen unterliegen starken saisonalen Zyklen, die grundlegend durch die physikalischen Eigenschaften des Wassers gesteuert werden. Nachgelagert werden so auch die meisten chemischen und ökologischen Prozesse beeinflusst. Diese saisonalen Zyklen und Prozesse sind besonders empfindlich gegenüber der Klimaerwärmung. Man unterscheidet bei der Durchmischung von Seen im jährlichen Zyklus zwischen monomiktisch (eine jährliche Durchmischung), dimiktisch (zweifache Durchmischung) und polymiktisch (mehrfache Durchmischung).

In einem typischen **dimiktischen See** sinken die Oberflächentemperaturen im Winter unter 4 °C und es kann sich eine Eisschicht bilden, wodurch eine Vermischung von Oberflächenwasser mit tieferem Wasser verhindert wird (Abb. 1a). Da Wasser bei 4 °C die höchste Dichte (Dichteanomalie) hat, schichtet sich im Winter kälteres Wasser über das 4 °C warme Wasser – weshalb Seen in der Regel nicht bis zum Grund durchfrieren. Nach der Eisschmelze im Frühling herrscht in der gesamten Wassersäule eine einheitliche Wassertemperatur, sodass sich der gesamte See bis zum Grund durchmischen kann. Dieser Prozess wird Zirkulation genannt (Abb. 1b). Zum Ende des Frühlings heizt die intensive

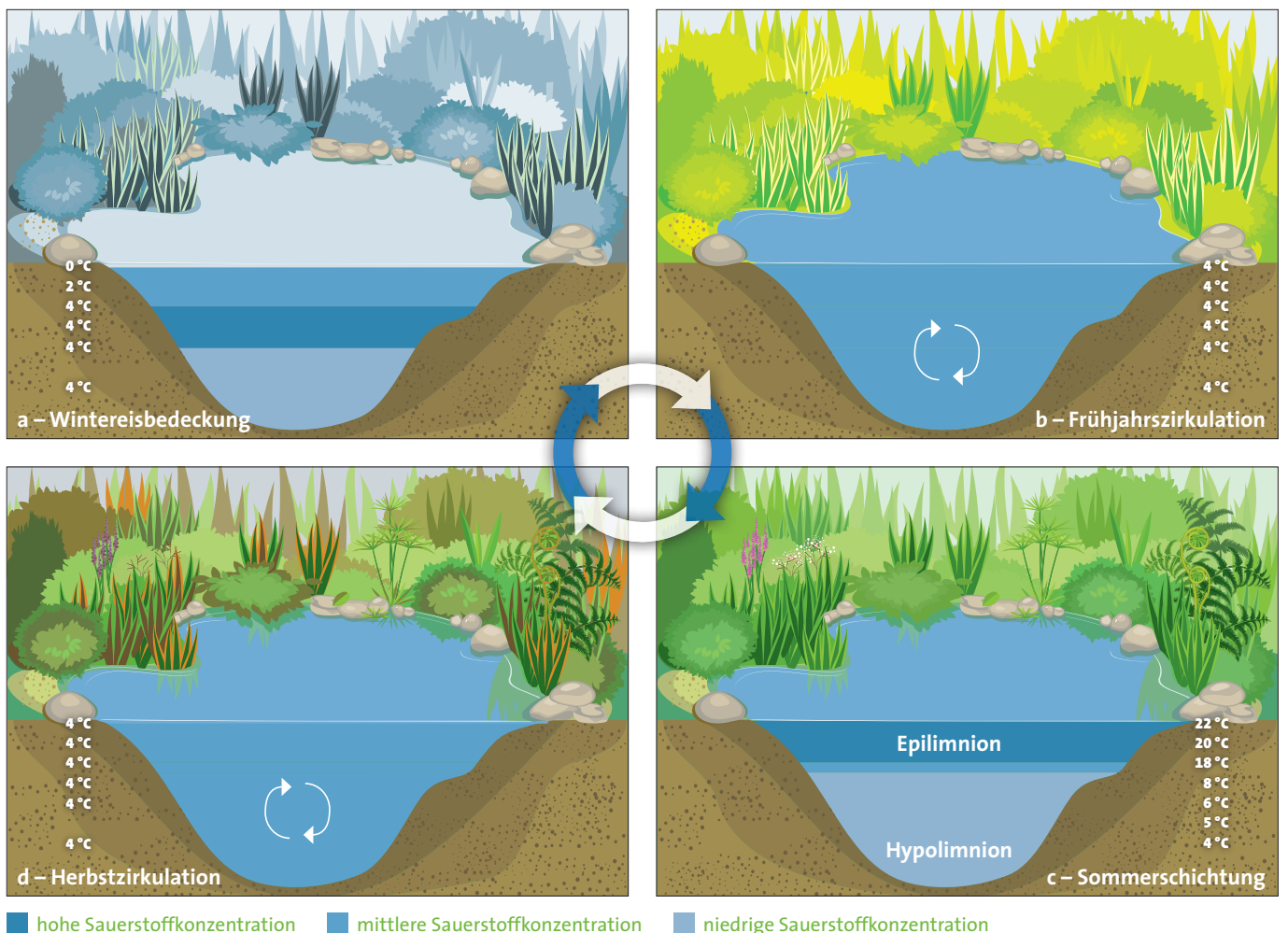


Abb. 1: Zyklus eines typischen dimiktischen Sees: Die Wassersäule wird zweimal im Jahr durchmischt (Frühjahrs- und Herbstzirkulation), was sich entscheidend auf den Sauerstoffgehalt und die Lebensgemeinschaften auswirkt. Temperaturunterschiede zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser unter Eis sowie im Sommer verhindern eine Durchmischung.

