

**Udo Gattenlöhner, Michael Bender
und Marlene Bär Lamas**

Blitzlichtstudie „Seen und Klimawandel“



Bundesamt für
Naturschutz

BfN-Skripten 624

2022

Blitzlichtstudie „Seen und Klimawandel“

Beiträge zu aktuell verfügbaren Forschungsergebnissen zu Auswirkungen des Klimawandels und daraus resultierenden Änderungen von Temperaturen, Niederschlagsmengen und Niederschlagsverteilungen auf Seen, Kleingewässer und Feuchtgebiete in Deutschland unter Einbeziehung von Erkenntnissen aus anderen Ländern

**Udo Gattenlöhner
Michael Bender
Marlene Bär Lamas**



Bundesamt für
Naturschutz

Titelbild: Der in Griechenland nördlich von Thessaloniki gelegene Volvi-See ist im Jahr 2019 komplett ausgetrocknet.

Adressen der Autorin und der Autoren:

Udo Gattenlöhner Global Nature Fund
Dr. Marlene Bär Lamas Fritz-Reichle-Ring, 78315 Radolfzell
E-Mail: gattenloehner@globalnature.org
 baerlamas@globalnature.org

Michael Bender GRÜNE LIGA e.V.
Greifswalder Straße 4, 10405 Berlin
E-Mail: wasser@grueneliga.de

Fachbetreuung im BfN:

Angelina Heidrich Fachgebiet I 2.3 „Internationaler Naturschutz“

Gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (FKZ: Z 2 53202/H/12).

Diese Veröffentlichung wird aufgenommen in die Literaturdatenbank „DNL-online“ (www.dnl-online.de).

BfN-Skripten sind nicht im Buchhandel erhältlich. Eine pdf-Version dieser Ausgabe kann unter <https://www.bfn.de/publikationen> heruntergeladen werden.

Institutioneller Herausgeber: Bundesamt für Naturschutz
 Konstantinstr. 110
 53179 Bonn
 URL: www.bfn.de

Der institutionelle Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des institutionellen Herausgebers übereinstimmen.



Diese Schriftenreihe wird unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz Namensnennung – keine Bearbeitung 4.0 International (CC BY - ND 4.0) zur Verfügung gestellt (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.de>).

Druck: Druckerei des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV).

Gedruckt auf 100% Altpapier

ISBN 978-3-89624-385-0

DOI 10.19217/skr624

Bonn 2022

Inhaltsverzeichnis

Grußwort von Prof. Dr. Manfred Niekisch	6
Zusammenfassung	7
Summary	10
1 Einleitung	12
2 Meteorologische Parameter des Klimawandels, Auswirkungen von Änderungen der Lufttemperatur, des Niederschlags, der Eisbedeckung und der Windeinwirkung auf Seen.....	15
2.1 Auswirkungen der globalen Erwärmung auf Seen. Frühere, gegenwärtige und zukünftige Aspekte	15
2.2 Meteorologische Parameter des Klimawandels, Luft- und Wassertemperatur, Eisbedeckung, Verdunstung und Wechselwirkung mit biologischen Faktoren	22
3 Klimawandel, Seen und Feuchtgebiete – Internationaler Kontext	29
3.1 Alpine Schweizer Seen im Klimawandel	29
3.2 Das Pantanal und Klimawandel	34
3.3 Mangrovenschutz ist Klimaschutz.....	35
3.4 Auswirkungen von Klima und Eutrophierung auf Seen in Estland.....	37
4 Auswirkungen des Klimawandels auf Seen in Deutschland	42
4.1 Seen im Klimawandel – der Müggelsee	42
4.2 Seen im Naturpark Stechlin-Ruppiner Land.....	43
4.3 Seen-Monitoring seit 1991 – Infos zu 45 Gewässern in der Holsteinischen Schweiz und im Kreis Plön/SH	44
4.4 Erste Auswirkungen der Klimaveränderungen auf überwinternde Wasservögel am Bodensee	46
4.5 Unter Wasser für Bildung & Forschung.....	49
4.6 Interview mit Dr. Bernd Wahl LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden- Württemberg – Institut für Seenforschung).....	53
5 Klimawandel und -risiken für den Wasser- und Naturhaushalt in Deutschland	56
5.1 Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland (KWRA 2021)	56
5.2 BfN Auenzustandsbericht 2021.....	62
5.3 Herausforderungen für öffentliche Wasserversorger am Beispiel des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes.....	63
6 Interpretation und Ausblick	68
6.1 Europäische Rahmenbedingungen.....	68
6.2 Handlungsansätze	68
6.3 Empfehlungen	69
Literaturverzeichnis	73

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Extreme Wettersituationen – A. Österreich mit den beiden Seeregionen (links) und den Pegelständen einiger Seen (rechts). B. Maximale und minimale monatliche Pegelstände im Mondsee 1976 bis 2020 (links) sowie Hochwasser 2013 und Seepiegel 2018 als Foto (rechts), bearbeitet. – Weitere Erklärung im Text.	18
Abb. 2: Der Vierwaldstättersee bei Kastanienbaum (Quelle: Adrien Gaudard).	29
Abb. 3: Entscheidend für die ökologische Gesundheit von Seen ist eine regelmäßige Durchmischung des Wasserkörpers (NCCS Hrsg. 2021), bearbeitet.....	30
Abb. 4: Prozesse in Seen, welche durch die Einleitung erwärmten Kühlwassers beeinflusst werden können. (Quelle Lanz et al. 2021), bearbeitet.....	32
Abb. 5: Die Wasserqualität der Seen hat sich stark verbessert, doch die Uferlinien sind vielfach noch vegetationsarm und verbaut (Quelle: Eawag, Timothy Alexander).	33
Abb. 6: Geografische Lage des Pantanal (Quelle: ECOA – Ecologia & Ação, 2021).	34
Abb. 7: Ein steigender Meeresspiegel und extreme Wetterereignisse belasten ohne Gegenmaßnahmen die Küstenlebensräume in den Sundarbans. (Quelle: Udo Gattenlöhner, GNF).....	36
Abb. 8: Karte der Lage des Võrtsjärv und des Peipussees (Lake Peipsi) (Nöges et al. 2020), bearbeitet.	38
Abb. 9: Kohlenstoffbudget des Võrtsjärv-Sees im Jahr 2009 (Nöges et al. 2016), bearbeitet.	39
Abb. 10: Schematische Erklärung der Ursachen von Fischsterben im Võrtsjärv und im Peipussee (Lake Peipsi) (Nöges et al. 2007), bearbeitet.	40
Abb. 11: Der Seddiner See ist in großer Gefahr. Noch nie seit Beginn der Messungen war der Wasserstand so niedrig wie im Sommer 2018 (Quelle: Hartwig Berger).	43
Abb. 12: Im Kleine Krukowsee (LRT 3140) im NSG Stechlin ist die Unterwasservegetation vollständig durch bethivore Fische zerstört. (Quelle: NABU Naturschutztaucher).....	44
Abb. 13: Sichttiefenerfassung als Indikator für Wassertrübung und Algenentwicklung an der Messtelle Plön/SH des Großen Plöner Sees. (Quelle: www.seen-transparent.de)	45
Abb. 14: Entwicklung der Wasservogelbestände von 1961/62 bis 2020/21 als Summe über die acht Zählmonate September bis April. Berücksichtigt wurden alle Wasservogelgruppen außer Möwen/Seeschwalben/Limikolen.	48
Abb. 15: Novemberbestand der Reiherente am Bodensee von 1961 bis 2020 (blaue Säulen) mit gleitendem Fünfjahresmittel (rote Linie).	48

Abb. 16: Eisente (Weibchen) <i>Clangula hyemalis</i> (Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Eisente , http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/).....	49
Abb. 17: Reiherente <i>Aythya fuligula</i> (Quelle: https://pixabay.com/de/photos/reiherente-wasservogel-entenvogel-4248521/ , https://pixabay.com/de/service/license/).....	49
Abb. 18: Tafelente <i>Aythya ferina</i> (Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Tafelente).....	49
Abb. 19: Zwergsäger (Weibchen) <i>Mergellus albellus</i> : (A.Trepte, www.avi-fauna.info)	49
Abb. 20: Probennahme durch wissenschaftliche Taucher (Quelle: Franz Brümmer, WiTUS & aquatil gGmbH)	50
Abb. 21: Ein Ausschnitt aus dem Quagga-Muschel-Bewuchs an der Halde in Überlingen im Bodensee mit der orangefarbenen Variante der Quagga-Muschel. –	
Abb. 22: Einsatz einer Unterwasserbestimmungstafel zum Monitoring der Quagga- Muschel durch Sporttaucherinnen und Sporttaucher (Quelle: Franz Brümmer).....	52
Abb. 23 und Abb. 24: Monitoring von Mikroplastik am Gewässerrand (Quelle: Franz Brümmer) und der Artenvielfalt durch Citizen Scientists (Quelle: Ralph Schill).	52
Abb. 25: Torfmoosernte. Abb. 26: Formteile aus Nasswiesen-Biomasse und Schilf (Quelle: Greifswald Moor Centrum).....	60
Abb. 27: Entwicklung der Grundwasserentnahmen im OOWV-Verbandsgebiet, bearbeitet. (Quelle: OOWV)	63
Abb. 28: Beispiel Wasserwerk Großenkneten – Jahresniederschlag und Grundwasserstandsganglinie der Messstelle 277 (Geest, großer Flurabstand), bearbeitet. (Quelle: OOWV)	65
Abb. 29: Beispiel Wasserwerk Großenkneten – Grundwasserstandsganglinie der Messstelle 277 (Geest) mit schematischer Darstellung des rd. 75 Meter mächtigen Grundwasserleiters, bearbeitet. (Quelle: OOWV).....	66

Grußwort von Prof. Dr. Manfred Niekisch

Die „Blitzlichtstudie Seen und Klimawandel“ wirft als praxisorientierte Übersicht ein Schlaglicht auf aktuelle Forschungsergebnisse und Praxiserfahrungen zu diesem Themenbereich. Sie stellt konkrete Projekte vor, die sich mit den Veränderungen von Seen, Kleingewässern und Feuchtgebieten als Folge des Klimawandels beschäftigen. Die praxisrelevanten Erkenntnisse und Fallbeispiele können einige Lösungsansätze für Problemstellungen liefern, zeigen aber auch weiteren Forschungs- und Handlungsbedarf auf.

Der aktuelle Auenzustandsbericht 2021 des Bundesamtes für Naturschutz belegt in einem bundesweiten Überblick den Verlust von Flussauen und Überschwemmungsflächen in Deutschland. Nur noch ein Drittel der ursprünglichen Flächen haben Anschluss an das Überflutungsregime. Da von den verbleibenden Auen- und Gewässerbiotopen nahezu 80 % gefährdet sind, muss es eine vordringliche Aufgabe sein, die Vielfalt von Gewässer- und Auenlebensräumen in Deutschland zu sichern und natürliche Überflutungsflächen an Flüssen zu vergrößern.

Alles in allem sind die durch den Klimawandel ausgelösten Veränderungen an der Ökologie aquatischer Lebensräume noch nicht in vollem Umfang abschätzbar. Es ist daher äußerst wichtig, vorausschauend die Resilienz und die Anpassungsmöglichkeiten von Gewässersystemen, gerade auch im Hinblick auf Extremereignisse und auf die Kohlenstoffspeicherfunktionen, zu verbessern. Dafür ist ein guter ökologischer Zustand der Gewässer eine essenzielle Voraussetzung.

Die vorliegende Studie liefert einen substantiellen Beitrag zur Umsetzung der bundespolitischen Agenden, zur Anpassung an den Klimawandel und zum Schutz der aquatischen Biodiversität und von Seen, Feuchtgebieten und Kleingewässern in Deutschland. Sie will auch Impulse für umweltpolitische Prozesse auf Ebene der Europäischen Union setzen. Der praxisnahe Überblick unterstützt damit die Ziele der vom Bundesministerium für Umwelt erarbeiteten Nationalen Wasserstrategie, deren Entwurf am 8. Juni 2021 vorgestellt wurde.

Angesichts der Bedeutung und Dringlichkeit von Maßnahmen zur Erhaltung und Wiederherstellung von Gewässern und Feuchtgebieten vor dem Hintergrund des Klimawandels wünsche ich der vorliegenden Schrift eine möglichst weite Verbreitung.

Manfred Niekisch
Vizepräsident des Global Nature Fund (GNF)

Zusammenfassung

Die globale Klimaerwärmung und die daraus resultierenden Zunahmen längerer Trockenperioden aber auch von Starkregenereignissen wirken sich in Deutschland, wie auch im restlichen Europa, spürbar auf den Wasserhaushalt von Seen und Feuchtgebieten aus. Beides wirkt als zusätzlicher Stressfaktor auf aquatische Ökosysteme und ihre Biodiversität. Dadurch werden zunehmend Konflikte bei der Wassernutzung deutlich.

Die vorliegende Studie „Seen und Klimawandel“ wirft ein Schlaglicht auf vorhandene Forschungsergebnisse zu Seen in Deutschland und Europa und bezieht Erfahrungen aus dem internationalen Netzwerk Living Lakes und Erkenntnisse aus „Citizen Science“-Projekten mit ein.

Im heutigen Zustand sind viele Seen bereits stark durch menschliche Aktivitäten beeinträchtigt und damit vulnerabler gegenüber negativen Auswirkungen des Klimawandels. Steigen die Wassertemperaturen, veränderte Hydrologie und zunehmende Nutzungsansprüche bringen neue Herausforderungen für den Schutz der Seeökologie mit sich. Für die Resistenz (Widerstand gegenüber einer Störung) und die Resilienz (Vermögen, nach der Störung in den Ausgangszustand zurückzukehren) von Seen gegenüber zunehmenden Extremereignissen sind die Ausgangsbedingungen, u.a. Temperaturniveau, Mischungszustand und Zeitpunkt des Extremereignisses, von entscheidender Bedeutung (vgl. Adrian, Kap. 4.1). Lösungsansätze bestehen darin, dass wir zum Schutz der Wasserökosysteme und ihrer Funktionen noch stärker auf die konsequente Vermeidung von Schadstoffeinträgen, die Renaturierung der Ufer und eine äußerst zurückhaltende Beanspruchung ihres Wassers für Bewässerung und Kühlung (vgl. Lanz, Kapitel 3.1) fokussieren müssen.

Seen reagieren direkt auf unmittelbare Einwirkungen des Wetters als Folge des Klimas, aber auch indirekt auf Vorgänge im Einzugsgebiet. Die Sommertemperaturen europäischer Seen stiegen im Mittel zwischen 0,29 und 0,38°C pro Dekade an (vgl. Dokulil, Kapitel 2.1). Die thermischen Bedingungen der Volumina haben sich zwischen den 1970er Jahren und heute bereits in einem Maße verändert, der einer Verlagerung der Seen in deutlich südlicher gelegene Breitengrade oder in tiefer gelegene Höhenlagen gleichkäme (vgl. Adrian, Kap. 4.1).

Es ist auch eine Abnahme der Eisbedeckung von Seen festzustellen. Durch den Rückgang winterlicher Eisdecken sind einige dimiktische Seen zu monomiktischen Zuständen übergegangen, werden also in Herbst und Frühjahr nicht mehr vollständig durchmischt. (vgl. Dokulil, Kapitel 2.1). Das hat negative Auswirkungen auf die Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser bis hin zur Anärobie. Anärobie, also sauerstofffreie Bedingungen initiieren die Freisetzung von zuvor im Sediment gebundenen Nährstoffen (vgl. Adrian, Kap. 4.1). Die globale Erwärmung und die damit verbundenen extremen Wetterereignisse führen darüber hinaus zu zusätzlich steigenden Nährstoffeinträgen, also einer klimainduzierten Eutrophierung der Seen. Eine primäre Ursache liegt in den verstärkten Austrägen aus den Einzugsgebieten als Folge von Starkregen und Überschwemmungen (vgl. Dokulil, Kapitel 2.1).

Langzeitmessungen an Seen in Schleswig-Holstein deuten darauf hin, dass der mittleren Lufttemperatur in den Sommermonaten für die Ausprägung der Sommersichttiefe keine dominante Bedeutung zukommt. Die zeitliche Nähe des Niederschlagsereignisses zur individuell gehandhabten Düngeraufbringung scheinen hingegen von ausschlaggebender Bedeutung für

die Algenentwicklung und für die Ausprägung der Sichttiefen im Sommer zu sein (Reck-Mieth, Kapitel 4.3.).

Studien an estnischen Seen zeigen, dass dort der dekadische Anstieg von Blaualgen (Cyanobakterien) in flachen Seen auf die Wechselwirkung zwischen lokaler Eutrophierung und globaler Erwärmung zurückzuführen ist, die die physikalischen und chemischen Bedingungen im See näher an das cyanobakterielle Optimum bringen (vgl. Nöges & Nöges, Kapitel 3.4) . Zunahmen von Chlorophyll und Cyanobakterien korrelieren oft auch mit sinkenden Wasserständen vieler Seen und Stauseen, zuweilen begleitet von Regimewechseln von klarem zu trübem Wasser (vgl. Bär Lamas, Kapitel 2.2). In einigen eutrophen Seen wurden Fischsterben aufgrund von Sauerstoffmangel und hoher Konzentrationen von Ammonium/Ammoniak beobachtet (vgl. Nöges & Nöges, Kapitel 3.4).

Die Klimaerwärmung und die damit verbundene Zunahme von Hitzeextremen führen zum Teil zu einem Verlust an Wasserfläche. Dadurch werden Ufersedimente freigelegt und mit Luftsauerstoff versorgt. Dies führt zu einer Erhöhung des mikrobiellen Abbaus organischen Materials unter Freisetzung von CO₂. Dies ist einer der Mechanismen, die Seen und trockenfallende Flüsse zu Treibhausgas-Quellen für die Atmosphäre machen und damit die Klimaerwärmung über Rückkopplungseffekte verstärken (vgl. Adrian, Kap.4.1).

Klimabedingte Schwankungen des Wasserstandes wirken sich auch deutlich auf die Brutbedingungen von Wasservögeln aus. So hat beispielsweise die Reiherente ihre Winterquartiere nach Nordosten verschoben und wurde am Bodensee inzwischen vom Blässhuhn als häufigste überwinternde Art abgelöst (Bauer, Werner, Kap. 4.4). Die Bestände der Wasservögel hängen auch von dem sich verändernden Nahrungsangebot ab. Erhebungen aus Tauchgängen von Sporttauchern konnten das Wissen um die Verbreitungsschwerpunkte von invasiven Arten wie der Quagga-Muschel deutlich verbessern, die sich parallel zum Klimawandel in den deutschen Gewässern ausbreiten (Brümmer, Schill, Kapitel 4.5).

Laut der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland (KWRA vgl. Kapitel 5.1) führt der klimabedingte Temperaturanstieg zu steigenden Verdunstungsraten, verbunden mit sinkenden Grundwasserständen besonders im Nordosten Deutschlands in Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und im Süden von Sachsen-Anhalt sowie in den Mittelgebirgen und am Alpenrand. Der oldenburgisch-ostfriesische Wasserverband, der derzeit ca. 2.500 Grundwassermessstellen betreibt, stellt in den Geestgebieten bereits seit 15 bis 20 Jahren unterdurchschnittliche Grundwasserstände fest. In den Jahren 2019/20 wurden hier vielerorts historische Tiefststände gemessen. Durch die Entwicklung hin zu heißeren und trockeneren Sommern ist zu erwarten, dass zukünftig verstärkt saisonal negative Wirkungen auf grundwasserabhängige Feuchtgebiete eintreten werden, v.a. wenn die Grundwasserstände relativ tief liegen und gleichzeitig der Bedarf für verschiedene Grundwassernutzungen hoch ist (vgl. Buss, Kapitel 5.3).

Für den Schutz von Mooren, die als besonders gefährdete Feuchtgebiete betrachtet werden müssen, wird als Handlungsansatz bereits seit einigen Jahren die Paludikultur erfolgreich erprobt und beworben. Dieser Ansatz ermöglicht eine Nutzung unter gleichzeitiger Wiederherstellung des natürlichen nassen Zustandes. Dies ist insofern von Relevanz, da entwässerte, dann in der Regel landwirtschaftlich genutzte, Moore große CO₂ Mengen

emittieren. Obwohl Moore nur 7 % der genutzten Landwirtschaftsfläche in Deutschland darstellen, sind sie für 37 % der gesamten landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen – rund 43 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr – verantwortlich (inklusive Tierhaltung). Die Torfzersetzung beziehungsweise die Mineralisierung in entwässerten Mooren führt außerdem zu hohen Stoffausträgen über Grund- und Oberflächengewässer, was mit dazu beiträgt, dass viele Seen und Küstengebiete in Europa unter einer hohen Nährstoffbelastung leiden und stark eutroph sind.

Die Kohlenstoffspeicherung organischer Böden kann jedoch wiederhergestellt werden, indem, z.B. durch Erhöhung des Grundwasserspiegels, torfbildende Vegetationen etabliert werden. Die Wiedervernässung von Mooren wird dann gleichzeitig den immensen Nährstoffaustrag an Stickstoff [N] und Phosphor [P] reduzieren, der bei entwässerten Mooren zu beobachten ist. Dies muss eine prioritäre Aufgabe im Flusseinzugsgebietsmanagement im Nordwesten Europas und in den Einzugsgebieten von Nord- und Ostsee werden (vgl. Bender, Wichtmann, Abel, Kapitel 5.2).

Summary

The global warming trend and the resulting increase in longer dry periods, but also in heavy rainfall events, are having a noticeable effect on the water balance of lakes and wetlands in Germany, as well as in the rest of Europe. Both act as additional stress factors on aquatic ecosystems and their biodiversity, making conflicts in water use increasingly visible.

The present study "Lakes and Climate Change" sheds light on existing research results on lakes in Germany and Europe and includes experiences from the international Living Lakes network and findings from "Citizen Science" projects.

In their current state, many lakes are already heavily affected by human activities and thus more vulnerable to the negative impacts of climate change. Rising water temperatures, changing hydrology and increasing demands for use bring about new challenges for the protection of lake ecology. For the resistance (ability to withstand a disturbance) and resilience (ability to return to the initial state after the disturbance) of lakes to increasing extreme events, the initial conditions, including temperature level, mixing state and timing of the extreme event, are of decisive importance (cf. Adrian, Chapter 4.1). In order to protect water ecosystems and their functions, we need to focus even more on the consistent avoidance of pollutant inputs, the renaturation of the banks and an extremely restrained use of their water for irrigation and cooling (cf. Lanz, Chapter 3.1).

Lakes react to the direct effects of the weather as a result of the climate, but also indirectly to processes in the catchment area. The summer temperatures of European lakes rose on average between 0.29 and 0.38°C per decade (cf. Dokulil, Chapter 2.1). The thermal conditions of the volumes have already changed between the 1970s and today to an extent that would be equivalent to a relocation of the lakes to significantly more southerly latitudes or to lower altitudes (cf. Adrian, Chapter 4.1).

A decrease in the ice cover of lakes can also be observed. Due to the decline in winter ice cover, some dimictic lakes have become monomictic, i.e. they are no longer completely mixed in autumn and spring (cf. Dokulil, Chapter 2.1). This has negative effects on the oxygen concentrations in the deep water, even to the point of anaerobiosis. Anaerobic, i.e. oxygen-free conditions initiate the release of nutrients previously bound in the sediment (cf. Adrian, Chapter 4.1). Global warming and the associated extreme weather events also lead to an additional increase in nutrient inputs, i.e. climate-induced eutrophication of lakes. A primary cause is the increased discharge from the catchment areas as a result of heavy rainfall and flooding (cf. Dokulil, Chapter 2.1).

Long-term measurements at lakes in Schleswig-Holstein indicate that the mean air temperature in the summer months is not of dominant importance for the development of the summer visibility depth. The temporal proximity of the precipitation event to the individually managed fertiliser application, on the other hand, seems to be of decisive importance for algal development and for the expression of the depth of visibility in summer (Reck-Mieth, Chapter 4.3.).

Studies on Estonian lakes indicate that the decadal increase of blue-green algae (cyanobacteria) in shallow lakes is due to the interaction between local eutrophication and global warming, which bring the physical and chemical conditions in the lake closer to the

cyanobacterial optimum (cf. Nöges & Nöges, Chapter 3.4). Increases in chlorophyll and cyanobacteria often correlate with decreasing water levels in many lakes and reservoirs, sometimes accompanied by regime changes from clear to turbid water (cf. Bär Lamas, Chapter 2.2). In some eutrophic lakes, fish kills have been observed due to oxygen deficiency and high concentrations of ammonium/ammonia (cf. Nöges & Nöges, Chapter 3.4).

Climate warming and the associated increase in heat extremes lead in part to a loss of water surface. As a result, bank sediments are exposed and supplied with atmospheric oxygen. This leads to an increase in microbial degradation of organic material with the release of CO₂. This is one of the mechanisms that make lakes and drying rivers greenhouse gas sources for the atmosphere and thus amplify climate warming via feedback effects (cf. Adrian, Chapter 4.1)

Climate-induced fluctuations in water levels also have a significant impact on the breeding conditions of waterbirds. For example, the tufted duck has shifted its winter quarters to the north-east and has now been replaced by the coot as the most common wintering species at Lake Constance (Bauer, Werner, Chap. 4.4). Waterfowl populations also depend on the changing food supply. Surveys from dives by scuba divers have significantly improved knowledge of the distribution centres of invasive species such as quagga mussels, which are spreading in German waters in parallel with climate change (Brümmer, Schill, Chapter 4.5). According to the Climate Impact and Risk Analysis for Germany (KWRA, cf. Chapter 5.1), the climate-induced rise in temperature will lead to increasing evaporation rates, combined with falling groundwater levels, especially in north-eastern Germany in Mecklenburg-Western Pomerania, Brandenburg and southern Saxony-Anhalt, as well as in the low mountain ranges and on the edge of the Alps. The Oldenburg-East Friesian Water Association, which currently operates around 2,500 groundwater measuring points, has been noting below-average groundwater levels in the Geest areas for 15 to 20 years. In 2019/20, historic lows were measured here in many places. Due to the trend towards hotter and drier summers, it is to be expected that in the future there will be increased seasonal negative effects on ground-water-dependent wetlands, especially when groundwater levels are relatively low and at the same time the demand for various groundwater uses is high (cf. Buss, Chapter 5.3).

For the protection of peatlands, which must be considered as particularly endangered wetlands, paludiculture has already been successfully tested and promoted for several years as an approach to action. This approach enables use while simultaneously restoring the natural wet condition. This is of great importance because drained peatlands, which are then usually used for agriculture, emit large amounts of CO₂. Although peatlands represent only 7 % of the agricultural land used in Germany, they are responsible for 37 % of total agricultural greenhouse gas emissions – around 43 million tonnes of CO₂ per year (including livestock). Peat decomposition or mineralisation in drained peatlands also leads to high substance discharges via ground and surface waters, which contributes to the fact that many lakes and coastal areas in Europe suffer from a high nutrient load and are highly eutrophic.

However, the carbon storage of organic soils can be restored by establishing peat-forming vegetation, e.g. by raising the groundwater level. The rewetting of peatlands will then simultaneously reduce the immense nutrient discharge of nitrogen [N] and phosphorus [P] that can be observed in drained peatlands. This must become a priority task in river basin management in north-western Europe and in the catchments of the North Sea and the Baltic Sea (cf. Bender, Wichtmann, Abel, Chapter 5.2).

1 Einleitung

Udo Gattenlöhner

Global Nature Fund, Internationale Stiftung für Umwelt und Natur, Fritz-Reichle-Ring 4, 78315 Radolfzell, Deutschland

Die vorliegende Blitzlichtstudie geht auf aktuelle Erfahrungen, Untersuchungen und Veröffentlichungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf Gewässer ein. Die Veröffentlichung konzentriert sich dabei, unter anderem auch aufgrund des kurzen Projektzeitraums von nur wenigen Monaten, vor allem auf Süßwasserökosysteme in Deutschland. Schon heute lassen sich, größtenteils negative, Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserökosysteme beobachten. Es ist offensichtlich, dass das wärmer werdende Klima die terrestrischen und marinen Wasserkreisläufe der Erde zunehmend weiter negativ beeinflussen wird. Es ist deshalb unseres Erachtens wichtig, die Auswirkungen des Klimawandels auf Gewässer möglichst gut abzuschätzen, um mögliche negative Einflüsse zu minimieren, geeignete Anpassungsstrategien zu entwickeln und langfristig unsere wertvollen Gewässer und ihre essentiellen Ökosystemleistungen zu sichern.

Wärmere Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen, mit Folgen für die Niederschlagsmengen und die Niederschlagswahrscheinlichkeiten. Was die Veränderung der für Seen wichtigen Niederschlagsmengen und Niederschlagsverteilungen betrifft, lassen sich bisher aber nur sehr bedingt exakte Aussagen treffen. Es scheint jedoch zu einer signifikanten Zunahme von extremen Niederschlagsereignissen zu kommen, was im Zusammenspiel mit einer früher einsetzenden Schneeschmelze in höheren Lagen nördlicherer Breiten und einer Abnahme von Ausgleichsflächen, z.B. Auen, zu einer größeren Wahrscheinlichkeit von Überflutungsereignissen führen wird. Für den Süden Deutschlands stellt das KLIWA-Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (Arbeitskreis KLIWA, Bremicker et al. 2019, 2021) fest, dass die jährlichen Niederschlagsmengen in den meisten Gebieten Süddeutschlands im Untersuchungszeitraum zwar in etwa konstant geblieben sind, sich aber die saisonale Niederschlagsverteilung verändert hat. KLIWA-Studien belegen, dass die Winterhalbjahre messbar feuchter geworden sind, während die Sommerhalbjahre, obwohl im Verhalten etwas uneinheitlicher, tendenziell trockener wurden. Dieser Trend wird langfristig das Risiko winterlicher Hochwasserlagen erhöhen.

Aus verschiedenen aktuellen Beobachtungen lassen sich, trotz hoher Komplexität der Kausalitäten, gewisse Schlussfolgerungen für die Ökologie von Seen ziehen, z.B. in Bezug auf Schichtung, Sauerstoffgehalt, Nährstoffverfügbarkeit oder biologische Vielfalt. Schon vor rund zwei Jahrzehnten lieferten mehrere auf internationaler Ebene vorliegende Studien zu Seen Hinweise zu Auswirkungen des Klimawandels auf Struktur und Funktion von Wasserökosystemen (z.B. Schindler et al. 1996; Magnuson et al. 2000; Verburg et al. 2003) und die Konsequenzen für die Ökosystemdienstleistungen der Gewässer (O'Reilly et al. 2003) und belegten erkennbare klimabedingte Auswirkungen auf Seen. Zum Beispiel wurden klimabedingte Schwankungen des Wasserstandes in Nordamerika in signifikantem Umfang beobachtet (Williamson et al. 2009). Auch beobachtete Veränderungen der Wassertemperaturen oder des Zeitpunkts der Bildung und des Tauens von Eisschichten auf Seen lassen sich auf die Klimaerwärmung zurückführen (z.B. Magnuson et al. 2000).

Weitere seenspezifische Indikatoren, wie gelöste organische Kohlenstoffe (DOC) oder die Planktonzusammensetzung, sind komplexer und schwieriger zu bewerten, deuten aber

ebenfalls auf negative Auswirkungen auf Ökosystemleistungen hin (Adrian et al. 2009). Nach Adrian eignen sich Seenökosysteme gut als Frühwarnsysteme für den Klimawandel, weil sie erstens klar definiert sind und gut untersucht werden können, zweitens Seen direkt auf den Klimawandel reagieren, drittens Auswirkungen klimabedingter Veränderungen im Einzugsgebiet berücksichtigt werden können, viertens Seen Effekte über längere Zeiträume summieren und dadurch zufällige Abweichungen ausgleichen und fünftens Seen geografisch gut verteilt sind und so verschiedene Aspekte des Klimawandels erfassen können.

Die vorliegende Veröffentlichung möchte unter anderem aufzeigen, welche wichtigen Beiträge Seen und Feuchtgebiete für die Gesellschaft und auch für die Wirtschaft liefern, deren Wert bisher noch nicht ausreichend gewürdigt wird. Terrestrische Wasserökosysteme und ihre Ufer- und Randbereiche bieten eine Vielzahl wertvoller Ökosystemleistungen wie z.B. Trinkwasser, Speisefisch, Bewässerung für die Landwirtschaft, Schifffahrtsmöglichkeiten, Hochwasserschutz, Erholung- und Tourismusnutzen. Neben diesen Leistungen zeigen Seenregionen oft eine sehr große Artenvielfalt und wirken sich häufig positiv auf das Mikroklima aus. So können in Seenregionen beispielsweise aufgrund ausgleichender klimatischer Effekte eher Sonderkulturen wie Gemüse und Wein angebaut werden. Seen sind außerdem ein wichtiges Kulturgut und haben spirituelle und ästhetische Bedeutung. Viele dieser Leistungen haben den Charakter öffentlicher ubiquitärer Güter. Aus diesem Grund werden sie häufig in Anspruch genommen, ohne dass Kosten hierfür anfallen.

Diese Blitzlichtstudie möchte dazu beitragen, weiter für den Wert und die Bedeutung von Gewässern und ihrer Ökosystemleistungen zu sensibilisieren, indem dargestellt wird, welche Risiken und Nachteile durch den Klimawandel für Gewässer und ihre verschiedenen Nutzergruppen entstehen können. Damit soll das Engagement für den Schutz und den Erhalt von Wasserökosystemen erhöht und zusätzliche Anreize geschaffen werden, die Auswirkungen des Klimawandels auf aquatische Ökosysteme stärker in die Entscheidungsfindung und Planung einzubeziehen, sinnvolle Anpassungsmaßnahmen vorzunehmen und neue Strategien und Instrumente zur Finanzierung zu ihrem Schutz zu entwickeln.

Die Blitzlichtstudie ist in fünf Bereiche unterteilt. Zunächst werden meteorologische Parameter des Klimawandels und ihre Auswirkungen auf biologische, physikalische und chemische Aspekte – u.a. Luft- und Wassertemperaturen, Niederschläge und Eisdecke – dargestellt. Im darauffolgenden Abschnitt werden globale Aspekte des Schutzes von Feuchtgebieten beispielhaft aufgegriffen und Klimafolgen für Seen anhand alpiner Seen in der Schweiz und Seen nördlicher Breiten in Estland in den europäischen Kontext gestellt.

Der dritte Bereich beschäftigt sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf Seen in Deutschland, v.a. in Bezug auf die Wassertemperatur, Wasserqualität (Sauerstoff, pH, organische Substanz, Nährstoffe, Mineralien, Schadstoffe, Phytoplankton), die Litoralzonen und die Biodiversität (Wasservögel und Neozoen). Hier finden sich Beiträge des Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB Berlin), des Max-Planck-Instituts in Radolfzell und des ISF Langenargen. Daraufhin wird in Kapitel 5 und 6 versucht, anhand der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland eine Abschätzung der Zukunft aufzuzeigen, den Bezug zum gegenwärtigen Zustand von Feuchtgebieten vorzunehmen, sich andeutende Konflikte mit der Trinkwasserversorgung aufzugreifen, Handlungsmöglichkeiten aufzuzeigen und Empfehlungen für die weitere Diskussion zu geben. Im letzten Kapitel befindet sich ein umfangreiches

Literaturverzeichnis zum Thema incl. der in der Blitzlichtstudie zitierten Quellen.

Im Paris-Agreement (UNFCCC, COP 21, 2015) haben 195 Staaten vereinbart, dass die menschengemachte Erwärmung der Lufttemperatur 2 Grad Celsius gegenüber vorindustriellen Werten nicht überschreiten darf, um unabsehbare Risiken für uns Menschen zu vermeiden. Für Gewässer wurde in Paris leider kein Grenzwert festgelegt. Es müssen rasch effiziente Maßnahmen und adäquate ordnungspolitische Rahmenbedingungen zum Schutz und zur Wiederherstellung von Gewässern und Feuchtgebieten umgesetzt werden, um massive, klimaindizierte Schäden von aquatischen Ökosystemen abzuwenden. Die vorliegende Schrift will hierzu einen Beitrag leisten.

