



© Mike Gatt – iStockphoto

3.2.4 Klimatisch bedingte Gefährdung der Wasserqualität

THORSTEN BLENCKNER

Climate related effects on water quality: Many of the water quality problems we experience today are strongly influenced by global changes in climate. A higher surface water temperature in lakes increases the turnover of nutrients, in particular phosphorus. This in combination with a higher water temperature and the associated longer stratification period favour blooms of potentially toxic blue-green algae. Furthermore, long-term analyses of lake data indicate an increase of phosphorus released from the sediment in deep lakes. This climate-related eutrophication decreasing the water quality of lakes, should especially be considered in the European Framework Directive, aiming at achieving a good water quality status in European Waters by 2015. A good co-operation between climatologists and water managers in a holistic approach is therefore required.

Viele wissenschaftliche Studien betrachten den Einfluss des Klimas auf die Wasserquantität, wobei jedoch die Wasserqualität oft vernachlässigt wird. Veränderungen in der Wasserqualität sind von entscheidender Bedeutung in verschiedensten Bereichen der Wassernutzung, wovon Trinkwasser neben industrieller oder landwirtschaftlicher Nutzung einen wesentlichen Teil ausmacht.

Um eine gute Wasserqualität in Europa langfristig zu gewährleisten, wurde die Europäische Wasserrahmenrichtlinie im Jahr 2000 ins Leben gerufen, welche beinhaltet, dass alle Mitgliedsländer der EU ihre Wasserressourcen bis 2015 dahingehend verbessern, dass alle Gewässer innerhalb der EU einen guten ökologischen und chemischen Zustand aufweisen. Derzeit sind in Europa 20% des Oberflächenwassers ernstlich

mit Schadstoffen verunreinigt. Diese Richtlinie spiegelt die wachsende Bedeutung wider, die der Frage der Wasserqualität in verschiedenen Bereichen der Politik zugestanden wird.

Die Wasserqualität definiert sich durch die Konzentration verschiedener nachweisbarer Substanzen. Eine Gefährdung geht vor allem von zu hohen anthropogenen Nährstoffeinträgen (insbesondere Nitrat), Öl, Pflanzenschutzmitteln, Hormonen sowie von Versalzung, Versauerung und mikrobieller Kontamination aus.

Die Einträge von Phosphat und Nitrat stammen insbesondere von stark genutzten Einzugsgebieten wie z.B. großen Agrarflächen oder Industrieanlagen in unmittelbarer Nähe von Flüssen und Seen. Dies führte oftmals zu einer Eutrophierung der Gewässer mit gravierenden ökologischen Folgen wie Algenblüten,

Aus: *WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für alle? 3.Auflage (2011)*
- Hrsg. Lozán, J. L. H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe & C.-D. Schönwiese

Sauerstoffarmut, »trübes Wasser« und Fischsterben. Einige Algenarten zum Beispiel produzieren Giftstoffe (Toxine) und können damit zu Veränderungen im Geschmack und Geruch des Wassers führen, was auch eine merkliche Beeinträchtigung der Wasserqualität bedeutet.

In diesem Kapitel soll der Schwerpunkt der Betrachtungsweise auf Seen liegen, da sie nicht nur in weiten Teilen Europas sondern auch weltweit relevante Trinkwasserreservoirare darstellen und die gefundenen Gesetzmäßigkeiten zudem auch auf künstlich geschaffene Wasserreservoirare in Regionen mit sehr variablen Jahresniederschlägen übertragen werden können.

Langjährige Messungen von Wasserqualitätsparametern in Seen haben gezeigt, dass zusätzlich zu den oben genannten Einträgen auch Wetter und Klimaveränderungen negative Auswirkungen auf die Wasserqualität haben können. In Folge einer durch Klimamodelle prognostizierten Zunahme der extremen Wetterbedingungen in der nahen Zukunft (IPCC 2007) haben Untersuchungen zu den Auswirkungen in Oberflächengewässern zunehmend an Bedeutung gewonnen.

