

Markus Hoffmann und Uta Raeder

Wenn sich das Wasser verändert

Klimawandel beeinflusst die Unterwasservegetation bayerischer Seen

Der Klimawandel und seine Folgen für die Umwelt sind inzwischen eine weltweit anerkannte Tatsache. Unabhängig davon welche Vorhersagen betrachtet werden, ist davon auszugehen, dass sich die Temperatur und Niederschläge in Zukunft weiter verändern werden. Deshalb werden seit einigen Jahren die Auswirkungen dieser Veränderungen auf die verschiedenen Ökosysteme erforscht. Dass der Klimawandel selbst große Wasserkörper beeinflussen kann, zeigten das Dürrejahr 2018 und das Hochwasser im Jahr 2013. Die beiden Extrema führten u.a. bei Gewässern wie dem Chiemsee und der Donau zu sichtbaren Veränderungen. Um langfristig die Folgen solcher Extremereignisse sowie die Folgen höherer Wassertemperaturen und Stoffeinträge auf die Unterwasservegetation abzuschätzen, wurden mehrere Studien durchgeführt. Diese zeigen, dass bereits die bisherigen Veränderungen nachweisbare Folgen für die Unterwasservegetation hatten. Durch die früher einsetzende und die länger andauernde Erwärmung der Seen breitete sich z.B. das *Nixenkraut* in der jüngeren Vergangenheit massiv in Bayern aus. Daher gilt das heimische *Nixenkraut* als Indikator für die Ausbreitungsgefahr nicht heimischer Arten in Seen. Durch weitere Studien konnte zudem nachgewiesen werden, dass eine Erhöhung der Trübstoffeinträge in Folge des Klimawandels langfristig zu Veränderungen der Unterwasservegetation führt.

Schlagwörter: **Makrophyten, Neophyten, Biodiversität, submers, Wassertemperatur, Trübung, Stoffeinträge**

1 Auswirkung des Klimawandels auf Seen

Der Klimawandel und seine Auswirkung auf unterschiedliche Lebensgemeinschaften sind weltweit zu beobachten. Bereits seit 1988 führt der zwischenstaatliche Sachverständigenrat für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) die Ergebnisse der internationalen Klimaforschung zusammen und wertet diese aus. In den Berichten des IPCC und der deutschen IPCC-Koordinierungsstelle wird die fortschreitende globale Erwärmung ausdrücklich belegt und der Einfluss des Menschen als Hauptursache für diese klimatischen Veränderungen eindeutig identifiziert. Der Klimawandel wirkt sich allerdings auf aquatische Ökosysteme anders aus als Landökosysteme und kann regional unterschiedliche Folgen haben. Insgesamt sind jedoch folgende Änderungen zu erwarten:

(I) Aufgrund des Treibhauseffekts wird davon ausgegangen, dass sich global die mittlere Lufttemperatur langfristig um 1,5 bis 4,5°C erhöhen wird (IPCC 2014). Im Kooperationsprojekt Klimawandelveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA) setzen sich die Bundesländer Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern mit den bisherigen Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts auseinander und erstellen Prognosen basierend auf den erwartenden Änderungen

der Temperatur- und der Niederschlagsverhältnisse. Die Analysen von KLIWA zeigen, dass als Folge der höheren Lufttemperatur die Wassertemperatur von großen Seen um 1,5 bis 2,5°C und die von alpinen Gewässern um 0,8 bis 1,3°C steigen werden (KLIWA 2015). In Kombination mit einer früher einsetzenden Erwärmung und langsameren Abkühlung der Gewässer führt dies einerseits zu einer Verkürzung oder sogar zum Fehlen der Eisbedeckung im Winter und andererseits zu einer längeren und stabileren Schichtung der Seen in den warmen Jahreszeiten. Die Zunahme der Wassertemperatur und die Verlängerung der Vegetationsperiode infolge des Klimawandels können wiederum die Etablierung wärmeliebender, gebietsfremder Wasserpflanzenarten begünstigen. Desweiteren kann es durch längere Schichtungsphasen zu anaeroben Verhältnisse über dem Gewässergrund kommen, was zunehmend zu Rücklösungs- und Abbauprozessen im Tiefenwasser führt. Dadurch kommt es zur Eutrophierung, d.h. zur Erhöhung der Primärproduktion der Seen, und das Wachstum von Algen bzw. die massive Ausbreitung von nährstoffliebenden Makrophytenarten wird gefördert (Abbildung 1).

(II) In Zukunft sind zunehmend extreme Wetterereignisse zu erwarten. D.h. es muss vermehrt mit langanhaltender Trockenheit im Wechsel mit Starkregenerereignissen mit Hochwässern gerechnet werden (IPCC 2014). Beides bewirkt eine Zunahme der stofflichen Einträge in die Gewässer. Das Erosionspotential von