2 Meteorologische Parameter des Klimawandels, Auswirkungen von Änderungen der Lufttemperatur, des Niederschlags, der Eisbedeckung und der Windeinwirkung auf Seen

2.1 Auswirkungen der globalen Erwärmung auf Seen. Frühere, gegenwärtige und zukünftige Aspekte.

Martin T. Dokulil

Forschungsinstitut für Limnologie, Universität Innsbruck, Mondseestr. 9, 5310 Mondsee, Österreich

Zusammenfassung

Anhand einer zugegebenermaßen subjektiven Auswahl aus der enormen Literatur zum Thema und eigenen Werken wird versucht, die Entwicklung und Auswirkung der Klimaerwärmung auf die Seen seit etwa den 1980er Jahren in möglichst vielen Facetten nachzuzeichnen. Sodann wird dargelegt, wo wir heute stehen und welche Aspekte sich in naher Zukunft abzuzeichnen beginnen. Zum Schluss folgt ein persönlich gefärbtes Resümee.

Präambel

Gemessen an den Veröffentlichungen hat die wissenschaftliche Beschäftigung mit Veränderungen des Klimas bereits eine lange Tradition, zurückreichend bis in die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts. Rasch zunehmende Bedeutung hat sie aber erst in den Jahren nach 1950 gewonnen (Stanhill 2001). Schon sehr früh lieferten stehende Gewässer bzw. deren sedimentäre Ablagerungen wesentliche Grundlagen für die Aufklärung von Klimaveränderungen in der Vergangenheit (Schmidt et al. 2004). Ab etwa Mitte der 1950er Jahre war dann ein rasch stärker werdendes Interesse an Klimaeinwirkungen auf Seen und Reservoirs zu beobachten (Ho and Goethals 2020). Deng et al. (2017) stellten einen Wendepunkt hin zu mehr klimaorientierter limnologischer Forschung ab etwa dem Jahr 1991 fest.

Der frühe Übergang der Paläolimnologie zu Fragen der Klimaentwicklung war wohl inhärent, da Analysen vergangener Umweltveränderungen in diesem Fachbereich immer schon vorrangig waren. Es ist auch sicherlich kein Zufall, dass die verstärkte Forschungstätigkeit kurz nach dem beobachteten Zeitpunkt des Regimewechsels im Klima einsetzte (Reid et al. 2016), der auch in Seen zu beobachten war (Woolway et al. 2017).

Einleitung

Über die globale Änderung des Klimas und die Einflussnahme der Menschheit besteht seit längerem wissenschaftlicher Konsens (IPCC 2014). Die Auswirkungen der Klimaerwärmung sind bereits evident und gelten als eine der größten Bedrohungen für die Ökosysteme der Erde. Erste Hinweise auf die Auswirkungen auf die Struktur und Funktion von Ökosystemen lieferten Studien an Seen (Magnuson et al. 1990; Schindler et al. 1996), die gezeigt haben, dass Seen empfindlich auf veränderte Umweltbedingungen reagieren und damit als Frühwarnsysteme genutzt werden können. Seen reagieren direkt auf unmittelbare Einwirkungen des Wetters als Folge des Klimas, aber auch indirekt auf Vorgänge im Einzugsgebiet (Dokulil und Teubner 2003). Das Klima manifestiert sich also durch das lokale Wettergeschehen, welches auf die Seen einwirkt und dort als Folge externer und interner Faktoren angepasste Reaktionen bewirkt (Livingstone et al. 2010).

Im Folgenden werden die bisher erzielten Ergebnisse der vergangenen 40 Jahre seit etwa 1980 beispielhaft dargestellt, der derzeitige Wissensstand skizziert und ein Ausblick auf die mögliche Entwicklung in der näheren Zukunft geboten.

Datengrundlage

Aus der Fülle der relevanten Publikationen wurden jeweils sachbezogene Beispiele ausgewählt, unter Verwendung eigener Untersuchungen oder Publikationen mit Beteiligung des Autors.

Ergebnisse

Die Klimaerwärmung wirkt sich unmittelbar auf die physikalisch-chemischen Vorgänge im See aus, welche daher auch gut erforscht sind. Eine Bestandsaufnahme für Österreich findet sich in Dokulil et al. (1993) und Nachtnebel et al. (2014) sowie für Europa in Eisenreich et al. (2005). Ein empirischer Zusammenhang der Lufttemperatur zur Seetemperatur war bald erhärtet. So fanden etwa Robertson und Ragotzkie (1990) eine Erhöhung der Temperatur des Epilimnions um 0,5 bis 1,0°C pro 1,0°C Zunahme der Lufttemperatur sowohl empirisch als auch unter Verwendung eines dynamischen Modells. In der Folge wurden weitere Modelle entwickelt und verfeinert, mündeten aber schließlich in Modelle zur Erfassung der Luft- bzw. Wassertemperatur von Satelliten (Sharma et al. 2015). Auswertungen der jährlichen und jahreszeitlichen Trends in den Langzeitdaten zahlreicher Seen erbrachten unterschiedlich Änderungen der Oberflächentemperatur bzw. in den Vertikalprofilen, aber ziemlich einheitlich eine verstärkte Zunahme der Gewässertemperatur ab den 1980er Jahren (Dokulil 2000, 2013, 2014a,b,c; Peeters et al. 2002; Persson et al. 2005). Die Sommertemperaturen europäischer Seen steigen im Mittel zwischen 0,29 und 0,38°C pro Dekade an. Weltweit wurden Zunahmen pro Dekade bis +1,3°C festgestellt, in manchen Seen aber auch Abkühlungsraten von bis zu - 0,7°C (O'Reilly et al. 2015). Ähnliche, aber weit geringere Erhöhungen (0,1–0,2°C pro Dekade) waren auch im Tiefenwasser zahlreicher Seen zu beobachten (Dokulil et al. 2006a,b).

Beide Trends waren deutlich abhängig von Fernwirkungen bestimmter Wetterlagen. Klimaindizes, wie z.B. die Nordatlantischen Oszillation (NAO), wirken vor allem im Winter und zeitigen Frühjahr auf die Gewässertemperatur ein (Livingstone und Dokulil (2001; Dokulil et al. 2006a,b).

Langfristig war auch eine Abnahme der Eisbedeckung von Seen festzustellen (Dokulil et al. 2014; Kainz et al. 2017). Beobachtungen an 513 Seen der Nordhalbkugel (Sharma et al. 2019) ergaben wesentliche Störungen der Ökosystemfunktionen in eisfreien Wintern. Durch den Wegfall der winterlichen Eisdecke sind dimiktische Seen zu monomiktischen Zuständen übergegangen (Ficker et al. 2017). Gleichzeitig beginnt die sommerliche Temperaturschichtung früher im Jahr und endet später. Somit dauert die Stagnationsperiode im Sommerhalbjahr deutlich länger, was unter Umständen zu Sauerstoffdefiziten im Tiefenwasser führt (Luger et al. 2021; Woolway et al. 2021). Die überwiegende Zahl der Veröffentlichungen zur Temperatur von Seen nutzen Mittelwerte übers Jahr, Jahreszeiten, Monate oder spezifische Perioden des Jahres (O'Reilly et al. 2015). Inzwischen wurden aber auch Trends der minimalen und maximalen Temperaturen veröffentlicht, die übereinstimmend eine erhebliche Zunahme aufweisen (Ptak et al. 2019; Woolway et al. 2019; Dokulil et al. 2021). Die zunehmende Erwärmung im Winter (im Mittel +0,35°C pro Dekade) verlängert die Vegetationsperiode, beeinflusst stenotherme Arten und Nahrungsnetze. Die Maximaltemperaturen nehmen durchschnittlich um +0,58°C pro Dekade zu. Temperaturen von z.B. 20°C werden zunehmend längerdauernd überschritten, was

potenziell zahlreiche Organismen beeinflussen könnte.

Einen umfassenden Überblick über die Ergebnisse des EU-Projektes CLIME (2003–2006) und der Jahre davor in Europa ermöglicht George (2010). Die kombinierte Auswirkung von Restaurierung und Klimaerwärmung auf das Zooplankton eines urbanen Gewässers finden sich in Teubner, Großschartner und Teubner (2018). Einen umfassenden Überblick über das Vordringen fremder Zooplankton-Arten auf der Basis einer umfangreichen Recherche und mögliche zukünftige Entwicklungen ermöglichen Dexter und Bollens (2020).

Die Bedeutung der Treibhausgase CO₂ und CH₄ und des Anstiegs ihrer Konzentrationen in der Atmosphäre für die Klimaerwärmung ist seit langem bekannt und immer wieder belegt (Ciais et al. 2013). Bis vor nicht allzu langer Zeit waren aber Binnengewässer nicht Bestandteil des Kohlenstoff-Budgets. Erst Cole et al. (2007) identifizierten Binnengewässer als bedeutend für das globale Kohlenstoff-Budget und Tranvik et al. (2009) zeigten, dass etwa 48,3 % des Kohlenstoffs als CO₂ an die Atmosphäre abgegeben werden sowie 20,7 % im Sediment dauerhaft verbleiben. Die übrigen 31 % werden durch Flüsse und Grundwasser zum Ozean abgeführt. Die globalen CH₄-Emissionen bestimmten Bastviken et al. (2011) zu insgesamt 72,2 %, wobei die restlichen 27,8 % im System verbleiben. Kürzlich haben Pighini et al. (2018) alpine Seen als Emittenten von Treibhausgasen nachgewiesen. In den 40 Seen in Höhenlagen zwischen 200 und 1.500 Metern Seehöhe konnte gelöstes CO₂ und CH₄ in mittleren Konzentrationen von $1,10 \pm 1,30$ und $36,23 \pm 31,15 \mu\text{mol L}^{-1}$ nachgewiesen werden. Eine Abhängigkeit von der Höhenlage war nicht gegeben. Die Autoren schließen aus ihren Ergebnissen, dass alpine Seen als Quelle für Treibhausgase fungieren können.

Mit steigenden Temperaturen wurde eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von extremen Wetterereignissen als Folge des anthropogenen Klimawandels beobachtet (Stott 2016). Ein Beispiel bietet der Frühsommer 2018, dessen extreme Wettersituationen durch Mäander im Höhenstarkwind (Jetstream) der nördlichen Hemisphäre verursacht wurden (Kornhuber et al. 2019). Das gleiche Muster verursachten auch die Hitzewellen 2003, 2006 und 2015.

Wie lokal unterschiedlich extreme Wetterereignisse auf Seen wirken können, lässt sich für die beiden österreichischen Seengebiete im Frühsommer 2018 verdeutlichen. Das Sommerhalbjahr 2018 wurde meteorologisch als das wärmste und trockenste Jahr der Messgeschichte eingestuft, wobei regionale Unterschiede zu verzeichnen waren. Die seit April anhaltende Trockenheit nördlich des Alpenhauptkammes führte zu Rekordabsenkungen der Seespiegel, wie Abb. 1A verdeutlicht. Die stärkste Absenkung des Pegels von -68 cm vom langjährigen Mittel war am Wallersee zu beobachten, die geringste (-7 cm) in zwei inneralpinen Seen. Die Seen des Kärntner Seengebietes südlich der Alpen waren hingegen so gut wie gar nicht betroffen. Im Mondsee lag der Seepegel im Juni bei -37 cm (Foto rechts unten in Abb. 1B), verstärkte sich aber noch bis zum Dezember, wie aus der Graphik der maximalen und minimalen monatlichen Pegelstände hervorgeht. Betrachtet man die Entwicklung über den Zeitraum 1976 bis 2020, so ist klar zu erkennen, dass Hochwässer deutlich häufiger auftreten als Trockenphasen mit geringem Wasserstand. Hochwässer mit mehr als 1 m über Normal (150 cm) traten 1987, 1991 und 2013 auf (Abb. 1B und Foto rechts oben).

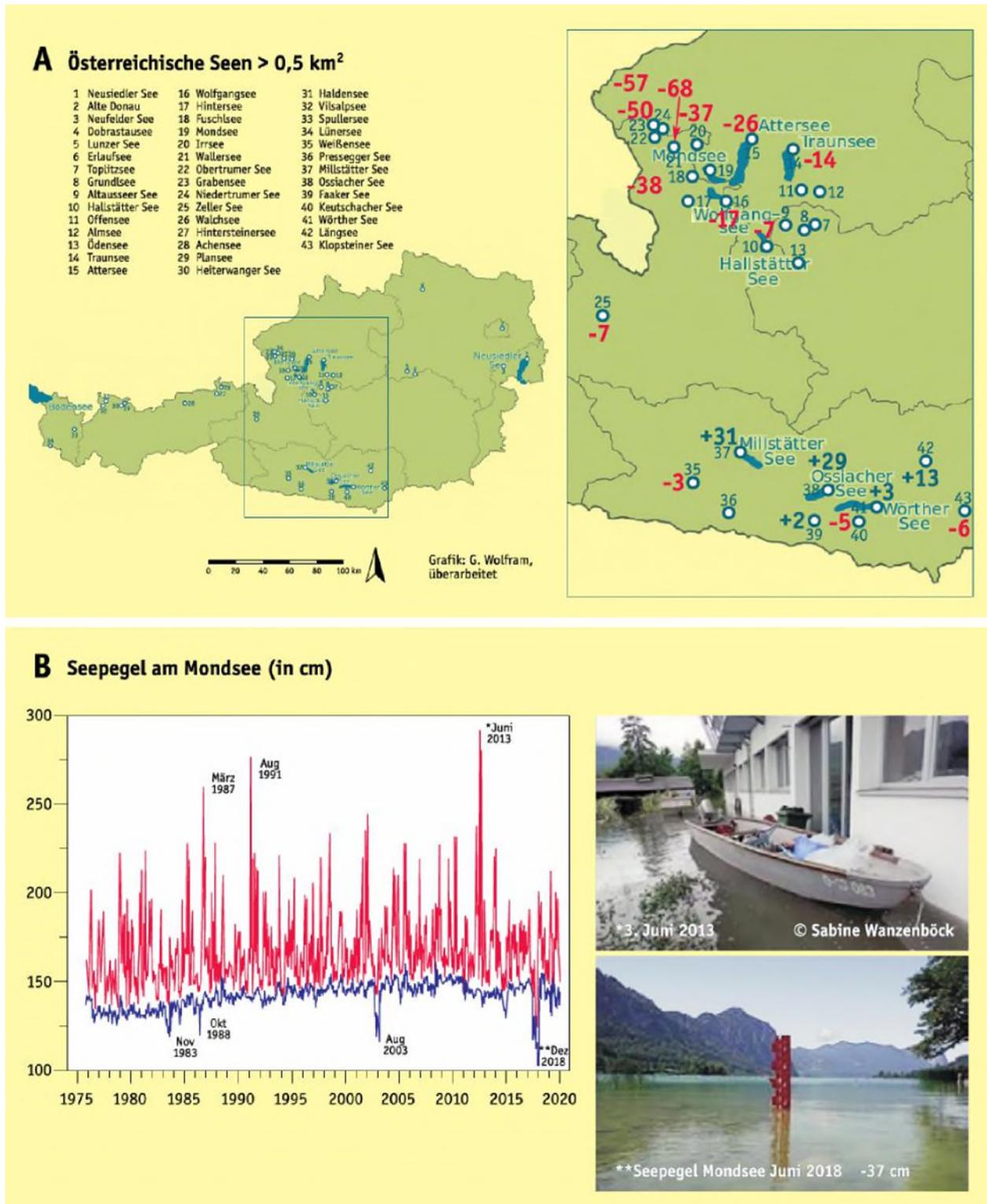


Abb. 1: Extreme Wettersituation en – A. Österreich mit den beiden Seeregionen (links) und den Pegelständen einiger Seen (rechts). B. Maximale und minimale monatliche Pegelstände im Mondsee 1976 bis 2020 (links) sowie Hochwasser 2013 und Seepegel 2018 als Foto (rechts), bearbeitet. – Weitere Erklärung im Text.

Die Auswirkungen extremer Sturmereignisse auf das Phytoplankton wurden von Stockwell et al. (2020) nach Angaben aus 26 Studien zusammengefasst. Die Analyse identifiziert zunächst, was „extrem“ ist, umfasst Auswirkungen von Sturm und Regen sowie die Kombination von beidem auf fast alle relevanten limnologischen Variablen und beschreibt, wie unterschiedliche Phytoplankton-Gemeinschaften auf Stürme reagieren. Die Autoren schlussfolgern, dass der Einfluss von Sturmereignissen auf die Bedingungen im See keine singuläre Funktion der Sturmstärke zu einem bestimmten Zeitpunkt und Ort ist. Ein besseres Verständnis der

Auswirkungen von Stürmen erfordert einen Ansatz unter Einschluss des Einzugsgebietes, der die Beziehungen zwischen Sturm, See und Einzugsgebiet sowie die Vorgeschichte und die Zeitskala des meteorologischen Impulses, der ökologischen Reaktion und der Datenerhebung berücksichtigt. Für alpine Seen haben bereits Perga et al. (2018) nachgewiesen, dass die Wetterbedingungen vor dem Ereignis wichtiger sind als die Stärke des Sturms. Mit hochfrequenten Messdaten von 18 Seen aus 11 Ländern aus allen Erdteilen konnten Doubek et al. (2021) zeigen, dass die Temperaturänderungen nach Stürmen meist kleiner als 2°C waren. Die Bandbreite der Temperaturänderung von Tag zu Tag war hingegen wesentlich größer. Wegen der geringen Wirkung von Stürmen auf die Wassertemperatur gaben die Autoren daher Änderungen der Nährstoffkonzentration und/oder des Lichts als Auswirkungen auf die biologischen Gemeinschaften den Vorzug. Die experimentelle Erhöhung der Temperatur führte zur Verringerung der Diversität des Phytoplanktons. Starke Niederschläge hingegen erhalten die Vielfalt trotz Änderungen der Nährstoffverhältnisse, Abnahme der Temperatur und des Lichtes (Bergkemper et al. 2018).

Die globale Erwärmung und die damit verbundenen extremen Wetterereignisse werden zunehmend auch zu erneuten Nährstoffeinträgen, also zu einer klimainduzierten Eutrophierung in die Seen führen. Die Ursachen liegen in verstärkten Austrägen aus den Einzugsgebieten als Folge von Starkregen und Überschwemmungen (Dokulil und Teubner 2011; Dokulil 2014c). Erste Anzeichen von Verschlechterungen im Hypolimnion beschrieben Luger et al. (2021).

Von Anfang an standen auch die Auswirkungen auf die Biologie der Organismengemeinschaften im Fokus (Magnuson et al. 1990; Schindler et al. 1996; Hobbie et al. 1999). Zahllose Veröffentlichungen widmeten sich in der Folgezeit unterschiedlichen Arten, Organismengruppen und Biozönosen. Dokulil und Teubner (2012) konnten durch die Auswertung von Daten aus 40 Jahren zeigen, dass die Tiefenlage einer Population von *Plaktothrix rubescens* im Metalimnion wesentlich von Klimasignalen und den Umweltbedingungen in der Wassersäule abhängt. Durch die Erwärmung des Klimas wird das Taxon vor allem im Frühjahr begünstigt. Längere Schichtungsperioden haben wenig Auswirkung auf die Entwicklung des Biovolumens. Die Auswirkung der Hitzewelle 2015 auf das Phytoplankton betraf vor allem *Plaktothrix rubescens* die ihren Schwerpunkt von 11 nach 16 Meter verlagerte (Bergkemper und Weisse 2017). Zohary, Flaim und Sommer (2020) analysierten den Effekt der Erhöhung der Gewässertemperatur auf die Größe des Phytoplanktons. Durch die globale Erwärmung werden die einzelnen Arten bzw. Kolonien kleiner, zugleich verschiebt sich aber auch die Gemeinschaft hin zu kleineren Formen. Arbeiten zum Einfluss der Temperatur auf morphologisch definierte funktionelle Planktongruppen ergaben unterschiedliche Auswirkungen gesteigerter Temperatur (Segura, Sarthou and Kruk 2018). Alle Gruppen reagierten positiv, bei einigen ging die Wachstumsrate mit steigender Temperatur zurück, bei anderen nahm die Wachstumsrate nach Überschreiten einer Grenztemperatur rasch ab.

Die Änderungen in der Populationsdynamik des Zooplanktons durch direkte und indirekte Wirkweisen erhöhter Temperatur erläutert Wojtal-Frankiewicz (2012) am Beispiel von Daphnien-Populationen. Schon geringe Erwärmungen während einer kurzen, aber kritischen Phase können zu Destabilisierungen im Nahrungsnetz führen, indem sie trophische Beziehungen entkoppeln.

Fische erfüllen eine Schlüsselrolle in der Dynamik von Seen. Mit Zunahme der Temperatur kommt es zu Änderungen in der Zusammensetzung der Fischfauna. Verändertes Fressverhalten führt zu größerem Fraßdruck auf das Zooplankton und Makroinvertebraten, was im Wesentlichen den Auswirkungen durch Eutrophierung gleicht. Erwärmung kann also dazu führen, dass niedrigere Nährstoffkonzentrationen nötig sein werden, um eine gute Wasserqualität sicherzustellen (Jeppesen et al. (2010, 2012).

Um die komplexen Beziehungen der Organismen untereinander und die Wechselwirkungen mit der Klimaerwärmung zu verstehen, analysierten Woodward et al. (2010) die Effekte verschiedenster Stressoren auf unterschiedliche zeitlich-räumliche Organisationsebenen, wozu Modelle, Experimente und Beobachtungsdaten ganzer Ökosysteme nötig waren. Aus einer Studie an 54 Nahrungsnetzen kanadischer Seen unter Verwendung stabiler Isotope schlossen Tunneya et al. (2014) unter anderem, dass kälteliebende Organismen ihr Verhalten ändern, um im kühlen Bereich zu bleiben, wenn sich ihre Habitate erwärmen. Andere Autoren wie etwa Hansen et al. (2017) sagen Veränderungen in der Zusammensetzung von Fischgemeinschaften mit steigender Gewässertemperatur voraus. Experimentell konnten Murphy, Romanuk und Worm (2020) zeigen, dass die Erwärmung direktere Auswirkungen auf die Organismen an der Basis beziehungsweise an der Spitze des Nahrungsnetzes bewirkt als auf die trophischen Gruppen dazwischen.

Die komplexen Interaktionen zwischen Cyanobakterien, Zooplankton, Ciliaten, Bakterien, Viren und Pilzen im Zuge der Klimaerwärmung fasste Wilk-Woźniak (2019) in einem Überblicksartikel zusammen, woraus ein noch komplizierteres Netzwerk an Beziehungen entstand, als ursprünglich gedacht. Es scheint so, als wären Massenentfaltungen von Cyanobakterien nicht der Endpunkt einer Entwicklung, sondern eher nur ein Zustand in einer Abfolge.

Derzeitiger Status

Umweltvariablen, Phytoplankton und Cyanotoxine wurden in einer umfangreichen Studie an 369 europäischen Seen erhoben (Mantzouki et al. 2018). Eines der wesentlichen Ergebnisse war das komplexe Zusammenspiel von regionalem Klima, lokalen Faktoren wie etwa Nährelementen und Morphometrie, und biologischen Größen (z.B. Artenzusammensetzung) für die Entwicklung von Cyanobakterien-Algenblüten. Eine Modellierung des Frühjahrsmaximums des Phytoplanktons in Westeuropa unter Verwendung meteorologischer Daten von 1.962 Messstellen aus 31 Jahren zeigte eine starke Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Eisbruchs und des Einsetzens einer stabilen thermischen Schichtung (Gronchi et al. 2020).

Messungen der US-Klimabehörde NOAA (NOAA 2021) ergaben, dass der Juli 2021 im Mittel über Land und Ozean mit +0,93°C über dem Mittelwert des 20. Jahrhunderts von 15,8°C der wärmste Juli seit 1880 war. Er übertraf damit die Juli-Monate von 2016, 2019 und 2020. In Europa war es der zweitwärmste jemals verzeichnete Juli. Besonders warm war es auch in Asien, wo der Höchstwert von 2020 überschritten wurde. Damit fallen 10 der wärmsten Juli-Monate in die Periode seit 2005.

Das Jahr 2021 war demnach zu einem hohen Grad vom Klimawandel betroffen. Die ‚World Meteorological Organization‘ etwa titelte in ihren News im Juli zunächst Summer of extremes: floods, heat and fire (<https://public.wmo.int/en/media/news/summer-of-extremes-floods-heat-and-fire>) und identifizierte danach die wasserbezogenen Risiken als die wesentlichen

Katastrophen der vergangenen 50 Jahre <https://public.wmo.int/en/media/press-release/water-related-hazards-dominate-disasters-past-50-years>

Ausblick

Für mindestens die Hälfte der Seen der Welt ist eine winterliche Eisdecke ökologisch wichtig, um die Verdunstungsraten zu minimieren, die Wassertemperaturen im Sommer zu mildern und Algenblüten einzudämmen. Gleichzeitig bieten Seen Erholung, Transport und Nahrung für Millionen von Menschen. Nach einer Prognose von Sharma et al. (2021) wird die Eisbedeckung in zahlreichen Seen bis zum Ende des Jahrhunderts dauerhaft verschwinden, wenn die Emissionen von Treibhausgasen auf dem heutigen Niveau bleiben.

Nach dem neuesten Klimabericht (AR6) des IPCC (2021) hat die derzeitige Temperatur an der Oberfläche der Erde um 1,1°C zugenommen, bezogen auf den Durchschnitt 1850 bis 1900. Wenn die globalen Treibhausgasemissionen so weitergehen wie bisher, wird ein Anstieg der globalen Temperatur zwischen 2,1 und 3,5°C bis 2100 prognostiziert. Um etwa das Pariser Klimaziel doch noch zu erreichen, ist die Zeitspanne bereits sehr kurz geworden.

Besonders hohe Temperaturanstiege von bis zu 5°C werden für Städte vorhergesagt, was die 1,5-Grad-Grenze um mehr als das Doppelte überschreiten würde. Die Schwankungsbreite der Unsicherheiten der Prognosen im AR6 hat deutlich abgenommen und reicht nunmehr von 2,5 bis 4°C.

In zahlreichen Regionen, vor allem aber im Mittelmeerraum ist ein Anstieg der Tage mit Temperaturen über 35°C sehr wahrscheinlich. Damit verbunden sind ein Anstieg von Dürren, der Feuergefahr, von Überschwemmungen und generell eine Zunahme extremer Wetterperioden bis 2050 mit hoher Wahrscheinlichkeit anzunehmen. Als eine der vielen möglichen Folgen für Seen müssen auch eine neuerliche, durch die Erwärmung des Klimas bedingte Eutrophierung und ihre Auswirkung in Betracht gezogen werden, wie bereits früher erwähnt (Dokulil und Teubner 2011; Dokulil 2014).

Auswirkungen auf die Binnengewässer werden letztlich aber auch Veränderungen in den Ozeanen nach sich ziehen, denn neben dem Meeresspiegelanstieg, der Versauerung der Meere und einer potentiellen Gefahr der Emission von Lachgas (N₂O), einem potenten Treibhausgas, könnte vor allem eine Verlangsamung des Golfstroms große negative Auswirkungen auf das Klima nicht nur in Europa, sondern weltweit haben.

Resümee

Zumindest seit Mitte der 1980er Jahre ist ein deutlicher, rascher Anstieg der weltweiten Temperaturen zu beobachten, der zu einem wesentlichen Teil durch anthropogene Emissionen von Treibhausgasen angetrieben wird, auch wenn manche das immer noch nicht wahrhaben wollen. Die zunehmend extremer werdenden Wetterereignisse haben gerade in diesem Jahr 2021 deutlich gemacht, was vermutlich in der Zukunft auf uns zukommt. Diese Entwicklungen betreffen direkt oder indirekt auch die Gewässer sowie die Ressource Wasser insgesamt.

Folgt man dem detaillierten Bericht des IPCC (2021), so ist immer noch Zeit zu handeln und so die dramatischsten Effekte der Klimakrise abzumildern. Allerdings stellt sich die Frage, wie die globale Bevölkerung und vor allem die globale Politik auf diese Herausforderung reagieren werden. Das Problem ist, wie viele andere Umweltprobleme auch, nur weltweit durch

Zusammenarbeit aller Staaten zu lösen. Möglicherweise wird die Menschheit nicht um eine rigorose System- und Wirtschaftsumstellung herumkommen, was aber derzeit außer Reichweite scheint. Als Mindestforderung bleibt der Umstieg auf saubere Energiequellen und drastische Senkung der Emissionen von Treibhausgasen, um so den weiteren Temperaturanstieg wenigstens in Grenzen zu halten. Eine wesentliche Frage wird dabei kaum diskutiert und ist auch so gut wie unlösbar, nämlich die ständige Zunahme der Weltbevölkerung, ohne die es neben der Klimaänderung zahllose andere Umweltprobleme nicht gäbe.

2.2 Meteorologische Parameter des Klimawandels, Luft- und Wassertemperatur, Eisbedeckung, Verdunstung und Wechselwirkung mit biologischen Faktoren

Marlene Bär Lamas

Global Nature Fund, Internationale Stiftung für Umwelt und Natur, Fritz-Reichle-Ring 4, 78315 Radolfzell, Deutschland

Die weltweiten Auswirkungen des Klimawandels auf Seen wurden in den letzten zwei Jahrzehnten in einer Vielzahl von Studien untersucht (Schindler 1997; Livingstone 2003; Williamson et al. 2009; Niedda et al. 2014; Ito und Momii 2015). Einige der am weitesten verbreiteten und bereits heute nachweisbaren physikalischen Folgen des Klimawandels auf Seen sind u.a. die Erwärmung des Oberflächenwassers, kürzere Zeiträume der Eisbedeckung, Veränderungen der Verdunstung und des Wasserhaushalts und des Mischungsregimes. Diese Faktoren stehen untereinander in verschiedenen sich gegenseitig verstärkenden oder abschwächenden Wechselbeziehungen, was die Vorhersagbarkeit konkreter Reaktionen von Seen auf den Klimawandel einschränkt. So wirken sich beispielsweise Veränderungen der Eisbedeckung und der Wassertemperatur auf die Verdunstungsraten aus, werden ihrerseits aber auch von diesen beeinflusst.

Bei unveränderten Niederschlagsverhältnissen führen reduzierte Eisbedeckung, erhöhte Wassertemperaturen und erhöhte Verdunstungsraten der Seen zu einer Absenkung des Seespiegels und damit einhergehend zu einer Verringerung der Fläche des Sees. Der Oberflächenabfluss und die direkten Niederschläge in den See unterliegen jedoch auch klimatischen Schwankungen im Einzugsgebiet und können die Effekte der Verdunstung auf den Seespiegel oder die Seeausdehnung verstärken oder sogar überlagern (Woolway et al. 2020). Diese komplexen Wechselwirkungen müssen bei der Diskussion einzelner Variablen berücksichtigt werden, um die Wirkungen auf das empfindliche Gleichgewicht der Wasserökosysteme zu verstehen. Ungeachtet der hohen Komplexität werden im Folgenden einige der relevanten Faktoren separat behandelt und bewertet.

Wassertemperatur

Die Wassertemperatur ist ein wichtiger Parameter aquatischer Ökosysteme, der die Stoffwechselrate von Organismen und die Aktivität von Bakterien und Algen stark beeinflusst. Eine Veränderung der Wassertemperatur kann sich auf das Gleichgewicht und die Artenzusammensetzung eines aquatischen Ökosystems auswirken und den trophischen Status verändern. Auch dynamische Prozesse in Seen, wie z.B. die thermische Schichtung und die Durchmischungsdynamik, sind eng mit der Wassertemperatur verbunden. Die Energiebilanz großer Seen wird durch Wärmeaustauschprozesse an der Oberfläche dominiert (Lieberherr & Wunderle 2018).

Eine aktuelle Veröffentlichung über globale Reaktionen von Seen auf den Klimawandel von Woolway et al. (2020), die in Nature Reviews Earth & Environment publiziert wurde, weist darauf hin, dass die Wassertemperatur an der Seeoberfläche (Lake Surface Water Temperature – LSWT) ein guter Indikator für den Klimawandel ist, da sie von klimatischen und seespezifischen Charakteristika beeinflusst wird, die zur Energiebilanz an der Seeoberfläche beitragen. Zu den wichtigsten Faktoren gehören die Menge der einfallenden kurzwelligigen und langwelligigen Strahlung und der Anteil der Sonneneinstrahlung, der an der Seeoberfläche absorbiert wird (Albedo); außerdem die Advektion und Speicherung von Wärme im See und der Wärmeverlust an der Luft-Wasser-Grenzfläche infolge der ausgehenden langwelligigen Strahlung und der turbulenten fühlbaren und latenten Wärmeflüsse. Diese Faktoren werden von vielen klimatischen Variablen beeinflusst, wie z.B. Bewölkung, Windgeschwindigkeit über dem See, Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur, insbesondere aber von zwei kritischen Parametern der Seeoberfläche: der LSWT und der Eisbedeckung. Daher können Änderungen in jeder der oben genannten Klimavariablen die LSWT und die Eisbedeckung durch mehrfache Rückkopplungen in der Oberflächenenergiebilanz beeinflussen (Woolway et al. 2020).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Wassertemperatur an der Seeoberfläche (LSWT) den Energie- und Massenaustausch zwischen der Wassermasse und der Troposphäre bestimmt. Sie ist auch ein wichtiger Parameter in der Meteorologie und in lokalen Klimamodellen. LSWT kann als wichtiger Indikator für regionale Klimaänderungen angesehen werden. Mehrere neuere Veröffentlichungen haben Klimasignale in Seen durch die Untersuchung von LSWT-Trends analysiert (Pareeth et al. 2017). In Anerkennung seiner Bedeutung wurde LSWT auch vom Global Climate Observing System (GCOS) in die Liste der essentiellen Klimavariablen (ECVs) aufgenommen, die überwacht werden sollten (Lieberherr & Wunderle 2018).

Eine globale Synthese von LSWT-Langzeitbeobachtungen zeigte, dass sich Seen weltweit zwischen 1985 und 2009 mit einer durchschnittlichen Rate von 0,34°C pro Dekade erwärmten. Im Allgemeinen erwärmen sich Seen in kaltwinterlichen Regionen (mittlere Lufttemperatur <0,4°C) schneller als solche in warmwinterlichen Regionen, was teilweise den verstärkten Anstieg der Lufttemperatur in polaren und hochgelegenen Regionen widerspiegelt. Seen in kalten Regionen zeigen in der warmen Jahreszeit jedoch auch Trends in der LSWT, die mit den Trends der Lufttemperatur vergleichbar oder diese sogar quantitativ übersteigen.

Diese Trends deuten auf Reaktionen früherer Schichtungen oder zusätzliche Energiequellen an den Seen hin, z. B. eine erhöhte Absorption von Sonnenstrahlung. In einigen Fällen trugen eine reduzierte Eisbedeckung oder weniger Schneefall (und damit Einflüsse der Schneeschmelze) zu größeren verfügbaren Energiemengen und damit zur Erwärmung des Oberflächenwassers und zur Erhöhung der Verdunstungsraten bei (Woolway et al. 2020).