So soll im Folgenden zunächst eine kurze Einführung zu Klimaveränderungen der letzten 100 Jahre gegeben werden, und anschließend der unterschiedliche Einfluss des Klimas auf die Wasserqualität von Seen im europäischen Kontext näher beleuchtet werden.

Klima

Klimaveränderungen natürlicher Art hat es im Laufe der Erdgeschichte schon immer gegeben. Nicht zuletzt dadurch konnte sich in der Evolution der Lebewesen eine so enorme Vielfalt ausbilden. Jedoch erhärten sich seit den letzten 30 Jahren die Indizien dafür, dass die Klimaveränderung der letzten hundert Jahre (1906–2005, IPCC 2007) wesentlich durch einen anthropogenen Einfluss verursacht ist. So wurde weltweit eine Erhöhung der globalen Lufttemperatur um 0,74 °C im jährlichen Mittel festgestellt, jedoch mit deutlichen regionalen Unterschieden (IPCC 2007). Im 20. Jahrhundert ist der Temperaturanstieg in Deutschland mit 0,9 °C überdurchschnittlich hoch. Zudem weisen zum Beispiel die 1990er Jahre extrem milde Winter und warme Sommer auf, und insgesamt ist eine Zunahme der Klimaschwankungen (Extrema) zu verzeichnen. Dies wird besonders offensichtlich in den Jahren 2002 und 2003.

In den Sommern der Jahre 2002 und 2006 kam es zu extremen Überschwemmungen in Europa, z.B. entlang der Elbe, verbunden mit weiträumigen Zerstörungen von Dörfern und Siedlungen. Im Gegensatz dazu war der Sommer 2003 sehr trocken, führte in weiten Teilen Mitteleuropas zu Dürren und forderte viele Menschen-

leben. Diese beiden Jahre machen die Spannbreite der Wetterschwankungen sehr gut deutlich.

Basierend auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten geht eine Erhöhung der Lufttemperatur immer mit einer erhöhten Aufnahme von Wasserdampf in der Luft einher. Demzufolge kommt es bei einer globalen Temperaturerhöhung weltweit zu einer Intensivierung des Wasserkreislaufs, das heißt, mehr Wasser wird in den Kreislauf aufgenommen. Die Folge sind Niederschläge mit extremen Niederschlagsmengen in kurzen Zeiträumen, die jedoch regional unterschiedlich stark ausgeprägt sein können.

Es ist daher äußerst wichtig, den allgemeinen Trend einer Erhöhung der Lufttemperatur von einer Zunahme der Schwankung (Variabilität) zu unterscheiden, auch wenn ein direkter Zusammenhang zwischen diesen beiden Phänomenen besteht.

Trotz eines nach wie vor hohen Unsicherheitsfaktors zeigen die meisten Klimasimulationen für die nächsten hundert Jahre, dass die Winter in Mitteleuropa milder und die Sommer niederschlagsärmer werden, beides zudem verbunden mit einem erhöhten Auftreten von Extremwittersituationen (RÄISÄNEN et al. 2004). Im Folgenden soll nun der Einfluss des sich verändernden Klimas auf die Wasserqualität betrachtet werden.

Physikalische Beeinflussung

Der Einfluss des Wettergeschehens und des Klimas auf Gewässer geschieht in unterschiedlicher Weise. Zunächst sollen hier die verschiedenen Wege der Einflussnahme vorgestellt werden, inwiefern Wetter und Klima die Seen direkt beeinflussen, um dann anschließend die Konsequenzen dieses Einflusses zu erläutern.

In der Regel – von Ausnahmen abgesehen – ist die Oberflächentemperatur von Fließgewässern und Seen sehr eng an die Lufttemperatur gebunden. Eine erhöhte Lufttemperatur im Winter, wie sie insbesondere in den letzten 20 Jahren beobachtet werden konnte, führt somit zu einer kürzeren Eisbedeckung und höheren Wassertemperaturen. So ist die Eisbedeckung von Seen in Deutschland stark zurückgegangen, da die Seen später zufrieren und früher aufbrechen. In Skandinavien beispielsweise geschieht in vielen Seen der Eisaufbruch heute um einen Monat früher als noch vor 30 Jahren. Arktische und alpine Seen reagieren sehr stark auf die kürzere Eisperiode, weil die Intensität der UV-B Strahlung in 3.000 m Höhe um 50% stärker ist als auf Meeresspiegelniveau (PSENNER 2003).