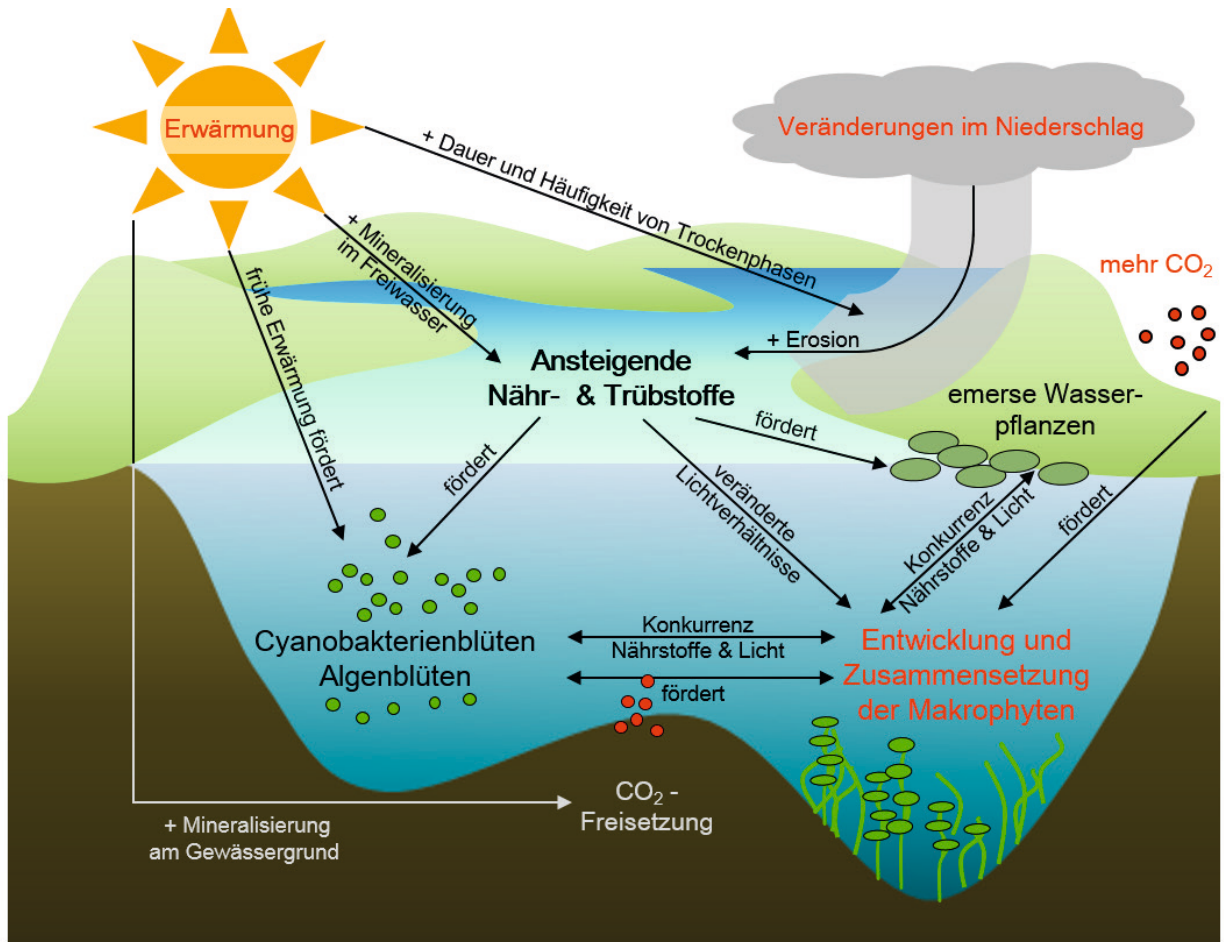


Abb. 1: Klimawandel wirkt sich über Effekte wie höhere Temperaturen, frühere Erwärmung des Wassers, Veränderungen im Niederschlag und höhere CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre direkt und über Folgeeffekte indirekt auf die Umweltbedingungen von Seen aus und verändert somit die Entwicklung und Zusammensetzung der Unterwasservegetation.

Flächen, die von Trockenheit und Dürren betroffen sind, wird deutlich erhöht. Durch folgende Starkregen- und Hochwasserereignisse kommt es zu gesteigertem Abfluss aus dem Einzugsgebiet und schließlich zu vermehrtem Stoffeintrag in die Seen (Abbildung 1). Die partikulären Schwebstoffe sowie die gelösten Huminstoffe und die Nährstoffe, die somit vermehrt in die Seen gelangen, beeinflussen die Unterwasservegetation signifikant. Während Schwebstoffe die Lichtintensität unter Wasser durch Streuung und Reflektion verringern, absorbieren Huminstoffe sowie durch Nährstoffeinträge geförderte Algen bestimmte Teile des Lichts und verändern das Lichtspektrum, d.h. die Lichtqualität (RAEDER/HOFFMANN/RUEGG 2018). Das Licht ist ein wichtiger Steuerungsfaktor für das Wachstum und die Entwicklung von Makrophyten und kann die Regenerationsfähigkeit sowie die Überlebenswahrscheinlichkeit von Makrophyten signifikant beeinflussen (KIRK 2011).

Wie sich diese Änderungen auswirken und welche Konsequenzen diese für die Biodiversität der Unterwasservegetation haben, wird im Folgenden

am Beispiel verschiedener Studien zum Thema *Seen im Klimawandel* dargestellt. Im Schwerpunkt werden die Ergebnisse aus Forschungsprojekten präsentiert, die seit zwei Jahrzehnten an der Limnologischen Station Iffeldorf (TUM, LS AquaSys) an bayerischen Gewässern durchgeführt wurden.

2 Einfluss steigender Wassertemperaturen auf die Biodiversität von Wasserpflanzen

In einer weltweiten Studie, bei der 64 Wissenschaftler 235 See untersuchten, konnte aufgezeigt werden, dass die sommerlichen Oberflächentemperaturen von Seen zwischen 1985 und 2009 um durchschnittlich 0,34°C pro Jahrzehnt gestiegen sind (O'REILLY et al. 2015). Die Autoren der vergleichenden Gewässerstudie gehen davon aus, dass der beobachtete Trend eher unterschätzt als überbewertet wird. Nach Aussage der erwähnten Studie stieg die Oberflächentemperatur der

Seen demnach innerhalb von nur 25 Jahren um 0,82°C und es wird deutlich, dass der angestrebte Grenzwert von maximal 1,5°C Erwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zumindest in Seen deutlich schwerer einzuhalten ist. Das heißt, die globale Erwärmung wird sich auf Seen direkt auswirken. Für Seen der gemäßigten Breiten wird vorhergesagt, dass aufgrund der generell milderen Winter die Eisbedeckung von Seen kürzer sein bzw. ganz ausbleiben wird. Die anschließende Erwärmung wird früher einsetzen. Daher werden sich die Zirkulationsphasen im Frühjahr verkürzen, bei der die Seen von oben bis unten eine Temperatur haben müssen. Im Gegenzug dazu werden sich die sommerlichen Schichtungsphasen verlängern. Aufgrund der späteren Abkühlung der Seen auf eine einheitliche Wassertemperatur wird auch die Zirkulation im Herbst kürzer ausfallen. Im extremsten Fall werden Seen, die ursprünglich zwei Mal im Jahr durchmischt werden konnten (dimiktischer Zirkulationstyp), nur noch im Winter soweit abkühlen, dass sie komplett durchmischt werden können (monomiktischer Zirkulationstyp). Wegen dieser Entwicklung werden die tieferen Seen am Grund zunehmend schlechter mit Sauerstoff versorgt, was zur Rücklösung von Phosphor im Tiefenwasser und somit zu einer internen Düngung, d.h. zu einer Eutrophierung führen kann.

Die Ausbreitung nicht-heimischer Wasserpflanzen (Neophyten) ist eine Hauptursache für den Verlust an Biodiversität und hat eine empfindliche Störung der komplexen Lebensgemeinschaften des Uferbereichs zur Folge. Durch die zukünftigen Temperatur- und Nährstoffbedingungen erhöht sich die Gefahr, dass sich nicht-heimische Wasserpflanzen in den bayerischen Gewässern ansiedeln und invasiv vermehren (MCKEE et al. 2002, MEERHOFF et al. 2007). HUSSNER et al. (2010) wiesen nach, dass in den letzten 100 Jahren 24 aquatische Neophyten in Deutschland eingewandert sind. In der Regel gelangen diese Arten über die Niederlande und Belgien nach Europa und dringen vom Nordwesten her in die heimischen Gewässer ein. Nach den Untersuchungen von HUSSNER et al. (2010) wurden bereits elf dieser Neophyten in bayerischen Gewässern angetroffen, die meisten davon waren bisher auf Grund ihrer Temperatur- und Nährstoffanforderungen auf warme bzw. auf sich schnell erwärmende Gewässer beschränkt (Tabelle 1). Nicht alle gebietsfremden Arten lösen ökologische, ökonomische oder andere Schäden aus, die Gruppe der invasiven Neobiota kann jedoch große Probleme für Ökosysteme verursachen. Im Sinne des Naturschutzes gelten Neozoen und Neophyten als invasiv, wenn sie Auswirkungen auf andere Arten, Lebensgemeinschaften und Biotope haben, indem sie