Der Datensatz einer Studie von Lieberherr & Wunderle (2018) umfasst 26 europäische Seen und deckt den Zeitraum von 1981 bis 2016 ab. Die Forscher registrierten, dass der Erwärmungstrend von Südwest- nach Nordosteuropa zunahm. Im Allgemeinen wurde jedoch eine starke Heterogenität der Trends innerhalb eines Jahres über die Seen hinweg festgestellt. Dies deutet darauf hin, dass die Verwendung einer einzigen Periode innerhalb eines Jahres zur Bestimmung von Temperaturtrends nicht repräsentativ ist. Es scheint sich zu bestätigen, dass die verschiedenen Jahreszeiten nicht gleichmäßig zu den jährlichen Trends beitragen. Daher kann eine Trendanalyse, die nur auf Sommerperioden basiert, kein vollständiges Bild

zeigen. Außerdem wurde eine Heterogenität von Trends innerhalb des Sees festgestellt. Der Standort der Messungen beeinflusst Trends signifikant. Dies bedeutet, dass direkte Vergleiche von Trends zwischen Vor-Ort-Daten und Satellitendaten mit Vorsicht zu genießen sind.

Der Vergleich mit lokalen Lufttemperatortrends zeigte, dass bei vielen Seen die Erwärmung des Wassers stärker ist als die lokale Erwärmung der Luft. Dieser Effekt war besonders deutlich bei kälteren Seen in höheren Lagen oder Breitengraden festzustellen. Zum Beispiel zeigt der in Schweden gelegene Vätternsee einen stärkeren Anstieg der LSWT als der Lufttemperatur, während für den Bolsena-See in Italien der LSWT-Trend sogar etwas geringer als der Anstieg der lokalen Lufttemperatur ausfällt.

Phänologie von Eis auf Seen

Die Phänologie des Eises auf Seen – also der Zeitpunkt, an dem die Oberfläche gefriert oder aufbricht – bietet einen weiteren Indikator für Klimaveränderungen. Die Eisbildung in Seen wird maßgeblich durch die Energiebilanz der Oberfläche und die Lufttemperatur bestimmt und durch die Morphologie des Sees, die windinduzierte Durchmischung und andere meteorologische und hydrologische Faktoren beeinflusst. Zum Beispiel erfolgt der Wärmeverlust der Seeoberfläche während der Eisbildung hauptsächlich durch abgehende langwellige Strahlung. Daher findet die erste Eisbildung normalerweise nachts, bei kalten und ruhigen Bedingungen und klarem Himmel statt. Allerdings sind i.d.R. auch eine starke Abkühlung und tiefe Durchmischung erforderlich, um den See auf die Vereisung der Oberfläche "vorzubereiten". Dies geschieht üblicherweise durch kalte, trockene Winde, die Wärmeverluste durch stärkere Verdunstung verursachen (Woolway et al. 2020).

Obwohl die Prozesse, die die Bildung und das Aufbrechen von Eis auf Seen steuern, von vielen interagierenden meteorologischen und limnologischen Faktoren abhängen (Gu und Stefan 1990), wird die Lufttemperatur als die dominierende Variable für die Eisbildung auf Seen angesehen (Williams und Stefan 2006). Da die individuellen physikalischen Eigenschaften von Seen Gefrierprozesse viel stärker beeinflussen als Auftauvorgänge, ist der Zeitpunkt des Eisaufbruchs ein besserer direkter Indikator für den Klimawandel als der Zeitpunkt der Eisbildung (Sporka et al. 2006). Die Verwendung von Satellitendaten zur Untersuchung der Bildungsprozesse von Eis auf Seen in großen räumlichen Skalen unterstreicht die Aussagekraft des Schmelzzeitpunktes als Indikator für den Klimawandel (Wynne und Lillesand 1993; Latifovic und Pouliot 2007).

Die Beziehung zwischen Eisrückgang und Lufttemperatur ist jedoch oft nicht linear und unterscheidet sich deutlich zwischen kälteren und wärmeren geographischen Regionen (Weyhenmeyer et al. 2004). Die Dauer der Eisbedeckung kann auch dann als Indikator für den Klimawandel herangezogen werden, wenn die Eisbedeckung intermittierend ist, z.B. wenn sich der Eisschild während eines warmen Winters mehrmals bildet und taut (Livingstone und Adrian 2009; Adrian et al. 2009).

Die Lufttemperatur und ihre Auswirkungen auf andere Komponenten der Oberflächenenergiebilanz (v.a. die Nettostrahlung) bestimmen oft den Zeitpunkt des Eisaufbruchs. Der Anstieg der Lufttemperatur in den Wochen vor dem Aufbruch ist i.d.R. der wichtigste Faktor für den Aufbruch. Teilweise ergeben sich additive Effekte auf den Wärmefluss, z.B. durch die abwärts gerichtete langwellige Strahlung, die Albedo von Schnee und Eis und damit die Gesamtmenge der lang- und kurzwelligen Strahlung, die an der Seeoberfläche absorbiert wird (Woolway et al. 2020).

Schneehöhe, kurzweilige Strahlung und Wind beeinflussen den Eisauflauf zusätzlich. Eine größere Schneedecke wird den Auflauf aufgrund ihrer höheren Albedo und größeren Isolierung im Frühjahr i.d.R. verzögern. Sie trägt auch zu zusätzlicher Eisbildung im Winter bei. Allerdings kann eine starke Schneedecke im frühen Winter die Geschwindigkeit der Eisbildung aufgrund isolierender Effekte auch reduzieren. Am Baikalsee beispielsweise führen kalte Winter mit geringem Schneefall und früher Eisbildung tendenziell zu einer dickeren Eisdecke und späterem Auflaufen. Im Gegensatz dazu wirkt starker Schneefall bei Seen in Estland als reflektierende und isolierende Schicht, was zu späterem Auflauf führt.

Stärkere Sonnenstrahlung begünstigt eine früher einsetzende Schneeschmelze. Die Menge der im See absorbierten Sonnenstrahlung wird dabei zum Teil von der Höhe und Dichte der Schneedecke auf dem Eis und der Lichtdurchlässigkeit von Schnee und Eis bestimmt. Bei fortgesetzter Erwärmung des Klimas ist davon auszugehen, dass sich der Trend zum früheren Auflaufen des Eises auf Seen deutlich fortsetzt. Beispielsweise wird erwartet, dass verglichen mit dem Ende des 20. Jahrhunderts der Eisbruch in der kanadischen Arktis 10 bis 25 Tage früher – und im Rest der nördlichen Hemisphäre 10 bis 30 Tage früher – eintreten wird (Woolway et al. 2020).

Verdunstung

Um die Reaktion von Seenökosystemen auf den Klimawandel vorherzusagen, ist es wichtig, die von der Verdunstung ausgehenden physikalischen Faktoren zu verstehen. Nach Woolway et al. (2020) verändert die Verdunstung bei Gewässern direkt und wesentlich die hydrologischen, chemischen und energetischen Bilanzen der Seen. Der kühlende Effekt des verdunstenden Wassers wirkt auf die Wassertemperatur an der Seeoberfläche (LSWT), die Eisbildung, die vertikale Schichtungsmischung und die Gasflüsse. Sie beeinflusst auch den Wasserspiegel und die Ausdehnung von Seen und sogar das regionale Klima.

Verdunstung ist energieintensiv und verbraucht etwa 82 % der globalen Strahlungsenergie, die an der Erdoberfläche verfügbar ist (Trenberth et al. 2009; Wild et al. 2013; Woolway et al. 2020). Die diffuse Natur der Verdunstung eignet sich jedoch für Massentransferformulierungen, bei denen die Verdunstungsrate in offenem Wasser einfach proportional zum Dampfdruckgradienten nahe der Oberfläche und verschiedenen Funktionen der Windgeschwindigkeit und der atmosphärischen Stabilität ist. Während die direktesten atmosphärischen Treiber der Verdunstung im See zweifellos die Windgeschwindigkeit und die absolute Feuchte sind, erfordert die Vorhersage des Dampfdruckgradienten in Modellen auch die Kenntnis der LSWT und des Eises, um den Sättigungsdampfdruck an der Seeoberfläche zu berechnen.

Im Gegensatz zu vielen Studien, die die Auswirkungen von prognostizierten Erhöhungen der Lufttemperatur auf die Funktion aquatischer Ökosysteme untersuchen, wurden die Auswirkungen möglicher Änderungen der Windgeschwindigkeit nicht eingehend untersucht (Adrian et al. 2009). Windgeschwindigkeiten werden oft stark von räumlichen Komponenten beeinflusst. Hier unterscheiden sich Küsten- und Binnenregionen (Griffin et al., 2010). Für Europa werden steigende Windgeschwindigkeiten auf bis zu 220 % erwartet. Außerdem wird die Häufigkeit von Sturmfluten in Nordeuropa zunehmen (Beniston et al., 2007). Darüber hinaus kann die Windgeschwindigkeit durch die Landnutzung, wie z.B. Aufforstung, drastisch verändert werden. Das kann wiederum das thermische Regime insbesondere kleiner Seen und Stauseen verändern (Kerimoglu und Rinkle, 2013).

Schließlich können der Zeitpunkt, die Intensität und die gesamten Volumenströme der Verdunstung im See auch durch zahlreiche seen- und landschaftsspezifische Variablen, wie z. B. die Klarheit des Wassers und Windschutzeffekte, beeinflusst werden. Die Reaktion der Seeverdunstung auf den Klimawandel wird aufgrund dieser komplexen interagierenden Faktoren räumlich wahrscheinlich stark variabel sein. Trotzdem wird insgesamt bis 2100 ein Anstieg der mittleren jährlichen Seeverdunstung von rund 16 % im Vergleich zum Zeitraum 2006 bis 2015 erwartet (Wang et al. 2018, Friedrich et al. 2018). Die größten Zunahmen der jährlichen Verdunstung werden in niedrigen Breiten erwartet (jährliche Änderungen von ca. 210 mm pro Jahr), wo Verdunstungsraten bereits hoch sind (ca. 1.600 mm pro Jahr zum Jahresmittel von 2006 bis 2015 für Seen zwischen 30°S und 30°N). Der Anstieg der Verdunstung in Seen niedrigerer Breitengrade ist in erster Linie eine Reaktion der Oberflächenenergiebilanz auf ansteigende Lufttemperaturen und abwärts gerichtete langwellige Strahlung, die auch einen Anstieg der LSWT bewirken. Im Vergleich zur Lufttemperatur wird der Anstieg der Seeoberflächentemperatur jedoch durch zusätzliche Energieverluste aufgrund von Verdunstungskühlung und emittierter langwelliger Strahlung abgeschwächt, was zu einer Abschwächung des Temperaturgradienten der Seeluft und einem reduzierten fühlbaren Wärmefluss führt (Woolway et al. 2020).

Während allgemein erwartet wird, dass Änderungen der langwelligen Strahlung, der Eisbedeckung und der Schichtung die langfristige Reaktion der Seeverdunstung auf den Klimawandel dominieren, müssen insbesondere auf kürzeren Zeitskalen auch andere Faktoren berücksichtigt werden. Zum Beispiel tragen globale und regionale Veränderungen der einfallenden Sonnenstrahlung aufgrund von Veränderungen der Wolkenbedeckung und Aerosole (oft als Solar Offset bezeichnet) zu Trends in der Teichverdunstung bei. Wie Verdunstungsteiche bzw. Verdunstungsbecken sind auch Seen energiebegrenzte Systeme, sodass einige Seen eine erhöhte Verdunstung als Reaktion auf solare Kompensationstrends erfahren können, insbesondere im Hinblick auf die beobachteten Veränderungen der LSWT. Obwohl sich diese Schwankungen in die Zukunft fortsetzen können, wird ein allgemeiner langfristiger Trend in der Sonneneinstrahlung nicht erwartet. In ähnlicher Weise wurden auch Abwärtstrends bei der Windgeschwindigkeit und eine abnehmende Verdunstungsleistung beobachtet.

Andere Studien haben in letzter Zeit jedoch eine Umkehrung dieses allgemeinen Trends oder sogar einen Aufwärtstrend bei der regionalen Windgeschwindigkeit festgestellt. Daher sind solar- und windinduzierte Trends in der Seeverdunstung wahrscheinlich sehr lokal und variabel auf kurzen Zeitskalen und von geringerer Größenordnung auf längeren Zeitskalen. Änderungen der Luftfeuchtigkeit könnten ebenfalls die Verdunstungstrends beeinflussen, und es wird erwartet, dass die spezifische Luftfeuchtigkeit der globalen Atmosphäre in Zukunft zunehmen wird. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass eine feuchtere Atmosphäre in der Lage sein wird, den zunehmenden Verdunstungsbedarf sich schnell erwärmender Landflächen und Seen zu kompensieren.

Schließlich sollte man noch beachten, dass die Verdunstung aus Seen oft sehr episodisch ist und von zwischenjährlichen Änderungen in der synoptischen Wettervariabilität – wie der Häufigkeit von Kaltfronten – beeinflusst sein kann. Genaue Projektionen der Reaktion der Verdunstung von Seen auf den Klimawandel müssen daher nicht nur Trends im mittleren Klima, sondern auch Änderungen der Variabilität berücksichtigen (Woolway et al. 2020).

Wechselwirkung von klimatischen Variablen mit biologischen Faktoren

Studien an Seen in alpinen Regionen Europas stellen eine Zunahme des Vorkommens potenziell schädlicher Cyanobakterien wie *Planktothrix rubescens* (Ernst et al. 2009) und *Dolichospermum lemmermannii* (Salmaso et al. 2015) in den vergangenen Jahrzehnten fest. Das könnte auf Veränderungen der lokalen Nährstoffkonzentrationen und ein wärmeres Klima zurückzuführen sein (Monchamp et al. 2018).

Eine Studie von Lau et al. (2019) untersuchte Hochgebirgsseen in Norwegen, Schweden, Finnland und den Färöer-Inseln. Hierbei wurden Daten zu mindestens drei biologischen Komponenten von Fokus-Ökosystemen (FECs) – Makrophyten, Phytoplankton, benthische Kieselalgen, küstennahe benthische Makroinvertebraten, Zooplankton und Fische – erfasst, die auch verschieden ziehende Arten und Gewässer-Lebensräume mit verschiedenen Nährstoffzuständen umfassen. Es wurden die Biodiversitätsmuster dieser Seen analysiert, die entlang breiter Umweltgradienten und räumlicher Gradienten verteilt sind, und untersucht, ob deren räumliche Biodiversitätsmuster mit einer Reihe abiotischer und geographischer Variablen korrelieren. Die Wissenschaftler*innen fanden heraus, dass die Biodiversität von SCFs verschiedener trophischer Ebenen in nordeuropäischen subarktischen Seen stark von klimatischen Variablen (v.a. Temperatur und Niederschlag) beeinflusst wurde, die durch die geographische Position (z.B. Breitengrad) und die hydrographische Vegetation determiniert sind.

In niedrigeren Breitengraden, die ein wärmeres und feuchteres Klima repräsentieren, nahm der relative Reichtum von Phytoplankton, Makrophyten und Fischen – Schlüsselakteure in der stromaufwärts und stromabwärts gerichteten Kontrolle der Nahrungsnetze von Seen – ab. Die Menge an Zooplankton und Makroinvertebraten – intermediäre trophische Ebenen in pelagischen und benthischen Nahrungsnetzen – nahm jedoch zu. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass durch den Klimawandel kälteangepasste Arten durch südlichere Arten verdrängt werden könnten, da diese toleranter gegenüber wärmeren Gewässern sind. (Lau et al. 2019).

Die o.g. Studie liefert deutliche Belege dafür, dass Trends in der Biodiversität nordeuropäischer Seen, die anhand von Gradienten des Klimas, der geografischen Lage und der Wasserscheidenvegetation beobachtet wurden, spezifisch für die trophische Ebene waren. Die Muster der mittleren trophischen Ebenen unterschieden sich von denen der Fische und Primärproduzenten. Das Klima war, neben Temperatur und Niederschlag, die Variable, die am stärksten mit den räumlichen Mustern in Bezug auf Breitengrad und Meereshöhe verbunden war. Die Vegetation des Wassereinzugsgebiets, die sowohl klimatische Einflüsse als auch menschliche Einflüsse (z. B. Landnutzung) einschließt, war ebenfalls wichtig und regulierte wahrscheinlich die Nährstoffeinträge und allochthonen organischen Subventionen in die Seen, was sich letztlich auf deren Produktivität auswirkte (Lau et al. 2019).

Woolway et al. (2020) stellten fest, dass Auswirkungen des Klimawandels in Seenökosystemen auf der ganzen Welt beobachtet wurden, einschließlich Veränderungen der Wasserqualität in Verbindung mit einer Zunahme der Phytoplankton-Biomasse und Veränderungen in der Zusammensetzung der Biozönose. Steigende Temperaturen führen zu starken Veränderungen in Planktongemeinschaften, wie z. B. erhöhte Populationen von Cyanobakterien und erhöhte Produktion von toxischen Stoffwechselprodukten. Selbst in abgelegenen Seen wurden noch nie dagewesene Vorkommen von Cyanobakterien festgestellt, die auf einen frühen Eisfluss, eine unvollständige Durchmischung, eine frühe

Schichtung und die daraus folgende erhöhte interne Nährstoffbelastung zurückzuführen sind. In vielen Seen wurde ein früheres Einsetzen der Phytoplanktonblüte beobachtet, z.B. eine Verschiebung um 30 Tage zwischen 2003 und 2017 am Taihu-See in China und um 28,5 Tage zwischen 1984-1994 und 2007/2017 am K ylij njarvi-See in Finnland.

Zunahmen von Chlorophyll und Cyanobakterien korrelieren oft auch mit sinkenden Wasserständen vieler Seen und Stauseen, manchmal begleitet von Regimewechseln von klarem zu trübem Wasser, die teilweise irreversibel waren. An einigen Seen führt eine vom Klimawandel beeinflusste zunehmende Schichtung zu einem Rückgang der Algenbiomasse, was sich negativ auf die Fischertr ge auswirkte. Änderungen der Wassertemperatur beeinflussen auch den Stoffwechsel, die Biodiversität und die Invasion von Arten.

Änderungen der Wetterbedingungen und Niederschläge im Winter haben eine Reihe von Konsequenzen. Zum Beispiel werden Veränderungen der Dauer, des Zeitpunkts und des Zustands der Eisdecke auf Seen den biogeochemischen Kreislauf, die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften, die Algenbiomasse, die Dynamik der Nahrungsnetze und die Gasemissionen beeinflussen, mit ähnlichen Folgen wie das Auftauen des Permafrostbodens. In Kombination mit anderen Umweltveränderungen werden die zu erwartenden feuchteren Klimabedingungen aufgrund von terrestrischen Einträgen gelöster organischer Substanzen zu tr bereren Seen führen. Dies hat Auswirkungen auf den Kohlenstoffkreislauf, invasive Arten, die Persistenz von Krankheitserregern und andere ökologische Faktoren. Der Klimawandel, kombiniert mit zunehmender Trübe und mehr Nährstoffen (Eutrophierung) im Wasser, wird die Funktion und die Zusammensetzung aquatischer Nahrungsnetze verändern. Indirekt wirkt sich die Klimaerwärmung also auch auf Seen-Ökosysteme durch Landschaftsveränderungen aus, z.B.  ber stärkere Erosion oder Staub, was sich letztlich in der Nährstoffverfügbarkeit, der Wasserqualität und in der Zusammensetzung und Produktivität von Lebensgemeinschaften niederschlägt.

Viele der sich abzeichnenden Veränderungen in Seen-Ökosystemen sind das Ergebnis komplexer Wechselwirkungen einer Vielzahl von Klimafaktoren, menschlichen Aktivitäten und den Eigenschaften der Seen. Der Einfluss des Klimas ist jedoch signifikant nachweisbar, selbst in Seen, die stark durch andere Faktoren wie Öl- oder Gasförderung, Abholzung und invasive Arten betroffen sind. Die anthropogenen Einflüsse auf die terrestrischen Nährstoffkreisläufe sind einer der am stärksten interagierenden Faktoren. Die Kombination aus erhöhtem Nährstoffeintrag und Temperatur wirkt oft synergetisch und führt zu sauerstoffärmeren (hypoxischen) Bedingungen, welche die Häufigkeit, Intensität und die Dauer schädlicher Algenblüten und letztlich die Biodiversität negativ beeinflussen.

3 Klimawandel, Seen und Feuchtgebiete – Internationaler Kontext

3.1 Alpine Schweizer Seen im Klimawandel

Klaus Lanz

International Water Affairs, Chemin des Chenevières 33, 2533 Evilard BE, Schweiz

Im Rahmen des Forschungsprogramms Hydro-CH2018 wurde in den letzten Jahren die Wirkung des Klimawandels unter anderem auf die Schweizer Seen untersucht. Es zeigte sich, dass steigende Wassertemperaturen, veränderte Hydrologie und zunehmende Nutzungsansprüche neue Herausforderungen für den Schutz der Seeökologie mit sich bringen. Viele der Erkenntnisse lassen sich auch auf Seen in anderen Regionen übertragen.

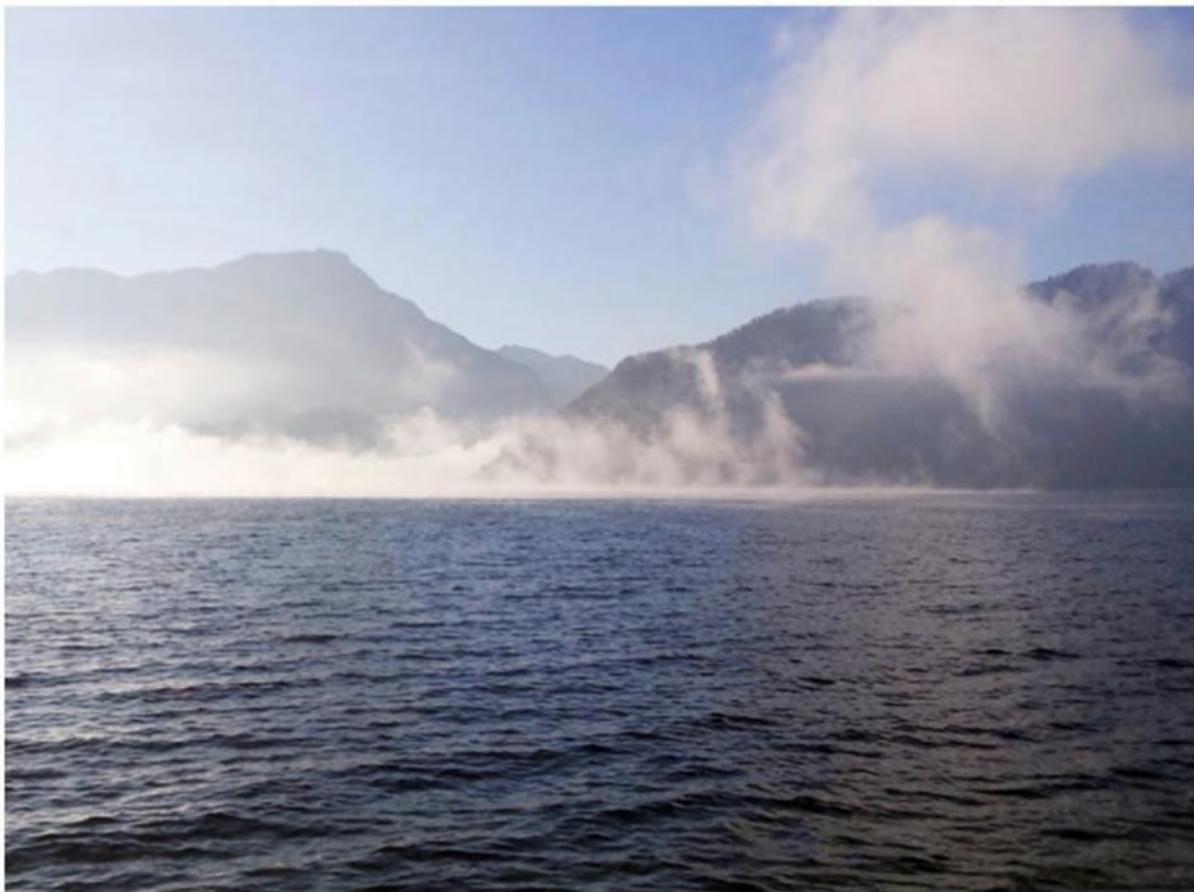


Abb. 2: Der Vierwaldstättersee bei Kastanienbaum (Quelle: Adrien Gaudard).

Der Klimawandel wirkt sich in mehrfacher Weise auf das Ökosystem der Seen aus. Zum einen nimmt die Wassertemperatur zu, teils durch wärmere Zuflüsse, teils durch direkte Aufheizung der oberen Wasserschichten in langen Hitzephasen. Zum zweiten verändert sich die Dynamik des Durchflusses: Fällt im Einzugsgebiet im Winter vermehrt Regen statt Schnee, erhöht sich der winterliche Durchfluss. Im Sommer gehen Zu- und Durchfluss in dem Maß zurück, in dem sich die Schneespeicher in den Alpen reduzieren. Gletschergespeiste Seen profitieren vorübergehend noch von der Dezimierung der Eismassen, bis auch diese in einigen Jahrzehnten verschwunden sind. Hinzu kommt, dass Seen in Hitzephasen vermehrt Wasser durch Verdunstung verlieren, was sich messbar auf ihren Abfluss auswirkt (BAFU Hrsg. 2021).

Stabile Schichtung

Für das Leben in Seen ist ein Phänomen entscheidend, das als Temperaturschichtung bezeichnet wird. Anders als bei Flüssen ist das Wasser von Seen im Sommer nicht gleichmäßig durchmischt, sondern horizontal geschichtet. Warmes Wasser ist wesentlich leichter als kaltes. Ab dem Frühjahr erwärmt sich die Oberfläche von Seen nach und nach und es bildet sich eine immer dicker werdende Warmwasserschicht aus. Wer am Anfang des Sommers in Seen schwimmt, kennt das Phänomen: Während die obersten zwei Meter angenehm warm sind, geraten die Füße immer wieder einmal in den noch winterkalten Bereich in der Tiefe.

Das Verblüffende ist die Stabilität der Schichtung warmen, leichteren Oberflächenwassers über dem schweren Kaltwasser in der Tiefe. Die warme Schicht kann in unseren Breiten bis auf 12 Meter und mehr anwachsen. Unter dieser Sprungschicht bleibt das Wasser konstant kalt zwischen 4° und 8° Celsius. Ausschlaggebend für das Leben im See ist die Tatsache, dass praktisch kein Austausch von gelösten Stoffen und Sauerstoff zwischen Warm- und Kaltbereich stattfindet.

Durch den Abbau organischen Materials wird vor allem in nährstoffreichen (eutrophen) Seen Sauerstoff verbraucht. Von frischem Sauerstoff aus der Atmosphäre ist die kalte Tiefenschicht aber abgeriegelt, ein Transport von Sauerstoff durch die Sprungschicht physikalisch nicht möglich. Während der warme Bereich an der Oberfläche reichlich mit Sauerstoff versorgt ist, sinkt der Sauerstoffgehalt in der Tiefe kontinuierlich. In einigen Seen entstehen dann Tiefenbereiche, in denen sich Fische nicht mehr aufhalten können.

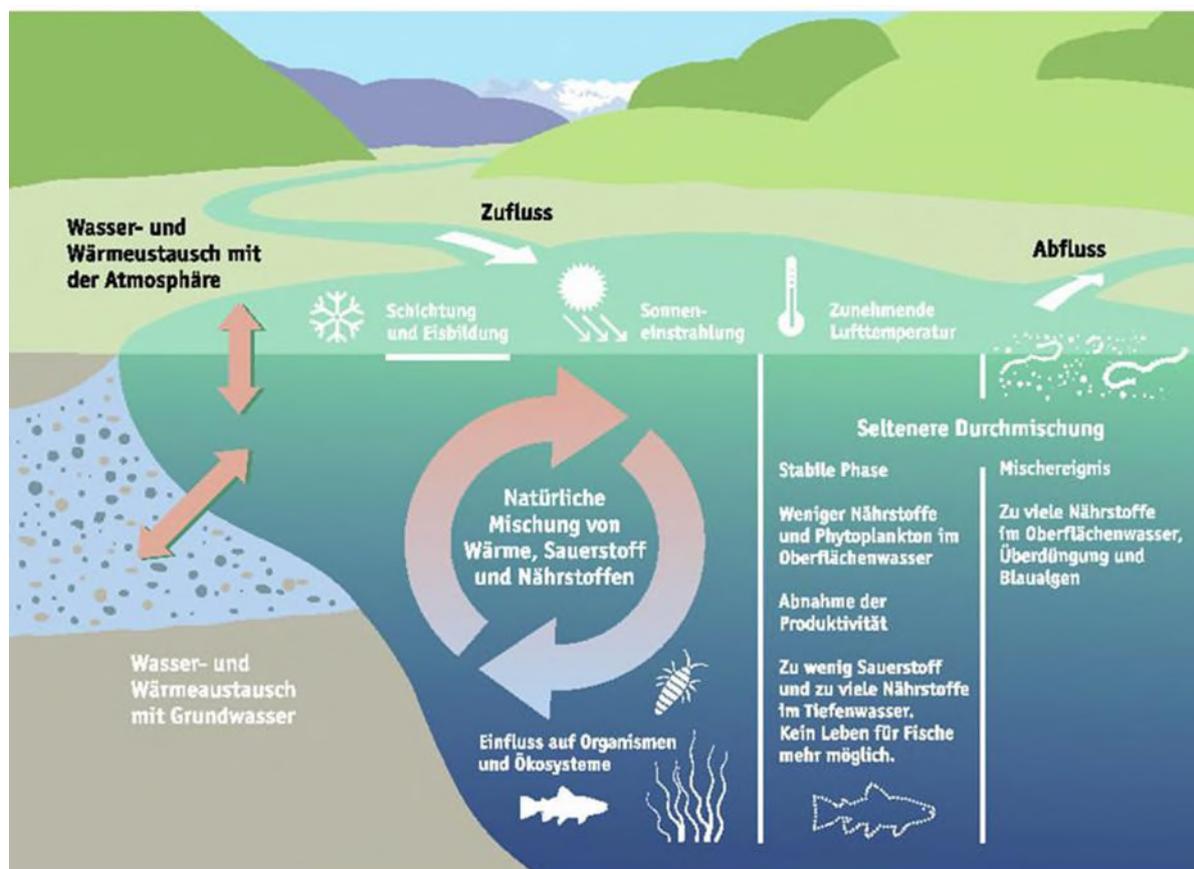


Abb. 3: Entscheidend für die ökologische Gesundheit von Seen ist eine regelmäßige Durchmischung des Wasserkörpers (NCCS Hrsg. 2021), bearbeitet.

Im Herbst oder im frühen Winter kühlt sich mit der Atmosphäre auch das Oberflächenwasser nach und nach ab. Dabei nimmt es zugleich an Gewicht zu und wird schließlich auch schwerer als das Wasser in der Tiefe, sodass es – meist angetrieben durch Winde – zu einer gewaltigen Umwälzung des gesamten Seeinhalts kommt: Das Seewasser durchmischt sich komplett. Dadurch gelangt Sauerstoff wieder bis auf den Seegrund. Der Klimawandel erschwert allerdings die herbstliche Durchmischung, denn je stärker der See sich im Sommer erwärmt, desto stabiler ist die Schichtung. In einigen tiefen Seen wie dem Luganersee findet eine vollständige Durchmischung bis zum Seegrund schon heute nur selten statt, große Tiefenbereiche bleiben jahrelang sauerstofffrei. Solche Verhältnisse könnten sich zukünftig auch in weniger tiefen Seen einstellen.

So selbstverständlich das Phänomen der sommerlichen Seeschichtung für Limnologen und Fischforscher ist, so exotisch erscheint sie Laien. Darum wird oft übersehen, dass das Nährstoffmanagement bei Seen wesentlich anspruchsvoller ist als bei Fließgewässern. Praktisch alle Seen ab 20 oder 25 Meter Tiefe bilden im Sommer eine stabile Sprungschicht aus. Ist das Wasser durch Abwasser oder Düngemittel reich an Nährstoffen, wird der Tiefenbereich schnell sauerstofffrei und lebensfeindlich. Für viele kälteliebende Fischarten wird der Lebensraum dann knapp, denn oberhalb der Sprungschicht ist das Wasser für ihren Stoffwechsel zu warm. Das bringt hohe Anforderungen an die Landwirtschaft im Einzugsbereich von Seen mit sich. Eine industrielle Tierhaltung ist dort ebenso wenig mit einer intakten Seeökologie zu vereinbaren wie intensiver Ackerbau. Dies wird auch in der Schweiz immer noch missachtet: Mehrere Seen leiden unter stark erhöhten Phosphatkonzentrationen aus der intensiven Tiermast und müssen künstlich belüftet werden. Auch die Abwasserreinigung an Seen muss weit höhere Anforderungen in Bezug auf Nähr- und Schadstoffe erfüllen. In der Schweiz zeigt sich, dass sich jene Seen am besten entfalten, die ganz frei von Abwassereinleitungen sind.

Auch die Nutzungen ändern sich

Der Klimawandel verändert also die ökologischen Bedingungen in Seen durch höhere Temperaturen, verminderten Durchfluss und reduzierten Sauerstoffgehalt deutlich. Gleichzeitig verändern sich aber auch die gesellschaftlichen Ansprüche an die Seen. Sie werden in der Schweiz zunehmend als Wasserreservoir für die Trinkwasserversorgung herangezogen – auch weil immer mehr Grundwasserfassungen mit Pestiziden und Nitrat belastet sind.

Zudem hat die Erfahrung mehrerer trockener Jahre in der Landwirtschaft einen wahren Boom bei den Bewässerungskulturen ausgelöst, überall im Land sind große Bewässerungsinfrastrukturen in Planung oder im Bau. Da den meisten Bächen in Trockenzeiten kein Wasser mehr entnommen werden darf, richtet sich auch hier das Interesse vor allem auf die Seen. Sie werden von der Landwirtschaft als unbegrenzte Wasserreservoir betrachtet. Das gilt in anhaltenden Trockenphasen allerdings nur eingeschränkt: Obwohl der Wasserspiegel fast aller größeren Seen in der Schweiz (mit Ausnahme von Bodensee und Walensee) reguliert ist, sanken die Pegel im Trockensommer 2018 an vielen Seen deutlich ab. Mit anderen Worten: Zufluss, Verdunstung, Entnahmen und Abfluss hielten sich nicht mehr die Waage. Wesentliche zusätzliche Entnahmen scheinen angesichts dieser Erfahrungen in Trockenphasen kaum mehr zu verantworten.

Angesichts der enormen Volumina der tiefen Schweizer Alpenrandseen mag Wasserknappheit schwer vorstellbar sein. Zu bedenken ist jedoch, dass nur wenige Dezimeter der Wassersäule

eines Sees für Nutzungen verfügbar sind. Entnahmen von mehr als 50 cm sind schon wegen der Uferstabilität unmöglich, verbieten sich natürlich aber auch wegen der Fischbestände, die auf Flachwasserbereiche und Schilfflächen angewiesen sind. Aus dem Zürichsee entnimmt allein die öffentliche Wasserversorgung etwa 15 cm Wasser pro Monat. Geht in heißen Sommern der Zufluss stark zurück, ist dies eine für den See nicht unerhebliche Wassermenge.

Kühlen mit Seewasser

Zunehmend in den Fokus kommen die Seen auch als Kaltwasserreservoir für die Kühlung von Gebäuden und Industrieanlagen. Dutzende große Projekte wurden an Schweizer Seen bereits verwirklicht, viele weitere sind geplant. Selbst das nationale Hochleistungsrechenzentrum wird mit Wasser aus dem Luganersee gekühlt. Das meiste Kühlwasser wird den Seen im Sommer entnommen, wenn der See stabil geschichtet ist. Während das Abpumpen kalten Tiefenwassers nur wenig Auswirkungen auf den See hat, ist das Rückleiten des erwärmten Kühlwassers kritischer.