Sonneneinstrahlung das Oberflächenwasser schneller auf als das tiefere Wasser. Dadurch entwickelt sich eine warme Wasserschicht an der Oberfläche, die **Epilimnion** genannt wird. Diese „schwimmt“ oberhalb der dichteren, kälteren Wasserschicht, die **Hypolimnion** genannt wird (Abb. 1c). Eine derartige Ausbildung unterschiedlicher Ebenen wird als Schichtung bezeichnet und bleibt über den gesamten Sommer bestehen. Im Herbst löst sich die Temperaturschichtung auf. Nach der kontinuierlichen Abkühlung des Oberflächenwassers kommt es erneut zu einer Zirkulation (Abb. 1d).

Polymiktische und monomiktische Seen unterliegen einem ähnlichen saisonalen Verlauf wie dimiktische Seen, allerdings mit einigen wesentlichen Unterschieden (Kirillin & Shatwell 2016). Im Gegensatz zu den eben beschriebenen dimiktischen Seen sind **polymiktische Seen** zu flach (weniger als zehn Meter tief), um ein ausgeprägtes Hypolimnion zu formen. Daher durchmischt sich das Wasser den ganzen Sommer hindurch regelmäßig und bildet nur kurzzeitig eine Schichtung aus. **Monomiktische Seen** wiederum unterscheiden sich von dimiktischen Seen in der Tatsache, dass sie im Winter nicht zufrieren. Dies kann zwei Gründe haben: entweder, weil sie sich in einem wärmeren Klima befinden, wo das Oberflächenwasser im Winter nicht unter 4 °C abkühlt (in der Gemäßigten Klimazone ist das nicht der Fall), oder weil sie zu tief sind (über 100 Meter) und die hohe Wärmespeicherkapazität des Wassers ein vollständiges Zufrieren verhindert, wie zum Beispiel beim Bodensee oder Zürichsee. Dementsprechend durchmischen sich monomiktische Seen auch während des Winters und bilden nur von Frühling bis Herbst eine Schichtung aus.

2.2. Chemische und biologische Prozesse in Seen

Der **Sauerstoffgehalt** ist ein wesentlicher Indikator für die Gesundheit eines Sees. Sauerstoff ist entscheidend für Wassertiere, aber auch für die Aufrechterhaltung einer chemischen Balance in Seen. Sauerstoff entsteht im Wasser in den lichtdurchfluteten oberen Wasserschichten während der Photosynthese des Phytoplanktons (Algen, pflanzliches Plankton). Ebenso gelangt über die Umgebungsluft Sauerstoff durch die Wasseroberfläche

in das Gewässer. Somit ist das Oberflächenwasser reich an Sauerstoff, während das Tiefenwasser in Perioden längerer Schichtung oder unter einer Eisdecke sauerstofffrei (anoxisch) werden kann.

Verbraucht wird Sauerstoff hauptsächlich beim Abbau von organischer Substanz durch Bakterien und generell durch Respiration (Atmung) aller aquatischen Organismen. Aufgebrauchter Sauerstoff wird während der Zirkulation aufgefüllt, sobald sich das sauerstoffreiche Oberflächenwasser im gesamten See verteilt. Dementsprechend haben dimiktische und monomiktische Seen im Frühling nach der Frühjahrszirkulation den höchsten Sauerstoffgehalt und zum Ende der Sommerstagnation den niedrigsten Sauerstoffgehalt (Abb. 1). In polymiktischen Seen tritt Sauerstoffmangel im Tiefenwasser im Winter infolge langer Eisbedeckung oder im Sommer durch längere Schichtungsereignisse auf.

Das **Plankton** (mikroskopisch kleine Wasserorganismen) unterliegt ebenfalls einem saisonalen Zyklus. Das **Phytoplankton** zeigt im Frühjahr in den meisten Seen eine charakteristische Blüte. Zur Blüte kommt es, wenn Lichtintensität und Temperatur nach dem Winter rasant ansteigen und gelöste Nährstoffe ausreichend zur Verfügung stehen. Das **Zooplankton** (tierisches Plankton), das sich vom Phytoplankton ernährt, dezimiert die Frühjahrsalgenblüte und erzeugt das sogenannte Klarwasserstadium. Dieses zeichnet sich durch sehr hohe Sichttiefen in Seen (Klarheit) über einen circa zweiwöchigen Zeitraum aus. Im Anschluss entwickelt sich eine Sommergemeinschaft von Phyto- und Zooplankton, darunter auch Cyanophyceen (umgangssprachlich „Blaualgen“ genannt), die im Herbst aufgrund geringerer Wassertemperaturen und schwächerer Lichtintensität ebenfalls einbricht. Während der Sommerschichtung sinkt epilimnisches organisches Material kontinuierlich zum Seegrund. So sammeln sich **Nährstoffe** im Tiefenwasser und im Bodensediment der geschichteten Seen. Mit der nächsten Herbst- und Frühjahrszirkulation erfolgt eine Verteilung der Nährstoffe über die gesamte Wassersäule, so stehen sie erneut für das Wachstum zur Verfügung. In polymiktischen Seen werden das Wasser und die enthaltenen Nährstoffe regelmäßig durchmischt und kontinuierlicher genutzt.