Tab.1: Die fünf häufigsten Neophyten in bayerischen Gewässern und ihre Präferenzen bezüglich Temperatur, Licht und Nährstoffbedingungen. Abkürzungen: BW: Baden-Württemberg, BY: Bayern, BE: Berlin, BB: Brandenburg, HB: Bremen, HH: Hamburg, HE: Hessen, MV: Mecklenburg-Vorpommern, NI: Niedersachsen, NW: Nordrhein-Westfalen, RP: Rheinland-Pfalz, SL: Saarland, SN: Sachsen, ST: Sachsen-Anhalt, SH: Schleswig-Holstein, TH: Thüringen.

	Temperatur-optimum	Lichtoptimum	Trophie	Ausbreitung
<i>Egeria densa</i> Dichtblättrige Wasserpest	^a 16–28 °C ^b 25–30 °C	Keine genauen Angaben	Mesotroph bis eutroph	Rein vegetativ, NRW, BW, BY, SN, NI (inkl. HB), MV
<i>Elodea Nuttallii</i> Schmalblättrige Wasserpest	^c 20–25 °C	^a Anpassung an Schwachlicht wird vermutet	Oligotroph bis eutroph	Rein vegetativ, Alle Bundesländer
<i>Lagarosiphon major</i> Wechselblatt-Wasserpest	^b 20–23 °C	Keine Präferenz bekannt	Oligotroph bis eutroph	Rein vegetativ, BY, BW, RP, HE, NRW
<i>Myriophyllum aquaticum</i> Brasilianisches Tausendblatt	^c 27–37 °C ^a 18–30 °C	^a Hohe Strahlungsintensität	Oligotroph bis eutroph	Rein vegetativ, NRW, BY
<i>Vallisneria Spiralis</i> Gewöhnliche Wasserschraube	^c 22–26 °C	Keine Präferenz bekannt	Keine Präferenz bekannt	Rein vegetativ, BY, BW, SL, RP, NRW, NI (inkl. HB)

Quellen: ^a(BARKO/SMART 1981), ^b(RIIS et al. 2012), ^c(HUSSNER 2009), ^d(heimbiotop.de), ^e(ANGELSTEIN/SCHUBERT 2009)

heimische Arten in der Konkurrenz um Lebensraum und Ressourcen verdrängen (NEHRING et al. 2013). In aquatischen Ökosystemen zählen allerdings 75% der Neophyten zu den invasiven bzw. potenziell invasiven Arten, während diese in terrestrischen Habitaten nur 14,6% der Neophyten ausmachen (NEHRING et al. 2013).

Es sind jedoch nicht alle bayerischen Gewässer gleichermaßen gefährdet von invasiven wärmeliebenden Arten besiedelt zu werden. In Abhängigkeit von der Höhenlage, der Hydrologie und der Morphologie der Seen wird sich der Klimawandel in unterschiedlicher Weise auf den Wärmehaushalt der Seen auswirken. Um Gewässer zu identifizieren, die potenziell durch die Einwanderung wärmeliebender Arten gefährdet sind, wurden 54 Seen in verschiedenen Regionen Bayerns untersucht (Abbildung 3 A). Ziel war es zu bestimmen, welche Gewässer bereits als Habitat für Neophyten dienen können und anhand der gewonnenen Daten vorherzusagen, welche Gewässer durch die zu erwartende Erwärmung zukünftig ge-



Abb. 2: Großes Nixenkraut (*Najas marina* ssp. *marina*)

fährdet sind. Im Rahmen der Untersuchung wurden die chemischen und physikalischen Parameter der Seen regelmäßig erfasst und darauf geachtet, ob die Gewässer bereits vom wärmeliebenden Arten besiedelt waren, besonders das heimische Große Nixenkraut (*Najas marina* ssp. *marina*) (Abbildung 2) diene als wichtiger Indikator. Diese Art war bis Mitte der 1980er Jahre nur in Bayerns wärmsten Seen, im Waginger-Tachinger See und der Eggstätt-Hemhofer Seenplatte, anzutreffen und breitet sich in den letzten 20 Jahren in Folge der höheren Wassertemperaturen kontinuierlich in Bayern aus (Abbildung 3 A). Wie die nicht-heimischen Arten profitiert das Nixenkraut von höheren Temperaturen, da die Art nur in Seen mit sommerlichen Wassertemperaturen von mindestens 20°C gedeihen kann (HOFFMANN et al. 2013a). Des Weiteren ist das Nixenkraut in der Lage, durch sein schnelles Wachstum Massenbestände zu entwickeln

und andere Arten zu unterdrücken, das heißt, wie die invasive Neophyten kann das Nixenkraut einen negativen Einfluss auf die Biodiversität eines Sees haben (HOFFMANN et al. 2013b). Auf Grund dieser Ähnlichkeiten wurde das Gefährdungspotenzial der bayerischen Seen durch die Ausbreitung des Großen Nixenkrauts ermittelt. Dazu wurde untersucht, welche Gewässer bereits von dem Nixenkraut besiedelt waren und was für Umweltbedingungen in diesen Seen vorherrschten. Mit Hilfe eines Verbreitungsmodells (Logistisches Regressionsmodell) konnten die gesammelten Daten genutzt werden, um alle Seen zu identifizieren, die als Habitat für das Nixenkraut und somit auch für die thermophilen Neophyten in Frage kommen, jedoch bis jetzt noch nicht besiedelt wurden. Das Verbreitungsmodell ermöglichte zusätzlich, auch verschiedene Umweltbedingungen und deren Effekt auf die Verbreitung der Neophyten zu simulieren.

Die Untersuchung zeigt, dass die bisherige Erwärmung der Gewässer schon ausgereicht hat, um in vielen Regionen Bayerns die Einwanderung von Neophyten zu ermöglichen (Abbildung 3 A). Bereits 29 der 54 können von Neophyten besiedelt werden bzw. beheimaten das Große Nixenkraut. Nur die alpingeprägten Seen im Allgäu und in der Region um Miesbach (Abbildung 3 A, 1 & 5) sind bisher als Habitat für die wärmeliebenden, nicht-heimischen Arten ungeeignet. Gleiches gilt für die vom Main beeinflussten Seen in Unterfranken (Abbildung 2 A, 13). Ein simulierter Anstieg der mittleren Wassertemperatur um 1,5°C, was dem niedrigsten von KLIWA (2015) prognostizierten Wert entspricht, veränderte

die Situation deutlich. Während unter den aktuellen Bedingungen nur etwas mehr als 50% der Gewässer geeignete Umweltbedingungen für invasive Neophyten bieten, könnten bei einem Anstieg um 1,5°C mehr als 75% der Gewässer von nicht-heimischen Arten besiedelt werden (Abbildung 3 B).