Werden große Mengen erwärmten Kühlwassers in einen See zurückgeleitet, schichten sich diese entsprechend ihrer spezifischen Dichte in den Wasserkörper ein und verändern die natürliche Schichtung. Die Schichtung soll möglichst nicht noch stabiler werden, daher werden große Kühlwassermengen von hoher Temperatur (deutlich über 20°C) in der Regel in größerer Tiefe unterhalb der Sprungschicht eingebracht (siehe Abb. 4). Da in diesem Fall keine Energie an die Atmosphäre abgegeben werden kann, bleibt während des Sommers die gesamte Kühlwasserwärme unterhalb der Sprungschicht eingeschlossen. Je nach Größe des Sees und eingeleiteter Wärmemenge kann sich so der gesamte See in unerwünschtem Maß erwärmen.

Zu beachten ist bei der Kühlwassernutzung neben unerwünschten Temperatureffekten auch der Nährstoffgehalt. In der Regel ist in der Tiefe entnommenes kühles Wasser nährstoffreicher als Oberflächenwasser. Daher muss die Rückleitung ebenfalls im Tiefenwasser erfolgen, so dass die Einschichtung unterhalb der Sprungschicht stattfindet. Eine oberflächliche Rückleitung nährstoffreichen Wassers hätte eine schädliche Verstärkung des Algenwachstums zur Folge.



Abb. 4: Prozesse in Seen, welche durch die Einleitung erwärmten Kühlwassers beeinflusst werden können. (Quelle Lanz et al. 2021), bearbeitet.

Ufer im Fokus

Die Ufer der großen Schweizer Seen sind verhältnismäßig stark verbaut. Zum einen liegt ein großer Teil der Seeufer in städtischen Gebieten, wo erhebliche Teile des Ufers künstlich aufgeschüttet sind. Außerdem folgen Bahnstrecken und Straßen historisch oft kilometerlang direkt der Uferlinie, was weitere Verbauungen bedingt. Das aktuelle Gewässerschutzgesetz sieht eine ökomorphologische Sanierung der Seeufer vor, eine erste Bestandsaufnahme anhand von Luftbildern findet derzeit statt.



Abb. 5: Die Wasserqualität der Seen hat sich stark verbessert, doch die Uferlinien sind vielfach noch vegetationsarm und verbaut (Quelle: Eawag, Timothy Alexander).

Die Zukunft der Seen

Das Leben der Seen erweist sich also als weit komplexer als ihre Oberfläche erahnen lässt. Neben universalen Prinzipien wie der sommerlichen Schichtung hat jeder See eine ausgeprägte Individualität, die durch die Dynamik seiner Zu- und Abflüsse, die Geologie seines Einzugsgebiets, die Tiefe, die Klarheit und nicht zuletzt die menschlichen Aktivitäten an seinen Ufern bedingt ist. Seen sind im Gegensatz zu den flinken Flüssen träge Systeme: Einmal oder zweimal im Jahr nehmen sie bei der Durchmischung einen tiefen Atemzug, der Austausch ihres Wassers dauert Jahre oder gar Jahrzehnte. Es ist viel nötig, um einen See dauerhaft zu schädigen. Ist der Schaden aber einmal angerichtet, sind Jahrzehnte für die Sanierung nötig.

Ihrem Charakter gemäß reagieren die Seen auch auf den Klimawandel verzögert und über lange Zeit kaum spürbar. Dennoch benötigen sie in Zeiten der Erwärmung und sommerlichen Austrocknung noch besseren Schutz. Das bedeutet vor allem die konsequente Vermeidung von Schadstoffeinträgen, die Renaturierung der Ufer und eine äußerst zurückhaltende Beanspruchung ihres Wassers für Bewässerung und Kühlung. Im heutigen Zustand sind viele Seen so stark durch menschliche Aktivitäten belastet, dass sie dem Klimawandel nicht unbeschadet widerstehen können. Wenn wir uns dieser Perlen der Landschaft auch in Zukunft erfreuen wollen, müssen wir handeln.

3.2 Das Pantanal und Klimawandel

Alcídes Faria und Paula Isla Martins

Ecoa – Ecology and Action, Rua 14 de Julho, 3169, Vila Cidade, Campo Grande, Brasilien

Das Pantanal umfasst eine Fläche von 190.000 km² in Brasilien, Bolivien und Paraguay. Der größte Teil dieses Gebiets liegt in Brasilien. Das Pantanal ist eines der größten zusammenhängenden Binnenfeuchtgebiete der Welt. Das Pantanal liegt im Einzugsgebiet des Oberen Paraguay-Flusses (UPRB) und ist Teil eines komplexen Feuchtgebietssystems in Südamerika, welches fünf Länder umfasst. Neben Brasilien, Bolivien und Paraguay zählen noch Argentinien und Uruguay dazu.



Abb. 6: Geografische Lage des Pantanal (Quelle: ECOA – Ecologia & Ação, 2021).

Im Jahr 2020 verwüsteten Brände fast ein Drittel der Gesamtfläche des Pantanals, wovon 4,3 Millionen Hektar allein auf den brasilianischen Teil entfallen. Dies hatte negative Auswirkungen auf die Tiere und ihre Lebensräume sowie auf die Menschen. Die traditionellen Gemeinschaften von Flussuferbewohnern und indigenen Völkern sahen ihre Lebensgrundlage und Gesundheit gefährdet. Diese Brände stehen im Zusammenhang mit extremen Wetterereignissen in der Region (z. B. lange Dürreperioden), anthropogenen Aktivitäten (z. B. intensive Landwirtschaft) und der Schwächung der Umweltagenda in Brasilien aufgrund der aktuellen Politik der brasilianischen Regierung. Im Allgemeinen sind Feuchtgebiete die wirksamsten Kohlenstoffsinken in der Region. Wenn sie brennen, werden viele wärmespeichernde Gase in die Atmosphäre freigesetzt und tragen so zum Treibhauseffekt bei (CNN, 2020).

Im Pantanal wird es weiterhin zu großflächigen Bränden kommen. Zukünftige Klimawandelszenarien sagen steigende Temperaturen und Veränderungen bei saisonalen und zwischenjährlichen Wetterextremen, einschließlich Dürren, Hitzewellen und Überschwemmungen voraus (Marengo et al., 2015). Auf der Grundlage regionaler Klimawandelprognosen für die Pantanal-Region wird erwartet, dass es bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu einer mittleren jährlichen Erwärmung von 5 bis 7°C sowie zu einem Rückgang der Niederschläge um 30 % kommen wird (Lázaro et al., 2020).

Der wichtigste Faktor, der die Dynamik des Pantanals beeinflusst, ist der Hochwasserimpuls als Folge von Niederschlagsereignissen aus dem Amazonasgebiet. In Richtung des Vorgebirges und des Tieflandes, wo das Wasser zurückgehalten wird breitet sich die Überschwemmungsebene aus (Lázaro et al., 2020). Dies bedeutet, dass der Klimawandel bereits jetzt einen starken Einfluss auf den gesamten Puls der Flüsse des Pantanals hat. Heutzutage verliert das Pantanal an Wasser und erlebt schwerere Dürreperioden als in der Vergangenheit.

Neben dem Klimawandel ist das Pantanal auch von vielen anderen Bedrohungen betroffen, z. B. durch die Agrarindustrie, durch Stauseen für die Stromerzeugung aus Wasserkraft (allein in der UPRB sind rund 180 kleine Wasserkraftwerke geplant), durch die Parana-Paraguay-Wasserstraße, durch die Umwandlung einheimischer Vegetation in exotisches Weideland und infolge der Ansiedlung von Industrien mit hohem Umweltverschmutzungspotenzial. Es ist äußerst wichtig, diese Bedrohungen einzudämmen und Maßnahmen zur Vorbeugung und zur Wiederherstellung geschädigter Gebiete zu ergreifen.

3.3 Mangrovenschutz ist Klimaschutz

Udo Gattenlöhner

Global Nature Fund, Internationale Stiftung für Umwelt und Natur, Fritz-Reichle-Ring 4, 78315 Radolfzell, Deutschland

Wesentliche Bestandteile der internationalen Klimaschutzbemühungen müssen die Verminderung des Ausstoßes von Treibhausgasen sowie der Schutz wichtiger Kohlenstoffsenken, wie Wälder und Moore, sein. Mangrovenwälder sind ein ausgesprochen wichtiger Klimagasspeicher, der dabei noch weitgehend übersehen wird.



Abb. 7: Ein steigender Meeresspiegel und extreme Wetterereignisse belasten ohne Gegenmaßnahmen die Küstenlebensräume in den Sundarbans. (Quelle: Udo Gattenlöhner, GNF)

Mangrovenwälder tropischer Küsten sind an den täglichen Wechsel zwischen Ebbe und Flut angepasst und gedeihen im Brackwasser besser als Konkurrenzpflanzen. Die Bäume, deren dichte Wurzelgeflechte wie Stelzen im Wasser stehen, bieten Lebensraum für eine Vielzahl seltener Säugetiere, Reptilien und Vögel. Sie dienen als Rückzugsort und Kinderstube für unzählige Fisch- und Krebsarten und halten große Mengen Sediment zurück. So schützt der Mangrovenwald die Küsten vor Erosion, tropischen Wirbelstürmen und Sturmfluten. Und auch gegen den Klimawandel sind Mangroven ein wirksames Instrument: Gesunde Mangrovenwälder speichern mehr Kohlenstoff als jeder andere Wald – bis zu 1.000 Tonnen pro Hektar (Donato et al. 2011).

Massive Abholzungsraten in den 1980er und 1990er Jahren führten dazu, dass innerhalb weniger Jahrzehnte rund 35 % der weltweiten Mangrovenfläche verloren gegangen sind (Friess et al. 2019). In der Literatur finden sich durchschnittliche jährliche Entwaldungsraten von 1 % bis 8 % für Mangroven (Friess et al. 2019). Aktuelle Untersuchungen beziffern den weltweiten Mangrovenbestand derzeit auf unter 15 Millionen Hektar (Zimmer 2020, Friess et al. 2019).

Die Konsequenzen zunehmender Mangroven-Entwaldung sind schwerwiegend. Experten der UNEP geben an, dass beinahe 20 % der weltweit freigesetzten Emissionen aus Abholzung auf die Zerstörung von Mangrovenwäldern zurückzuführen sind (UNEP, 2014). Vor dem Hintergrund, dass Mangroven lediglich etwa 0,35 % der weltweiten Waldfläche (Weltbank, 2016) ausmachen, unterstreicht dies nochmals ihre enorme Bedeutung für die Speicherung von Kohlenstoff.

Die Sundarbans (Bengali für „schöner Wald“) sind ein riesiges Flussdelta in der Mündungszone des Ganges und bilden das größte zusammenhängende Mangrovegebiet der Erde. Auf ausgedehnten Schlammbänken unbewohnter Inseln leben bis zu sechs Meter lange Salzwasserkrokodile und unzählige Vogelarten. Rund einhundert wilde Bengalische Tiger finden sich hier noch (West Bengal Forest Department, 2020). Aber auch Millionen von Menschen leben hier. Das einzigartige Ökosystem, das sich von der östlichen Küste Indiens bis nach Bangladesch erstreckt, ist massiv bedroht. In der Sundarbans-Region ist deutlich zu spüren, dass der Meeresspiegel steigt und extreme Wetterereignisse Natur und Menschen in immer dramatischerer Weise belasten (Abdullah-Al et al. 2021).

In aktuellen Projekten wird in Indien, Bangladesch und Sri Lanka degradiertes oder zerstörtes Mangrovenwald wiederhergestellt, um die Menschen vor klimabedingten Naturkatastrophen zu schützen. Im Rahmen des Projekts SAIME („Sustainable Aquaculture in Mangrove Ecosystems“), welches durch das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) gefördert wird, entwickelt der GNF gemeinsam mit lokalen Umweltschutzorganisationen in Indien (NEWS) und Bangladesch (BEDS) Lösungen für den nachhaltigen Schutz von Mangrovenökosystemen in Aquakulturlandschaften. Auch die Daimler AG und die Stiftung Ursula Merz unterstützen die vielfältigen Aktivitäten des GNF zum Mangrovenschutz in Asien.

Ein Handbuch fasst wichtige Erkenntnisse zusammen und gibt eine Anleitung zur natürlichen Wiederaufforstung. Es ist in englischer Sprache kostenfrei unter dem Titel „Mangrove Restoration Guide – Best Practices and Lessons Learned from a Community-based Conservation Project“ über die Projektwebseite des Global Nature Fund abrufbar: <https://www.globalnature.org/Mangroves>

3.4 Auswirkungen von Klima und Eutrophierung auf Seen in Estland

Peeter Nõges und Tiina Nõges

Lehrstuhl für Hydrobiologie und Fischerei, Institut für Agrar- und Umweltwissenschaften, Estnische Universität für Life Sciences, Kreutzwaldi 5, 51006 Tartu, Estland

Estland hat fast 2.000 Seen, die 4,9 % der Landfläche ausmachen. Es ist damit das Land mit der viertgrößten Anzahl an Seen in Europa. Der Võrtsjärv-See, ein flächenmäßig großer und gleichzeitig flacher See (270 km², mittlere Tiefe 2,8 m), mit einer bemerkenswerten klimabedingten Variabilität in Hydrologie und Wasserchemie, ist einer der am intensivsten langfristig untersuchten Seen in Europa. Zusammen mit dem verbundenen Peipussee (Lake Peipsi, 3.555 km², mittlere Tiefe 7,1 m) bilden die beiden Seen (Abb. 8) ein perfektes Modellsystem zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökosysteme flacher Seen.



Abb. 8: Karte der Lage des Vörtsjärv und des Peipussees (Lake Peipsi) (Nöges et al. 2020), bearbeitet.

Im Zeitraum 1961–2011 stieg die Oberflächenwassertemperatur im April im Peipussee um 0,48 °C pro Jahrzehnt und im Vörtsjärv um 0,28 °C pro Jahrzehnt, im August betrug der Anstieg in beiden Seen 0,40 °C pro Jahrzehnt. Der tiefere Peipussee vereist später und taut früher, beide Vorgänge weisen dabei eine höhere Temperaturempfindlichkeit auf als im Vörtsjärv. Infolgedessen würde ein Anstieg der durchschnittlichen Lufttemperatur von November bis März um 2 °C die Dauer der Eisbedeckung im Peipussee vermutlich halbieren, im Vörtsjärv jedoch nur um etwa 20 % verkürzen (Nöges & Nöges 2014).

Kontinuierliche Bojenmessungen und direkte Emissionsstudien ergaben, dass die Kohlenstoffbindung und -emission im pelagischen Bereich des Vörtsjärv in etwa ausgeglichen sind. Der See nimmt jährlich 250 bis 420 g organischen Kohlenstoff pro Quadratmeter auf, wovon 65 % aus der Produktion von Phytoplankton, 15 % aus der Produktion aquatischer Makrophyten und 30 % aus dem Einzugsgebiet stammen. Gegenwärtig beträgt der Kohlenstoffeintrag (C) aus autochthonen Quellen (innerhalb des Sees) mehr als das Doppelte des Kohlenstoffs aus allochthonen Quellen (außerhalb des Einzugsgebiets) (Abb. 9). Wenn

sich die derzeitigen Klimatrends fortsetzen, wird der Winterabfluss zunehmen. Mit der Verdoppelung des Winterabflusses verdoppelt sich auch die Belastung mit gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC), wodurch die allochthonen C-Quellen mit den autochthonen Quellen gleichziehen. Es wird erwartet, dass die Photosyntheserate mit der Klimaerwärmung ebenfalls ansteigt. Der Anstieg ist allerdings viel geringer. Etwa 15 % der organischen C-Verluste im Võrtsjärv entfallen auf die Sedimentation, 20 % auf den Abfluss und 65 % auf die Atmung. Die zunehmende DOC-Belastung aus dem Einzugsgebiet in Verbindung mit der steigenden Temperatur, die die Atmungsrate stärker anregt als die Photosyntheserate, führt zum Auftreten von Heterotrophie und verschlechtert die Sauerstoffverfügbarkeit für Fische (Nöges et al. 2016).

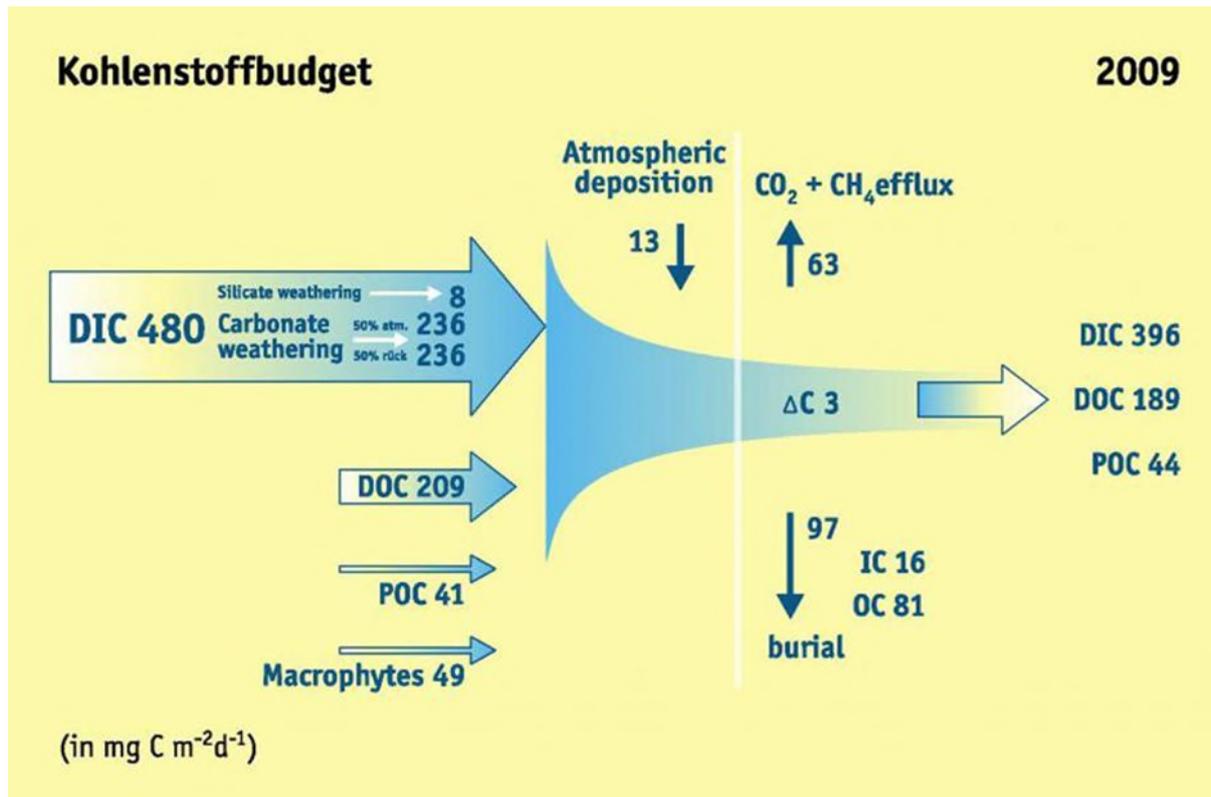


Abb. 9: Kohlenstoffbudget des Võrtsjärv-Sees im Jahr 2009 (Nöges et al. 2016), bearbeitet.

Die estnischen Seen waren in den 70er und 80er Jahren stark mit Nährstoffen belastet. Die Einträge gingen Anfang der 90er Jahre, nach dem Zusammenbruch der intensiven Landwirtschaft sowjetischer Prägung, rasch zurück. Da die Stickstoffbelastung (N) im Einzugsgebiet schneller zurückging als die Phosphorbelastung (P), verringerte sich das N/P-Verhältnis und in einigen Seen kam es erneut zu Algenblüten, die im Sommer zu Fischsterben führten.

Unsere Studien deuten darauf hin, dass der dekadische Anstieg von Blaualgen (Cyanobakterien) in flachen Seen auf die Wechselwirkung zwischen lokaler Eutrophierung und globaler Erwärmung zurückzuführen ist, die die physikalischen und chemischen Bedingungen im See näher an das cyanobakterielle Optimum bringen (Cremona et al. 2018).

Die dominierenden blaugrünen Arten im trüben Võrtsjärv sind meist lichtlimitiert und die Beziehung zur N/P-Stöchiometrie ist indirekt, während die häufige N-Limitierung im tieferen Peipussee N_2 -fixierende Arten begünstigt (Nöges et al. 2020). Darüber hinaus hat eine jüngste Studie (Janatian et al. 2019) gezeigt, dass die Bodensedimente im Võrtsjärv infolge der

atmosphärischen Beruhigung über der nördlichen Hemisphäre seit 1996 deutlich weniger gestört wurden, was zu einer Zunahme der Phytoplankton-Biomasse trotz reduzierter Nährstoffgehalte führte. Die abnehmende Menge an Schwebstoffen eröffnete eine „Lichtnische“, die von der lichtbegrenzten Phytoplankton-Gemeinschaft genutzt und gefüllt wurde, was darauf hindeutet, dass die Windstille neben der Klimaerwärmung ein weiterer globaler Faktor ist, der der Verringerung der Eutrophierung in Seen entgegenwirkt. Unsere Modellierung ergab, dass der kombinierte Anstieg der Wassertemperatur und des pH-Werts des Sees in Verbindung mit der immer noch hohen Verfügbarkeit von P in der Wassersäule ein stetiges Wachstum der Cyanobakterien-Biomasse während der letzten Jahrzehnte im Vörtsjärv ermöglichte.

In den beiden Seen wurden mehrere Fischsterben dokumentiert (Nöges et al. 2007). Im Vörtsjärv kommt es vor allem im Winter zu Fischsterben aufgrund des Sauerstoffmangels. In wasserarmen Jahren ist die unter dem Eis eingeschlossene Sauerstoffmenge aufgrund des geringeren Seevolumens gering und könnte bei lang anhaltender Eisbedeckung aufgebraucht werden. Im Peipussee könnten hohe Wassertemperaturen und Algenblüten im Sommer zu einem massiven Fischsterben führen. Durch intensive Photosynthese wird tagsüber viel Sauerstoff produziert, nachts verbrauchen die Algenmassen diesen Sauerstoff und es könnte zu einem Mangel kommen. Solche starken tageszeitlichen Schwankungen der Sauerstoffkonzentration schaden den Fischen und machen sie anfälliger für andere Stressfaktoren wie hohe Wassertemperaturen, hohe pH-Werte, die durch die intensive Photosynthese verursacht werden, und erhöhte Konzentrationen von Ammonium (NH_4^+), das bei der Zersetzung von organischem Material frei wird. Bei einem hohen pH-Wert (> 9) wird das meiste Ammonium in giftiges Ammoniak (NH_3) umgewandelt, das auch Fische töten kann. Darüber hinaus können Toxine der Cyanobakterien auch Fischpopulationen schädigen (Abbildung 10).

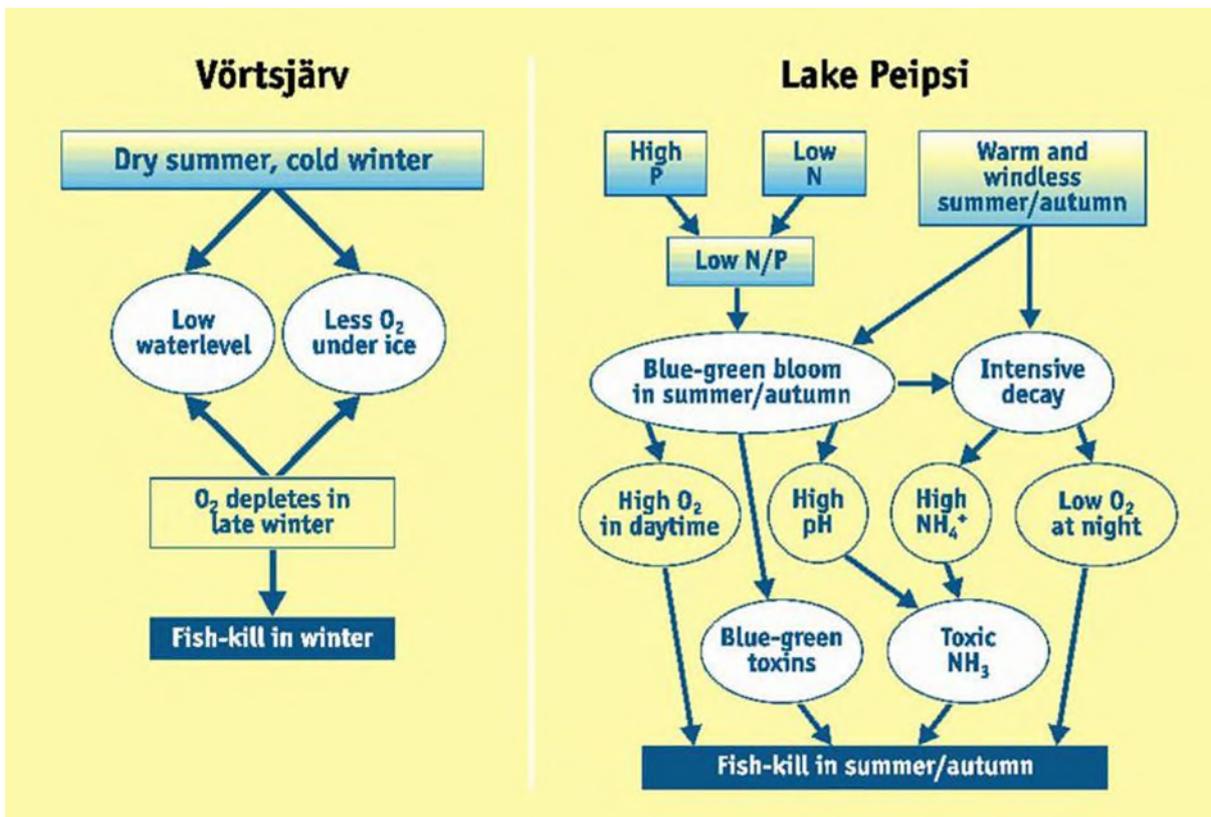


Abb. 10: Schematische Erklärung der Ursachen von Fischsterben im Vörtsjärv und im Peipussee (Lake Peipsi) (Nöges et al. 2007), bearbeitet.

Auf globaler Ebene könnte die Fortsetzung des Erwärmungstrends und der Eutrophierung zu häufigeren schädlichen Cyanobakterienblüten und Fischsterben in flachen eutrophen Seen führen (Cremona et al. 2018). Da die Klimaerwärmung Eutrophierungsphänomene in Seen verstärkt, indem sie die interne Nährstoffbelastung erhöht und blütenbildende Cyanobakterien begünstigt, wären strengere Maßnahmen erforderlich, um die Nährstoffbelastung (insbesondere von P) in Seen durch eine verbesserte Abwasserbehandlung und eine effizientere Ausbringung von Düngemitteln weiter zu begrenzen (Nöges et al. 2020).

4 Auswirkungen des Klimawandels auf Seen in Deutschland

4.1 Seen im Klimawandel – der Müggelsee¹

Rita Adrian

Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB), Müggelseedamm 301 und 310,
12587 Berlin, Deutschland

Das Forschungsteam Klima und Seen des Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) beobachtet auch am Müggelsee seit den 1970er Jahren den tendenziellen Verlust von Eis im Winter und erhöhte Wassertemperaturen im gesamten Jahresverlauf. Seen sind heute weniger häufig vollständig durchmischt, mit negativen Auswirkungen auf die Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser bis hin zur Anärobie. Anärobie Bedingungen initiieren die Freisetzung von zuvor im Sediment gebundenen Nährstoffen. In dieser Hinsicht ist der Erwärmungstrend und die Zunahme von Hitzeextremen einer zunehmenden Eutrophierung mit erhöhtem Algenwachstum von bereits produktiven Seen gleichzusetzen. Für Fische bedeutet dies, dass sie in die oberen wärmeren Wasserschichten ausweichen müssen, und dort einem erhöhten Temperaturstress ausgesetzt sind.

Intuitiv könnte man davon ausgehen, dass Seen warmes Habitatvolumen gewinnen und kaltes Habitatvolumen verlieren. Veränderungen im thermischen Habitat sind jedoch komplex, da Trends in den Wassertemperaturen vertikal (entlang der Tiefe von Seen), horizontal (Seemitte / Ufer) und saisonal verschieden sind und auch gegenläufig sein können. Diese Gewinne und Verluste thermischen Volumens sind u.a. an die Morphologie eines Sees gekoppelt und damit recht seenspezifisch. Thermische Habitatvolumina zwischen den 1970er Jahren und heute haben sich in einem Maße verändert, der einer Verlagerung der Seen in deutlich südlicher gelegene Breitengrade oder in tiefer gelegene Höhenlagen gleichkäme (Kraemer et al. in press).

Die Klimaerwärmung und anhaltende Hitzeextreme gehen z.T. mit einem Verlust an Wasserfläche einher. Ufersedimente werden freigelegt und mit Luftsauerstoff versorgt. Dies führt zu einer Erhöhung des mikrobiellen Abbaus organischen Material unter Freisetzung von CO₂. Dies ist nur einer der Mechanismen, die Seen und trockenfallende Flüsse zu Treibhausgas-Quellen für die Atmosphäre machen – und damit die Klimaerwärmung in positiver Rückkopplung verstärken.

Derzeit werden die Auswirkungen von Wetterextremen wie z.B. des Sturmtiefs Xavier am 5.10.2017 näher untersucht. Von entscheidender Bedeutung für die Resistenz (Widerstand gegenüber einer Störung) und die Resilienz (Vermögen nach der Störung in den Ausgangszustand zurückzukehren) von Seen gegenüber Sturmereignissen sind die Ausgangsbedingungen in denen sich das Ökosystem befindet (Temperaturniveau, Mischungszustand, Zeitpunkt des Extremereignisses).

¹ Der Text beruht auf einem Vortrag zum Online Seminar „Gewässer, Seen und Feuchtgebiete im Klimastress – Forschung und Fallstudien“ am 22. März 2021 (Weltwassertag), s.a. <https://www.globalnature.org/de/weltwassertag-2021>



Abb. 11: Der Seddiner See ist in großer Gefahr. Noch nie seit Beginn der Messungen war der Wasserstand so niedrig wie im Sommer 2018 (Quelle: Hartwig Berger).

4.2 Seen im Naturpark Stechlin-Ruppiner Land

Silke Oldorf

NABU-Bundesfachausschuss Lebendige Seen, Fürstenberger Straße 6, 16775 Stechlin OT Menz, Deutschland

Um dem Klimawandel entgegenzuwirken, sollen im Naturpark Stechlin-Ruppiner Land Nährstoffeinträge reduziert und Moore und Seen in ihrer Funktionsfähigkeit wiederhergestellt werden. Die Wiederherstellung von Binnenentwässerungsgebieten und somit die Anhebung der Grundwasserstände ist ein wichtiges Ziel des Naturparks. Das Wassermanagement muss insgesamt noch viel stärker auf Rückhaltung ausgerichtet sein.

Die höheren Wasserpflanzen spielen dabei eine wichtige Rolle im Seen-Ökosystem. Ohne Wasserpflanzen gibt es keinen Lebensraum und keine Nahrung für Fische und Makrozoobenthos sowie keinen Schutz für Kleinfische und Zooplankton vor Fraßdruck. Ohne sie gibt es außerdem keine Konkurrenz für das Phytoplankton um die Nährstoffe.

Beim Naturschutztauchen gibt es deutliche Hinweise auf Störungen durch besetzte Arten. Karpfen wühlen die Sedimente auf dem Grund auf und entwurzeln Makrophyten. Die Folge sind veränderte Lebensräume für einheimische Fische und andere aquatische Arten. Ein weiteres Problem ist das übermäßige Anfüttern bei der Angelfischerei. Ein Teil des Fischfutters verfault am Grund und führt zu Überdüngung, Sauerstoffzehrung und verstärkter Algenentwicklung. Ist zu viel Phytoplankton vorhanden, dann sterben auch potenzielle Beutetiere von Fischen wie Muscheln, Krebse und Würmer. Als Fazit ist zu sagen, dass stabile

Ökosysteme den Klimastress besser abpuffern bzw. ausgleichen können, während gestörte Ökosysteme dazu kaum noch in der Lage sind.



Abb. 12: Im Kleine Krukowsee (LRT 3140) im NSG Stechlin ist die Unterwasservegetation vollständig durch bethivore Fische zerstört. (Quelle: NABU Naturschutztaucher)

4.3 Seen-Monitoring seit 1991 – Infos zu 45 Gewässern in der Holsteinischen Schweiz und im Kreis Plön/SH

Edith Reck-Mieth

Seen Beobachtungsprogramm Kreis Plön, Kreisverwaltung Plön, Amt für Umwelt, Deutschland

Das Citizen Science Projekt „Seen-Monitoring seit 1991 – Infos zu 45 Gewässern in der Holsteinischen-Schweiz, Kreis Plön SH“ liegt in der Trägerschaft von „Wasser Otter Mensch e.V. – Verein für Ökosystemschutz und -nutzung“. Von den einbezogenen Seen, darunter auch die beiden größten Seen Schleswig-Holsteins, der Große Plöner See und der Selenter See, weisen ca. 2/3 eine Wasserfläche kleiner als 50 ha auf und stehen daher nicht im Fokus der EU-Wasserrahmenrichtlinie. Das Programm umfasst geschichtete wie auch instabil geschichtete Seen, bistabile Seen und Flachgewässer. Die Erfassung der Sichttiefe ebenso wie die Entnahme der Wasserproben erfolgt seit 1991 unter vergleichbaren Bedingungen.

Im Rahmen des Monitorings werden zur Herbst-Vollzirkulation möglichst zeitparallel aktuell an 48 Messstellen Wasserproben gezogen und von wissenschaftlich anerkannten Laboren u.a. folgende Parameter bestimmt:

- die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor
- der organische Kohlenstoff
- der pH-Wert
- die Leitfähigkeit.

Die Sichttiefe wird von engagierten Bürgerinnen und Bürgern wöchentlich in der Vegetationsperiode oder darüberhinausgehend aktuell an 35 Seen mit einer Secchi-Scheibe (weiße Secchi-Scheibe nach DIN EN ISO 7027-2:2016) erfasst. Dies ist eine anerkannte Messmethode, die weltweit zur Anwendung kommt. Eine internationale Anerkennung erfuhr das Seen-Monitoring durch die Datenspeicherung von über 32.000 Sichttiefen auf dem besonders gesicherten Server der Umweltdatenbank der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), der Wetter- und Ozeanografie Behörde der Vereinigten Staaten.

Seit 1991 wurden von engagierten Bürgerinnen und Bürgern mehr als 40.000 Sichttiefen erfasst als Indikator für Wassertrübung und Algenentwicklung, graphisch nachzuverfolgen auf der Internetseite www.seen-transparent.de. Die im Zeitraum 1991 bis 2010 auftretenden Sommersichttiefen (KW 28–37, Mitte Juli bis Mitte September) hatte Prof. Winfried Lampert, ehemals Direktor des Max-Planck-Instituts für Limnologie (Seenkunde) und Initiator des Seen-Monitorings, ausgewertet und festgestellt, dass „über alle Seen in 2003 die niedrigsten Sichttiefen der 20 Jahre“ gemessen wurden.