3. Veränderungen: konkrete Auswirkungen des Klimawandels auf Seen

3.1 Methoden der Klimafolgenforschung an Seen

Wie sich der Klimawandel bereits heute auf unsere Seen auswirkt und wie sich dieser Prozess in Zukunft entwickeln wird, ist auch für die Seenforschung eine komplexe Frage. Die gewässerfokussierte Klimafolgenforschung basiert vorrangig auf der datenbasierten **Langzeitforschung** an Seen. Trendhafte Veränderungen lassen sich nicht durch experimentelle Ansätze, die über kurze Zeiträume durchgeführt werden, beschreiben. Um die grundlegenden Mechanismen zu verstehen, ist es sinnvoll, die experimentelle Forschung und die Modellierung mit der Langzeitforschung zu koppeln. Bei Letzterer nutzen WissenschaftlerInnen umfangreiche Datenreihen, die über mehrere Dekaden (über 40 Jahre, sog. „Big Data“) erhoben wurden. Diese umfassen abiotische Faktoren (Klima, Wetter, Nährstoffeinträge aus dem Einzugsgebiet, thermische Schichtung oder Sauerstoffverhältnisse) und Wechselwirkungen von Organismen in Nahrungsnetzen. Mittels statistischer und deterministischer Modellierung klimabedingter Langzeitveränderungen werden Trends sowie die mögliche Überschreitung kritischer Grenzwerte erkenn- und quantifizierbar. Weiterhin können Auswirkungen von Extremereignissen im Vergleich zur langjährigen natürlichen Variabilität herausgearbeitet werden.

Die der Forschung insgesamt zur Verfügung stehenden methodischen Herangehensweisen (Modellierung, Experiment und Langzeitforschung) unterscheiden sich im jeweiligen Grad der Kontrollierbarkeit, dem erlangten Verständnis der wirkenden Mechanismen und der erfassten Systemkomplexität: Mit **Modellen** lassen sich die untersuchten Mechanismen gut kontrollieren, aber sie können die Komplexität von Ökosystemen nicht abbilden. Dagegen zeigen Langzeitdaten die Entwicklung von Ökosystemen unter Berücksichtigung der gesamten Komplexität abiotischer und biotischer Interaktionen sowie des „Gedächtnisses“ (z. B. im Sediment deponierte Dauerstadien) eines Sees. Sie sind jedoch begrenzt darin, Wirkungszusammenhänge aufzuzeigen. **Großskalige Experimente** sind zwischen der Theorie und der Langzeitbeobachtung angesiedelt und liefern ein gutes Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen. Dabei können die Gesamtkomplexität sowie die jahreszeitlichen Schwankungen von Ökosystemen jedoch nur eingeschränkt abgebildet werden.

Die folgenden Abschnitte fassen Ergebnisse und Prognosen aus den unterschiedlichen Forschungsansätzen zusammen.

3.2 Steigende Luft- und Wassertemperatur: direkte und indirekte Effekte

Die Klimaerwärmung der letzten 50 Jahre hat zu sichtbaren allgemeinen und systemspezifischen Veränderungen von Seeökosystemen geführt. Neben direkten Effekten sind es eine Vielzahl von indirekten Effekten, die wesentlich zu Veränderungen von Seen beigetragen haben.

Direkte Effekte: Durch die erhöhte Lufttemperatur steigt auch die Temperatur des Oberflächenwassers. Die winterliche Eisentwicklung geht zurück oder bleibt ganz aus. Durch die höheren Wassertemperaturen verändert sich auch die thermische Struktur von Seen (vgl. Abschnitt 3.3; Abb.1 und 2).

Die veränderte thermische Struktur und die verringerte Eisentwicklung ziehen **indirekte Effekte** nach sich. Diese umfassen veränderte Licht-, Sauerstoff- und Nährstoffverhältnisse. Hinzu kommt die Zunahme externer Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet (vgl. Abschnitt 3.5 und Abb. 2). Diese indirekten Effekte wirken sich maßgeblich auf die Entwicklung des Phytoplanktons und die Struktur von Nahrungsnetzen aus. Sie sind oftmals stärker in ihren Auswirkungen als die direkt durch die Temperatur verursachten Veränderungen.

3.3 Änderungen in der thermischen Schichtung

Eine der deutlichsten Auswirkungen der Klimaerwärmung auf Seen ist die zunehmende thermische Schichtung. In polymiktischen Seen, wie zum Beispiel dem Berliner Müggelsee, werden Schichtungsereignisse aufgrund von vermehrten Heißwetterperioden im Sommer länger und häufiger. Einige der gemäßigten polymiktischen Seen werden zukünftig dimiktisch, wenn diese Schichtungsereignisse über den gesamten Sommer bestehen bleiben (Kirillin 2010). In saisonal stagnierenden Seen (dimiktisch und monomiktisch) beginnt die Schichtung durch mildere Winter bereits zeitiger im Frühjahr und kann im Herbst auch später enden. Dies führt zu einer verlängerten Wachstumsperiode.

Die Erwärmung im Winter beeinflusst ebenfalls die Durchmischung von Seen (Arvola et al. 2009). Mildere Winter bedeuten weniger Eisbedeckung, was die Durchmischung in poly- und dimiktischen Seen fördert. Wenn die Eisschicht gänzlich verschwindet, werden dimiktische Seen zu monomiktischen Seen, da sie sich ohne eine Eisbedeckung im Laufe des Winters kontinuierlich durchmischen (Abb. 1). Anders ist die Situation in sehr

tiefen monomiktischen Seen, wie zum Beispiel dem Bodensee (vgl. Abschnitt 2.1), die nur in sehr kalten und lang anhaltenden Wintern über die gesamte Seefläche eine Eisdecke entwickeln. Mildere Winter können verhindern, dass sich die Seen unter 4 °C abkühlen, wodurch eine Restschichtung erhalten bleibt. Diese Seen werden oligomiktisch, das heißt sie durchmischen sich nicht mehr jährlich bis zum Grund. Insgesamt kann also davon ausgegangen werden, dass sich durch den Klimawandel die Schichtungstypen von Seen verändern können: Polymiktische Seen könnten häufiger dimiktisch werden, dimiktische Seen eher monomiktisch und monomiktische Seen tendenziell oligomiktisch.