Für die bayerischen Seen bedeutet dies, dass bereits heute eine Gefährdung hinsichtlich der Biodiversität der Unterwasservegetation besteht und dass sich diese durch die zu erwartende Erwärmung der Seen vergrößern wird. Dabei geht die Gefahr nicht nur von invasiven Neophyten aus, die in die Gewässer einwandern und sich ausbreiten könnten, sondern auch von heimischen Arten wie dem Großen Nixenkraut. Problematisch sind sowohl bei invasiven Neophyten als auch beim Nixenkraut vor allem die Entwicklung von Massenbeständen und die damit einhergehende Verdrängung anderer heimischer Arten (PODRAZA et

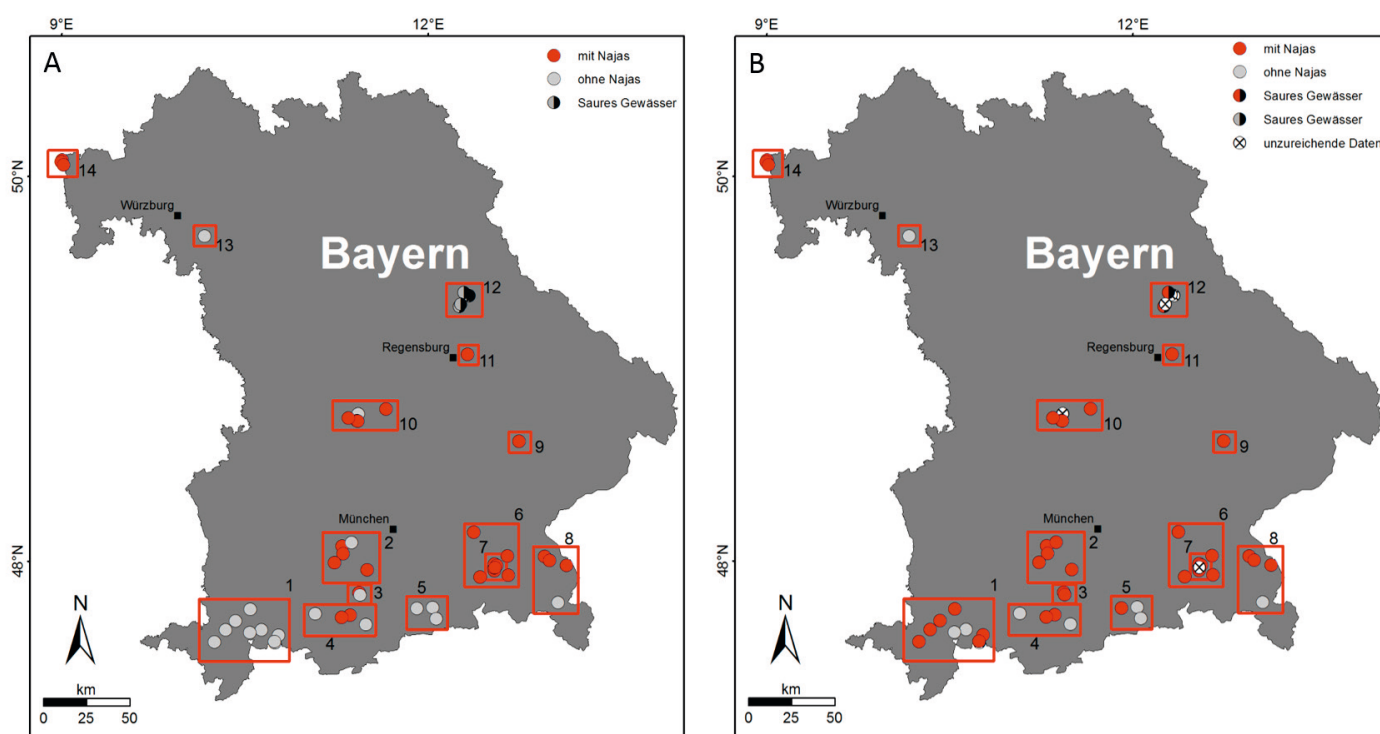


Abb. 3: Darstellung der invasionsgefährdeten Seen in Bayern basierend auf der Ausbreitung des wärmeliebenden Nixenkrauts. A) Invasionsgefährdete Seen (rote Punkte) bei aktuellen Umweltbedingungen (Stand 2013).

B) Modellvorhersage: Invasionsgefährdete Seen (rote Punkte) bei Anstieg der durchschnittlichen Wassertemperatur um 1,5 °C. Logistisches Regressionsmodell basierend auf Wassertemperatur und Nährstoffbedingungen: $R^2N : 0,718$ $AUC : 0,914$.

Die roten Kästen zeigen die Untersuchungsgebiete: 1) Allgäu, 2) Fünfseenland, 3) Osterseenkette, 4) Blaues Land, 5) Region Miesbach, 6) Region Chiemgau, 7) Eggstätt-Hemhofer Seenkette, 8) Region Berchtesgaden, 9) Niederbayern, 10) Region Ingolstadt, 11) Donaualtarme, 12) Oberpfälzer Seengebiet, 13) Region Unterfranken, 14) Region Aschaffenburg.

(Quelle: HOFFMANN/RAEDER 2016, verändert)

al. 2008, HUSSNER et al. 2010, HOFFMANN et al. 2013b). Folglich ist es für die aktuelle und zukünftige Entwicklung der Biodiversität bayerischer Seen notwendig, die Ausbreitung von nicht-heimischen Arten zu verhindern und gegebenenfalls das Auftreten von Massenvorkommen der Neophyten und auch der heimischen Arten durch geeignetes Gewässermanagement zu regulieren (HOFFMANN et al. 2013b).