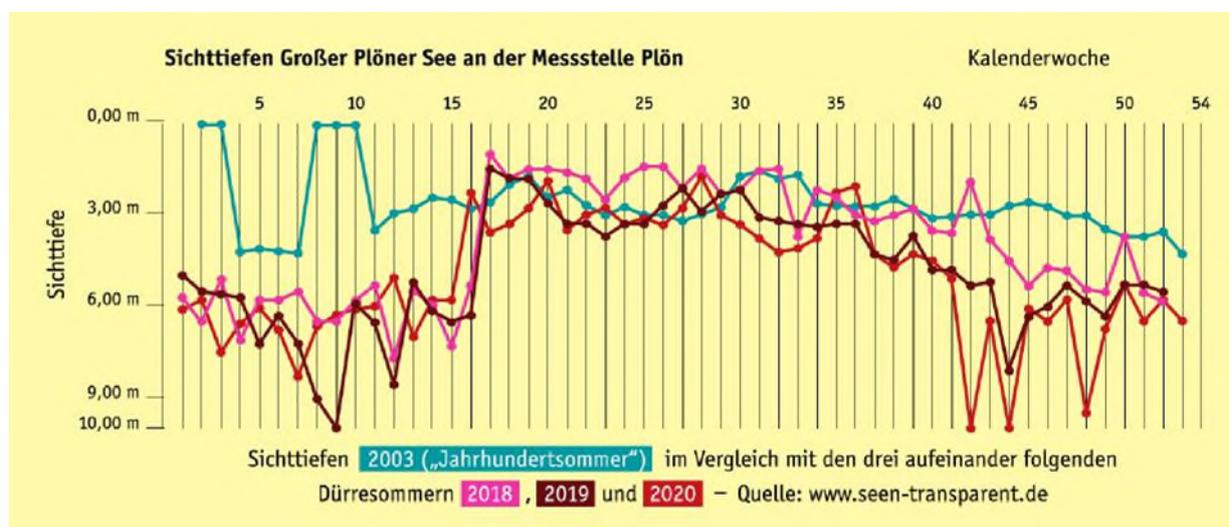


Abb. 13: Sichttiefenerfassung als Indikator für Wassertrübung und Algenentwicklung an der Messstelle Plön/SH des Großen Plöner Sees. (Quelle: www.seen-transparent.de).

Wie stellen sich nun im Vergleich mit dem Jahrhundertsommer 2003 die Sichttiefen der „Sommerspitzenreiter“ in den Jahren 2018 bis 2020 dar? Überraschenderweise zeigen die Sommersichttiefen (KW 28-37) dieser Jahre extrem gegenläufige Tendenzen: Seit Start des Monitorings vor 30 Jahren wurden 2003 und 2018 die geringsten Sichttiefen und 2020 und 2019 die größten Sommersichttiefen erfasst. Diese gegensätzlichen Reaktionsmuster der Sichttiefen treten zeitparallel gleichermaßen auf in Flachseen wie z.B. dem Bothkamper See sowie auch in tiefen, stabil geschichteten Seen wie z.B. dem Großen Plöner See.

Im Ergebnisbericht (Band 2) „10 Jahre Seen-Beobachtung im Kreis Plön 1991–2000“ wurden die Ergebnisse einer Analyse der Witterungscharakteristika veröffentlicht, die im entsprechenden Zeitraum von zehn Jahren die minimalen bzw. maximalen Sichttiefen begleitet hatten. Auch hier zeigt sich, dass der mittleren Lufttemperatur in den Sommermonaten für die Ausprägung der Sommersichttiefe keine dominante Bedeutung zukommt. Erosionsvorgänge im Einzugsgebiet der Seen und – theoretisch erschlossen – die zeitliche Nähe des Niederschlagsereignisses zur individuell gehandhabten Düngeraufbringung scheinen hingegen von ausschlaggebender Bedeutung für die Algenentwicklung und für die Ausprägung der Sichttiefen im Sommer zu sein. Insbesondere spezielle Witterungsbedingungen in zeitlicher Nähe zur ersten Grunddüngung der Landwirtschaft im jeweiligen Einzugsgebiet fördern

erosionsbedingte Nährstoffeinträge. Schwerpunktmäßig in der ersten März-Dekade scheinen Anteile der ausgebrachten Düngung durch Niederschläge insbesondere nach einer vorausgehenden Trockenphase, gekennzeichnet durch eine geringe Bodenfeuchte, mobilisiert und über noch gut ausgeprägte Furchen vom Acker abgeschwemmt und in Gewässer eingetragen zu werden. Erst Wochen nach dem Eintrag liegt der häufig die Algenproduktion limitierende Nährstoff Phosphat in einer bioverfügbaren Form transformiert vor und kann im Sommer ein verstärktes Algenwachstum und minimale Sichttiefen bewirken. So können extreme Niederschlagsereignisse mit regional und auch kleinräumig unterschiedlichen Schwerpunkten zu einer verstärkten Eutrophierung mit den bekannten negativen Auswirkungen auf das „Ökosystem See“ wie z.B. Sauerstoffmangel führen.

Binnengewässer stellen sensible Indikatoren für bereits eingetretene Umweltveränderungen dar. Sind Extremsituationen in den Jahren der „Sommerspitzenreiter“ 2003, 2018, 2019 und 2020 wie das aufeinander folgende Auftreten der geringsten sowie der größten Sommersichttiefen seit 30 Jahren – zeitparallel in den verschiedensten Seen der Region – eine mögliche Auswirkung des Klimawandels und je nachdem eine Folge von Dürre bzw. von extremen erosiven Niederschlagsereignissen?

Durch Datenabgleich und Auswertung der seit 1991 durchgeführten Wasseranalysen und erfassten Sichttiefen, u.a. auch durch Beurteilung der zeitlichen Verschiebung des Beginns des Klarwasserstadiums, der Frühjahrs- und Sommerblüten sowie deren Dauer, können zukünftig zu erwartende Konsequenzen (Klimawandel) besser abgeschätzt und Konsequenzen wie z.B. abgestufte Schutzmaßnahmen an den im Monitoring einbezogenen Seen und in den Einzugsgebieten gezielt konzipiert werden.

4.4 Erste Auswirkungen der Klimaveränderungen auf überwinternde Wasservögel am Bodensee

Hans-Günther Bauer

Max-Planck-Institut für Ornithologie, Am Obstberg 1, 78315 Radolfzell, Deutschland

Stefan Werner

Schweizerische Vogelwarte, Seerose 1, CH-6204 Sempach, Schweiz

Die Mitarbeiter der internationalen Ornithologischen Arbeitsgemeinschaft Bodensee (=OAB) haben seit deren Gründung im Jahr 1958 mit großem ehrenamtlichen Engagement die Vorkommen und Bestandstrends der im „Winterhalbjahr“ (September-April) auftretenden Wasservögel am Bodensee dokumentiert und im Zusammenhang mit den auftretenden ökologischen Veränderungen ausgewertet. Welche gute Indikatoren die Wasservögel für die komplexen Änderungen am Bodensee sein können, wurde schon in den ersten Jahren der systematischen Erfassungen erkennbar, als sich (1) die Folgen des Jahrhundertwinters 1962/63 bei der der Bodensee mit einer tragenden Eisschicht bedeckt war (die einzige vollständige „Seegfröne“ des 20. Jahrhunderts) auf die Wasservogelbestände in den Folgewintern klar belegen ließen (Szijj 1965), (2) fast alle zum Nahrungserwerb tauchenden Arten eine sehr starke Bestandszunahme mit dem Auftauchen der Wandermuschel *Dreissena polymorpha* ab dem Jahr 1965 zeigten (Stark et al. 1999) und (3) der Effekt der starken Eutrophierung des Bodensees, der Mitte der 1950er Jahre einsetzte und in den 1970er-Jahren seinen Höhepunkt fand, sich an den zunehmenden resp. abnehmenden Beständen rastender und überwinternder Arten ablesen ließ (Schuster 1976).

Die am Bodensee in großen Zahlen rastenden und überwinternden Wasservögel unterliegen einer Vielzahl von Einflussfaktoren, die sich auf die Bestandstrends der regelmäßig auftretenden Vogelarten unterschiedlich stark auswirken. In den sechs Jahrzehnten der synchronen Bestandserfassungen sowie limnologischer Untersuchungen haben sich folgende Faktoren als besonders wichtig herausgestellt: Änderungen in der Nahrungszusammensetzung als Folge von Eutrophierung bzw. Re-Oligotrophierung (Stadien mit vielen oder wenigen Armleuchteralgen gegenüber Grün-/Blaualgen, Änderungen bei Massenfischarten); Einwanderung von wirbellosen Neozoen wie der Wandermuschel (s.o.) als Hauptnahrung für tauchende Wasservögel sowie die generelle drastische Zunahme der Biomasse und rezente Dominanz wirbelloser Neozoenarten zu Lasten angestammter Tierarten (Werner & Bauer 2012); starke Schwankungen des Seewasserpegels im Jahresverlauf mit zum Teil sehr ungünstigen Auswirkungen hinsichtlich der Nahrungsverfügbarkeit für Vogelarten; erhebliche Ausweitung der Freizeitnutzung, der Bootsaktivitäten sowie der Trendsportarten bis in den Hochwinter bei entsprechend hoher Störwirkung auf Vögel; Jagd auf Wasservögel, zumindest bis Mitte der 1980er-Jahre ein sehr wichtiger Faktor, inzwischen aber deutlich eingeschränkt, allerdings Zunahme der genehmigten Abschusszahlen beim Kormoran, auch innerhalb der Schutzgebiete, mit Störwirkung auch auf andere Arten (Werner et al. 2018); Lebensraumverlust oder -beeinträchtigung (oft anthropogen bedingt) mit Ausfall wichtiger Nahrungsquellen und gesicherter Brutplätze; Unterschützstellung wichtiger Flachwasserzonen des Sees ab den 1970er-Jahren zur Schaffung von Rückzugs- und Rastgebieten (aber: Fischerei als Störfaktor); Änderungen der interspezifischen Konkurrenz und der Zugstrategien einzelner Arten über die Zeit.

All diese Faktoren hatten oder haben einen entscheidenden Einfluss auf die Bestandszahlen und -trends der rastenden und überwinternden Wasservögel. Die generelle Entwicklung wird in Abb. 14 anhand der „Wintersummen“ von September bis April für 55 Arten gezeigt. Demnach ergibt sich ein Bestandstief nach der verlustreichen Seegrörne 1963 und eine starke Zunahme durch die Ausbreitung der Wandermuschel gegen Ende der 1960er-Jahre. Danach folgte eine Stabilisierung bzw. ein leichter Rückgang in der Phase stärkster Eutrophierung und unzureichenden Gebietsschutzes und ein kontinuierlicher Anstieg bis etwa zur Jahrtausendwende durch Re-Oligotrophierung und besseren Schutz. Seither ist eine Stagnation bzw. ein leicht rückläufiger Trend zu beobachten, vornehmlich bedingt durch starke Rückgänge bei der Reiherente. Während die verwandte Tafelente in jüngster Zeit auf einem hohen Niveau stabil zu bleiben scheint, gehen die Zahlen bei der Reiherente im Hauptmonat November seit den Höchstständen von 1983-2002 kontinuierlich zurück (Abb. 15). Die Nahrungsgrundlage für die am Bodensee fast ausschließlich auf Muscheln konzentrierte Reiherente hat sich kaum verändert, auch wenn die Wandermuschel derzeit von der Quaggamuschel *Dreissena rostriformis bugensis* abgelöst wird. Zudem zeigen Arten mit ähnlichen Nahrungsansprüchen keine ähnlich starke Abnahme (vgl. Gesamtsumme in Abb. 14), dagegen finden sie sich bei mehreren der nordisch verbreiteten Arten. Die Reiherente nimmt europaweit nicht ab (nach Daten von Wetlands International), sondern hat ihre Winterquartiere klimabedingt nach Nordosten verschoben, davon profitierend, dass die Ostseeregion im Winter zunehmend eisfrei bleibt. Offenbar machen sich die Reiherenten und weitere nord(ost)europäische Wasservögel nur noch dann auf die Wanderung nach Süd(west)en auf, wenn sie durch ungünstige Bedingungen dazu gezwungen sind. Folglich treten die im Norden ausharrenden Vögel am Bodensee immer später bzw. weniger häufig auf, während zugleich die Winterbestände an der Ostsee deutlich zunehmen (Lehikoinen et al. 2014). Inzwischen wurde die Reiherente vom Blässhuhn als häufigste überwinternde

Wasservogelart am Bodensee abgelöst. Auch mehrere Meeresentenarten zeigen stark rückläufige Winterzahlen am Bodensee, z.B. Eisente oder Zwergsäger (Werner et al. 2018), doch könnten hier neben klimabedingten Effekten auch paneuropäische Bestandsverluste eine Rolle spielen. Neben den ökologischen Veränderungen im Gebiet selbst (Werner & Hesselschwerdt 2015) können Klimaeffekte andernorts für erhebliche Veränderungen in der Abundanz oder Artenzusammensetzung sorgen. Die OAB wird diese weiterhin dokumentieren und interpretieren.

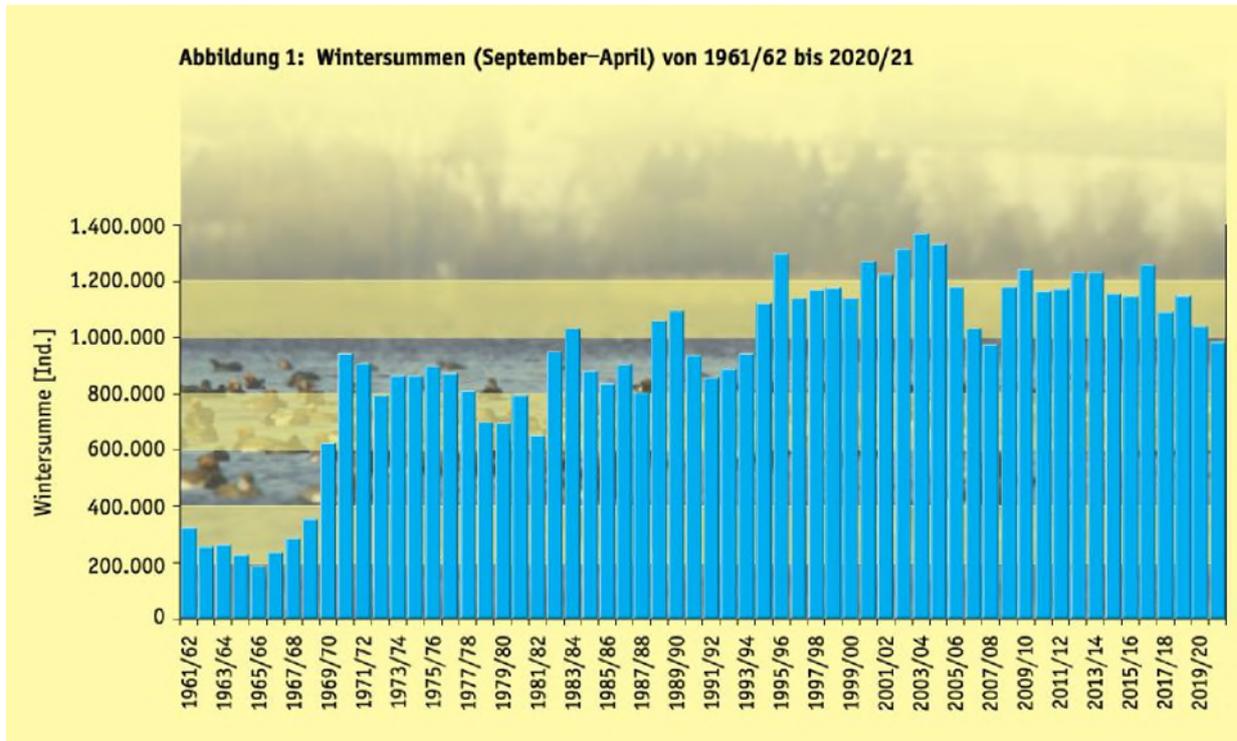


Abb. 14: Entwicklung der Wasservogelbestände von 1961/62 bis 2020/21 als Summe über die acht Zählmonate September bis April. Berücksichtigt wurden alle Wasservogelgruppen außer Möwen/Seeschwalben/Limikolen.

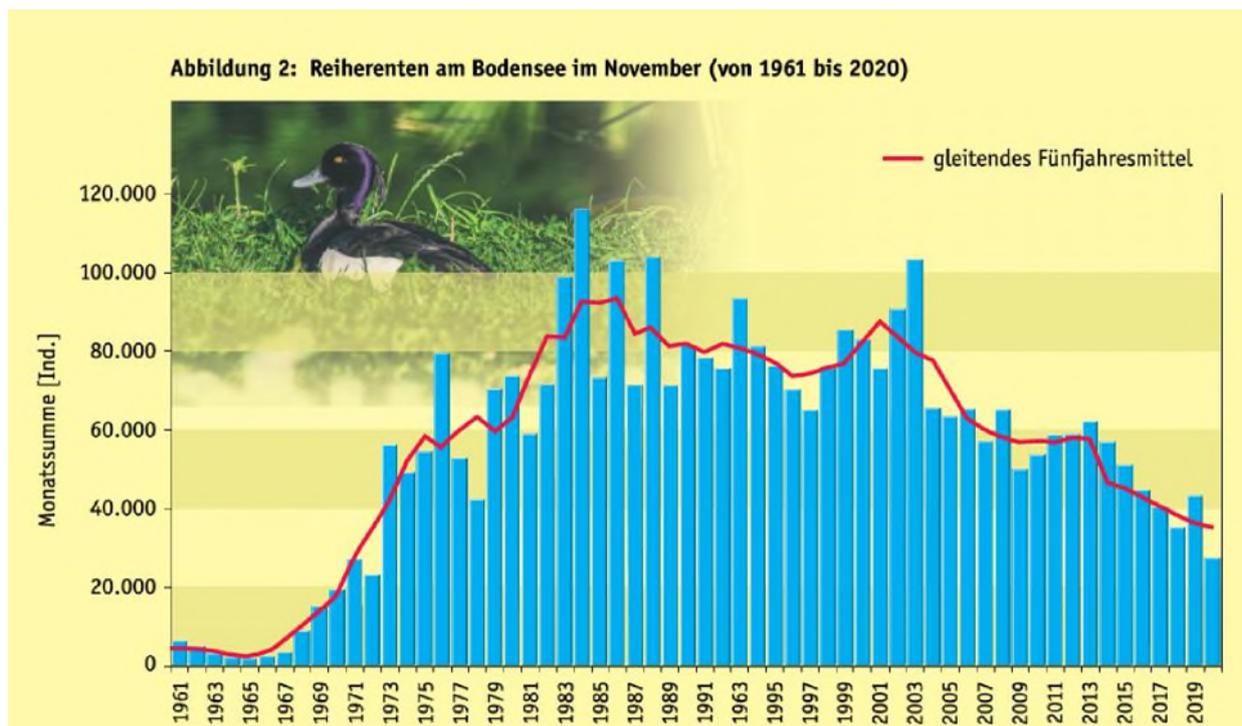


Abb. 15: Novemberbestand der Reiherente am Bodensee von 1961 bis 2020 (blaue Säulen) mit gleitendem Fünfjahresmittel (rote Linie).



v.l.n.r.: Abb. 16: Eisente (Weibchen) *Clangula hyemalis*; Abb. 17: Reiherente *Aythya fuligula*; Abb. 18: Tafelente *Aythya ferina*; Abb. 19: Zwergsäger (Weibchen) *Mergellus albellus* (Quellen: s. Abbildungsverzeichnis).

Veränderte Brutbedingungen und weniger Wintervögel am Bodensee

Wolfgang Fiedler

Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie Am Obstberg 1, 78315 Radolfzell, Deutschland

Nach aktuellen Zahlen der Ornithologischen AG Bodensee finden sich im Winter etwa 50.000 Reiherenten, 50.000 Tafelenten, 10.000 Haubentaucher, 14.000 Kolbenenten, 13.000 Schnatterenten, 3.000 Höckerschwäne und 3.000 Kormorane am Bodensee ein. Aufgrund von geänderten Wasserstandsverläufen reduziert sich für einige Arten das Zeitfenster, in dem Vögel in den Schilfgebieten am See brüten können. Im Jahre 2020 standen Schilfzonen als Brutplatz für die Wasservögel erst Anfang Juni statt Anfang Mai zur Verfügung, Schlickflächen tauchten im Herbst statt Mitte Oktober erst ab Mitte November auf. 2021 wurde der Schlick Mitte Januar überflutet, daher waren die Flachwasserzonen sehr schmal.

Großräumige Vogelbestanderfassungen und regionale Monitoring-Projekte wie die alle zehn Jahre stattfindende Brutvogelkartierung Bodensee belegen starke und zum großen Teil durch den Klimawandel begründbare Änderungen in den Brutverbreitungen mitteleuropäischer Vogelarten. Im Bodenseeraum gehören Orpheusspötter, Zippammer, Felsenschwalbe, Weißkopfmöwe, Zaunammer und Purpurreiher zu den Gewinnern dieser Entwicklung, während Gelbspötter, Fitis, Krickente, Bekassine und Uferschnepfe Brutmöglichkeiten einbüßen. Im Naturschutzgebiet Wollmatinger Ried an der Landesgrenze zur Schweiz fällt im Winter immer häufiger praktisch die gesamte geschützte Flachwasserzone trocken. Das Schutzgebiet bietet dann keinen Schutzraum für Wasservögel mehr. Die im Winter zunehmend eisfreien Gewässer in den nördlicheren Breiten sorgen für einen Rückgang der Wintergäste.

4.5 Unter Wasser für Bildung & Forschung

Prof. Dr. Franz Brümmer und Prof. Dr. Ralph O. Schill

aquatil gGmbH, Derendinger Straße 106, D-720 72 Tübingen

Steh- oder Stillgewässer machen insgesamt nur etwa 3 % der Landoberfläche der Erde aus. Betrachtet man die über 10 ha großen Stehgewässer, so sind es 1,8 % der Landoberfläche mit einer Uferlänge von etwa $7,2 \times 10^6$ km. Dies ist etwa 4-mal länger als die Uferlänge der Ozeane (Messenger et al. 2016).

Als mehr oder weniger geschlossene Ökosysteme neigen Stehgewässer durch z. B. eine intensive Pflanzenproduktion und den mangelnden Abtransport von Detritus viel stärker zur Verlandung als Fließgewässer. Ausschlaggebend für den ökologischen Zustand der Seen sind neben der Nutzung und den Klimaveränderungen auch die Lichteindringtiefe, die Schichtung des Wasserkörpers, die Sauerstoff- und Nährstoffversorgung ebenso wie das Vorkommen

neuer Tier- und Pflanzenarten (Neobiota), der Tierbesatz (Fische) und vermehrt die Belastung durch (Kunststoff-)Müll. Häufig wirken mehrere Faktoren gleichzeitig.

Der Zustand unserer Seen in Deutschland ist besorgniserregend. Zwar erreichten nach dem Bericht der Europäischen Umweltagentur im Jahr 2018 92,7 % der Badegewässer in Deutschland eine ausgezeichnete hygienische Badegewässerqualität (EUA, 2019). Doch zeigten nach einem Bericht des Umweltbundesamtes nur 26,4% der natürlichen deutschen Seen im Jahr 2015 einen „guten“ (24 %) oder „sehr guten“ (2,4 %) ökologischen Zustand (UBA, 2019). Der Sauerstoffgehalt in Seen ist, wie eine Studie mit über 400 Seen weltweit zeigte, seit 1980 im Oberflächenwasser im Schnitt um 5,5 % und im Tiefenwasser um über 18 % gesunken (Jane et al. 2021). Auch der Bodensee ist davon betroffen: Im Winterhalbjahr 2020/21 war es für eine Durchmischung des Bodensees wieder nicht kalt genug! Die letzte vollständige Durchmischung des Bodensees und damit eine gute Sauerstoffversorgung auch in den tiefen Bereichen des Bodensees fand Ende des Winterhalbjahres 2017/18 statt (LUBW, 2021).



Abb. 20: Probennahme durch wissenschaftliche Taucher (Quelle: Franz Brümmer, WiTUS & aquatil gGmbH).

Zur Beurteilung des ökologischen Zustandes und für Maßnahmen zum Erreichen des guten ökologischen Zustandes sind entsprechende Datenerhebungen von biologischen, chemischen und physikalischen Parametern erforderlich. Damit können die Gewässer anhand einheitlicher Verfahren wie z. B. der EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) bewertet werden. Hierzu zählen Gewässergüteuntersuchungen zum Saprobienindex und die Bewertung anhand der Makrophyten (Oldorff et al. 2018) ebenso wie biologisches Monitoring zu Makrozoobenthos und Fischen (Brümmer und Müller 2015; Gilbert et al. 2019).

Neobiota

Seit über 15 Jahren beschäftigen wir uns mit dem Thema Neobiota in heimischen Gewässern durch wissenschaftliche Forschungsarbeiten zur Ökologie der Neobiota (Fritz et al. 2007, 2008, 2009; Brümmer et al. 2020, 2021), durch Citizen Science Projekte und durch biologisches Monitoring der betroffenen Biozönosen (Lebensgemeinschaften) sowie möglicher Bekämpfungsmaßnahmen. Im Zusammenhang mit Citizen Science und Science to public entwickeln wir neben der klassischen Informationsbroschüre auch neue Bildungsformate (Wissenschaftscomics, eComics, Comic-Apps) zu den Themen

Biodiversität, Klimawandel, Natursport und Umweltbildung, um eine große Zielgruppe im Bereich des außerschulischen Lernens zu erreichen (Brümmer et al. 2016).

Invasive Flusskrebse und ihre Ausbreitung bereiten zurzeit besonders große Sorge. Viele der invasiven Krebse sind überlegene Konkurrenten oder Fressfeinde einheimischer Arten und können einheimische Ökosysteme stark beeinträchtigen. Die nordamerikanischen Arten sind potenzielle Ausbreitungsvektoren für die Krebspest (Chucholl & Dehus, 2011; Chucholl & Brinker, 2017). Der Kamberkrebs *Faxonius limosus* – auch Amerikanischer Krebs oder Amerikaner genannt – ist gemäß der EU-Verordnung (Nr. 1143/2014 über invasive gebietsfremde Arten) eine invasive gebietsfremde Art von unionsweiter Bedeutung (Chucholl & Brinker, 2017). Einheimische Flusskrebse sind mittlerweile die am stärksten gefährdete Artengruppe in Deutschland und in Baden-Württemberg. Zu ihrem Schutz werden entsprechende Erhaltungs- und Schutzmaßnahmen aufgezeigt (Chucholl & Brinker, 2017). Wichtig ist deshalb nicht nur, die Flusskrebse unterscheiden zu können, sondern sich auch mit deren Biologie und Ökologie zu beschäftigen.

Die zwei Dreikantmuschelarten Zebra-Muschel *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) und die Quagga-Muschel *Dreissena rostriformis bugensis* (Andrusov, 1897) sind invasive Süßwasserorganismen, die sich in heimischen Gewässern ausgebreitet haben und dies teilweise fast unbemerkt weiterhin erfolgreich fortsetzen. Die Zebra-Muschel ist schon seit langem in heimischen Gewässern etabliert. Sie bildet zum Beispiel stabile Bestände im gesamten schiffbaren Rhein, kommt in zahlreichen Baggerseen vor und ist im Bodensee als wichtiges Nahrungsangebot für Wasservögel bekannt.

Die Quagga-Muschel wurde erstmals im Jahr 2016 im Bodensee beobachtet und breitet sich dort seitdem besonders rasant aus. Sie bildet riesige Bestände im Flachwasserbereich des Sees und ist mittlerweile auch in tiefen Seebereichen wie zum Beispiel auf dem in ca. 40 Meter Wassertiefe liegenden Wrack des gesunkenen Schaufelraddampfers JURA zu beobachten (Brümmer et al. 2020). Auch in noch größerer Tiefen – bis in über 90 Meter – konnten wir die Quagga-Muschel durch den Einsatz des Technischen Tauchens dokumentieren (Brümmer et al. 2021a). Gleichzeitig hat sie die etablierte Zebra-Muschel mehr oder weniger vollständig verdrängt.

Als Suspensionsfresser filtrieren die Dreikantmuscheln große Wasservolumina und verlagern damit auch gleichzeitig Material aus der Wassersäule in das Litoral; somit bewirken sie eine Verlagerung des pelagischen Nahrungsnetzes. Und als r-Vermehrungsstrategen (Produktion von sehr vielen Nachkommen) pflanzen sich die Dreikantmuscheln über planktotrophe Veligerlarven fort. Bei der Quagga-Muschel geschieht dies das gesamte Jahr über und die Larven sind in größeren Tiefen zu finden (IGKB, 2019). Die große Dichte dieser Muscheln mit einer fast unvorstellbaren Individuenzahl, gepaart mit der hohen Filtrationsrate bleiben nicht ohne Auswirkungen auf das gesamte Nahrungsnetz und die Lebensgemeinschaften. Und mit Hilfe des Faserbartes (Byssus) heften sich die Dreikantmuscheln an unterschiedlichsten Substraten fest. Als Aufsitzer beobachten wir sie so z. B. an Makrophyten, ebenso auf Schnecken, anderen Muscheln oder Krebsen.

Wenig ist über die Verbreitung der Quagga-Muschel in Deutschland bekannt. In einem Citizen Science-Projekt erhielten interessierte Sporttaucher spezielle Informationen (Unterwasserschreibtafel mit Bestimmungsschlüssel, Schulungen, Booklet) zu beiden Muschelarten, um die Verbreitung und Häufigkeit der beiden Muschelarten bei ihren

Tauchgängen zu dokumentieren. So konnte eine erste beeindruckende Liste zum Vorkommen der Quagga-Muschel zusammengetragen werden, darunter viele Erstbeobachtungen in Baggerseen am Oberrhein sowie in Seen in Sachsen und Sachsen-Anhalt (Brümmer et al. 2021b). Darüber hinaus wurde eine bisher unbekannte Farbvariante häufig beobachtet. Normalerweise lassen sich diese beiden *Dreissena*-Arten anhand der Farbe der Siphons unterscheiden: Die Zebrauschel hat weiße bis durchsichtige Siphons, die Quagga-Muschel hat schwarze Siphons. In verschiedenen Seen wurde im Rahmen des Bürgerprojekts eine orangefarbene Variante beobachtet. Und im Gegensatz zur Zebra-Muschel werden bei der Quagga-Muschel zwei Phänotypen beschrieben, wovon eine (profunda-Form) einen deutlich längeren Schlundsiphon aufweist, den wir in verschiedenen Seen beobachtet haben.

Im Rahmen von Science to Public ist das Booklet „Kaliko-Wissen“ und „Quagga-Wissen“ erschienen. Diese Booklets beinhalten die wichtigsten Informationen zu Biologie, Vorkommen und Ausbreitung des invasiven Kalikokrebses resp. der Quagga-Muschel. Sie können online unter www.aquatil.org/transfer#_Umweltbildung angeschaut und als PDF kostenlos heruntergeladen werden.



Abb. 21: Ein Ausschnitt aus dem Quagga-Muschel-Bewuchs an der Halde in Überlingen im Bodensee mit der orangefarbenen Variante der Quagga-Muschel. – Abb. 22: Einsatz einer Unterwasserbestimmungstafel zum Monitoring der Quagga-Muschel durch Sporttaucherinnen und Sporttaucher (Quelle: Franz Brümmer)



Abb. 23 und Abb. 24: Monitoring von Mikroplastik am Gewässerrand (Quelle: Franz Brümmer) und der Artenvielfalt durch Citizen Scientists (Quelle: Ralph Schill).

4.6 Interview mit Dr. Bernd Wahl LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg – Institut für Seenforschung)

Bernd Wahl, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Institut für Seenforschung, Argenweg 50/1, 88085 Langenargen, Deutschland

1. Wofür steht die Abkürzung KlimBo?

KlimBo steht für „Klimawandel am Bodensee“ und war ein EU-gefördertes Interreg-Projekt der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB). Wie es der Projektname bereits verrät, war die Zielsetzung des Projekts, die Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodensee näher zu untersuchen. Schwerpunktmäßig wurden Fragen des Gewässerschutzes und der Nutzung des Sees behandelt.

2. In welchem Zeitraum und von wem wurde KlimBo umgesetzt?

Das Projekt wurde im Zeitraum 2011 bis 2015 bearbeitet. Koordiniert wurde es durch uns, dem Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) als Vertreter der IGKB. Die Teilprojekte wurden von wissenschaftlich kompetenten Partnerinstitutionen bearbeitet: Dies waren die Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz der Schweiz (EAWAG), das Ingenieurbüro Prof. Kobus und Partner (kup), das Technologiezentrum Wasser (TZW) und der Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung (BWV).

3. Was war bzw. ist das zentrale Ziel von KlimBo?

Das Projekt zielte darauf ab, Abschätzungen zu gewinnen, mit welchen Auswirkungen des Klimawandels auf den See im Verlauf des 21. Jahrhunderts zu rechnen ist. Dabei standen verschiedene Themenbereiche im Fokus der Untersuchung. Dies waren zum einen die thermischen Entwicklungen mit besonderem Fokus auf den Wärmehaushalt und die thermische Schichtung. Weiter wurden verschiedene Transport- und Austauschprozesse analysiert, wie z.B. die Ausbreitung von Flusswasserfahnen im Bodensee oder der Austausch zwischen verschiedenen Wasserkörpern des Sees. Ein Schwerpunkt lag in der Untersuchung der vertikalen Durchmischung und der davon abhängigen Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser. Darüber hinaus wurden Fragen der Nutzung des Sees behandelt: Hierbei wurden Risiken analysiert, die sich für die Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee durch den Klimawandel ergeben könnten. Und es wurden die Auswirkungen einer thermischen Nutzung des Sees abgeschätzt.

4. Wie konnten die Ergebnisse von KlimBo helfen abzuschätzen, wie sich der Klimawandel am Bodensee auswirkt?

Die Untersuchungen basierten sowohl auf Messdaten, die teilweise im Rahmen des Projektes gewonnen wurden, als auch auf Szenarienbetrachtungen, für die Ergebnisse aus Klimamodellen verwendet wurden. Mit Hilfe dieser Daten und verschiedener Modellanalysen konnten einerseits die relevanten Prozesse näher untersucht werden, sodass Veränderungen aus einem verbesserten Prozessverständnis heraus abgeschätzt werden können. Zum anderen wurden mit den prognostischen, szenarienbasierten Betrachtungen direkt Abschätzungen über das Ausmaß der Veränderungen ermittelt. Aus der Interpretation der

Ergebnisse lassen sich dann auch Aussagen ableiten, wie sich Veränderungen beim Auftreten von Hoch- oder Niedrigwasser auswirken oder mit welchen Folgen für die Wasserqualität zu rechnen ist.

5. Was waren die signifikantesten Veränderungen am Bodensee, die im Rahmen der Studie als Folgen des Klimawandels auf die Bodenseeregion festgestellt worden sind?

Deutlich erkennbar sind erwartungsgemäß die Veränderungen im Wärmehaushalt, bzw. in den Wassertemperaturen, für welche eine weitere Zunahme prognostiziert wird. Offensichtlich sind auch die davon abhängigen Veränderungen in der vertikalen Durchmischung, welche in Zukunft häufiger zu mehrjährigen Phasen unzureichenden Tiefenwasseraustauschs und damit zu Veränderungen in der Wasserqualität führen werden. In der Risiko- und Vulnerabilitätsstudie zur Trinkwasserversorgung werden für die Zukunft deutliche Einflüsse durch den Klimawandel prognostiziert, wie z.B. stärker ausgeprägte Spitzenabgaben an Trinkwasser. Diesen kann durch eine vorausschauende Handlungsweise begegnet werden.

6. Haben die klimatischen Veränderungen heute bereits Auswirkungen auf die Wasserqualität des Bodensees?

Die Wasserqualität des Bodensees hängt u.a. von den Einträgen aus dem Einzugsgebiet, den Austauschprozessen im See oder auch von den Austauschprozessen zwischen Sediment und Seewasser ab. Diese Bereiche sind alle vom Klimawandel betroffen, wenngleich das Ausmaß vielfach noch nicht bekannt ist. Teilweise sind bereits Veränderungen erkennbar. Ein Beispiel ist der verminderte vertikale Wasseraustausch, der zu einer Verminderung von Sauerstoff und einer Anreicherung von Nährstoffen im Tiefenwasser führt.

7. Können die klimatischen Veränderungen die Sicherheit der Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee gefährden?