3.4 Veränderungen der Sauerstoffkonzentration

Durch die Klimaerwärmung ist zu erwarten, dass die **Sauerstoffkonzentration in Seen** sinkt. Am besten lässt sich dies im Spätsommer in den tiefen Wasserschichten von saisonal geschichteten Seen beobachten. Die höheren

Wassertemperaturen verursachen einen höheren Sauerstoffverbrauch. Durch die längere Schichtung können Zonen entstehen, in denen der Sauerstoff nicht mehr rechtzeitig durch die einsetzende Zirkulation aufgefüllt wird (North et al. 2014). So bilden sich sauerstofffreie (anaerobe) Zonen im Hypolimnion, die zu interner Düngung (vgl. Abschnitt 3.5; Abb. 2) und damit zu einer Verschlechterung der Wasserqualität führen können (Carpenter 2003).

Im Winter ist die Situation nicht weniger komplex: Lange Eisbedeckung von relativ flachen Seen verursacht Sauerstoffmangel und „Winterfischsterben“. Werden die Winter zukünftig milder, verbessert sich die Sauerstoffversorgung und Fischsterben werden geringer (Fang & Stefan 2009). Andererseits können solche milden Winter in sehr tiefen monomiktischen Seen eine tiefgehende Durchmischung und damit die Sauerstoffversorgung im Tiefenwasser verhindern (Rempfer et al. 2010). Dieses Sauerstoffdefizit im Tiefenwasser wird dann vom Winter in den folgenden Sommer übertragen, wodurch sich die sauerstoffarmen Bereiche noch weiter ausbreiten.

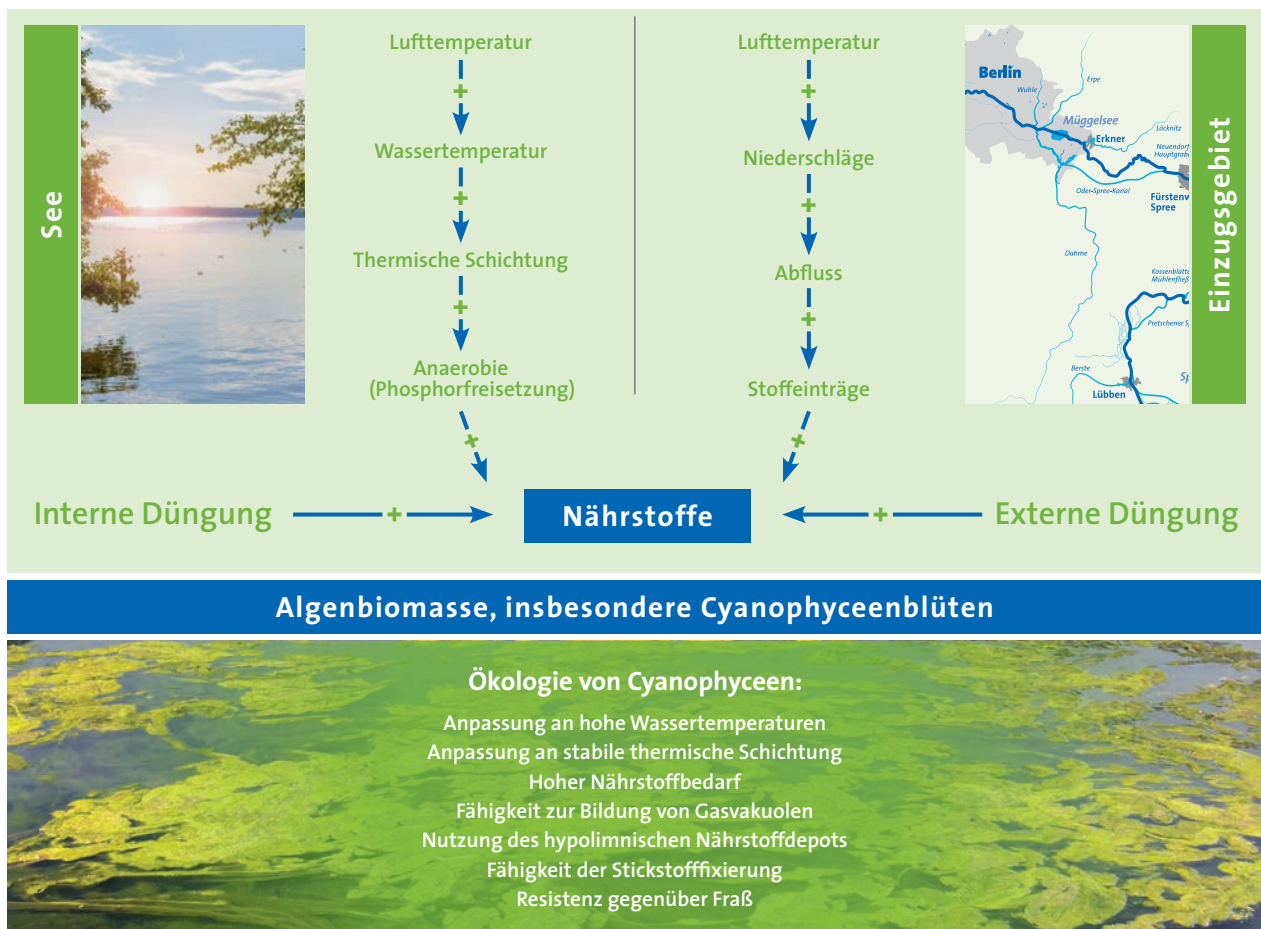


Abb. 2: Gegenüberstellung intern und extern verursachter Düngung von Seen im Kontext der globalen Erwärmung: Die Anreicherung von Nährstoffen im Wasser befördert das Algenwachstum – und insbesondere die Entwicklung von Cyanophyteen, die aufgrund ihrer Ökologie zu den Profiteuren der Klimaerwärmung gehören.