3 Einfluss von Trübung auf die Unterwasservegetation

Abgesehen vom direkten Einfluss des Klimawandels auf die Wassertemperatur wird sich dieser auch indirekt auf die Seen auswirken. Im Zuge der Erwärmung muss mit veränderten Niederschlagsverhältnissen gerechnet werden, das heißt, mit vermehrten Phasen der Trockenheit im Gewässereinzugsgebiet und mit Hochwassern infolge von langem und extrem starkem Regen (KLIWA 2018, KLIWA 2019). Beides bewirkt eine Zunahme der stofflichen Einträge

in die Gewässer. Durch Trockenheit und Dürren wird das Erosionspotential von betroffenen Flächen deutlich erhöht (KLIWA 2016), da die Böden nur über begrenzte Kapazitäten zur Wasseraufnahme verfügen, die durch die längeren Trockenperioden reduziert werden. Anschließend Starkregen- und Hochwasserereignisse führen zu gesteigertem Abfluss aus dem Einzugsgebiet. Dadurch kommt es schließlich zu vermehrten Stoffeinträgen in die Seen, die sich auf die Lichtverhältnisse in den Gewässern auswirken können (Abbildung 1). Dabei beeinflussen Huminstoffe und Schwebstoffe das Lichtklima unter Wasser direkt, indem sie das Licht streuen, reflektieren oder absorbieren (Abbildung 4). Eingeschwemmte Nährstoffe wirken düngend und können u.a. die Entwicklung von Algenblüten fördern. Auf diese Weise verursachen Nährstoffe indirekt eine Veränderung der Lichtbedingungen in der Wassersäule, da Algen Teile des einfallenden Lichtes für die Photosynthese nutzen (FEE et al. 1996; SAMAL et al. 2013). In Abhängigkeit von den optischen Eigenschaften der eingetragenen Stoffe kommt es folglich zu quantitativen und qualitativen Veränderungen des

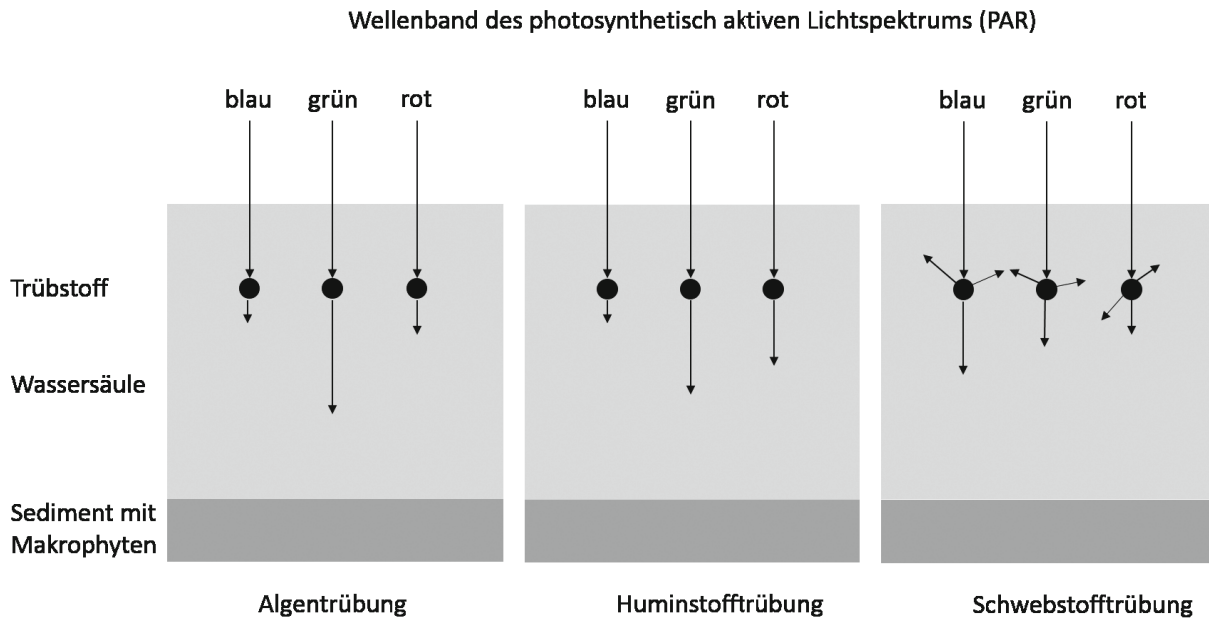


Abb. 4: Veränderung der Lichtzusammensetzung durch verschiedene Trübstoffarten. Pfeillänge zeigt den verbleibenden Lichtanteil nach Absorption, Reflexion oder Streuung durch die jeweiligen Trübstoffe. Die Pfeilrichtung zeigt Veränderungen des Lichtweges durch Reflexion und Streuung.

pflanzenverfügbaren Lichts (Abbildung 4). Das Licht ist ein wichtiger Steuerungsfaktor für das Wachstum und für die Entwicklung von Makrophyten und kann deren Regenerationsfähigkeit sowie die Überlebenswahrscheinlichkeit signifikant beeinflussen (MORMUL et al. 2012). Daher haben die Konzentration und die Zusammensetzung der optisch aktiven Stoffe in der Wassersäule einen deutlichen Einfluss auf die Zusammensetzung der Unterwasservegetation (RAEDER/HOFFMANN/RUEGG 2018).

Ein Eintrag von Huminstoffen in ein Gewässer färbt dieses beispielsweise braun, was als Dystrophierung beziehungsweise als Brownification bezeichnet wird (SNUCINS/GUNN, 2000; KASPRZAK et al., 2016). Diese Braunfärbung wird durch die Absorption großer Teile der kurzwelligen Strahlung des einfallenden Sonnenlichts durch die Huminstoffe verursacht (OSBURN/MORRIS/THORN 2001, Abbildung 4). Die Huminstoffe schützen Makrophyten und Phytoplankton daher wirksam vor ultravioletter Strahlung (KIRK 2011) und verhindern so Lichtschäden in den oberen Schichten der Wassersäule (AGUIRRE-VON-WOBESER/FIGUEROA/CABELLO-PASINI 2000). Gleichzeitig reduzieren und verändern die Huminstoffe jedoch die für Pflanzen wichtige photosynthetisch aktive Strahlung (PAR). Studien haben gezeigt, dass diese Veränderungen das Wachstum von nicht-heimischen Makrophyten erleichtern und diese daher ihre Ausbreitung fördern können (MORMUL et al. 2012). Darüber hinaus könnten höhere Huminstoffkonzentrationen

zu Veränderungen in der Unterwasservegetation führen, da die Trübung den Makrophyten ermöglicht den lichtdurchfluteten Flachbereiche der Seen ohne Lichtschäden zu besiedeln. Zusätzlich könnten weitere an Schwachlichtverhältnisse angepasste Arten einen Wachstumsvorteil erhalten.

Im Rahmen von Mesokosmenversuchen konnte nachgewiesen werden, dass die verschiedenen Wasserpflanzenarten sehr unterschiedlich auf Trübungen reagieren und dass sich auch die Art der Trübung, d.h. durch Algen, Huminstoffe oder Schwebstoffe, bei den einzelnen untersuchten Makrophytenarten unterschiedlich auswirkt.