Die gemessene Temperaturerhöhung hat vielerlei Auswirkungen auf sämtliche Komponenten des komplexen Ökosystems See. Primär als direkte Konsequenz ist zunächst zu nennen, dass bei zahlreichen Seen eine

verlängerte Schichtung im Sommer beobachtet werden konnte. Diese Schichtung, auch als Sommerstagnation bezeichnet, ist durch eine höhere Temperatur in den oberen Wasserschichten gekennzeichnet, die sich von einer deutlich niedrigen Temperatur in den tieferen Wasserschichten abtrennt. Zwischen beiden Wasserschichten kann zu dieser Zeit nur ein sehr geringer Austausch stattfinden. Diese längere Sommerstagnation ist insbesondere in tieferen Seen von großer Bedeutung und verschlechtert die Sauerstoffversorgung der unteren Wasserschichten, erhöht die Nährstoffanreicherung im Tiefenwasser und begünstigt eine Blaualgenblüte im Sommer (BLENCKNER et al. 2002). Die Stärke dieser Veränderungen ist jedoch stark von den individuellen Seeigenschaften, wie z.B. der maximalen Wassertiefe abhängig.

Ein weiterer direkter Einfluss der veränderten Klimabedingungen besteht in der Zunahme der Starkniederschläge verbunden mit einer Tendenz zur Abnahme der Sommerniederschläge in großen Teilen Mitteleuropas. Die Zuflussmenge eines Sees, gesteuert durch die Niederschlagsmenge, bestimmt die Aufenthaltszeit des Wassers im See. Dies hat einen starken Einfluss auf die Sensibilität des Sees gegenüber dem Klimageschehen. So kann der Einfluss eines milden Winters in einem tiefen See mit einer langen Wasseraufenthaltszeit bis in den Sommer hinein beobachtet werden, z.B. anhand einer erhöhten Temperatur in den tieferen Wasserschichten. Andererseits nimmt dieser Effekt in Seen mit einer kurzen Wasseraufenthaltszeit (Tage, Wochen) schnell ab (GERTEN & ADRIAN 2001).

Die Zuflussmenge in den See bestimmt auch die Zufuhr von Nährstoffen und anderen anthropogenen Einträgen. So kann eine Verringerung der Sommerniederschläge die Wassermenge in Flüssen stark reduzieren, wodurch für sämtliche Stoffe im Wasser die Konzentration zu- und gleichzeitig der Sauerstoffgehalt abnimmt. Dies kann insbesondere in ariden und semi-ariden Gebieten zu starken Versalzungen führen. Mit gehäuftem Auftreten von Starkregenfällen nehmen sowohl die Erosion im Gewässereinzugsgebiet sowie die Spitzenbelastungen der Oberflächengewässer mit Schwebstoffen, Nährstoffen und Schadstoffen wie z.B. Pflanzenschutzmitteln zu. Ein weiterer Anstieg der Temperatur verstärkt in den niederschlagsarmen Perioden eine weitere Austrocknung der Böden und eine Absenkung des Grundwasserspiegels.

Viele dieser oben genannten Einflüsse wurden bisher allein auf Änderungen von lokalen Wetterbedingungen zurückgeführt. Die heutige Erkenntnis zeigt hingegen immer deutlicher, dass klimabedingte Änderungen in Seen nicht allein durch lokal auftretende Witterungseinflüsse, sondern durch regionale und globale

Wettergeschehnisse gesteuert werden. In Europa lässt sich der Einfluss globaler Wetteränderungen durch die Nordatlantische Oszillation (NAO) und der Nord-Süd Verschiebung des Golfstroms erkennen (LIVINGSTONE et al. 2010, BLENCKNER et al. 2010). Diese »Fernwirkungen« auf Seeökosysteme sind auch wichtig für die Bewirtschaftung von Seen.