3.5 Interne Düngung und Cyanophyteenblüten

Durch die verlängerte thermische Schichtung sinkt der Sauerstoffgehalt des Tiefenwassers. Infolgedessen werden durch chemische Prozesse zuvor im Sediment gebundene Nährstoffe, wie zum Beispiel Phosphor, freigesetzt (Wilhelm & Adrian 2008). Diese klimabedingte Verstärkung der **internen Düngung von Seen** konterkariert die großen Anstrengungen der vergangenen Jahrzehnte, die externe Nährstoffzufuhr und die damit verbundene Eutrophierung von Seen zu reduzieren. Unter zukünftig wärmeren Klimaszenarien bedeutet dies, dass externe Nährstofffrachten noch stärker als bislang verringert werden müssten, um den Effekt der internen Düngung zu kompensieren – nur, um den aktuellen Nährstoffstatus eines Sees zu erhalten. Jedoch führt die Klimaerwärmung in nördlichen Regionen zu erhöhten Niederschlägen in Form von Regen oder Schnee, wodurch sich der externe Zufluss in Seen und damit die Nährstofffrachten aus dem Einzugsgebiet zusätzlich erhöhen (Abb. 2).

Höhere Wassertemperaturen, eine längere Schichtung und hohe Nährstoffkonzentrationen begünstigen das Algenwachstum und insbesondere die **Entwicklung von Cyanophyteen**, die an diese Bedingungen optimal angepasst sind (Wagner & Adrian 2009). Zudem sind manche Cyanophyteen-Arten in der Lage, Gasvakuolen innerhalb der eigenen Zellen auszubilden, mit denen sie ihre vertikale Position in der Wassersäule regulieren können. Dies ermöglicht ihnen, das hypolimnische Nährstoffdepot, das sich während Perioden stabiler thermischer Schichtung ansammelt, zu erreichen. Damit umgehen sie den zeitweiligen Nährstoffmangel im Epilimnion und sind so konkurrenzstärker als die nicht mobilen Arten. Ein zusätzlicher Vorteil von Cyanophyteen ist deren Möglichkeit, atmosphärischen Stickstoff (N₂) zu nutzen. Aufgrund ihrer oftmals fädigen Struktur und der Tendenz, Kolonien zu bilden, entziehen sie sich zudem weitgehend dem Fraßdruck durch das Zooplankton. Cyanophyteen können so insbesondere an der Wasseroberfläche dichte Blütenteppiche bilden, die auch den Freizeitwert eines Sees als Badegewässer erheblich einschränken (Abb. 2).

3.6 Phänologie: Verschiebung jahreszeitlicher Ereignisse

Die am weitesten verbreiteten klimabedingten Veränderungen in Ökosystemen finden sich in der **Phänologie**, dem jahreszeitlichen Ablauf bestimmter saisonaler Ereignisse. Das Zufrieren von Seen erfolgt später, der Eisbruch hingegen früher. Die frühere Eisschmelze führt zu verbesserten Lichtverhältnissen im Wasser, wodurch auch die Frühjahrsalgenblüte früher erreicht wird. Erhöhte Wassertemperaturen fördern zeitgleich eine zeiti-

gere Entwicklung des Zooplanktons und folglich ein früheres Auftreten des Klarwasserstadiums. Eine weitere Vorverlagerung von Ereignissen ins Frühjahr wird durch die Tageslänge, die konstant bleibt und die Lichtverfügbarkeit bestimmt, eingeschränkt.

3.7 Lebensgemeinschaften: Veränderungen der Individuengröße und des Artenspektrums

Klimabedingte Veränderungen in den Seelebensgemeinschaften sind sehr viel systemspezifischer als die der physikalischen Effekte. Nicht jeder See innerhalb einer Klimazone reagiert biologisch gleich. Zudem sind Veränderungen stark vom Trophiegrad (Nährstoffgehalt) eines Sees abhängig. Eine der wenigen Veränderungen, die generalisierbar scheinen, ist neben der Phänologie (vgl. Abschnitt 3.6) die **Abnahme der Körpergröße von Lebewesen** mit zunehmenden Temperaturen. Dieser Effekt konnte für das Phytoplankton, Zooplankton und für Fischpopulationen gezeigt werden (Adrian et al. 2016). Höhere Temperaturen führen in der Regel zu höheren Wachstumsraten und damit einhergehend zu einer Verringerung der Körpergröße. Dies ist durch die Temperatur-Größen-Regel beschrieben (Kingsolver & Huey 2008). Im Kern besagt diese Regel, dass schnelles Wachstum auf Kosten der Körpergröße geht, da die Geschlechtsreife früher eintritt.

Für das Phytoplankton ist ein indirekter Effekt von Bedeutung: Höhere Temperaturen befördern das **Algenwachstum**, bis es zur Aufzehrung der verfügbaren Nährstoffe kommt. Durch ihr größeres Oberflächen-Volumen-Verhältnis können kleine Algenzellen effizienter Nährstoffe aufnehmen und sind in der Lage, größere Algenarten zu verdrängen.

Lebensgemeinschaften verändern sich zudem durch **Migration von Süden nach Norden**. Arten, die aus dem mediterranen Raum stammen, breiten sich zum Beispiel zunehmend nach Norden aus. Kaltwasserfische wie Seesaiblinge, Coregonen und Stinte, die nur eine geringe Toleranz bei Temperaturveränderungen haben (stenotherme Arten), verlieren in vormalig kühleren Regionen ihren Lebensraum. Arten wie Zander oder Brassen (Blei, Brachse), die größere Temperaturschwankungen tolerieren (eurytherme Arten), nehmen hingegen zu. Generell ist davon auszugehen, dass sich wärmeliebende Arten weiter ausbreiten und dadurch kälteliebende verdrängen (für eine ausführliche Zusammenfassung siehe Jepsen et al. 2012, Adrian et al. 2016).