Das verwendete Mesokosmensystem bestand aus bis zu 16 Becken mit je 1000 Liter Fassungsvermögen (Abbildung 5 A) und ermöglicht Experimente mit heimischen und fremden Wasserpflanzenarten unter naturnahen Bedingungen, ohne die Gefahr invasive Arten in natürlichen Ökosystemen zu verbreiten bzw. Veränderungen in der Zusammensetzung der heimischen Makrophytengesellschaften zu verursachen. Die Becken können abhängig von den Versuchsanforderung miteinander und/oder mit einem Filtersystem verbunden werden, und sie können mit Sedimenten und Wasser aus verschiedenen Voralpenseen befüllt werden. Für die Trübungsversuche wurden diese Becken zudem mit ausgewählten Vertretern heimischer und nicht-heimischer Wasserpflanzen besetzt (Abbildung 5B). Als heimische Versuchspflanzen dienten unter

anderem das *Große Nixenkraut* (*Najas marina* ssp. *marina*), das *Quirlige Tausendblatt* (*Myriophyllum verticillatum*) und das *Kamm-Laichkraut* (*Stuckenia pectinata*) (Abbildung 6), die in bayerischen Gewässern gesammelt wurden. Auch die inzwischen etablierte nicht-heimische Schmalblättrige *Wasserpest* (*Elodea nuttallii*) konnte im Freiland gesammelt werden, während die fremden Arten *Grundnessel* (*Hydrilla verticillata*) und *Wechselblatt-Wasserpest* (*Lagarosiphon major*) (Abbildung 6), die bisher nur sehr vereinzelt in heimische Gewässer eingewandert sind, über den Aquarienhandel bezogen wurden.

Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, war der Versuchsaufbau bei allen Trübungsversuchungen grundsätzlich identisch. Die ausgewählten Makrophyten wurden in Pflanzkästen/topfe eingesetzt und in den 1000 Liter Becken ausgebracht, die mit Wasser aus einem Voralpensee (Starnberger See) gefüllt waren. Nachdem die Pflanzen sich an die neuen Umweltbedingungen akklimatisiert hatten, wurden für jeden Trübungstyp drei zufällig ausgewählte Becken künstlich eingetrübt. Die Trübung erfolgte entweder mittels Zugabe von Huminstoffkonzentraten aus dem Teichhandel, fein gesiebtm Seesediment oder einer eigens angesetzten Algenlösung (Abbildung 5 C & D). Ein Teil der Becken blieben unverändert und dienten als Referenz für die Analyse des Pflanzenwachstums.

Während der Trübung wurden die Umweltbedingungen durchgehend überwacht, d.h. Wassertemperatur, Leitfähigkeit, Lichtmenge, Lichtzusammensetzung und pH-Wert. Die Algen- und Sedimenttrübungen zeigten im Vergleich zu den Referenzbecken keinen Einfluss auf die physikalischen Parameter wie den pH-Wert, die Leitfähigkeit oder die Wassertemperatur. In den mit Huminstoffen getrühten Becken war hingegen durch die im Konzentrat enthaltenen Huminsäure der pH-Wert etwas niedriger als in den Referenzbecken, der pH-Wert blieb jedoch stets im leicht alkalischen Bereich zwischen pH 8 und pH 9. Zu Beginn und am Ende der mehrwöchigen Versuche wurden die Pflanzen vermessen und der durchschnittliche Zuwachs der einzelnen Arten bestimmt. Der Einfluss der Trübung auf die Wasserpflanzen wurde anschließend über die Wachstumsraten ermittelt, d.h. über die Zunahme der Biomasse bis zum Ende des Versuchszeitraums. Dabei wurden die Wachstumsraten der verschiedenen Wasserpflanzenarten in den getrühten Becken und in den ungetrühten Referenzbecken bestimmt und verglichen. Dadurch konnte ermittelt werden, wie gut die einzelnen Makrophytenarten unter den verschiedenen Bedingungen gedeihen konnten, in dem sie unterschiedliche Beträge an Biomasse hinzugewonnen hatten.

Die Auswertung der Wachstumsraten zeigte keine eindeutigen Unterschiede zwischen der Gruppe der heimischen und nicht-heimischen Arten (Abbildung 6):

I) Die Algentrübung führte beispielsweise bei den meisten Wasserpflanzen zu einem deutlichen Rückgang des Wachstums im Vergleich zu den ungetrühten Becken. Ausnahmen bildeten die *Schmalblättrige Wasserpest*, auf deren Wachstum die Algen einen positiven Einfluss hatten, sowie das Tausendblatt, dessen Wachstum im Vergleich zu den ungetrühten Becken unverändert blieb.

II) Im Gegensatz zu anderen Studien wie z.B. denen von MORMUL et al. 2012 konnte kein positiver Effekt der Huminstofftrübung auf das Wachstum der nicht-heimischen Arten nachgewiesen werden. Das Wachstum der fremden Arten war in den entsprechend behandelten Becken im Durchschnitt niedriger als in den Referenzbecken. Auch der Großteil der heimischen Arten profitierte nicht von den erhöhten Huminstoffwerten im Wasser. Nur beim *Großen Nixenkraut* konnte bei einer mäßigen Huminstofftrübung ein stärkeres Wachstum beobachtet werden. Sowohl das heimische *Tausendblatt* als auch die neophytische *schmalblättrige Wasserpest* zeigten im Vergleich zu den Referenzpflanzen keine Unterschiede im Wachstum.

III) Ähnlich wie bei der Algentrübung hatte auch die Schwebstofftrübung tendenziell einen negativen Effekt

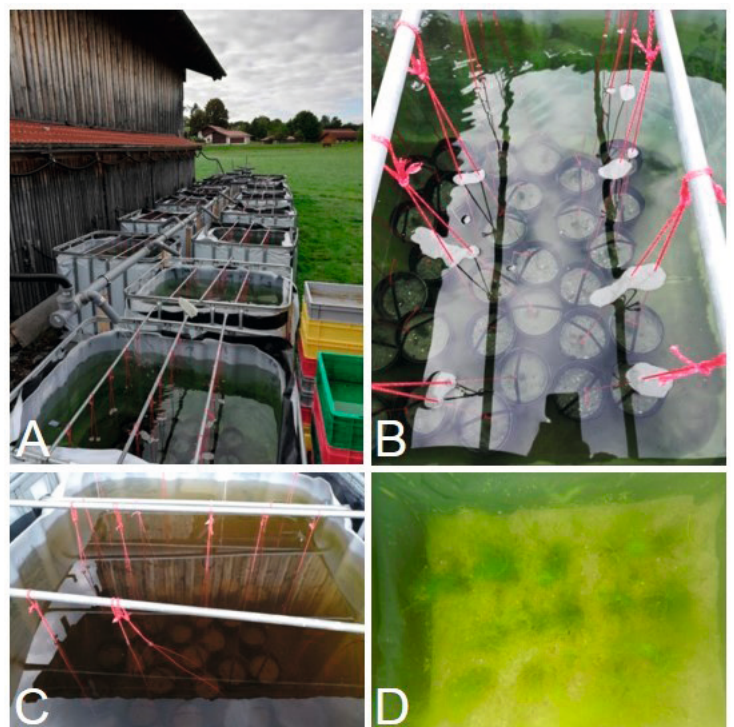


Abb. 5:

- A) Aufbau des Mesokosmensystems für die Trübungsversuche,
 B) Versuchspflanzen in Töpfen,
 C) Beispiele für Huminstofftrübung,
 D) Beispiel für Algentrübung.

auf das Pflanzenwachstum. Von den nicht-heimischen Arten konnte nur die *Wechselblatt-Wasserpest* und bei niedriger Trübungsstärke auch die *schmalblättrige Wasserpest* unverändert wachsen. Das *Große Nixenkraut* zeigte als einzige Wasserpflanze ein erhöhtes Wachstum durch die Schwebstoffe im Wasser. Die Ergebnisse der Trübungsversuche lassen die

Schlussfolgerung zu, dass die nicht-heimischen Arten nicht grundsätzlich durch erhöhte Stoffeinträge, die Folgen des Klimawandels sind, einen Konkurrenzvorteil gegenüber den heimischen Arten erhalten. Die Folgen der Trübung auf die Zusammensetzung der Unterwasservegetation hängen stark von der Kategorie des Trübungsstoffes und von den betroffenen

		Trübungsart	Algen			Huminstoffe			Schwebstoffe			
Makrophytenart	Trübungsstärke	L	M	S	L	M	S	L	M	S		
<i>Wechselblatt-Wasserpest</i> <i>Lagarosiphon major</i>			▼			▼			—		nicht-heimische Arten	
Grundnessel <i>Hydrilla verticillata</i>			▼			▼			▼			
Schmalblättrige Wasserpest <i>Elodea nuttallii</i>			▲			—			—	▼		
Großes Nixenkraut <i>Najas marina ssp. marina</i>			▼			—	▲	▼		▲	heimische Arten	
Quirliges Tausendblatt <i>Myriophyllum verticillatum</i>			—			—			—	▼		
Kamm-Laichkraut <i>Stuckenia pectinata</i>			▼			—	▼	▼		▼		

Abb. 6: Auswirkung von verschiedenen Trübungsarten auf das Wachstum ausgewählter heimischer und nicht-heimischer Wasserpflanzen. Zusammenfassung basierend auf Mesokosmenversuchen. Zellen mit mehreren Symbolen zeigen differenzierte Ergebnisse für leichte (L), moderate (M) und starke (S) Trübung. Roter Pfeil: Rückgang, grüner Pfeil: Zunahme, Strich: keine Veränderung.

Wasserpflanzenarten ab. Die Experimente haben gezeigt, dass besonders Trübungen durch Algenblüten das Wachstum von heimischen Makrophyten, die zu Massenvorkommen neigen, und von invasiven bzw. potenziell invasiven Neophyten hemmen können. Es gibt jedoch auch Makrophytenarten, die eine hohe Toleranz gegenüber der Trübung durch bestimmte Stoffe haben oder sogar von spezifischen Trübungen profitieren können. Die Unterwasservegetation der Seen ist sehr komplex und an Umweltbedingungen angepasst, die im jeweiligen See vorherrschenden. Folglich unterscheiden sich die Artenzusammensetzung und die Stoffeinträge von See zu See. Aus diesem Grund lassen sich bis jetzt noch keine allgemeinen Aussagen darüber treffen, ob durch den Klimawandel veränderte Stoffeinträge in die Seen die Biodiversität verändern werden. Aufgrund der bisherigen Befunde lässt sich jedoch generell feststellen, dass eine Veränderung der Lichtverhältnisse allein nicht ausreicht, damit nicht-heimische Arten die heimischen Makrophyten in bayerischen Seen nachhaltig verdrängen.

4 Fazit

Die Wassertemperatur und die Lichtbedingungen in Seen sind zwei Faktoren, die sich durch den Klimawandel langfristig verändern werden bzw. sich bereits verändert haben. Dass steigende Wassertemperaturen ein großes Problem darstellen, konnte durch die Untersuchungen der bayerischen Gewässer gezeigt werden. Viele der Seen sind bereits heute warm genug, um wärmeliebende, nicht-heimische Wasserpflanzen zu beheimaten und durch die fortlaufende Erwärmung werden immer mehr Gewässer geeignete Bedingungen für thermophile Neophyten bieten. Es besteht auch die Gefahr, dass sich in diesen Seen heimische, wärmeliebende Arten verbreiten, die durch Massenentwicklungen zu Problemen für das Ökosystem führen. Folglich hängt die zukünftige Biodiversität der Seen zum einen davon ab, ob invasive Neophyten erfolgreich nach Bayern einwandern können und zum anderen, ob durch Massenvorkommen heimischer Arten andere Wasserpflanzen verdrängt werden.

Im Gegensatz zu den Folgen steigender Wassertemperaturen, lassen sich für die Auswirkungen erhöhter Stoffeinträge noch keine generellen Aussagen bezüglich der Neophyten treffen. Die bisherigen Versuche konnten keine eindeutigen Vorteile oder Nachteile für heimische oder nicht-heimische Arten durch Trübungsereignisse nachweisen. Bei beiden Gruppen gab es Arten, die bei unterschiedlichen Trübungsarten oder Trübungsintensitäten besser wuchsen, während andere von den veränderten Lichtverhältnissen negativ beeinflusst wurden. Es zeigte sich jedoch, dass

heimische Wasserpflanzenarten wie das *Kamm-Laichkraut* existieren, die empfindlich gegenüber jeglicher Art der Trübung sind. Es ist davon auszugehen, dass diese Arten durch erhöhte Stoffeinträge auch ohne Konkurrenz durch Neophyten zurückgehen werden, was eine Verminderung der Biodiversität zur Folge hat. Die Ergebnisse lassen insgesamt den Schluss zu, dass durch die erhöhten Stoffeinträge in die Seen Probleme für die Biodiversität entstehen können, die jedoch durch die bisherigen Untersuchungen noch nicht vollständig abgebildet werden. So ist es zum einen wahrscheinlich, dass weitere heimische Arten ebenfalls empfindlich auf Trübung reagieren. Zum anderen muss davon ausgegangen werden, dass einige Makrophyten anders reagieren, wenn die Trübung unter- oder oberhalb bestimmter Kippunkte liegt.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen muss deshalb auf folgendes geachtet werden: (I) Ein größerer Querschnitt von Wasserpflanzenarten muss untersucht werden, um mehr über die Auswirkungen von Trübung auf die Artenzusammensetzung zu erfahren. (II) Der Einfluss der Trübungsintensität muss genauer (hochauflösender) erforscht werden, um mögliche Kippunkte zu identifizieren, ab denen sich die Trübung auf das Pflanzenwachstum positiv oder negativ auswirkt.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden in verschiedenen Projekten zur Erforschung der Auswirkungen des Klimawandels in Bayerischen Seen durchgeführt. Sie wurden vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (TLK01U-60031 und TLK01U-66627) finanziert. Insbesondere bei Frau Prof. Gschlöbl vom SMUV bedanken wir uns für das große Interesse an den limnologischen Fragestellungen und für ihre immer hilfreichen Anregungen. Gegenwärtig werden die Untersuchungen in einem Teilprojekt des Forschungsverbunds BLIZ des Bayerischen Klimaforschungsnetzwerks Bayklif fortgeführt und vom Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst finanziert. Wir danken Frau Dr. Kaltenhauser von der Geschäftsstelle Bayklif für ihre stete Bereitschaft uns zu unterstützen und allen Mitgliedern des Forschungsverbunds für die sehr kollegiale und konstruktive Zusammenarbeit.