Auswirkungen

Wie bereits erwähnt, ist eines der wichtigsten Merkmale der Wasserqualität die Nährstoffkonzentration. Diese kann in regenreichen und milden Wintern, wie sie auch von Klimamodellen für die Zukunft prognostiziert werden, zunehmen, da ein erhöhter Wasserzufluss mehr Nährstoffe in den See transportieren kann. Ob es zu einer Zunahme von Nährstoffen kommt, hängt vor allem von der Landnutzung im Einzugsgebiet ab. So sind die Hauptquelle für Stickstoffeinträge die landwirtschaftlich genutzten Flächen, in einigen Gebieten auch der Abfluss aus Klärwerken sowie Einträge aus der Luft. Für Phosphat stellten in Deutschland lange die Industrie und Haushalte die Hauptquelle dar. Diese punktuellen Zuflüsse wurden jedoch stark reduziert, so dass vielerorts die diffusen Zuflüsse von Agrarflächen die Haupteintragsquellen darstellen.

Eine erhöhte Nitratkonzentration in Seen nach milden Wintern wurde in Finnland festgestellt. Durch den erhöhten Zufluss während der Schneeschmelze, auch im extensiv genutzten Einzugsgebiet, wird das gelöste Nitrat in den See transportiert und führt zu erhöhten Nitratkonzentrationen im Vergleich zu Jahren mit kälteren Wintern. Im unerwarteten Gegensatz dazu hat man jedoch in England in milden Wintern eine geringere Nitratkonzentration in den Seen gemessen, da dort durch eine längere Vegetationsperiode im Einzugsgebiet das Nitrat von Bakterien und Pflanzen direkt aufgenommen wurde (GEORGE et al. 2004). Dies macht deutlich, dass es von entscheidender Bedeutung ist, die Landnutzung im unmittelbaren Einzugsgebiet und die Klimaregion mit zu betrachten.

Die Phosphatkonzentration in Seen kann deutlich zunehmen, insbesondere durch erhöhte Lufttemperaturen in den Winter- und Frühjahrsmonaten, wie sie in Klimamodellen prognostiziert werden (RÄISÄNEN et al. 2004). So zeigt eine Studie (MALMAEUS et al. 2005) aus Schweden, dass, begünstigt durch wärmere Wassertemperaturen, eine längere Sommerstagnationsperiode sowie niedrige Sauerstoffgehalte in den tieferen Wasserschichten, mehr Phosphat aus dem Sediment gelöst wird, wodurch es zu einer internen Eutrophierung kommt. Dies bedeutet, dass in tiefen Seen mit einer langen Wasseraufenthaltszeit (länger als ein Jahr) ein See eutrophieren kann, obwohl die reine Zuflusskon-

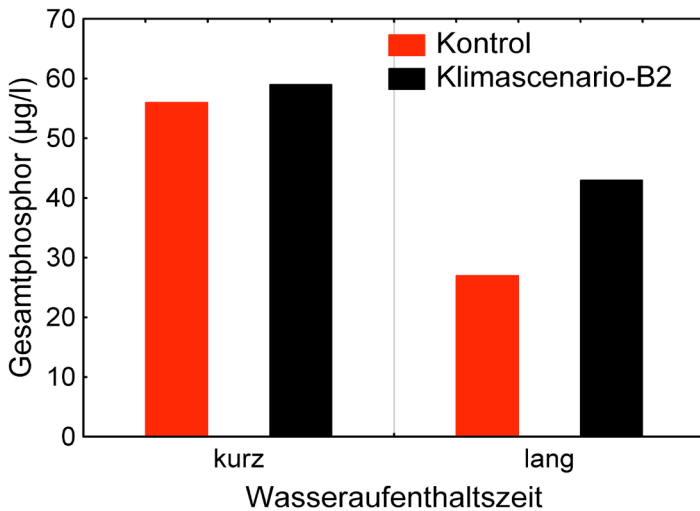


Abb. 3.2.4-1: Der Vergleich des Gesamtphosphors in Relation zum heutigen (Kontrol) und simulierten Klima in der Zukunft (Klimaszenario-B2) in zwei schwedischen Seen mit unterschiedlicher Wasseraufenthaltszeit (verändert nach MALMAEUS et al. 2005).