Die erwärmungsbedingte Eutrophierung (Anreicherung von Nährstoffen) von Seen schränkt die Lichtverfügbarkeit ein. Das wirkt sich negativ auf größere **Unterwasserpflanzen** (submerse Makrophyten) aus. Diese Unterwasserpflanzen halten normalerweise das See-

wasser klar, verhindern das übermäßige Wachstum der Cyanophyceen und sind Kinderstube, Rückzugsort und Speisekammer für Fische, Wasservögel und Insekten. Durch das mangelnde Licht können sie jedoch nur noch schlecht gedeihen. So dominiert das Phytoplankton und damit auch der eher trübe Zustand eines Sees (Jepesen et al. 2003, van Donk et al. 2003, Mooij et al. 2009). Milde Winter mit wenig oder fehlender Eisbedeckung können auch zu einer veränderten Artenzusammensetzung der Unterwasserpflanzen führen. Immergrüne freischwimmende Arten, die überwintern, können bei höheren Wassertemperaturen einen Vorteil gegenüber Arten haben, die im Winter vollends zurückgehen (Netten et al. 2011). Nicht heimische Arten, wie zum Beispiel der freischwimmende Gemeine Schwimmpfarn (*Salvinia natans*) und die Gewöhnliche Wasserschraube (*Vallisneria spiralis*) sind in der Lage, heimische Arten in milden Wintern zu verdrängen (Hussner et al. 2014). Die vorliegenden empirische Studien lassen bisher nur begrenzt weitere Aussagen zur klimawandelbedingten Dynamik und zur Zusammensetzung der Makrophytengemeinschaft zu (Adrian et al. 2016).

3.8 Wechselwirkungen mit dem Einzugsgebiet von Seen

Seen sammeln und speichern das Wasser aus ihren Einzugsgebieten. Sie reagieren daher sehr empfindlich auf Veränderungen in ihrem Umland. Dabei sind Seen in ihren Reaktionen oftmals sehr individuell. Die größten Auswirkungen sind wahrscheinlich auf regional unterschiedliche Niederschlagschwankungen zurückzuführen, die stark durch Wetterextreme wie Dürren und Überschwemmungen (vgl. Abschnitt 3.5) überlagert sind. Durch diese ändert sich die Wasserrückhaltezeit im Gewässer sowie die externe Nährstoff- und Sedimentzufuhr (Abb. 2). Im Zuge der Klimaerwärmung erfolgt somit neben der internen Düngung auch eine stärkere **externe Düngung**. Hervorzuheben ist eine erhöhte Zufuhr von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) aus dem Einzugsgebiet, speziell als Folge milder und niederschlagsreicher Winter.

Sind diese Einträge reich an Huminstoffen (gelöste Substanzen aus dem Boden), kann es zur sogenannten **Dystrophierung** (engl. Browning oder Brownification) kommen: das Wasser färbt sich braun. In diesem Fall verschlechtern sich die Lichtverhältnisse, was die Algen- und Makrophytenentwicklung einschränkt. So können sich die erhöhte Nährstoffzufuhr einerseits und die Verschlechterung der Lichtverhältnisse durch Browning andererseits in ihrer Auswirkung auf die Algenentwicklung gegenseitig abdämpfen. Browning beeinflusst nicht nur die Lichtverhältnisse unter Wasser und damit

die Primärproduktion, sondern erhöht auch die Stagnationsdauer und verringert die Tiefenwassertemperatur in saisonal geschichteten Seen (Snucins & Gunn 2000, Shatwell et al. 2016).

3.9 Bedeutung von Extremwetterereignissen und Überschreitung kritischer Grenzwerte

Die Klimaforschung geht davon aus, dass Extremwetterereignisse zunehmen. Relevant für Seen sind sehr milde Winter, sommerliche Hitzewellen und extreme Sturm- oder Regenereignisse. Unter zukünftigen Klimaszenarien wird es mehr eisfreie Winter geben (Adrian et al. 2016). **Eisfreie Winter** führen zu höheren Sauerstoffkonzentrationen, da die kontinuierliche Durchmischung des Wasserkörpers der Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser entgegenwirkt. Die Lichtverhältnisse und die Mischungsverhältnisse im Winter verändern sich und es entwickelt sich eine an diese Bedingungen angepasste Phytoplanktongemeinschaft. Das Größenspektrum kann sich hin zu etwas größeren Zellen und nicht mobilen Spezies verschieben (Özkundakzi et al. 2016), die durch die Turbulenz des Wasserkörpers bei fehlender Eisbedeckung in der Schwebelage gehalten werden. Größere Algenzellen haben im Winter bei fehlender Nährstofflimitation keinen Konkurrenzvorteil gegenüber kleineren Spezies.

Sommerliche Hitzewellen können Cyanophyceenblüten infolge hoher Wassertemperaturen und intensiver thermischer Schichtung begünstigen (vgl. Abschnitt 3.5 und Abb. 2). Dies ist jedoch sehr von dem zeitlichen Verlauf der Erwärmung und dem Überschreiten kritischer Grenzwerte in der Länge der thermischen Schichtung abhängig. Anhaltende thermische Schichtung und hohe Oberflächentemperaturen können zu sommerlichen Fischsterben als Folge von Temperaturstress in den oberen Wasserschichten und Sauerstoffmangel in den tieferen Wasserschichten führen (Kangur et al. 2013).

Sturmereignisse können zu einer Verlagerung der Thermokline (Übergang von Wasserschichten unterschiedlicher Temperatur) in die Tiefe führen. Damit kommt es zu einer größeren Verteilung des hypolimnischen Nährstoffdepots oder von Planktongemeinschaften, die vorher innerhalb der Thermokline konzentriert waren (Tiefenchlorophyllmaximum), in das Epilimnion. Als Folge konnte ein zunehmendes Algenwachstum beobachtet werden (Kasprzak et al. 2017, Giling et al. 2017).