Literatur

AGUIRRE-VON-WOBESER, E.; FIGUEROA, F. L.; CABELLO-PASINI, A. 2000: Effect of UV radiation on photoinhibition of marine macrophytes in culture systems. *Journal of Applied Phycology* 12: 159–168.

- FEE, E. J. et al. 1996: Effects of lake size, water clarity, and climatic variability on mixing depths in Canadian Shield lakes. *Limnology and Oceanography* 41: 912–920.
- HOFFMANN, M. A. et al. 2013a: Influence of sediment on the growth of the invasive macrophyte *Najas marina* ssp. *intermedia* in lakes. *Limnologia* 43: 265–271.
- HOFFMANN, M. A. et al. 2013b: Experimental weed control of *Najas marina* ssp. *intermedia* and *Elodea nuttallii* in lakes using biodegradable jute matting. *Journal of Limnology* 72: 485–493.
- HOFFMANN, M. A.; RAEDER, U. 2016: Predicting the potential distribution of neophytes in Southern Germany using native *Najas marina* as invasion risk indicator. *Environmental Earth Sciences* 75: 1217ff.
- HUSSNER, A. 2009: Growth and photosynthesis of four invasive aquatic plant species in Europe. *Weed Research* 49: 506–515.
- HUSSNER, A. et al. 2010: Comments on increasing number and abundance of non-indigenous aquatic macrophyte species in Germany. *Weed Research* 50: 519–526.
- IPCC. 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Genf, Schweiz.
- KASPRZAK, P. et al. 2017: Extreme Weather Event Triggers Cascade Towards Extreme Turbidity in a Clear-water Lake. *Ecosystems* 20: 1407–1420.
- KLIWA. 2015: KLIWA – Einfluss des Klimawandels auf Seen – Literaturauswertungsstudie. Kooperationsvorhaben Klimaveränderung und Wasserwirtschaft. Konstanz.
- KLIWA. 2018: Ergebnisse gemeinsamer Abflussprojektionen für KLIWA und Hessen basierend auf SRES A1B. Online: https://www.kliwa.de/_download/6-KLIWA_Kurzbericht_Abflussprojektionen_final.pdf (15.04.2020).
- KLIWA. 2019: Starkniederschläge Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft – Kurzbericht. Online: https://www.kliwa.de/_download/KLIWA-Kurzbericht_Starkregen.pdf, (15.04.2020).
- KIRK, J. T. O. 2011: Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. Cambridge University Press.
- MCKEE, D. et al. 2002: Effects of simulated climate warming on macrophytes in freshwater microcosm communities. *Aquatic Botany* 74: 71–83.
- MEERHOFF, M. et al. 2007: Can warm climate-related structure of littoral predator assemblies weaken the clear water state in shallow lakes? *Global Change Biology* 13: 1888–1897.
- MORMUL, R. P. et al. 2012: Water brownification may increase the invasibility of a submerged non-native macrophyte. *Biological Invasions* 14: 2091–2099.
- NEHRING, S. et al. 2013: Naturschutzfachliche Invasionsbewertung für in Deutschland wild lebende gebietsfremde Gefäßpflanzen. BfN Skripten 352: 1–2 02.
- O'REILLY, C. M. et al. 2015: Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters* 42: 10773–10781.
- OSBURN, C. L.; MORRIS, D. P.; THORN, K. A. 2001: Chemical and optical changes in freshwater dissolved organic matter exposed to solar radiation. *Biogeochemistry* 54: 251–278.
- PODRAZA, P. et al. 2008: Untersuchungen zur Massenentwicklung von Wasserpflanzen in den Ruhrstauseen und Gegenmaßnahmen – F & E – Vorhaben im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (MUNLV). Essen.
- RAEDER, U.; HOFFMANN, M.; RUEGG, S. 2018: Bayerns Stillgewässer im Klimawandel – Einfluss und Anpassung: Endbericht TLK01U66627: Teilprojekt (TP) 1: Trübungen von Seen infolge klimabedingter Zunahme von Hochwässern – Auswirkungen auf die Makrophytenvegetation durch veränderte Lichtverhältnisse. Technische Universität München. Online: <https://www.tib.eu>.
- RÜEGG, S. et al. 2020: *Najas marina* and *N. major* benefit from low light conditions caused by climate change in competition with native and alien invasive macrophytes. (eingereicht).
- SAMAL, N. R. et al. 2013: Modeling potential effects of climate change on winter turbidity loading in the Ashokan Reservoir, NY. *Hydrological Processes* 27: 3061–3074.
- SNUCINS, E.; GUNN J. 2000: Interannual variation in the thermal structure of clear and coloured lakes. *Limnology and Oceanography* 45: 1639–1646.

Abstract: When the water is changing – Climate change influences the underwater vegetation of Bavarian lakes

Climate change and its consequences for the environment are meanwhile a worldwide concern. Based on a multitude of prognoses, it can be assumed that temperature and precipitation will continue to change in the future. For this reason, the effects of these changes on the various ecosystems have been researched for several years. The fact that climate change can affect even large water bodies was demonstrated by the drought in the year 2018 and the flood in 2013. The two opposing extremes led to visible changes in water bodies such as the lake Chiemsee and the Danube, e.g. in water levels or water turbidity. To assess the long-term consequences of such extreme events as well as the effects of higher water temperatures and substance influx, several extensive studies have been carried out. One focus was on the study of reactions and changes in underwater vegetation. The studies show that even previous changes have had significant consequences for underwater vegetation. Due to the earlier onset and the longer lasting warming of the lakes, the spiny naiad, for example, spread massively in Bavaria in the recent past. Therefore, the native naiad is considered an indicator for the spread of non-native species in lakes. Further studies have also shown that an increase in turbidity inputs as a result of climate change leads to long-term changes in the composition of underwater vegetation.

Keywords: **Macrophytes, neophytes, biodiversity, submerge, water temperature, turbidity, substance influx**

Autor*innen: Dr. Markus Hoffmann, markus.hoffmann@tum.de, Dr. Uta Raeder, uta.raeder@tum.de. Limnologische Station Iffeldorf, LS AquaSys, Hofmark 1-3, 82393 Iffeldorf.