Die im Projekt KlimBo durchgeführte Vulnerabilitäts- und Risikountersuchung sieht zwar Anpassungsbedarf, jedoch keine Gefährdung. Das Themenfeld wird jedoch weiter untersucht und es können die inzwischen vorliegenden Erfahrungen aus mehreren Jahren mit ausgeprägten Trockenphasen ausgewertet werden. Auf Bundesebene wurde aktuell auf einer neueren Erkenntnisgrundlage eine „Nationale Wasserstrategie“ ausgearbeitet und auf Landesebene wird in Baden-Württemberg ein „Masterplan Wasserversorgung“ entwickelt, der sich intensiv mit der Trinkwasserversorgung der Zukunft befasst.

8. Welche Handlungsempfehlungen ergeben sich aus Klimbo? Welche Anpassungsmaßnahmen sind aus Ihrer Sicht für den Bodensee notwendig?

Im Rahmen des Forschungsprojekts KlimBo wurden für die Bereiche Wärmenutzung und Trinkwasserversorgung sehr spezifische Handlungsempfehlungen entwickelt. Aus gewässerökologischer Sicht ist es wichtig, die Nährstoffkonzentrationen des Sees weiter auf einem von Natur aus niedrigen Niveau zu halten, da eine erhöhte Nährstoffbelastung die Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers zusätzlich beeinträchtigen würde. Generell ist es erforderlich, die Veränderungen des insgesamt sehr komplexen Ökosystems Bodensee weiter zu beobachten, also ein angepasstes Monitoring für die Fragen des Klimawandels durchzuführen, und durch gezielte Forschung die Zusammenhänge aufzuzeigen.

Anstrengungen in diese Richtung werden von der IGKB z.B. im aktuellen Forschungsprojekt Seewandel unternommen (www.seewandel.org).

9. Gibt es Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen, die auf andere Seen in Europa übertragbar wären?

Die in der vorangegangenen Frage benannten Folgerungen und Empfehlungen sind im Wesentlichen auch für andere große tiefe Seen des alpinen Raums gültig. So betrachtet das Projekt Seewandel nicht nur den Bodensee, sondern erstreckt sich auch auf andere Seen in der Schweiz. Und auch in KlimBo selbst wurden für verschiedene Fragestellungen Erfahrungen und Fallstudien anderer Seen mit einbezogen.

Das Interview mit Dr. Bernd Wahl führte Udo Gattenlöhner im Juli 2021.

5 Klimawandel und -risiken für den Wasser- und Naturhaushalt in Deutschland

5.1 Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland (KWRA 2021)

Umweltbundesamt

Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau, Deutschland

Bei einem ungebremsten Klimawandel würden die Risiken durch Hitze, Trockenheit und Starkregen im gesamten Bundesgebiet künftig stark ansteigen. Das zeigen die Ergebnisse der Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA) des Bundes, die am 14. Juni 2021 von Bundesumweltministerium und Umweltbundesamt vorgestellt wurde. Die Schäden wirken sich dabei wie bei einem Dominoeffekt von bereits heute stark belasteten Ökosystemen wie Böden, Wäldern und Gewässern hin zum Menschen und seiner Gesundheit aus. In der KWRA wurden über 100 Wirkungen des Klimawandels und deren Wechselwirkungen untersucht und bei rund 30 davon sehr dringender Handlungsbedarf festgestellt. Dazu gehören tödliche Hitzebelastungen, besonders in Städten, Wassermangel im Boden und häufigere Niedrigwasser mit schwerwiegenden Folgen für alle Ökosysteme, die Land- und Forstwirtschaft sowie den Warentransport. Es wurden auch ökonomische Schäden durch Starkregen, Sturzfluten und Hochwasser an Bauwerken untersucht sowie der durch den graduellen Temperaturanstieg verursachte Artenwandel einschließlich der Ausbreitung von Krankheitsüberträgern und Schädlingen.

Bisher sind nur wenige Regionen in Deutschland sehr intensiv von Hitze, Trockenheit oder Starkregen betroffen. Bei einem starken Klimawandel würden bis Mitte des Jahrhunderts sehr viel mehr Regionen mit diesen Wirkungen konfrontiert sein. Im Westen und Süden Deutschlands würde sich das Klima relativ zu heute am stärksten verändern. Im Südwesten und Osten würden klimatische Extreme am häufigsten vorkommen. Die Flüsse und Flusstäler könnten durch Folgen von wasserspezifischen Risiken wie Niedrig- und Hochwasser betroffen sein. An der Küste würden die Gefahren durch den Meeresspiegelanstieg in der zweiten Jahrhunderthälfte deutlich zunehmen. Bei einem starken Klimawandel würde Ende des Jahrhunderts im Vergleich zu heute ganz Deutschland ein Hotspot für Risiken des Klimawandels. Die Studie wurde im Auftrag der Bundesregierung durch ein wissenschaftliches Konsortium und unter Einbindung von Expertinnen und Experten aus 25 Bundesbehörden und -institutionen aus neun Ressorts im Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ erarbeitet. Die Ergebnisse der Studie sind eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). Im Rahmen der DAS werden Klimadaten und -projektionen über das Deutsche Klimavorsorgeportal <http://www.klivo-portal.de/> zur Verfügung gestellt.

Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA) wurde in einer Zusammenfassung² und 6 Teilberichten veröffentlicht, in denen zu verschiedenen Clustern die 102 Klimawirkungen und 13 Handlungsfelder hinsichtlich Klimarisiken, Anpassungsmöglichkeiten und Handlungsbedarf untersucht und bewertet wurden. Es wird hier kurz auf die Erkenntnisse des insbesondere des Teilbericht 3 der KWRA 2021 eingegangen, die Risiken und Anpassung im Handlungsfeld Wasser darstellen. Der Bericht trifft hier u.a. folgende Aussagen:

² <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Zusammenfassung>

Kernaussagen zu „Niedrigwasser“

- Die Modellierungsergebnisse der Niedrigwasserabflüsse für das Szenario RCP8.5 streuen in weiten Grenzen.
- Im optimistischen Fall (85. Perzentil) zeigen die Modellergebnisse sowohl für die Mitte als auch das Ende des 21. Jahrhunderts überwiegend keine Verschärfung. Allerdings befinden sich die aktuell beobachteten Entwicklungen (Periode 1989 bis 2018) auf einem deutlich ungünstigeren Pfad. Extreme Einzeljahre und Episoden sind in jedem Szenario möglich.
- Für den pessimistischen Fall (15. Perzentil) wurden besonders für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts substanzielle Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse berechnet. Das gilt für die Mosel, den Neckar und die Mulde für die Mitte des Jahrhunderts und für fast alle Flüsse für Ende des Jahrhunderts. Die deutlichsten Änderungen werden für Teile des Rheins projiziert.

Kernaussagen zu „Hochwasser“

- Extreme Hochwasserereignisse verursachen immer wieder große Schäden und gefährden Menschenleben. Die klimatischen, hydrologischen und hydrodynamischen Voraussetzungen für ihre Entstehungen sind sehr vielfältig und können nicht verallgemeinert werden.
- Für das RCP8.5-Szenario deuten die meisten modellierten Abflüsse unabhängig vom betrachteten Hochwasserindikator auf eine Zunahme von Hochwasserabflüssen insbesondere in den heute regendominierten Regionen Deutschlands hin (Mittelgebirge, Ostdeutschland).
- Die Ausprägung extremer und schadensbringender Hochwasserereignisse (HQ100 und höher) unterliegt vielfältigen und je nach Ereignistyp individuell kombinierten Einflussfaktoren, die nur teilweise für längere Zeiträume in die Zukunft projiziert werden können und noch Gegenstand der Forschung sind.

Kernaussagen zu „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“

- Feuchtgebiete sind bereits durch Trockenlegung und anschließende Nutzungsintensivierung stark in ihrem Bestand (Fläche und Qualität) zurückgegangen. Der Klimawandel ist eine weitere Gefährdungsursache und führt durch länger andauernde (Frühjahrs-)Trockenperioden und hohe Temperaturen zu einer verstärkten Austrocknung von Feuchtgebieten und Bachläufen, wodurch die Gefahr der weiteren Abnahme und Degradierung von Feuchtlebensräumen zunimmt.
- In Fließgewässern gehen geeignete Lebensräume und Bestände bestimmter Fischarten wie Äsche und Forelle durch steigende Gewässertemperaturen zurück und eine zunehmende Ausbreitung von Arten des unteren Flusslaufs (Potamal) in höhere Gewässerabschnitte erfolgt. Bei Niedrigwasser und geringerer Durchflussmenge heizen sich Gewässer schneller auf, was zu stärkerer Sauerstoffzehrung beziehungsweise -verfügbarkeit führt, weshalb nicht-mobile Arten ihren Lebensraum verlieren können. Eine Begünstigung von an warme Gewässer gebundenen Arten wird erwartet.

In den Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten heißt es „Möglichkeiten der transformativen Anpassung zur Minderung von Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten zeigen sich im Bereich der Nutzungsform der jeweiligen Gebiete. So könnte eine Vergrößerung wassergebundener Habitats in Betracht gezogen werden. Dies

würde jedoch eine Änderung der Nutzungsform der betroffenen und angrenzenden Gebiete bedingen (Hartje et al. 2015). Zur Umsetzung von Naturschutzmaßnahmen wäre daher ein Ankauf von großräumigen Flächen nötig, welche durch Renaturierungs- oder Wiedervernässungsmaßnahmen umgestaltet werden könnten. Dies würde jedoch zwangsläufig zu Interessenkonflikten führen. Neben einer vollständigen Umgestaltung solcher Flächen in Naturschutzgebieten könnte weiterhin auch ein Umstieg auf alternative, naturverträgliche Landnutzungsformen erwogen werden. Möglich wäre beispielsweise eine Förderung der Bepflanzung wiedervernässter Flächen mit nassetoleranten Arten durch Anbaumethoden wie die Paludikultur (Hartje et al. 2015; Wichmann et al. 2020; Ziegler 2020).“

5.2 Moorschutz und Paludikultur³

Michael Bender

GRÜNE LIGA, Netzwerk Ökologischer Bewegungen, Haus der Demokratie und Menschenrechte, Greifswalder Straße 4, 10405 Berlin, Deutschland

Wendelin Wichmann und Susanne Abel

Greifswald Moor Centrum, Ellernholzstr. 1/3, 17489 Greifswald, Deutschland

Verbreitung von Mooren

Moore kommen in mindestens 175 Ländern der Erde vor und bedecken rund 4 Millionen km², das entspricht etwa 3 % der Landmasse der Erde. In der nördlichen Hemisphäre sind die klimatischen Bedingungen gut geeignet für die Bildung von Torf, aber auch in den Tropen kommen Moore vor. In Europa erstrecken sich Moore auf einer Fläche von über 593,727 km² (Tanneberger et al. 2017), in Deutschland v.a. im Nordwesten und Nordosten Deutschlands und im Alpenvorland. Niedermoore sind sehr produktiv, da sie wasser- und nährstoffreich sind. Hochmoore werden ausschließlich aus Niederschlägen und durch aus der Luft eingetragene Mineralsalze versorgt.

Moorentwässerung ist schädlich fürs Klima

Die Trockenlegung von Mooren und die konventionelle landwirtschaftliche Bewirtschaftung von entwässerten Mooren führt zum Abbau des organischen Bodenmaterials (Torf) wodurch hohe Treibhausgasemissionen, vor allem CO₂, entstehen. Der daraus i.d.R. resultierende Nährstoffaustrag sowie der Verlust der Biodiversität schränkt Flächennutzungsmöglichkeiten zunehmend ein. Organische kohlenstoffreiche Böden nehmen in Deutschland insgesamt 5,2 % der Landesfläche (ca. 1,8 Millionen Hektar, Tegetmeyer et al. 2021) ein, aber nur noch 2 % von ihnen weisen noch einen natürlich nassen Zustand auf. Die Landwirtschaft auf Moorböden in Deutschland verursacht durch Entwässerung und die einhergehende Moordegradierung jährlich einen Klimaschaden von rund 7,4 Milliarden Euro, der mit EU-Geldern in Höhe von 410 Millionen Euro subventioniert wird.⁴ Entwässerte Moore sind Hauptquellen landwirtschaftlicher CO₂-Emissionen. Obwohl Moore nur 7 % der genutzten Landwirtschaftsfläche in Deutschland bedecken, sind sie für 37 % der gesamten

³ Der Beitrag basiert auf einer Ausgabe der „Steckbriefe zur Umsetzung der WRRL“ der GRÜNEN LIGA e.V. vom Februar 2019, der aktualisiert und ergänzt wurde (Michael Bender, Wendelin Wichmann, Tobias Schäfer), sowie auf einem Beitrag von Susanne Abel, Greifswald Moor Centrum.

⁴ Faktenpapier: Moorbodenschutz als naturbasierte Lösung im Klimaschutzprogramm 2030 – schnelle Einstellung von Moor-Entwässerung für wirkungsvollen Klimaschutz nötig! Greifswald Moor Centrum, 2019, https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/Infopapiere_Briefings/2019-09-Faktenpapier_MoorklimaschutzDE_4S.pdf

landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen (Sektor Landwirtschaft und LULUCF, inklusive Tierhaltung) verantwortlich. Das entspricht etwa 53 Millionen Tonnen CO₂-Äq. pro Jahr (UNFCCC: National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 2020). Die Torfzersetzung bzw. -mineralisierung in entwässerten Mooren führt außerdem zu hohen Stoffausträgen über Grund- und Oberflächengewässer, was mit dazu beiträgt, dass viele Seen und Küstengebiete in Europa unter einer hohen Nährstoffbelastung leiden und stark eutroph sind. Die Stoffausträge aus der Landwirtschaft, sowohl aus den mineralisierenden Mooren als auch aus den gedüngten Mineralböden, sind für die übermäßige diffuse Nährstoffbelastung unserer Gewässer – Grundwasser, Oberflächenwasser, Küstengewässer sowie Seen – die hauptsächliche Quelle.

Ein weiterer unerwünschter Effekt der Moordegradation ist der fortgesetzte Höhenverlust, welcher jährlich ca. 2 cm beträgt. Dieser durch Torfmineralisierung, Sackung und Erosion verursachte kontinuierliche Höhenverlust der Moore erfordert eine ständige Vertiefung der Entwässerungsgräben, was wiederum den Torfabbau und den Höhenverlust verstärkt und eine weitere Vertiefung der Gräben erfordert. Jegliche entwässerungsbasierte Nutzung von Torfböden bedeutet langfristig einen potentiellen Verlust an produktiven Böden. Die daraus resultierenden Schäden an Wasser, Land und Infrastruktur sind ein großes Problem – langfristig auch ökonomisch gesehen.

Wissenschaftliche Untersuchungen belegen, dass eine Anhebung der Wasserstände von Mooren zu verringerten Treibhausgas-Emissionen führt (Günther et al. 2019). Hier liegt eine Chance für den Klima- und Naturschutz. Von den zirka 1,8 Millionen Hektar Moor- und anmoorigen Böden in Deutschland sollten bis 2050 pro Jahr rund 50.000 Hektar wiedervernässt werden, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und die Pariser Klimaziele einzuhalten. Gleichzeitig würden auch die Nährstoffausträge in Fließgewässer stark reduziert. Von intakten Moorlandschaften profitieren auch spezialisierte und bedrohte Tierarten und Pflanzenarten wie z.B. Seggenrohrsänger und Sonnentau.

Wiedervernässung und Paludikultur als Lösungsansatz

Die Wiedervernässung leistet einen Beitrag zur Minderung der hohen THG-Emissionen und die langfristige Kohlenstoffspeicherefunktion der organischen Böden kann wiederhergestellt werden, indem infolge einer Erhöhung des Grundwasserspiegels torfbildende Vegetation etabliert wird. Eine Moorwiedervernässung kann den immensen Nährstoffaustrag an Stickstoff [N] und Phosphor [P] von entwässerten Mooren reduzieren; eine zentrale Aufgabe für das Flusseinzugsgebietsmanagement im Nordwesten Europas und in den Einzugsgebieten von Nord- und Ostsee. Durch die Wiederherstellung von wasserabhängigen semiaquatischen Lebensräumen können ökologische und ökonomische Ziele gleichermaßen erreicht werden. So schützt die Wiedervernässung von degradierten Mooren das Klima durch reduzierte Treibhausgasemissionen verbunden mit positiven regionalen Effekten der Landschaftskühlung durch erhöhte Evapotranspiration.

Gleichzeitig kann eine Moorwiedervernässung, Oberflächengewässer und Grundwasser schützen, indem überschüssige Nährstoffeinträge in den wiedervernässten Böden gebunden (P, N) oder durch Denitrifikation eliminiert (Stickstoff) werden. Außerdem verhindert eine Wiedervernässung weitere Bodensackungen und vermindert die Bodenerosion.

Die Verbesserung der Wasserqualität resultiert nicht nur aus einer Reduzierung der Torfmineralisierung, sondern auch aus der Aufnahme von Nähr- und Schadstoffen durch die Moorvegetation. Viele Feuchtgebietspflanzen haben erwiesenermaßen einen positiven Effekt auf die Wasserreinigung (Wissing & Hoffmann 2002). Die Biomasse wiedervernässter, nicht zusätzlich gedüngter Moore „exportiert“ die in ihr enthaltenen Nährstoffe sozusagen aus dem System. Auch tiergebundene Nutzungsformen, z.B. die Beweidung nasser Weiden mit extensiv gehaltenen Wasserbüffeln, können zu einem verbesserten Nährstoffausgleich beitragen. Eine Moorwiedervernässung in Verbindung mit ‚nasser Landwirtschaft‘ (Paludikultur) kann auch aus wirtschaftlicher Sicht rentabel sein, wenn die aufwachsende Biomasse in Paludikultur verwertet wird und weitere Ökosystemdienstleistungen honoriert werden. Paludikultur kann somit eine nachhaltige Alternative zur konventionellen Landwirtschaft darstellen. Die geerntete Biomasse kann als Rohmaterial für Baustoffe, als Verpackungsmaterial, als Substrat im Gartenbau, zur Energiegewinnung oder zur Futterproduktion genutzt werden. Wiedervernässte Moore unterstützen die Revitalisierung und Aufrechterhaltung der Biodiversität, indem sie typische Lebensräume für die meist selten gewordenen Tier- und Pflanzenarten bereitstellen.



Abb. 25: Torfmoosерnte. Abb. 26: Formteile aus Nasswiesen-Biomasse und Schilf (Quelle: Greifswald Moor Centrum)

Auf Nasswiesen bilden Rohrglanzgras, Seggen und Wasserbüffel wichtige Faktoren für eine nachhaltige Nutzung. Weitere Optionen für den Anbau von Paludikulturen sind Schilf, Rohrkolben oder Torfmoose.

Es könnte ein großer Markt für stoffliche Verwertungswege durch die Bioökonomie entstehen, die zum Anbau klimaschonender Produkte anregen. Aufgefasertes Schilf, Seggen oder Rohrkolben können als Bauplatten oder Formteile genutzt werden. Schaumplatten aus Seggen oder Graspapier als Verpackung sind weitere Beispiele für die Verwendbarkeit dieser Produkte.

Umsetzung von Paludikultur in Mecklenburg-Vorpommern

Moorböden in Mecklenburg-Vorpommern bedecken mit rund 290.000 ha. etwa 13 % der Landesfläche und emittieren, insbesondere durch Entwässerung für die landwirtschaftliche Nutzung, etwa 30 % der gesamten landesweiten Treibhausgasemissionen. Innerhalb landwirtschaftlich genutzter Flächen (Feldblöcke auf Moor) und unter Berücksichtigung gesetzlicher Fachvorgaben wurde eine Flächenkulisse für Paludikultur für Mecklenburg-Vorpommern erstellt. Diese unterscheidet zwischen „Nasswiesen“ und „Anbaukulturen“. Aus Sicht der Landwirtschaft und des Naturschutzes ist Paludikultur demnach auf über 85.000 ha uneingeschränkt möglich. Auf weiteren bis zu 50.000 ha können nach naturschutzfachlicher

Prüfung Paludikulturen (Anbau oder Nasswiese) und auf weiteren fast 30.000 ha ebenfalls nach naturschutzfachlicher Prüfung Nasswiesen bewirtschaftet werden (Tanneberger et al. 2020), (LM MV). Allerdings bestehen für solche Bewirtschaftungsformen derzeit noch verschiedene Hürden wie z.B. die fehlende Beihilfefähigkeit von Anbau-Paludikulturen, unangepasste Finanzierungsinstrumente und fehlende Verwertungsstrukturen.

Ein Beispiel für die thermische Verwertung von Nasswiesenbiomasse ist das Heizwerk Malchin. Dort wird Heu, das im Hochsommer auf ca. 300 ha Nasswiesen am Kummerower See geerntet wurde, in einer für diese Art von Biomasse angepassten dänischen Strohverbrennungsanlage verbrannt, um Wärme zu gewinnen. Etwa 500 Haushalte werden mit dieser Anlage mit Wärme und Warmwasser versorgt. Im Rahmen des Verbundprojektes BOnaMoor (2018–2021) wird untersucht, wie die nasse Bewirtschaftung von Mooren und die thermische Verwertung von Biomasse aus nassen Niedermooren optimiert werden kann.

Moorschutz – Handlungsansätze in Brandenburg⁵

Durch ihre Fähigkeit, klimarelevante Treibhausgase zu speichern, kommt Mooren in Bezug auf den Klimaschutz eine herausragende Bedeutung zu. Und das betrifft Brandenburg in besonderer Weise, da es sehr reich an Moorflächen ist. Die Umstellung auf eine torfzehrungsmindernde Bewirtschaftung bis 2030 und auf klimaneutrale Bewirtschaftung bis 2050 sind dabei essentielle Elemente des deutschen Klimaschutzplans 2050. Laut der Bund-Länder-Zielvereinbarung zum Moorbodenschutz sollen die Emissionen aus deutschen Mooren bis 2030 von 44 Mio. um 5 Mio. t CO₂-Äquivalente pro Hektar und Jahr verringert werden. Das ist eine Reduzierung um rund 11,4 %. Für Brandenburg entspricht das etwa 50.000 Hektar Moorfläche.

Im Auftrag des Landes Brandenburg untersucht das Projekt "Klimaschutz und Klimafolgenanpassung durch moorschonende Einrichtung der Staubeiche und Wasserbewirtschaftung in Bezug auf Moorflächen des Landes Brandenburg und deren Einzugsgebiete" das Wasserrückhaltevermögen großflächiger Moore, deren Wasserhaushalt durch Entwässerungsmaßnahmen beeinträchtigt wurde. Dabei ist es ein Ziel, gemeinsam mit den Nutzern Strategien und Lösungen für eine an hohe Wasserstände angepasste Bewirtschaftung zu erarbeiten und attraktive Verwertungsmöglichkeiten zu etablieren.

Moore vereinen eine Vielzahl von ökologischen, ökonomischen und sozialen Funktionen durch ihre vielfältigen Ökosystemdienstleistungen, die jedoch bisher nicht immer in Einklang miteinander stehen. So sind der Schutz und die Revitalisierung von Moorflächen durch Wasserstandsanehebungen zwar aus Biodiversitäts- und Klimaschutzsicht gewünscht, stehen jedoch der bisherigen mit Entwässerung einhergehenden Landnutzung entgegen. Um diese Bereiche in Einklang zu bringen, braucht es innovative Ansätze für eine angepasste Landnutzung sowie die Unterstützung landwirtschaftlicher Unternehmen bei der betrieblichen Anpassung und Vermarktung der neuen Produkte.

Vor diesem Hintergrund hat das Land Brandenburg zwei neue Förderprogramme für den Moorschutz ins Leben gerufen. Beim Förderprogramm moorschonenden Stauhaltung (AUKM) müssen die Landnutzer Wasserstände von maximal 10 cm unter Flur im Winter und 30 cm unter Flur im Sommer erreichen. Dafür erhalten die Landnutzer jährlich Fördermittel in Höhe

⁵ Text nach <https://www.klimamoor-brandenburg.de/> ARGE Klimamoor

von 387 Euro pro Hektar (3). Im Frühjahr 2022 soll die zweite Klima-Moorschutzinitiative („Moorschutz investiv“) starten, die darauf abzielt, die weitere Zersetzung von Moorböden zu vermeiden und die Umstellung auf nasse Moornutzung zu begünstigen. Im Rahmen der geplanten Förderrichtlinien sollen Investitionen in moorerhaltende und moorschonende Bewirtschaftungstechnik bzw. Bewirtschaftungsverfahren unterstützt werden als auch die Erschließung neuer Verwertungsmöglichkeiten für Produkte auf Basis von Biomasse.

1. <https://www.klimamoor-brandenburg.de/>

2. https://www.klimamoor-brandenburg.de/wp-content/uploads/2021/06/Moore_Klimaschutz_im_Rhinluch_Einladung_Verwertung.pdf

3. <https://mluk.brandenburg.de/mluk/de/service/foerderung/landwirtschaft/moorschonende-stauhaltung/>

5.2 BfN Auenzustandsbericht 2021⁶

*Bundesamt für Naturschutz
Konstantinstraße 110, 53179 Bonn*

Mit dem Auenzustandsbericht 2021 stellte das Bundesamt für Naturschutz nach 2009 zum zweiten Mal einen bundesweiten Überblick über die räumliche Ausdehnung der Flussauen, den Verlust von Überschwemmungsflächen und den Zustand der rezenten Flussauen an 79 Flüssen in Deutschland zusammen. Von den ursprünglichen Flussauen wird nur noch ca. ein Drittel überflutet. Davon sind knapp 1 % sehr gering verändert (Auenzustandsklasse 1) sowie 8 % gering verändert (Auenzustandsklasse 2) und damit noch weitgehend ökologisch funktionsfähig. 33 % werden vom BfN als deutlich verändert eingestuft. Der überwiegende Teil der erfassten rezenten Flussauen gilt jedoch als stark verändert (32 %) oder sehr stark verändert (32 %) und spiegelt damit die intensive Nutzung der Flusslandschaften wider. Insgesamt sind 80 % der Auen- und Gewässerbiotope gefährdet. Die Nutzung der rezenten Auen ist mit einem Flächenanteil von 43 % weiterhin von Grünland dominiert. Zu 26 % bzw. 7 % werden die rezenten Auen als Ackerflächen sowie als Siedlungs-, Verkehrs- und Gewerbeflächen genutzt. Nur 16 % sind Wälder.

Deutschlandweit wurden seit Anfang der 1980er Jahre bis 2020 etwa 223 größere Auenrenaturierungsprojekte an Flüssen umgesetzt, davon 167 innerhalb der Gebietskulisse des Auenzustandsberichts. Damit konnten an den 79 Flüssen im gesamten Betrachtungszeitraum von 1983 bis 2020 insgesamt 7.100 ha resp. 1,5 % wieder zurückgewonnen werden. Die Ziele der Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt, die naturraumtypische Vielfalt der Gewässer- und Auenlebensräume zu sichern und die natürlichen Überflutungsflächen an Flüssen um 10 % zu vergrößern, werden bislang allerdings deutlich verfehlt. Neben dem Nationalen Hochwasserschutzprogramm bietet an den Bundeswasserstraßen auch das „Bundesprogramm Blaues Band Deutschland“ die Möglichkeit, Auenfunktionen wiederherzustellen. Die europäische Biodiversitätsstrategie sieht EU-weit mindestens 25.000 km frei fließende Flüsse vor.

⁶ <https://www.bfn.de/themen/gewaesser-und-auenschutz/bundesweiter-auenschutz/auenzu-stand.html>

5.3 Herausforderungen für öffentliche Wasserversorger am Beispiel des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes

Ursula Buss

Oldenburgisch-Ostfriesische Wasserverband (OOWV), Georgstraße 4, 26919 Brake, Deutschland

Der Oldenburgisch-Ostfriesische Wasserverband (OOWV) ist ein Zusammenschluss von Landkreisen und Gemeinden zum Zwecke der Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung. Der 1948 gegründete Verband ist eine Körperschaft öffentlichen Rechts ohne Gewinnerzielungsabsicht. Er versorgt rund 1,1 Millionen Menschen in Nordwest-Niedersachsen mit Trinkwasser und ist, gemessen an der Fläche, Deutschlands größter Wasserversorger. Der OOWV betreibt elf Wasserwerke auf dem Festland und vier Wasserwerke auf den Ostfriesischen Inseln. Die Wasserversorgung erfolgt zu 100 % auf Basis von Grundwasser, das über 267 Förderbrunnen aus überwiegend sandigen Sedimenten mit bis zu rund 200 Metern Mächtigkeit entnommen wird. Die Wasserrechte zur Entnahme von Grundwasser betragen insgesamt knapp 100 Mio. m³ pro Jahr.

Wasserbedarf

Der OOWV versorgt verschiedene Verbrauchergruppen mit Wasser. Die Verbrauchergruppe „Haushalt und Kleingewerbe“ nimmt mit mehr als der Hälfte den größten Anteil ein. Danach folgen etwa zu gleichen Teilen „Gewerbe und Industrie“ sowie „Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft“. Die Versorgung „Öffentlicher Einrichtungen“ und „Anderer“ (z.B. Unterstützung benachbarter Wasserversorgungsunternehmen) machen knapp 10% aus. Seit Beginn der 2000er Jahre verzeichnet der OOWV einen steigenden Wasserbedarf, der durch erhöhte Grundwasserentnahmen gedeckt werden muss (siehe Abb. 27).

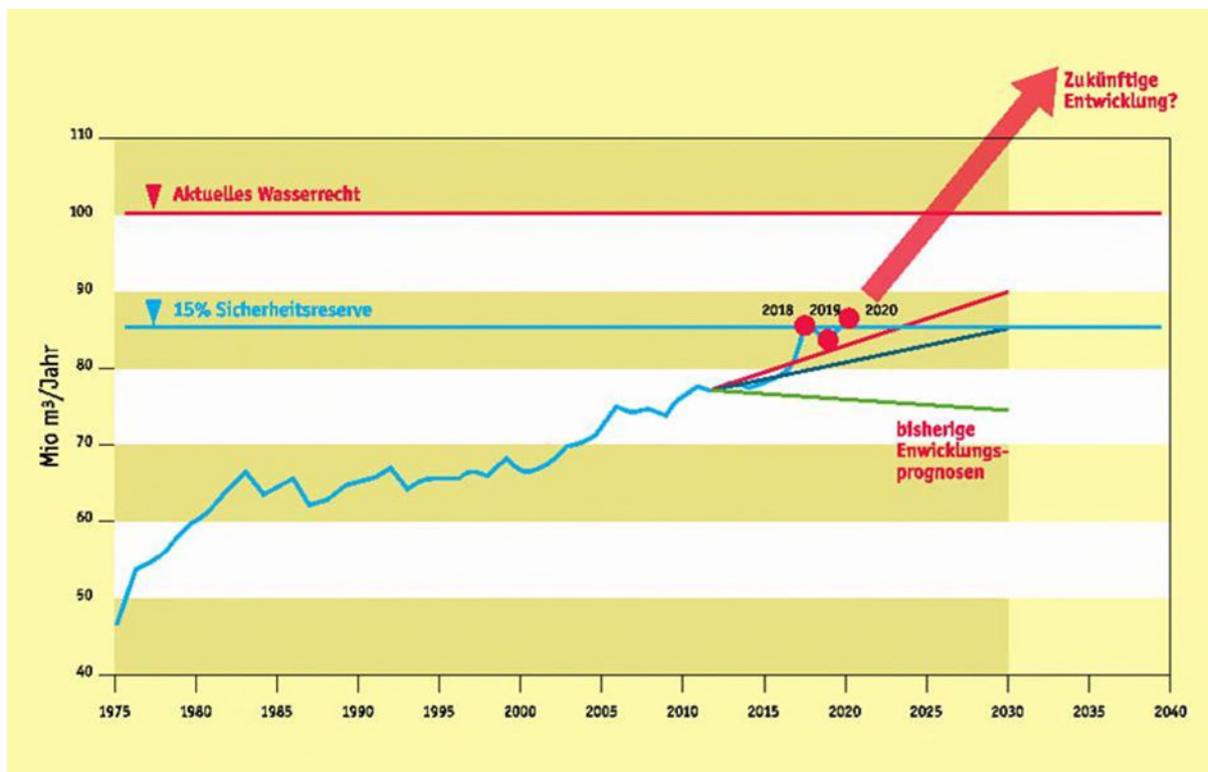


Abb. 27: Entwicklung der Grundwasserentnahmen im OOWV-Verbandsgebiet, bearbeitet. (Quelle: OOWV)

In den Jahren 2018 bis 2020 überstieg der Wasserbedarf alle bisherigen Entwicklungsprognosen (s. Abb. 27). Dies wird zum einen auf die tatsächliche

Bevölkerungsentwicklung zurückgeführt, die in einigen Gebieten oberhalb der Prognosen des Niedersächsischen Landesamtes für Statistik lag. Zum anderen machte sich in den außergewöhnlich trockenen und heißen Jahren 2018 bis 2020 ein erhöhter Wasserbedarf infolge gesteigerter privater Nutzung sowie Bewässerung und Kühlung bemerkbar. Der erhöhte Bedarf konzentriert sich dabei auf heiße und trockene Tage sowie auf bestimmte Tageszeiten, nämlich die Morgen- und Abendstunden. Dadurch ergaben sich in den letzten drei Jahren Spitzenlastsituationen mit nie dagewesenen Tagesabgaben in das Versorgungsnetz. Die jetzigen Versorgungsanlagen (Brunnen, Aufbereitung, Leitungsnetze, Speicheranlagen, Pumpwerke) sind nicht für diese nicht erwarteten Spitzenbedarfe ausgelegt und kommen an ihre Kapazitätsgrenzen. Zur Anpassung an diese neue Situation sieht der OOWV technische Maßnahmen vor, die jedoch von der Planung über Genehmigungsverfahren bis hin zur Umsetzung oft einige Jahre oder sogar Jahrzehnte benötigen.

Auch der rapide Anstieg im Trinkwasserbedarf, der schneller als bisher prognostiziert verläuft, stellt viele Wasserversorger vor neue Herausforderungen. Die bestehenden Wasserrechte sind nahezu ausgeschöpft und Sicherheitsreserven teilweise aufgebraucht. Genehmigungsverfahren zur Erneuerung oder Erhöhung bestehender Wasserrechte sind aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen und der vielfältigen Fragestellungen, die auf der Basis von verschiedenen Fachgutachten beantwortet werden müssen, aufwändige und langwierige Prozesse. Sie nehmen oft 5 bis 10 Jahre in Anspruch. Die Erkundung neuer Grundwasserressourcen sowie der Bau neuer Brunnen, Leitungen und Wasserwerke einschließlich der erforderlichen Plan- und Genehmigungsverfahren sind noch aufwändiger und benötigen ausreichenden Vorlauf.

Die Situation im Hinblick auf die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung lässt sich demnach wie folgt zusammenfassen: Wenn man die Witterungssituation der letzten 20 Jahre und insbesondere die extremen Trockenjahre 2018 bis 2020 als Anzeichen des Klimawandels deutet, die zukünftig häufiger zu erwarten sind, so besteht für Wasserversorgungsunternehmen die Herausforderung darin, das technische Versorgungsnetz und die wasserrechtlichen Rahmenbedingungen rechtzeitig und vorausschauend auf die sich verändernde Bedarfssituation mit höheren Gesamtmengen und ansteigenden Spitzenlasten anzupassen. Dafür muss die Bedarfsentwicklung aufgrund der langen Planungs- und Umsetzungszeiträume über mehrere Jahrzehnte in die Zukunft prognostiziert werden. Gleichzeitig werden neue Lösungsansätze betrachtet, zum Beispiel die Idee, Trinkwasser für bestimmte Zwecke durch aufbereitetes Abwasser zu ersetzen, und die Förderung des bewussten Umgangs mit Trinkwasser.