Starkregenereignisse haben erhöhte Stoffeinträge von Nährstoffen und organischem Kohlenstoff aus dem Einzugsgebiet in Seen zur Folge. Diese Einträge können die Algenentwicklung und bakterielle Aktivität befördern (vgl. Abschnitt 3.8 und Abb. 2).

4. Fazit und Zukunftsprognose

Seen sind durch die Klimaerwärmung weltweit wärmer geworden. Das von der internationalen Gemeinschaft angestrebte Ziel, die Erderwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen, wurde bei den Temperaturen des Oberflächenwassers vieler Seen in den vergangenen Jahrzehnten in den Sommermonaten bereits erreicht oder sogar überschritten. Die Folgen dieser Erwärmung könnten sich in der Zukunft gravierend auf Schutz und Nutzung von Seen auswirken.

Klimabedingte Veränderungen lassen sich vor allem bei den physikalischen, direkten Effekten (vgl. Abschnitte 2.1 und 3.2) mit hoher Sicherheit prognostizieren. Auf chemischer und speziell auf biologischer Ebene ist eine Vorhersage dagegen deutlich schwieriger. Sicher sind steigende Wassertemperaturen, verändertes Schichtungsverhalten und reduzierte Sauerstoffkonzentrationen im Sommer. Dadurch nimmt auch die interne Düngung in Seen mit nährstoffreichen Sedimenten zu. Sehr gut vorhersagbar sind Veränderungen in der Phänologie, den zeitlichen Mustern saisonaler Ereignisse (vgl. Abschnitt 3.6). Für die Prognose von Stoffeinträgen, die an die Hydrologie und die Besonderheiten des Einzugsgebietes von Seen gekoppelt sind, besteht eine höhere Unsicherheit. Auswirkungen auf Lebensgemeinschaf-

ten, Artenvielfalt und Nahrungsnetze sind bisher nur mit sehr geringer Zuverlässigkeit vorherzusagen. Allgemein feststellen lässt sich jedoch die Tendenz, dass Organismen kleiner werden, sich wärmetolerante Arten verstärkt nach Norden ausbreiten und kälteliebende Arten zurückgedrängt werden. Generell gilt, dass neben der Klimaerwärmung das **Auftreten zusätzlicher Stressoren** wie Eutrophierung (bzgl. der Wasserqualität) oder verstärkte Wassernutzung und -verknappung (Wassermenge) eine Zuordnung der direkt durch den Klimawandel verursachten Effekte erschwert.

Dies bedeutet, dass das **Gewässermanagement** im Rahmen der Klimafolgenanpassung mit neuen Unsicherheiten und Herausforderungen konfrontiert ist. Klimafolgenforschung und langfristige Monitoringprogramme können dabei helfen, tragfähige Anpassungsstrategien zu entwickeln. Dabei spielen die Szenarienentwicklung und der Einsatz ökologischer Modelle eine wichtige Rolle. Ein ganzheitliches, flexibles und langfristiges Gewässermanagement, das die Dynamik ganzer Einzugsgebiete (vgl. Abschnitt 3.8) über Landesgrenzen hinweg betrachtet, ist dringlicher geworden. Dies bedeutet jedoch auch, dass die Komplexität und der Koordinationsbedarf der politischen Entscheidungen im föderalen System zunehmen werden.