Grundwasserressourcen/Entwicklung der Grundwasserstände

Klimaprognosen zeigen für Niedersachsen tendenziell trockenere Sommer und nassere Winter mit einer Zunahme von Extremereignissen. Die Klimawirkungsstudie Niedersachsen (MU Niedersachsen [Hrsg.]. [2019]. Klimawirkungsstudie Niedersachsen. Hannover.) prognostiziert im Gebiet des OOWV, je nach Lokalität und Szenario, eine im Vergleich zum aktuellen Referenzzeitraum 1971-2000 nicht signifikant veränderte, eine leicht reduzierte oder sogar eine leicht erhöhte mittlere Grundwasserneubildung. Dabei ist mit der Verschiebung der Niederschläge aus dem Sommer in den Winter auch tendenziell eine Abnahme der Grundwasserneubildung im Sommer und eine Zunahme im Winter verbunden. Die resultierenden Auswirkungen auf die langfristige Entwicklung der Grundwasserstände sind aber im Detail unklar und auch landesweit Thema von Forschungsprojekten.

Der OOWV betreibt zur Überwachung und Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen ein Messnetz aus Grundwassermessstellen und Oberflächengewässermessstellen, an denen überwiegend monatlich der Wasserstand gemessen wird. Das Messnetz hat sich seit den 1960er Jahren kontinuierlich entwickelt und umfasst heute rd. 2.500 aktive Wasserstands-Messstellen. Es liegen dadurch viele kontinuierliche Zeitreihen vor, die mehr als 50 Jahre zurückgehen.

Seit Beginn der 2000er Jahre hat der OOWV insbesondere im südlichen Verbandsgebiet entgegen den langfristigen Klimaprognosen eine Tendenz zu unterdurchschnittlichen Winterniederschlägen beobachtet. In den Geestgebieten, wo die Grundwasseroberfläche meist mehr als 5 Meter unter der Geländeoberfläche liegt, beobachtet der OOWV infolge der mangelnden Niederschläge in den vergangenen 15 bis 20 Jahren Grundwasserstände auf einem unterdurchschnittlichen Niveau.

Die Jahre 2018 bis 2020 waren wie deutschlandweit auch im Nordwesten Niedersachsens durch extrem trockene und heiße Sommer geprägt, die als Folge des Klimawandels gedeutet werden. In Kombination mit der oben beschriebenen Entwicklung seit Beginn der 2000er Jahre erreichten die Grundwasserstände in 2019/2020 in den Geestgebieten daher vielerorts historische Tiefstände (s. Abb. 28).

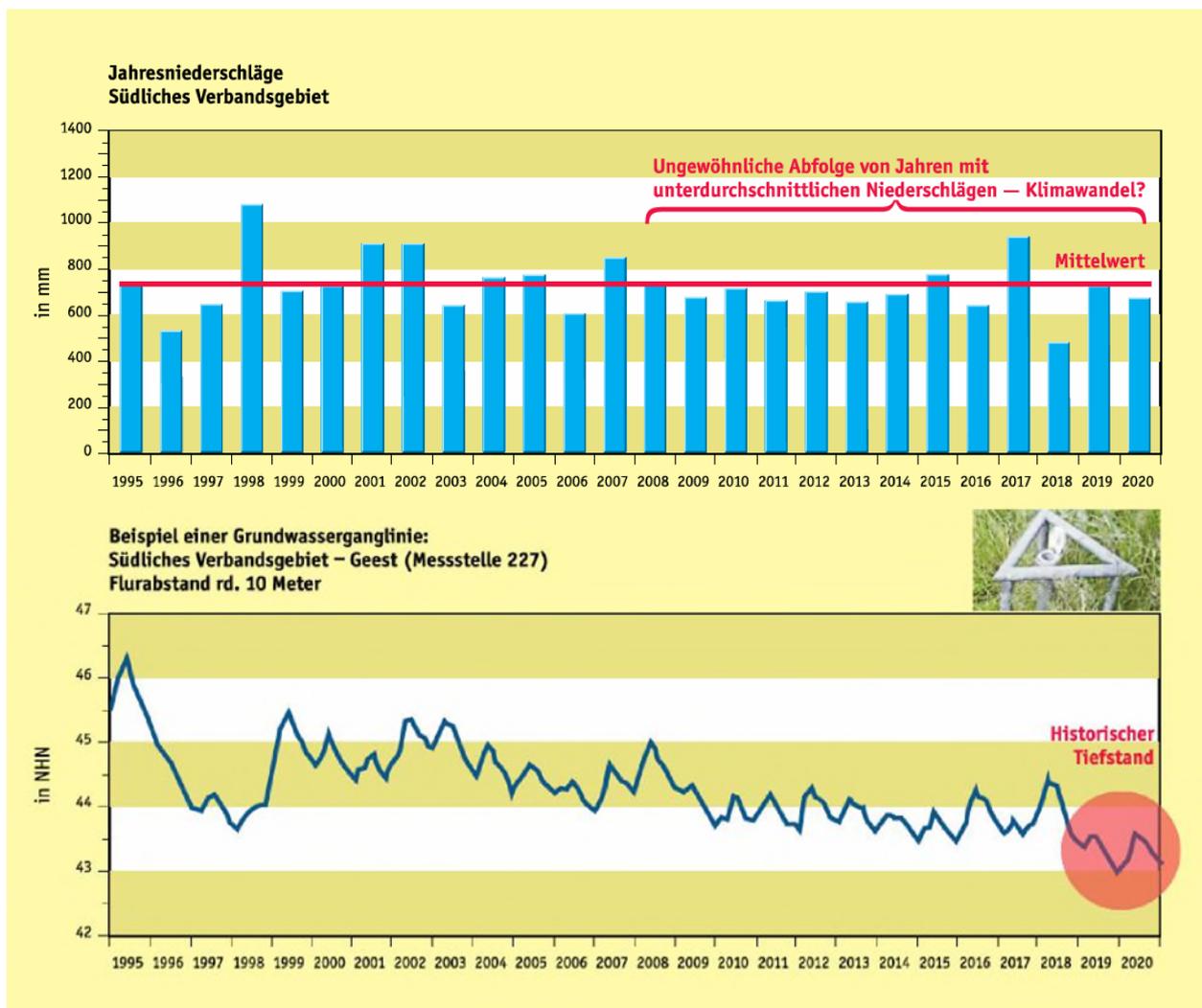


Abb. 28: Beispiel Wasserwerk Großenkneten – Jahresniederschlag und Grundwasserstandsganglinie der Messstelle 277 (Geest, großer Flurabstand), bearbeitet. (Quelle: OOWV).

In den Niederungsbereichen, wo das Grundwasser nahe oder nur wenige Meter unterhalb der Geländeoberfläche zu finden ist, beobachtet der OOWV kaum oder weniger deutliche Veränderungen der Grundwasserstände – hier reichen oft schon geringere Niederschläge zur Auffüllung des oberflächennahen Grundwasserspeichers.

Die insbesondere in den Geestgebieten mit relativ großen Grundwasserflurabständen beobachteten Veränderungen haben in den Wassergewinnungsgebieten des OOWV aufgrund der mächtigen Grundwasserleiter (oft > 100 Meter und teilweise bis zu rd. 200 Meter) normalerweise keine Auswirkung auf die „technische“ Gewinnbarkeit der Grundwasserressourcen. In Abb. 29 ist der langfristige Verlauf des Grundwasserstandes an einer Beispiel-Messstelle schematisch zusammen mit der lokalen Mächtigkeit des Grundwasserleiters dargestellt. Die Variation des Grundwasserstandes im Beobachtungszeitraum 1975 bis 2020 beträgt an der betrachteten Messstelle trotz der beobachteten Veränderungen der letzten Jahre und des Erreichens eines historischen Tiefststandes in 2019 insgesamt nur etwa 3,2 Meter im Vergleich zu einer Mächtigkeit des Grundwasserleiters von rund 75 Metern.

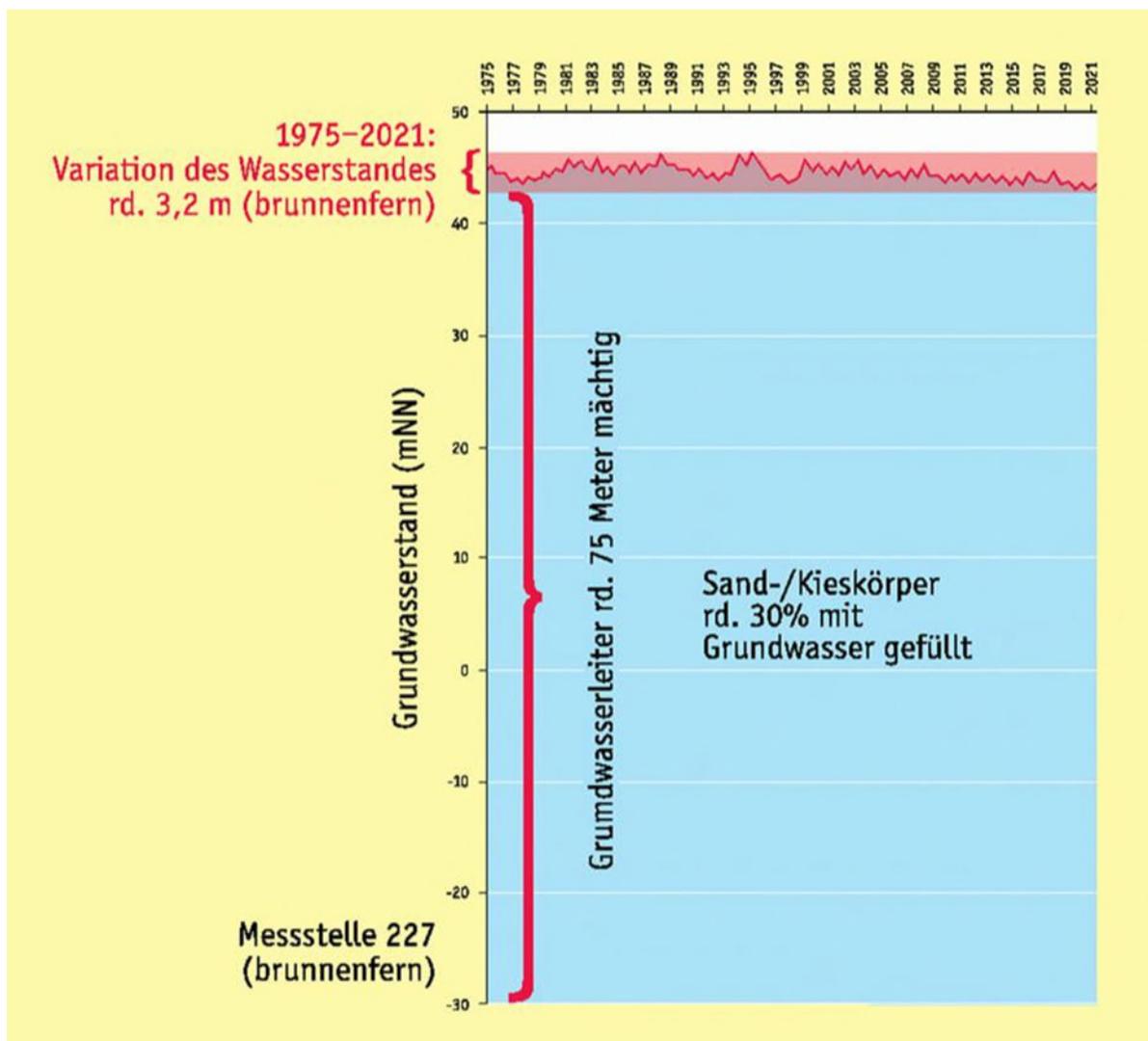


Abb. 29: Beispiel Wasserwerk Großenkneten – Grundwasserstandsganglinie der Messstelle 227 (Geest) mit schematischer Darstellung des rd. 75 Meter mächtigen Grundwasserleiters, bearbeitet. (Quelle: OOWV)

Unter Klimastress können dagegen dort Nutzungskonflikte entstehen, wo oberflächennah Grundwasser benötigt wird. Durch die Entwicklung hin zu heißeren und trockeneren Sommern ist zu erwarten, dass zukünftig verstärkt saisonal negative Wirkungen u.a. auf grundwasserabhängige Feuchtgebiete eintreten werden, wenn die Grundwasserstände relativ tief sind und gleichzeitig der Bedarf für verschiedene Gewässernutzungen hoch ist.

6 Interpretation und Ausblick

6.1 Europäische Rahmenbedingungen

Die Europäische Kommission hat als eine der wichtigsten Maßnahmen im Rahmen des Europäischen Green Deals am 24. Februar 2021 die neue Anpassungsstrategie an den Klimawandel verabschiedet (EU-Strategie für die Anpassung an den Klimawandel 2021). Der starke europäische Rahmen unterstützt die Umsetzung ambitionierter Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. Die Bundesregierung hatte bereits Ende 2020 die Deutsche Anpassungsstrategie aktualisiert und den dritten nationalen Aktionsplan Anpassung beschlossen. Die zentralen Umweltziele für Gewässer sind in der im Jahr 2000 in Kraft getretenen europäischen Wasserrahmenrichtlinie festgelegt (WRRL). In Deutschland lagen zu Beginn des Jahres 2021 die Entwürfe der Bewirtschaftungspläne der 3. Phase der Wasserrahmenrichtlinie zur Kommentierung aus. Die Veröffentlichung der endgültigen WRRL-Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme wird für den 22. Dezember 2022 erwartet. Erstmals wurde für alle deutschen Flussgebiete der Klimawandel flächendeckend als eine der wesentlichen Wasserbewirtschaftungsfragen anerkannt.

Bislang werden hinsichtlich des schlechten mengenmäßigen Zustands ausschließlich Grundwasserkörper ausgewiesen, die vom Braunkohletagebau beeinflusst sind. Landschaftsentwässerung durch Drainage, Entwässerungsgräben und Kanalisierung schlagen sich darin nicht nieder, obwohl sie sich auf den Grundwasserstand und damit auf grundwasserabhängige Feuchtgebiete und die Seenspiegel auswirken. Seen werden ab einer Größe von 50 ha unmittelbar von der Berichtspflicht nach Wasserrahmenrichtlinie erfasst. Von den mehr als 12.000 natürlichen Seen fallen etwa 750 in diese Kategorie.⁷ Nach den EU-Kriterien der Wasserrahmenrichtlinie waren 2015 nur 26,4 % der deutschen Seen in einem „guten“ oder „sehr guten“ ökologischen Zustand.⁸

Ein wichtiges Instrument zum Schutz der biologischen und damit auch der aquatischen Artenvielfalt stellt auf EU-Ebene die Natura-2000-Richtlinie dar. Im Zuge der Diskussion um die EU-Biodiversitätsstrategie werden weitere rechtliche Vorgaben erwartet, die auch im Kontext der Feuchtgebiete und Seen relevant sind.

6.2 Handlungsansätze

Am 8. Juni 2021 stellte das Bundesumweltministerium den Entwurf einer Strategie zu den zukünftigen Aufgaben der Wasserwirtschaft mit Zeitperspektive 2050 vor. Die Wasserstrategie zielt darauf ab, künftiger Wasserknappheit vorzubeugen und Nutzungskonflikte vorausschauend zu erkennen, den naturnahen Wasserhaushalt zu stärken und Böden als natürliche Wasserspeicher zu nutzen. Gleichzeitig soll in die Infrastruktur investiert werden, um Leitungsnetze an den Klimawandel anzupassen, regionale und überregionale Vernetzungen zu stärken und das Regenwassermanagement zu verbessern. Zur Umsetzung des Verursacherprinzips sollen Hersteller stärker in die Verantwortung genommen werden.

Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) veröffentlichte am 22. Dezember 2020 ihren Klimawandelbericht, der in der Bestandsaufnahme die Klimaauswirkungen auf

⁷ (vgl. https://www.gewaesser-bewertung.de/index.php?article_id=4&clang=0)

⁸ (vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/zustand-der-seen>)

Seen zusammenfassend sehr ähnlich darstellt wie die hier vorgelegte Blitzlichtstudie (vgl. LAWA-Klimawandelbericht 2020, Kap. 4.1.2.1). Neben dem Hochwassermanagement, das in der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie der EU und im nationalen Hochwasserschutzprogramm adressiert wird, erlangt angesichts länger anhaltender Trockenperioden auch das Niedrigwassermanagement stärkere Bedeutung. In einer umfangreichen Sammlung von Maßnahme-Steckbriefen zu bereits umgesetzten Praxisbeispielen stellt der LAWA-Klimawandelbericht auch Ansätze zu verbessertem Wasserrückhalt in der Fläche vor.

Wie auch im einführenden Beitrag dieser Studie angemerkt (Dokulil), könnten die Temperaturen in urbanen Räumen noch deutlich stärker ansteigen als im globalen Mittel. Bereits jetzt deuten sich angesichts sinkender Grundwasserstände Konflikte zwischen Trinkwasserförderung und Naturschutz an (Buss, OOWV). Die Berliner Landesarbeitsgemeinschaft Naturschutz e.V. hat am 22.03.2021 Klage beim Verwaltungsgericht Berlin eingelegt. Die Klage bezieht sich auf den Schutz der Berliner Moore in den FFH-Gebieten „Spandauer Forst“, „Müggelspree-Müggelsee“ und „Grunewald.“ Es geht hier insbesondere um einen Verstoß gegen geltendes FFH-Recht durch die Berliner Wasserwerke in Spandau, Friedrichshagen, Tiefwerder und Beelitzhof und Auswirkungen auf die Moore in den oben genannten FFH-Gebieten (vgl. BLN).

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) fordert in einem Positionspapier aus dem Jahr 2021 dazu auf, unsere Städte deutlich wasserbewusster zu entwickeln und unterbreitet dazu konkrete Empfehlungen. Für den besseren Umgang mit den Klimafaktoren Starkregen, Hochwasser, Trockenheit und Hitze, aber auch für den Wandel in Gesellschaft, Umwelt und Wirtschaft müssen bedarfsgerecht neue, zukunftsfähige Lösungen gefunden werden. Regenwasser muss deutlich stärker am natürlichen Wasserhaushalt orientiert bewirtschaftet werden (vgl. DWA – Position Wasserbewusste Entwicklung unserer Städte 2021). Stadtgewässer sollten renaturiert und zu „blau-grünen Achsen“ der ökologischen Vernetzung entwickelt werden, da die Beschattung und Verdunstung der Vegetation die Umgebungstemperaturen mess- und fühlbar senken. Besonders günstig wirkt eine Vegetation, für deren ausreichende Bewässerung vorrangig Regenwasser, aber auch Grundwasser oder aufbereitetes Abwasser genutzt wird.“

Die Bundesministerin für Ernährung und Landwirtschaft und die Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit haben gemeinsam mit allen Amtskolleginnen und -kollegen aus den Ländern im Oktober 2021 die Bund-Länder-Zielvereinbarung zum Klimaschutz durch Moorbodenschutz unterschrieben. Bis zum Jahr 2030 sollen damit die jährlichen Treibhausgasemissionen aus Moorböden um fünf Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente reduziert werden. Im Zentrum der Vereinbarung stehen Maßnahmen zur großflächigen Wiedervernässung entwässerter Moorböden. Die land- bzw. forstwirtschaftliche Nutzung auf diesen Standorten soll bei entsprechender Anpassung bzw. Umstellung weiterhin möglich sein und Paludikulturen sollen gefördert werden. Für Modellvorhaben werden bis 2025 rund 330 Millionen Euro zur Verfügung gestellt (vgl. BMU, Bund-Länder-Zielvereinbarung zum Moorbodenschutz).

6.3 Empfehlungen

In der vorliegenden Blitzlichtstudie Klima und Seen werden eine Reihe von Forschungsergebnissen und Veröffentlichungen vorgestellt, ohne dass ein Anspruch auf

Vollständigkeit erhoben wird. Gemeinsam mit den aufgeführten Praxisbeispielen und Fallbeispielen bietet die Blitzlichtstudie eine Grundlage für erste Schlussfolgerungen und Empfehlungen, die im Folgenden in Form zentraler Thesen für die weitere Diskussion zusammengefasst dargestellt werden.

Neben bereits erkennbaren Veränderungen von Wetter, Wind und insbesondere Temperaturen, die sich für die Zukunft teilweise extrapolieren lassen, ändern sich gleichzeitig ökologische Bedingungen (Bsp. Ausweitung von Neobiota) und zukünftig zu erwartende oder sich bereits abzeichnende zusätzliche Nutzungsansprüche. Diese sind in der Studie zum Teil bereits skizziert, z.B. Kühlwasser, umfassen aber auch weitere Aspekte, wie beispielweise die Entwicklung von Aquakultur, die hier nicht dezidiert dargestellt sind.

Insgesamt gesehen stehen viele Seen und Feuchtgebiete bereits jetzt an beziehungsweise jenseits der Grenze ihrer hydrologischen und ökosystemischen Belastbarkeit. Es muss sichergestellt werden, dass aktuelle und bisherige Erfolge im Management von Gewässern durch negative Entwicklungen und neue Ansprüche nicht wieder zunichte gemacht werden. Deshalb müssen vorhandene Nutzungen von und an Seen und Feuchtgebieten sowie zusätzliche Ansprüche vor dem Hintergrund zu erwartender Klimaentwicklungen kritisch geprüft und priorisiert werden, mit dem Ziel, die Gesamtbelastung der Ökosysteme zu reduzieren und das ökologische Gleichgewicht zu sichern.

In allen deutschen Flussgebieten zählt die Nährstoffbelastung zu den wichtigen Wasserbewirtschaftungsfragen nach Artikel 14.1.b WRRL. Die Eutrophierung gilt als eine der wesentlichen Ursachen für das Nichterreichen des in der Wasserrahmenrichtlinie formulierten guten ökologischen Zustands von Oberflächengewässern, die Nitratbelastung als Hauptfaktor für das Verfehlen des guten chemischen Zustands des Grundwassers. Aktuelle Klimaforschungen zu Seen und ihren Einzugsgebieten deuten auf Faktoren hin, die zu zusätzlichen Nährstoffeinträgen und damit zu verstärkten Algenblüten in Gewässern führen werden. Vorgaben und Rahmenbedingungen zur Reduzierung der Nährstoffeinträge sollten sowohl die höhere Wahrscheinlichkeit zusätzlicher Einträge aus dem Einzugsgebiet, beispielweise durch Starkregenereignisse, und weitere zusätzliche Belastungen stärker in Betracht ziehen.

Neben den Daten, die durch die zuständigen Stellen auf Bundes- und Länderebene erhoben werden, liegen bei weiteren Institutionen, wie z.B. den Wasserversorgern oder „Citizen Science“ Projekten, umfassende, zum Teil langjährige Messdaten vor, die in wesentlich größerem Umfang für die Bestandserfassung und die Ableitung notwendiger Maßnahmen zu Rate gezogen werden sollten. Hinsichtlich der Nährstoffbelastung gilt das insbesondere auch für alle Daten, die im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung erhoben werden.

Wenn Wasserversorger (wie z.B. der OÖVV) von den niedrigsten jemals gemessenen Grundwasserständen berichten, kann dies als weiteres Indiz für einen großflächigen Rückgang grundwasserabhängiger Feuchtgebiete und Kleingewässer sowie von Seenflächen angesehen werden. Wie groß der bislang aufgetretene Umfang dieser Entwicklung und ihr Gesamteffekt auf den Rückgang der aquatischen Biodiversität bereits ist, scheint gegenwärtig noch nicht vollumfänglich erfasst. Neben dem sich hier andeutenden Forschungsbedarf gibt es aber eine Reihe von Handlungsansätzen, wie den naturnahen Wasserrückhalt, denen sowohl hinsichtlich des Erhalts der Biodiversität, als auch des Klimaschutzes steigende Bedeutung zukommt.

Besonders effektiv hinsichtlich der Verringerung von CO₂ und Methanemissionen sind dabei die Anhebung des Wasserstandes und die Wiedervernässung von Moorflächen, die sich derzeit zu ca. 98 % als künstlich entwässert darstellen. Einen wesentlichen Handlungsschwerpunkt bilden dabei die zur landwirtschaftlichen Bewirtschaftung entwässerten ehemaligen Moorflächen, die neben der Tierhaltung zu den Hotspots der landwirtschaftlichen Klimagasemissionen zählen. Hier gilt es, den Moorschutz aus Gründen des Naturschutzes und des Klimaschutzes und der Klimaanpassung auszuweiten und ergänzend Maßnahmen zu angepasster Nutzung unter feuchten Bedingungen (Paludikultur) deutlich auszuweiten. Die Zuführung feuchter Standorte für die konventionelle Bewirtschaftung muss der Vergangenheit angehören.

Im heutigen Zustand sind viele Seen so stark durch menschliche Aktivitäten belastet, dass sie dem Klimawandel nicht unbeschadet widerstehen können. In Zeiten der Erwärmung und sommerlichen Austrocknung benötigen sie noch besseren Schutz. Das bedeutet vor allem die konsequente Vermeidung von Schadstoffeinträgen, die Renaturierung der Ufer und eine äußerst zurückhaltende Beanspruchung ihres Wassers für Bewässerung und Kühlung.

Geplante Maßnahmen weiterer Uferverbauung sollten unter Beachtung der begrenzten Tragfähigkeit der Seen stärker Gegenstand strategischer Umweltprüfungen werden, umfangreichere Pufferzonen und ungenutzte Gewässerrandstreifen angelegt und naturnahe Flachwasserzonen umfangreicher wiederhergestellt werden. Leitfäden zur Gestaltung von Gewässerrandstreifen sind in den Bundesländern aufgestellt (vgl. z.B. LUBW u. WBWF, Gewässerrandstreifen in Baden-Württemberg, 2015). Zur Verbesserung der Finanzierungsmöglichkeiten bietet sich ein bundesweites Förderprogramm zur Renaturierung von Seen und Feuchtgebieten an.

In einem Strategiepapier, das ursprünglich im Auftrag der Ramsar-Konvention über Feuchtgebiete erstellt wurde (Erwin 2008), wurden zehn Empfehlungen für Wissenschaftler, Praktiker und politische Entscheidungsträger formuliert, um Handlungsmöglichkeiten und Perspektiven aufzuzeigen und eine Diskussion anzuregen, mit dem Ziel, eine neue Richtung für den globalen Feuchtgebietsschutz in einer sich verändernden Welt zu entwickeln. Ein wichtiges Ziel ist, die nicht-klimatischen Stressfaktoren für Ökosysteme deutlich zu reduzieren: Die Verringerung der durch menschliche Aktivitäten verursachten negativen Wirkungen erhöht die Widerstandsfähigkeit von Lebensräumen und Arten gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels.

Wenn Klimawandel und -schwankungen nicht proaktiv berücksichtigt werden, sind die Erfolgsaussichten langfristiger Schutz- und Erhaltungspläne deutlich geringer. Auch Maßnahmen zur Kontrolle invasiver Arten sind dabei unerlässlich, da die sich verändernden Klimabedingungen das Risiko der Ausbreitung invasiver Arten erhöhen. Nach Aussagen in der umfangreichen wissenschaftlichen Literatur, die derzeit zur Verfügung steht, ist es sehr wahrscheinlich, dass der prognostizierte Klimawandel die Gesamt-Phosphor-Belastungen von Seen erhöhen und – in der Regel aufgrund von Cyanobakterien – zu einer Verschlechterung des ökologischen Zustands der Gewässer führen wird. Zu Anpassungsmaßnahmen in nördlichen gemäßigten Zonen gehören eine konsequent nachhaltige Landwirtschaft, eine verbesserte Nährstoff- und Bodenbewirtschaftung mit geringeren Nährstoffverlusten in die Oberflächengewässer, eine geringere Belastung aus Punktquellen, die Wiederherstellung degradierter Feuchtgebiete und Uferzonen und die Renaturierung von kanalisiertem Flüssen. Im trockeneren Südeuropa muss die Wassernutzung durch den Menschen eingeschränkt

werden, insbesondere in der Bewässerungslandwirtschaft. Der Erfolg dieser Maßnahmen wird weitgehend von Einbeziehung lokaler Gemeinschaften in den Anpassungsprozess abhängen (Jeppesen et al. 2009).

Die Studie zeigt auch, dass es innerhalb der einzelnen Sektoren (Wissenschaft, Öffentlichkeit, Privatwirtschaft, zivile Organisationen) viele Faktoren gibt, die bei der Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf Seen beachtet werden müssen. Bei diesen Faktoren ist zu berücksichtigen, dass sie miteinander interagieren und die Auswirkungen verstärken oder gegenläufig beeinflussen können. Aus diesen Multi-Stakeholder- und Multisektor-Netzwerken müssen Vorschläge hervorgehen, die nicht nur der Weiterentwicklung von Wissen, sondern auch der Maßnahmen im Hinblick auf das ökologische Gleichgewicht und den guten Zustand von Gewässern im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie dienen. Dazu soll die vorliegende Studie Klimawandel und Seen einen Beitrag leisten.

Literaturverzeichnis

- Adrian, R., O'Reilly, C. M., Zagarese, H., Baines, S. B., Hessen, D. O., Keller, W. & Winder, M. (2009). Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and oceanography*, 54(6part2), 2283-2297.
- BAFU (Hrsg.) (2021). Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101: 134 S.
- Bartram, J., Carmichael, W. W., Chorus, I., Jones, G. & Skulberg, O. (1999). Eutrophication, cyanobacterial blooms and surface scums. Toxic cyanobacteria in water. E & FN Spon, London, UK, 5-7.
- Bastviken, D., Tranvik, L. J., Downing, J. A., Crill, P. M. & Enrich-Prast, A. (2011). Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. *Science*, 331(6013), 50-50.
- Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A., Frei, C., Goyette, S. & Woth, K. (2007). Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic change*, 81(1), 71-95.
- Bergkemper, V. & Weisse, T. (2017). Phytoplankton response to the summer 2015 heat wave—a case study from prealpine Lake Mondsee, Austria. *Inland Waters*, 7(1), 88-99.
- Bergkemper, V., Stadler, P. & Weisse, T. (2018). Moderate weather extremes alter phytoplankton diversity – A microcosm study. *Freshwater Biology*, 63(10), 1211-1224.
- BMU (2021). Bund-Länder-Zielvereinbarung zum Moorbodenschutz. <https://www.bmu.de/download/bund-laender-zielvereinbarung-zum-moorbodenschutz>
- BMU / Franz Emde (2021). Entwurf für eine Nationale Wasserstrategie. 73 S. <https://www.bmu.de/download/nationale-wasserstrategie/>
- Briand, J. F., Jacquet, S., Bernard, C. & Humbert, J. F. (2003). Health hazards for terrestrial vertebrates from toxic cyanobacteria in surface water ecosystems. *Veterinary research*, 34(4), 361-377.
- Brisson, J., Rodriguez, M., Martin, C. A. & Proulx, R. (2020). Plant diversity effect on water quality in wetlands: a meta-analysis based on experimental systems. *Ecological Applications*, 30(4), e02074.
- Brümmer, F. & Müller, A. (2015). Süßwasserschwämme (Porifera: Spongillidae) in Baden-Württemberg. *Jahreshefte der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg*, 171, 259-282.
- Brümmer, F., Müller, C., Winkler, K., Fritz, G. B., Müller R. W. & Schill, R. O. (2016). Scientific Diving - What is happening under the water surface? First ECSA Conference 2016 Citizen Science – Innovation in Open Science, Society and Policy, Berlin. Abstract.
- Brümmer, F., Remmers, D., Müller, R. W. & Scholz, S. (2021). Introduction of the technical diving method for scientific diving to investigate biocoenosis in the twilight zone of fresh-water lakes. *Freiberg online geoscience*, 58, 46.
- Brümmer, F., Shegeftfard, N., Tersteegen, J., Vetter, W. & Schill, R.O. (2020). Zur Biologie und Ökologie der Dreikantmuscheln *Dreissena polymorpha* (Zebra-Muschel) und *Dreissena rostriformis bugensis* (Quagga-Muschel) (Bivalvia: Dreissenidae) sowie zu

- deren Verbreitung in Baden-Württemberg. *Jh. Ges. Naturkde. Württemberg* 176:319–90.
- Brümmer, F., Tersteegen, J., Rapp, L., Beck, R., Schenk-Trautmann, T., Ramm, A. & Müller, R.W. (2021b). Monitoring the invasive quagga mussel by recreational divers in a citizen science project. *Freiberg Online Geoscience* 58: 54–65.
- Bueche, T. & Vetter, M. (2015). Future alterations of thermal characteristics in a medium-sized lake simulated by coupling a regional climate model with a lake model. *Climate Dynamics*, 44(1-2), 371-384.
- Bueche, T., Hamilton, D. P. & Vetter, M. (2017). Using the General Lake Model (GLM) to simulate water temperatures and ice cover of a medium-sized lake: a case study of Lake Ammersee, Germany. *Environmental Earth Sciences*, 76(13), 1-14.
- Bundesregierung, D. (2008). Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am, 17, 1-78.
- Bundesregierung, D. (2020). Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Chucholl, C. & Brinker, A. (2017). Der Schutz der Flusskrebse - ein Leitfaden. Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, 84 Seiten.
- Chucholl, C. & Dehus, P. (2011). Flusskrebse in Baden-Württemberg. Fischereiforschungsstelle Baden-Württemberg (FFS), Langenargen, 92 S.
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J. & Thornton, P. (2014). Carbon and other biogeochemical cycles. In *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 465-570). Cambridge University Press.
- CNN (2020), see <https://edition.cnn.com/2020/11/13/americas/pantanal-fires-climate-change-intl/index.html>
- Cole, J. J., Prairie, Y. T., Caraco, N. F., McDowell, W. H., Tranvik, L. J., Striegl, R. G & Melack, J. (2007). Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 10(1), 172-185.
- Cremona, F., Tuvikene, L., Haberman, J., Noges, P. & Noges, T. (2018). Factors controlling the three-decade long rise in cyanobacteria biomass in a eutrophic shallow lake. *Science of The Total Environment*, 621, 352-359.
- Deng, J., Zhang, Y., Qin, B., Yao, X. & Deng, Y. (2017). Trends of publications related to climate change and lake research from 1991 to 2015. *Journal of Limnology*, 76(3).
- DER GEMEINSCHAFT, E. O. F. M. (2000). Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.
- Dexter, E. & Bollens, S. M. (2020). Zooplankton invasions in the early 21st century: a global survey of recent studies and recommendations for future research. *Hydrobiologia*, 847(1), 309-319.
- Dinsmore, K. J., Skiba, U. M., Billett, M. F. & Rees, R. M. (2009). Effect of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms. *Plant and Soil*, 318(1), 229-242.
- Dokulil, M. T. (2000). Die Bedeutung hydroklimatischer Ereignisse für die Dynamik des Phytoplanktons in einem alpinen Klarwassersee (Mondsee, Österreich). *Gewässerökologie Norddeutschlands*, 4, 87-93.

- Dokulil, M. T. (2014a). Impact of climate warming on European inland waters. *Inland Waters*, 4(1), 27-40.
- Dokulil, M. T. (2014b). Predicting summer surface water temperatures for large Austrian lakes in 2050 under climate change scenarios. *Hydrobiologia*, 731(1), 19-29.
- Dokulil, M. T. (2014c). Old wine in new skins: eutrophication reloaded: global perspectives of potential amplification by climate warming, altered hydrological cycle and human interference. *Eutrophication*. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- Dokulil, M. T. (2016). Climate impacts on ecohydrological processes in aquatic systems. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 16(1), 66-70.
- Dokulil, M. T. & Teubner, K. (2003). Klimaeinflüsse auf Seen in Europa (CLIME). *Österreichs Fischerei*, 56(7), 176-179.
- Dokulil, M. T. & Teubner, K. (2011). Eutrophication and climate change: present situation and future scenarios. In *Eutrophication: causes, consequences and control* (pp. 1-16). Springer, Dordrecht.
- Dokulil, M. T. & Teubner, K. (2012). Deep living *Planktothrix rubescens* modulated by environmental constraints and climate forcing. In *Phytoplankton responses to human impacts at different scales* (pp. 29-46). Springer, Dordrecht.
- Dokulil, M. T., de Eyto, E., Maberly, S. C., May, L., Weyhenmeyer, G. A. & Woolway, R. I. (2021). Increasing maximum lake surface temperature under climate change. *Climatic Change*, 165(3), 1-17.
- Dokulil, M. T., Herzig, A., Somogyi, B., Vörös, L., Donabaum, K., May, L. & Nöges, T. (2014). Winter conditions in six European shallow lakes: a comparative synopsis. *Estonian Journal of Ecology*, 63(3), 111-129.
- Dokulil, M. T., Humpesch, T., Pöckl, U. H. & Schmidt, R. (1993). Auswirkungen geänderter Klimaverhältnisse auf die Ökologie von Oberflächengewässer in Österreich. ÖAW, Kommission für Reinhaltung der Luft (Ed.), Bestandsaufnahme anthropogene Klimaänderungen: mögliche Auswirkungen auf Österreich-mögliche Massnahmen in Österreich, 5-1.
- Dokulil, M. T., Jagsch, A., George, G. D., Anneville, O., Jankowski, T., Wahl, B. & Teubner, K. (2006b). Twenty years of spatially coherent deepwater warming in lakes across Europe related to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography*, 51(6), 2787-2793.
- Dokulil, M. T., Teubner, K. & Jagsch, A. (2006a). Climate change affecting hypolimnetic water temperatures in deep alpine lakes. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 29(3), 1285-1288.
- Doubek, J.P., Anneville, O., Dur, G., et al. (2021). The extent and variability of storm-induced temperature changes in lakes measured with long-term and high-frequency data. *Limnology Oceanography* 66: 1979-1992
- Drösler, M., Freibauer, A., Christensen, T. R. & Friberg, T. (2008). Observations and status of peatland greenhouse gas emissions in Europe. In *the continental-scale greenhouse gas balance of Europe* (pp. 243-261). Springer, New York, NY.
- DWA – Position Wasserbewusste Entwicklung unserer Städte (2021). [https://de.dwa.de/files/ media/content/01_DIE_DWA/Politikinformationen/Positionspapiere/Positionspapier Wasserbewusste Entwicklung unserer St%C3%A4dte 2021 Netz.pdf](https://de.dwa.de/files/media/content/01_DIE_DWA/Politikinformationen/Positionspapiere/Positionspapier_Wasserbewusste_Entwicklung_unserer_St%C3%A4dte_2021_Netz.pdf)

- Eisenreich, S. J., Bernasconi, C., Campostrini, P., De Roo, A., George, G., Heiskanen, A. S. & Cornell, S. E. (2005). Climate Change and the European Water Dimension. Recommendations and Key Findings.
- Ernst, B., Hoeger, S. J., O'Brien, E. & Dietrich, D. R. (2007). Physiological stress and pathology in European whitefish (*Coregonus lavaretus*) induced by subchronic exposure to environmentally relevant densities of *Planktothrix rubescens*. *Aquatic toxicology*, 82(1), 1526.
- Ernst, B., Hoeger, S. J., O'Brien, E. & Dietrich, D. R. (2009). Abundance and toxicity of *Planktothrix rubescens* in the pre-alpine Lake Ammersee, Germany. *Harmful Algae*, 8(2), 329-342.
- Erwin, K. L. (2009). Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and management*, 17(1), 71-84.
- EUA (2019). Europäische Umweltagentur – Qualität der europäischen Badegewässer 2018. 18 Seiten.
- European Commission (2021). Forging a climate-resilient Europe - the new EU Strategy on Adaptation to Climate Change. Communication from The Commission to The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions COM(2021) 82 final.
- Evans, C. D., Peacock, M., Baird, A. J., Artz, R. R. E., Burden, A., Callaghan, N. & Morrison, R. (2021). Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature*, 593(7860), 548-552.
- Falconer, I. R. (2001). Toxic cyanobacterial bloom problems in Australian waters: risks and impacts on human health. *Phycologia*, 40(3), 228-233.
- Feldbauer, J., Kneis, D., Hegewald, T., Berendonk, T. U. & Petzoldt, T. (2020). Managing climate change in drinking water reservoirs: potentials and limitations of dynamic withdrawal strategies. *Environmental Sciences Europe*, 32(1), 1-17.
- Ficker, H., Luger, M. & Gassner, H. (2017). From dimictic to monomictic: Empirical evidence of thermal regime transitions in three deep alpine lakes in Austria induced by climate change. *Freshwater Biology*, 62(8), 1335-1345.
- Fischer, E. M., Sippel, S. & Knutti, R. (2021). Increasing probability of record-shattering climate extremes. *Nature Climate Change*, 1-7.
- Fitz, H. C., DeBellevue, E. B., Costanza, R., Boumans, R., Maxwell, T., Wainger, L. & Sklar, F. H. (1996). Development of a general ecosystem model for a range of scales and eco-systems. *Ecological modelling*, 88(1-3), 263-295.
- Friedrich, K., Grossman, R. L., Huntington, J., Blanken, P. D., Lenters, J., Holman, K. D. & Kowalski, T. (2018). Reservoir evaporation in the Western United States: current science, challenges, and future needs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(1), 167-187.
- Fritz, G. B., Pfannkuchen, M., Reuner, A., Schill, R. O., & Brummer, F. (2009). *Craspedacusta sowerbii*, Lankester 1880-population dispersal analysis using COI and ITS sequences.
- Fritz, G. B., Schill, R. O. & Brummer, F. (2008). Public awareness and scientific interest – obtaining data on nonindigenous species. In: Rabitsch, W., F. Essl & F. Klingenstein (Hrsg.): *Biological Invasions – from Ecology to Conservation*. NEOBIOOTA 7, 41-45.

- Fritz, G. B., Schill, R. O., Pfannkuchen, M. & Brümmer, F. (2007). The freshwater jellyfish *Craspedacusta sowerbii* Lankester, 1880 (Limnomedusa: Olindiidae) in Germany, with a brief note on its nomenclature.
- George, G. (2010). The impact of climate change on European lakes. In the Impact of Climate Change on European Lakes (pp. 1-13). Springer, Dordrecht.
- Gerten, D. & Adrian, R. (2000). Climate-driven changes in spring plankton dynamics and the sensitivity of shallow polymictic lakes to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography*, 45(5), 1058-1066.
- Gilbert, M., Weiß, J., Vogel, B., Bernhard, S. & Brümmer, F. (2019). Der Kulkwitzer See (Leipzig, Sachsen) als Referenzgewässer für die neuen Seen der Bergbaufolgelandschaft Mitteldeutschlands–Tauchuntersuchungen zur Ökologie und Biodiversität. Jahreshefte der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 175, 293-387.
- Gillefalk, M., Tetzlaff, D., Hinkelmann, R., Kuhlemann, L. M., Smith, A., Meier, F. & Soulsby, C. (2021). Quantifying the effects of urban green space on water partitioning and ages using an isotope-based ecohydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-27.
- Greifswald Moor Centrum (2019). Faktenpapier Moorklimaschutz. Moorbodenschutz als naturbasierte Lösung im Klimaschutzprogramm 2030 – schnelle Einstellung von Moor-Entwässerung für wirkungsvollen Klimaschutz nötig! https://greifswaldmoor.de/files/dokumente/Infopapiere_Briefings/2019-09-Faktenpapier_MoorklimaschutzDE_4S.pdf. Accessed 30 May 2020
- Griffin, B. J., Kohfeld, K. E., Cooper, A. B. & Boenisch, G. (2010). Importance of location for describing typical and extreme wind speed behavior. *Geophysical research letters*, 37(22).
- Gronchi, E., Jöhnk, K. D., Straile, D., Diehl, S. & Peeters, F. (2021). Local and continental-scale controls of the onset of spring phytoplankton blooms: Conclusions from a proxy-based model. *Global change biology*, 27(9), 1976-1990.
- Gu, R. & Stefan, H. G. (1990). Year-round temperature simulation of cold climate lakes. *Cold Regions Science and Technology*, 18(2), 147-160.
- Günther, A., Barthelmes, A., Huth, V., Joosten, H., Jurasinski, G., Koebisch, F. & Couwenberg, J. (2020). Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions. *Nature communications*, 11(1), 1-5.
- Günther-Diringer, D., Berner, K., Koenzen, U., Kurth, A., Modrak, P., Ackermann, W. & Heyden, J. (2021). Methodische Grundlagen zum Auenzustandsbericht 2021: Erfassung, Bilanzierung und Bewertung von Flussauen. Bundesamt für Naturschutz.
- Hamilton, D. P., Carey, C. C., Arvola, L., Arzberger, P., Brewer, C., Cole, J. J. & Brookes, J. D. (2015). A Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON) for synthesising high-frequency sensor data for validation of deterministic ecological models. *Inland Waters*, 5(1), 49-56.
- Hansen, G. J., Read, J. S., Hansen, J. F. & Winslow, L. A. (2017). Projected shifts in fish species dominance in Wisconsin lakes under climate change. *Global Change Biology*, 23(4), 1463-1476.
- Harms, O., Dister, E., Gerstner, L., Damm, C., Egger, G., Heim, D. & Modrak, P. (2018). Potenziale zur naturnahen Auenentwicklung: Bundesweiter Überblick und methodische Empfehlungen für die Herleitung von Entwicklungszielen. BfN, Bundesamt für Naturschutz.

- Hartje, V., Wüstemann, H. & Bonn, A. (Eds.). (2015). *Naturkapital und Klimapolitik: Synergien und Konflikte*. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung-UFZ.
- Hipsey, M. R., Hamilton, D. P., Hanson, P. C., Carey, C. C., Coletti, J. Z., Read, J. S. & Brookes, J. D. (2015). Predicting the resilience and recovery of aquatic systems: A framework for model evolution within environmental observatories. *Water Resources Research*, 51(9), 7023-7043.
- Ho, L. & Goethals, P. (2020). Research hotspots and current challenges of lakes and reservoirs: a bibliometric analysis. *Scientometrics*, 124(1), 603-631.
- Hobbie, J. E., Peterson, B. J., Bettez, N., Deegan, L., O'Brien, W. J., Kling, G. W. & Hershey, A. E. (1999). Impact of global change on the biogeochemistry and ecology of an Arctic freshwater system. *Polar Research*, 18(2), 207-214.
- Huber, V., Adrian, R. & Gerten, D. (2008). Phytoplankton response to climate warming modified by trophic state. *Limnology and Oceanography*, 53(1), 1-13.
- HWRM-RL (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (Hochwasserrisikomanagementrichtlinie. In: Amtsblatt der EU vom 06.11.2007, Nr. L 288, S. 27-34.
- Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (igkb) (Hrsg.). (2019). *Quagga-Muschel im Bodensee—Faktenblatt der IGKB*.
- Ito, Y. & Momii, K. (2015). Impacts of regional warming on long-term hypolimnetic anoxia and dissolved oxygen concentration in a deep lake. *Hydrological Processes*, 29(9), 2232-2242.
- Janatian, N., Olli, K., Cremona, F., Laas, A. & Nöges, P. (2020). Atmospheric stilling offsets the benefits from reduced nutrient loading in a large shallow lake. *Limnology and Oceanography*, 65(4), 717-731.
- Jane, S. F., Hansen, G. J., Kraemer, B. M., Leavitt, P. R., Mincer, J. L., North, R. L. & Rose, K. C. (2021). Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature*, 594(7861), 6670.
- Jeppesen, E., Kronvang, B., Meerhoff, M., Søndergaard, M., Hansen, K. M., Andersen, H. E. & Olesen, J. E. (2009). Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations. *Journal of environmental quality*, 38(5), 1930-1941.
- Jeppesen, E., Kronvang, B., Olesen, J. E., Audet, J., Søndergaard, M., Hoffmann, C. C. & Özkan, K. (2011). Climate change effects on nitrogen loading from cultivated catchments in Europe: implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation. *Hydrobiologia*, 663(1), 1-21.
- Jeppesen, E., Meerhoff, M., Holmgren, K., González-Bergonzoni, I., Teixeira-de Mello, F., Declerck, S. A. & Lazzaro, X. (2010). Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. *Hydrobiologia*, 646(1), 73-90.
- Jeppesen, E., Mehner, T., Winfield, I. J., Kangur, K., Sarvala, J., Gerdeaux, D. & 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.
- Jing, M., Kumar, R., Heße, F., Thober, S., Rakovec, O., Samaniego, L. & Attinger, S. (2020). Assessing the response of groundwater quantity and travel time distribution to 1.5, 2, and 3 C global warming in a mesoscale central German basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1511-1526.

- Kahlenborn, W., Porst, L., Voß, A., Fritsch, U., Renner, K., Zebisch, M. & Schauser, I. (2021). Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland (KWRA 2021) / Umweltbundesamt, Fachgebiet I 1.6 KomPass. Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Forschungszahl 3717 48 102 0 FB000574/KURZ
- Kainz, M. J., Ptacnik, R., Rasconi, S. & Hager, H. H. (2017). Irregular changes in lake surface water temperature and ice cover in subalpine Lake Lunz, Austria. *Inland Waters*, 7(1), 2733.
- Kerimoglu, O. & Rinke, K. (2013). Stratification dynamics in a shallow reservoir under different hydro-meteorological scenarios and operational strategies. *Water Resources Research*, 49(11), 7518-7527.
- Kornhuber, K., Osprey, S., Coumou, D., Petri, S., Petoukhov, V., Rahmstorf, S. & Gray, L. (2019). Extreme weather events in early summer 2018 connected by a recurrent hemispheric wave-7 pattern. *Environmental Research Letters*, 14(5), 054002.
- Kuefner, W., Hofmann, A. M., Geist, J. & Raeder, U. (2020). Evaluating climate change impacts on mountain lakes by applying the new silicification value to paleolimnological samples. *Science of The Total Environment*, 715, 136913.
- Ladwig, R., Furusato, E., Kirillin, G., Hinkelmann, R. & Hupfer, M. (2018). Climate change demands adaptive management of urban lakes: model-based assessment of management scenarios for Lake Tegel (Berlin, Germany). *Water*, 10(2), 186.
- Lahmer, W., Pfützner, B. & Becker, A. (2001). Assessment of land use and climate change impacts on the mesoscale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(7-8), 565-575.
- Lanz, K. et al. (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz*, Nr. 43, Bern. ISBN 978-3-9524235-54.
- Latifovic, R. & Pouliot, D. (2007). Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record. *Remote Sensing of Environment*, 106(4), 492-507.
- Lau, D. C., Christoffersen, K. S., Erkinaro, J., Hayden, B., Heino, J., Hellsten, S. & Gdeodkoop, W. (2020). Multitrophic biodiversity patterns and environmental scripts of sub-Arctic lakes in northern Europe. *Freshwater Biology*.
- LM MV (Ministry of Agriculture and Environment Mecklenburg-Vorpommern) (2017) Umsetzung von Paludikultur auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in Mecklenburg-Vorpommern. Fachstrategie zur Umsetzung der nutzungsbezogenen Vorschläge des Moorschutzkonzeptes. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt- und Verbraucher-schutz Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin 98 p.
<https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/lm/Umwelt/Nachhaltige-Entwicklung/Schutz-und-Nutzung-der-Moore-in-MV/?id=15227&processor=veroeff>
- LAWA (2020): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder 2020 (Kurztitel: LAWA Klimawandel-Bericht 2020). Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).
- Lázaro, W. L., Oliveira-Júnior, E. S., Silva, C. J. D., Castrillon, S. K. I. & Muniz, C. C. (2020). Climate change reflected in one of the largest wetlands in the world: an overview of the Northern Pantanal water regime. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 32.

- Lehikoinen, A., Jaatinen, K., Vähätalo, A. V., Clausen, P., Crowe, O., Deceuninck, B. & Fox, A. D. (2014). Rapid climate driven shifts in wintering distributions of three common waterbird species. *Global change biology*, 19(7), 2071-2081.
- Lieberherr, G. & Wunderle, S. (2018). Lake surface water temperature derived from 35 years of AVHRR sensor data for European lakes. *Remote sensing*, 10(7), 990.
- Livingstone, D. M. (2003). Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake. *Climatic change*, 57(1), 205-225.
- Livingstone, D. M. & Dokulil, M. T. (2001). Eighty years of spatially coherent Austrian lake surface temperatures and their relationship to regional air temperature and the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography*, 46(5), 1220-1227.
- Livingstone, D. M., Adrian, R., Arvola, L., Blenckner, T., Dokulil, M. T., Hari, R. E. & Weyhenmeyer, G. A. (2010). Regional and supra-regional coherence in limnological variables. In *The impact of climate change on European lakes* (pp. 311-337). Springer, Dordrecht.
- LUBW (2021) Bodensee: Winter war für eine Durchmischung nicht kalt genug.
- Luger, M., Kammerlander, B., Blatterer, H. & Gassner, H. (2021). Von der Eutrophierung in die Klimaerwärmung—45 Jahre limnologisches Monitoring Mondsee. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 1-8.
- Magnuson, J. J., Meisner, J. D. & Hill, D. K. (1990). Potential changes in the thermal habitat of Great Lakes fish after global climate warming. *Transactions of the American Fisheries Society*, 119(2), 254-264.
- Magnuson, J. J., Robertson, D. M., Benson, B. J., Wynne, R. H., Livingstone, D. M., Arai, T. & Vuglinski, V. S. (2000). Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere. *Science*, 289(5485), 1743-1746.
- Mantzouki, E., Campbell, J., Van Loon, E., Visser, P., Konstantinou, I., Antoniou, M. & Bravo, A. G. (2018). A European Multi Lake Survey dataset of environmental variables, phytoplankton pigments and cyanotoxins. *Scientific data*, 5(1), 1-13.
- Marengo, J. A., Alves, L. M. & Torres, R. R. (2016). Regional climate change scenarios in the Brazilian Pantanal watershed. *Climate Research*, 68(2-3), 201-213.
- Markovic, D., Carrizo, S. F., Kärcher, O., Walz, A. & David, J. N. (2017). Vulnerability of European freshwater catchments to climate change. *Global Change Biology*, 23(9), 3567-3580.
- Messenger, M. L., Lehner, B., Grill, G., Nedeva, I. & Schmitt, O. (2016). Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature communications*, 7(1), 1-11.
- Monchamp, M. E., Spaak, P., Domaizon, I., Dubois, N., Bouffard, D. & Pomati, F. (2018). Homogenization of lake cyanobacterial communities over a century of climate change and eutrophication. *Nature ecology & evolution*, 2(2), 317-324.
- Mooij, W. M., Hülsmann, S., Domis, L. N. D. S., Nolet, B. A., Bodelier, P. L., Boers, P. C. & Lammens, E. H. (2005). The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review. *Aquatic Ecology*, 39(4), 381-400.
- Murphy, G. E., Romanuk, T. N. & Worm, B. (2020). Cascading effects of climate change on plankton community structure. *Ecology and evolution*, 10(4), 2170-2181.
- Nachtnebel, H. P., Dokulil, M., Kuhn, M., Loiskandl, W., Sailer, R., Schöner, W. & Viglione, A. (2014). Kapitel 2: Der Einfluss des Klimawandels auf die Hydrosphäre. In: *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. Austrian Panel on

- Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 411–466.
- NCCS (Hrsg.) (2021). Schweizer Gewässer im Klimawandel. National Centre for Climate Services, Zürich. 28 S. ISBN 978-3-9525413-3-3
- Niedda, M., Pirastru, M., Castellini, M. & Giadrossich, F. (2014). Simulating the hydrological response of a closed catchment-lake system to recent climate and land-use changes in semi-arid Mediterranean environment. *Journal of Hydrology*, 517, 732-745.
- NOAA National Centers for Environmental Information (2021) State of the Climate: Global Climate Report for July 2021. publ. online August 2021, retrieved August 14.
- Nöges, P., Cremona, F., Laas, A., Martma, T., Rõõm, E. I., Toming, K. & Nöges, T. (2016). Role of a productive lake in carbon sequestration within a calcareous catchment. *Science of the Total Environment*, 550, 225-230.
- Noges, T., Janatian, N., Laugaste, R. & Noges, P. (2020). Post-soviet changes in nitrogen and phosphorus stoichiometry in two large non-stratified lakes and the impact on phyto-plankton. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01369.
- Noges, T., Järvet, A., Kisand, A., Laugaste, R., Loigu, E., Skakalski, B. & Noges, P. (2007). Reaction of large and shallow lakes Peipsi and Võrtsjärv to the changes of nutrient load-ing. In *Shallow Lakes in a Changing World* (pp. 253-264). Springer, Dordrecht.
- Oldorff, S., Kiel, E., Krautkrämer, V., Brümmer, F., Pudwill, R., Yasser, S. & Kirschey, T. (2018). „Submerse Makrophyten und Zustandsbewertung von ausgewählten Gewässern im östlichen Land Brandenburg mit Anmerkungen zu biologischen Invasionen – Ergebnisse einer Exkursion des DGL Arbeitskreises Tauchen in der Limnologie“. Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL) Ergebnisse der Jahrestagung 2017 (Cottbus) 342–53.
- O'Reilly, C. M., Alin, S. R., Plisnier, P. D., Cohen, A. S. & McKee, B. A. (2003). Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. *Nature*, 424(6950), 766-768.
- O'Reilly, C. M., Sharma, S., Gray, D. K., Hampton, S. E., Read, J. S., Rowley, R. J. & Zhang, G. (2015). Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters*, 42(24), 10-773.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R. & van Ypserle, J. P. (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 (p. 151). *ipcc*.
- Pareeth, S., Bresciani, M., Buzzi, F., Leoni, B., Lepori, F., Ludovisi, A. & Salmaso, N. (2017). Warming trends of perialpine lakes from homogenised time series of historical satellite and in-situ data. *Science of the Total Environment*, 578, 417-426.
- Pavón-Jordán, D., Fox, A. D., Clausen, P., Dagys, M., Deceuninck, B., Devos, K. & Lehikoinen, A. (2015). Climate-driven changes in winter abundance of a migratory waterbird in relation to EU protected areas. *Diversity and Distributions*, 21(5), 571-582.
- Peeters, F., Livingstone, D. M., Goudsmit, G. H., Kipfer, R. & Forster, R. (2002). Modeling 50 years of historical temperature profiles in a large central European lake. *Limnology and Oceanography*, 47(1), 186-197.
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N. & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422.

- Perga, M. E., Bruel, R., Rodriguez, L., Guénand, Y. & Bouffard, D. (2018). Storm impacts on alpine lakes: Antecedent weather conditions matter more than the event intensity. *Global Change Biology*, 24(10), 5004-5016.
- Persson, I., Jones, I., Sahlberg, J., Dokulil, M., Hewitt, D., Leppäranta, M. & Blenckner, T. (2005). Modeled thermal response of three European lakes to a probable future climate. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 29(2), 667-671.
- Pighini, S., Ventura, M., Miglietta, F. & Wohlfahrt, G. (2018). Dissolved greenhouse gas concentrations in 40 lakes in the Alpine area. *Aquatic Sciences*, 80(3), 1-13.
- Pilla, R. M., Williamson, C. E., Adamovich, B. V., Adrian, R., Anneville, O., Chandra, S. & Zadereev, E. (2020). Deeper waters are changing less consistently than surface waters in a global analysis of 102 lakes. *Scientific reports*, 10(1), 1-15.
- Ptak, M., Sojka, M. & Kozłowski, M. (2019). The increasing of maximum lake water temperature in lowland lakes of Central Europe: case study of the Polish Lakeland. In *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology* (Vol. 55, p. 6). EDP Sciences.
- Ptak, M., Wrzesiński, D. & Choiński, A. (2017). Long-term changes in the hydrological regime of high mountain lake Morskie Oko (Tatra Mountains, Central Europe). *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 65(2), 146-153.
- Reid, P. C., Hari, R. E., Beaugrand, G., Livingstone, D. M., Marty, C., Straile, D. & Zhu, Z. (2016). Global impacts of the 1980s regime shift. *Global change biology*, 22(2), 682-703.
- Robertson, D. M. & Ragotzkie, R. A. (1990). Changes in the thermal structure of moderate to large sized lakes in response to changes in air temperature. *Aquatic Sciences*, 52(4), 360-380.
- Salmaso, N., Capelli, C., Shams, S. & Cerasino, L. (2015). Expansion of bloom-forming *Dolichospermum lemmermannii* (Nostocales, Cyanobacteria) to the deep lakes south of the Alps: colonization patterns, driving forces and implications for water use. *Harmful Algae*, 50, 76-87.
- Schindler, D. W. (1997). Widespread effects of climatic warming on freshwater ecosystems in North America. *Hydrological processes*, 11(8), 1043-1067.
- Schindler, D. W., Bayley, S. E., Parker, B. R., Beaty, K. G., Cruikshank, D. R., Fee, E. J. & Stainton, M. P. (1996). The effects of climatic warming on the properties of boreal lakes and streams at the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario. *Limnology and Oceanography*, 41(5), 1004-1017.
- Schmidt, R., Kamenik, C., Kaiblinger, C. & Hetzel, M. (2004). Tracking Holocene environmental changes in an alpine lake sediment core: application of regional diatom calibration, geochemistry, and pollen. *Journal of Paleolimnology*, 32(2), 177-196.
- Schuster, S. (1976): Die monatlichen Wasservogelzählungen am Bodensee 1961/62 bis 1974/75. 2. Teil: Schwäne und Gründelenten. *Ornithol. Beob.* 73: 49-65.
- Segura, A. M., Sarthou, F. & Kruk, C. (2018). Morphology-based differences in the thermal response of freshwater phytoplankton. *Biology letters*, 14(5), 20170790.
- Sharma, S., Blagrove, K., Filazzola, A., Imrit, M. A. & Hendricks Franssen, H. J. (2021). Forecasting the Permanent Loss of Lake Ice in the Northern Hemisphere Within the 21st Century. *Geophysical research letters*, 48(1), e2020GL091108.

- Sharma, S., Blagrove, K., Magnuson, J. J., O'Reilly, C. M., Oliver, S., Batt, R. D. & Woolway, R. I. (2019). Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world. *Nature Climate Change*, 9(3), 227-231.
- Sharma, S., Gray, D. K., Read, J. S., O'reilly, C. M., Schneider, P., Qudrat, A. & Woo, K. H. (2015). A global database of lake surface temperatures collected by in situ and satellite methods from 1985–2009. *Scientific data*, 2(1), 1-19.
- Shatwell, T., Thiery, W. & Kirillin, G. (2019). Future projections of temperature and mixing regime of European temperate lakes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3), 1533-1551.
- Shimoda, Y., Azim, M. E., Perhar, G., Ramin, M., Kenney, M. A., Sadraddini, S. & Arhonditsis, G. B. (2011). Our current understanding of lake ecosystem response to climate change: what have we really learned from the north temperate deep lakes?. *Journal of Great Lakes Research*, 37(1), 173-193.
- Sivonen, K. (1999). Cyanobacterial toxins. *Toxic Cyanobacteria in Water, A Guide to Their Health Consequences, Monitoring and Management*.
- Skea, J., Shukla, P., Al Khourdajie, A. & McCollum, D. (2021). Intergovernmental Panel on Climate Change: Transparency and integrated assessment modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12(5), e727.
- Stanhill, G. (2001). The growth of climate change science: A scientometric study. *Climatic Change*, 48(2), 515-524.
- Stark, H., Bauer, H. G., Jacoby, H. & Suter, W. (1999). Internationale Wasservogelzählung am Bodensee. Ergebnisse aus den Zählperioden 1961/62 bis 1996/97. Dynamik der Zugrast- und Überwinterungsbestände und der Einfluß von Umweltbedingungen. *Ornithologische Jahreshefte für Baden-Württemberg*, 14, 64-122.
- Stockwell, J. D., Doubek, J. P., Adrian, R., Anneville, O., Carey, C. C., Carvalho, L. & Wilson, H. L. (2020). Storm impacts on phytoplankton community dynamics in lakes. *Global change biology*, 26(5), 2756-2784.
- Stott, P. (2016). How climate change affects extreme weather events. *Science*, 352(6293), 1517-1518.
- Straile, D., Kerimoglu, O., Peeters, F., Jochimsen, M. C., Kümmerlin, R., Rinke, K. & ROTHHAUPT, K. O. (2010). Effects of a half a millennium winter on a deep lake – a shape of things to come? *Global Change Biology*, 16(10), 2844-2856.
- Szjij, J. (1965). Ökologische Untersuchungen an Entenvögeln (Anatidae) des Ermatinger Beckens (Bodensee). *Die Vogelwarte*, 23, 24-71.
- Tanneberger, F., Schröder, C., Hohlbein, M., Lenschow, U., Permien, T., Wichmann, S. & Wichtmann, W. (2020). Climate change mitigation through land use on rewetted peat-lands—cross-sectoral spatial planning for paludiculture in northeast Germany. *Wetlands*, 40(6), 2309-2320.
- Teubner, K., Großschartner, M. & Teubner, I. E. (2018). Response of zooplankton to restoration and climate warming in Alte Donau. In *the Alte Donau: Successful Restoration and Sustainable Management* (pp. 163-212). Springer, Cham.
- Tranvik, L. J., Downing, J. A., Cotner, J. B., Loiselle, S. A., Striegl, R. G., Ballatore, T. J. & Weyhenmeyer, G. A. (2009). Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and oceanography*, 54(6part2), 2298-2314.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., Kiehl, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. & Kiehl, J. (2009). Earth's global energy budget, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 90, 311–323.

- Trolle, D., Hamilton, D. P., Hipsey, M. R., Bolding, K., Bruggeman, J., Mooij, W. M. & Hanson, P. C. (2012). A community-based framework for aquatic ecosystem models. *Hydrobiologia*, 683(1), 25-34.
- Tunney, T. D., McCann, K. S., Lester, N. P. & Shuter, B. J. (2014). Effects of differential habitat warming on complex communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(22), 8077-8082.
- Turner, M. G., Calder, W. J., Cumming, G. S., Hughes, T. P., Jentsch, A., LaDeau, S. L. & Carpenter, S. R. (2020). Climate change, ecosystems and abrupt change: science priorities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190105.
- UBA (2019): Zustand der Seen: www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/zustand-der-seen#textpart-1 (zuletzt aufgerufen: 01.09.2021)
- UNESCO, UN-Water (2020). United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change, Paris, UNESCO. ISBN 978-92-3-100371-4.
- UNFCCC (2020). National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory
- Verburg, P., Hecky, R. E. & Kling, H. (2003). Ecological consequences of a century of warming in Lake Tanganyika. *Science*, 301(5632), 505-507.
- Vinnå, L. R., Medhaug, I., Schmid, M. & Bouffard, D. (2021). The vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1-10.
- Wagner, C. & Adrian, R. (2011). Consequences of changes in thermal regime for plankton diversity and trait composition in a polymictic lake: a matter of temporal scale. *Freshwater Biology*, 56(10), 1949-1961.
- Walsh, S. E., Vavrus, S. J., Foley, J. A., Fisher, V. A., Wynne, R. H. & Lenters, J. D. (1998). Global patterns of lake ice phenology and climate: Model simulations and observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D22), 28825-28837.
- Wang, W., Lee, X., Xiao, W., Liu, S., Schultz, N., Wang, Y. & Zhao, L. (2018). Global lake evaporation accelerated by changes in surface energy allocation in a warmer climate. *Nature Geoscience*, 11(6), 410-414.
- Weber, C. J. & Weihrauch, C. (2020). Autogenous Eutrophication, Anthropogenic Eutrophication, and Climate Change: Insights from the Antrift Reservoir (Hesse, Germany). *Soil Systems*, 4(2), 29.
- Weinberger, S. & Vetter, M. (2014). Lake heat content and stability variation due to climate change: coupled regional climate model (REMO)-lake model (DYRESM) analysis. *Journal of Limnology*, 73(1).
- Werner, S. & J. Hesselschwerdt (2015): Einfluss des Klimawandels auf Seen. Literaturlauswertungsstudie im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA.
- Werner, S. & Bauer, H. G. (2012). Stille Revolution im Bodensee: Wasservögel und wirbellose Neozoen. *Der Falke*, 59(6), 212-218.
- Werner, S., Bauer, H. G., Heine, G., Jacoby, H. & Stark, H. (2018). 55 Jahre Wasservogelzählung am Bodensee: Bestandsentwicklung der Wasservögel von 1961/62 bis 2015/16.
- Weyhenmeyer, G. A., Meili, M. & Livingstone, D. M. (2004). Nonlinear temperature response of lake ice breakup. *Geophysical research letters*, 31(7).

- Whitehead, P. G., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., Kernan, M. & Wade, A. J. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological sciences journal*, 54(1), 101-123.
- Wichmann, S., Krebs, M., Kumar, S. & Gaudig, G. (2020). Paludiculture on former bog grass-land: Profitability of Sphagnum farming in North West Germany. *Mires and Peat*, 26(08), 8.
- Wiegand, C. & Pflugmacher, S. (2005). Ecotoxicological effects of selected cyanobacterial secondary metabolites a short review. *Toxicology and applied pharmacology*, 203(3), 201-218.
- Wild, M., Folini, D., Schär, C., Loeb, N., Dutton, E. G. & König-Langlo, G. (2013). The global energy balance from a surface perspective. *Climate dynamics*, 40(11-12), 3107-3134.
- Wilk-Woźniak, E. (2019). An introduction to the 'micronet' of cyanobacterial harmful algal blooms (CyanoHABs): cyanobacteria, zooplankton and microorganisms: a review. *Marine and Freshwater Research*, 71(5), 636-643.
- Williams, S. G. & Stefan, H. G. (2006). Modeling of lake ice characteristics in North America using climate, geography, and lake bathymetry. *Journal of Cold Regions Engineering*, 20(4), 140-167.
- Williamson, C. E., Saros, J. E. & Schindler, D. W. (2009). Sentinels of change. *Science (Washington)*, 323(5916), 887-888.
- Winslow, L. A., Read, J. S., Hansen, G. J., Rose, K. C., & Robertson, D. M. (2017). Seasonality of change: Summer warming rates do not fully represent effects of climate change on lake temperatures. *Limnology and Oceanography*, 62(5), 2168-2178.
- Wojtal-Frankiewicz, A. (2012). The effects of global warming on *Daphnia* spp. population dynamics: a review. *Aquatic Ecology*, 46(1), 37-53.
- Woodward, G., Perkins, D. M. & Brown, L. E. (2010). Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1549), 2093-2106.
- Woolway, R. I., Dokulil, M. T., Marszelewski, W., Schmid, M., Bouffard, D. & Merchant, C.J. (2017). Warming of Central European lakes and their response to the 1980's climate regime shift. *Climatic Change*, 142(3-4), 505-520.
- Woolway, R. I., Kraemer, B. M., Lenters, J. D., Merchant, C. J., O'Reilly, C. M. & Sharma, S. (2020). Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(8), 388-403.
- Woolway, R. I., Sharma, S., Weyhenmeyer, G. A., Debolskiy, A., Golub, M., Mercado-Bettín, C. & Jennings, E. (2021). Phenological shifts in lake stratification under climate change. *Nature communications*, 12(1), 1-11.
- Woolway, R. I., Weyhenmeyer, G. A., Schmid, M., Dokulil, M. T., de Eyto, E., Maberly, S. C., & Merchant, C. J. (2019). Substantial increase in minimum lake surface temperatures under climate change. *Climatic Change*, 155(1), 81-94.
- Wynne, R. H. & Lillesand, T. M. (1993). Satellite observation of lake ice as a climate indicator-initial results from statewide monitoring in Wisconsin.
- Zhu, S., Ptak, M., Choiński, A. & Wu, S. (2020). Exploring and quantifying the impact of climate change on surface water temperature of a high mountain lake in Central Europe. *Environmental monitoring and assessment*, 192(1), 1-11.

- Ziegler, R. (2020): Paludiculture as a critical sustainability innovation mission. *Research Policy* 49 (5), S. 103979. doi:10.1016/j.respol.2020.103979.
- Zohary, T., Flaim, G. & Sommer, U. (2021). Temperature and the size of freshwater phytoplankton. *Hydrobiologia*, 848(1), 143-155.