Quellen und Literatur

- ADRIAN R, HESSEN DO, BLENCKNER T, HILLEBRAND, HILT S, JEPPESEN E, LIVINGSTONE DM, TROLLE D (2016): Environmental Impacts – Lake Ecosystems. In: Quante M, Colijn F North Sea Region Climate Change Assessment. Regional Climate Studies. Cham: Springer; p. 315-340.
- ARVOLA L, GEORGE G, LIVINGSTONE DM, JÄRVINEN M, BLENCKNER T, DOKULIL MT (2009): The Impact of the Changing Climate on the Thermal Characteristics of Lakes. In: George G The Impact of Climate Change on European Lakes. Aquatic Ecology Series. Dordrecht: Springer; p. 85-101.
- CARPENTER SR (2003): Regime shifts in lake ecosystems. Pattern and variation. *Excellence in ecology*; 15, Oldendorf/Luhe: Internat. Ecology Inst. 199 p.
- FANG X, STEFAN HG (2009): Simulations of climate effects on water temperature, dissolved oxygen, and ice and snow covers in lakes of the contiguous United States under past and future climate scenarios. *Limnology and Oceanography*. 54(6):2359-2370.
- GILING DP, NEJSTGAARD JC, BERGER SA, GROSSART HP, KIRILLIN G, PENSKE A, LENTZ M, CASPER P, SAREYKA J, GESSNER MO (2017) Thermocline deepening boosts ecosystem metabolism: evidence from a large-scale lake enclosure experiment simulating a summer storm. *Global Change Biology*. 23(4):1448-1462.
- HUSSNER A, NEHRING S, HILT S (2014) From first reports to successful control: a plea for improved management of alien aquatic plant species in Germany. *Hydrobiologia*. 737(1):321-331.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 1535 pp, Doi:10.1017/CBO9781107415324.
- JEPPESEN E, MEHNER T, WINFIELD IJ, KANGUR K, SARVALA J, GERDEAUX D, RASK M, MALMQUIST HJ, HOLMGREN K, VOLTA P, ROMO S, ECKMANN R, SANDSTROM A, BLANCO S, KANGUR A, STABO HR, TARVAINEN M, VENTELA AM, SONDERGAARD M, LAURIDSEN TL, MEERHOFF M (2012) Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes. *Hydrobiologia*. 694(1):1-39.
- JEPPESEN E, SONDERGAARD M, JENSEN JP (2003) Climatic warming and regime shifts in lake food webs – some comments. *Limnology and Oceanography*. 48(3):1346-1349.
- KANGUR K, KANGUR P, GINTER K, ORRU K, HALDNA M, MOLS T, KANGUR A (2013) Long-term effects of extreme weather events and eutrophication on the fish community of shallow lake Peipsi (Estonia/Russia). *Journal of Limnology*. 72(2):376-387.
- KASPRZAK P, SHATWELL T, GESSNER MO, GONSIORCZYK T, KIRILLIN G, SELMECZY G, PADISAK J, ENGELHARDT C (2017) Extreme Weather Event Triggers Cascade Towards Extreme Turbidity in a Clear-water Lake. *Ecosystems*. 20(8):1407-1420.
- KINGSOLVER JG, HUEY RB (2008) Size, temperature, and fitness: three rules. *Evolutionary Ecology Research*. 10(2):251-268.
- KIRILLIN G (2010): Modeling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes. *Boreal Environment Research*. 15(2):279-293.
- KIRILLIN G, SHATWELL T (2016): Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes. *Earth-Science Reviews*. 161:179-190.
- MOOIJ WM, DOMIS LND, JANSE JH (2009) Linking species- and ecosystem-level impacts of climate change in lakes with a complex and a minimal model. *Ecological Modelling*. 220(21):3011-3020.
- NETTEN JJC, VAN ZUIDAM J, KOSTEN S, PEETERS ETHM (2011) Differential response to climatic variation of free-floating and submerged macrophytes in ditches. *Freshwater Biology*. 56(9):1761-1768.
- NORTH RP, NORTH RL, LIVINGSTONE DM, KOSTER O, KIPFER R (2014): Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global Change Biology*. 20(3):811-823.
- O'REILLY CM et al. (2015): Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters*. 42(24):10773-10781.
- OZKUNDAKCI D, GSELL AS, HINTZE T, TAUSCHER H, ADRIAN R (2016) Winter severity determines functional trait composition of phytoplankton in seasonally ice-covered lakes. *Global Change Biology*. 22(1):284-298.
- REMPFER J, LIVINGSTONE DM, BLODAU C, FORSTER R, NIEDERHAUSER P, KIPFER R (2010): The effect of the exceptionally mild European winter of 2006-2007 on temperature and oxygen profiles in lakes in Switzerland: A foretaste of the future? *Limnology and Oceanography*. 55(5):2170-2180.
- SHATWELL T, ADRIAN R, KIRILLIN G (2016) Planktonic events may cause polymictic-dimictic regime shifts in temperate lakes. *Scientific Reports*. 6: 24361.

- SNUCINS E, GUNN J (2000) Interannual variation in the thermal structure of clear and colored lakes. *Limnology and Oceanography*. 45(7):1639-1646.
- VAN DONK E, SANTAMARIA L, MOOIJ WM (2003) Climate warming causes regime shifts in lake food webs: A reassessment. *Limnology and Oceanography*. 48(3):1350-1353.
- WAGNER C, ADRIAN R (2009): Cyanobacteria dominance: Quantifying the effects of climate change. *Limnology and Oceanography*. 54(6):2460-2468.
- WILHELM S, ADRIAN R (2008): Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton. *Freshwater Biology*. 53(2):226-237.

Impressum

Herausgeber

Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)
im Forschungsverbund Berlin e.V.
Müggelseedamm 310
12587 Berlin
www.igb-berlin.de
Facebook: IGB.Berlin
Twitter: @LeibnizIGB

Ansprechpartner und verantwortliche Autoren

Prof. Dr. Rita Adrian | adrian@igb-berlin.de
Dr. Tom Shatwell | shatwell@igb-berlin.de

Redaktion

Johannes Graupner und Angelina Tittmann | ssi@igb-berlin.de

Gestaltung

unicom werbeagentur GmbH

Titelbild

Der Müggelsee im Südosten Berlins und ist ein polymiktischer, eutropher Flachsee und Gegenstand langjähriger Forschung am IGB.
© stock.adobe.com – Maurice Tricatelle

Über diese Publikation

„Forschen für die Zukunft unserer Gewässer“ ist der Leitspruch des IGB. Die objektive und auf wissenschaftlicher Evidenz basierende Beratung von gesellschaftlichen Akteuren aus Politik, Behörden, Verbänden, Wirtschaft, Bildung und interessierter Öffentlichkeit gehört zu den zentralen Aufgaben des Instituts. Im Rahmen der eigenen Schriftenreihe *IGB Outlines* fasst das IGB gesellschaftsrelevante oder anwendungsorientierte Forschungsergebnisse für verschiedene Zielgruppen in unterschiedlichen Formaten zusammen. Für die Inhalte der Beiträge sind die jeweiligen Autoren verantwortlich. Das hier vorliegende *IGB Dossier* führt in die Grundlagen der physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse in Seen ein und erläutert, wie sich der Klimawandel künftig auf Seen auswirken könnte.

Eine Weiterverbreitung des zusammenhängenden Gesamtdokumentes mit Hinweis auf den Urheber ist grundsätzlich gestattet. Sollten Sie aus dem Dokument im Rahmen anderer Publikationen und Formate zitieren, freuen wir uns über einen Hinweis.

Zitationsvorschlag

IGB (Hrsg.) (2018): IGB Dossier. Seen im Klimawandel. Diagnosen und Prognosen aus der Langzeitforschung. Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin.

Stand: April 2018

DOI: 10.4126/FRL01-006407562

Soweit nicht anders gekennzeichnet, unterliegen die Inhalte dieses Dokuments mit Ausnahme von Bildern der Creative Commons BY 4.0 Lizenz Deutschland.