zentration des Phosphats unverändert ist. Eine Zunahme der Häufigkeit von Starkniederschlägen würde in der Zukunft diese Prozesse aufgrund erhöhter externer Nährstoffeinträge noch verstärken.

Der Effekt einer internen Eutrophierung konnte bislang in Seen mit einer kurzen Wasseraufenthaltszeit nicht nachgewiesen werden (siehe Abb. 3.2.4-1). Dort ist jedoch der Erwärmungseffekt sehr stark. Die Intensität von Umsatzprozessen nimmt zu, da hier die gesamte Wassersäule erwärmt wird, was zu einem Verdrängen von Arten führen könnte, die an niedrige Temperaturen angepasst sind. Weiterhin können Starkniederschläge in kürzester Zeit die Nährstoffkonzentration in Flachgewässern erhöhen, wie dies in englischen Seen gezeigt werden konnte.

In den letzten Jahren ist zudem eine Intensivierung der Wasserfarbe in Flüssen und Seen in England und Skandinavien beobachtet worden. Die Austrocknung und Wiedervernässung von organisch reichen Böden hat die Konzentration von gelöstem organischem Kohlenstoff in Flüssen ansteigen lassen. Dies verändert die Wasserfarbe und erhöht durch die stärkere Lichtabsorption der oberen Wasserbereiche die Schichtung. Eine stärkere Bräunung des Wassers hat vor allem Konsequenzen für die Trinkwasseraufbereitung.

Schließlich führt die erhöhte Wassertemperatur verbunden mit der erhöhten physikalischen Stabilität der Wassersäule zu einem gehäuftem Auftreten von Algenblüten während der Sommermonate, wie dies schon jetzt in einigen europäischen Seen zu beobachten ist. Insbesondere die unerwünschten Blaualgenblüten mit ihren Toxinen nehmen in einigen Seen zu. Einige Algenarten breiten sich außerdem weiter nach Norden aus. So tritt beispielsweise die tropische und potenziell toxische Blaualge *Cylindrospermopsis raciborskii* nun

auch in Seen mittlerer Breiten (Ungarn, Deutschland, Frankreich und Portugal) auf, wo diese Art aufgrund der Temperaturzunahme inzwischen geeignete Lebensbedingungen vorfindet.

Zudem ist aufgrund der Zunahme von Starkniederschlägen mit einer verstärkten mikrobiellen Kontamination (coliformen Bakterien) zu rechnen, was eine unmittelbare Gesundheitsgefährdung mit sich bringt (ROSE et al. 2000).

Schlussbetrachtung

Dies sind nur einige Gefahren für die Wasserqualität, die durch eine Klimaänderung verursacht werden können. Zusammenfassend sind die wichtigsten klimabedingten Prozesse und Tendenzen, die in den meisten Studien gefunden wurden, vor allem auch in ihrer Kombination mit anderen anthropogenen Faktoren wie beispielsweise Versauerung, UV-Strahlung und Eutrophierung eine Gefahr für die Wasserqualität. So führt die Klimaerwärmung direkt zu:

- einer kürzeren Eisbedeckung
- einer höheren Variabilität der an das Klima gekoppelten Parameter
- einem Ansteigen der Wassertemperatur
- längeren Stagnationsperioden im Sommer

Dies kann in Seen folgende Auswirkungen haben:

- geringere Sauerstoffkonzentrationen in eutrophen Seen
- interne Phosphorbelastung in Seen mit einer langen Wasseraufenthaltszeit
- eine zunehmende Häufigkeit von Blaualgenblüten
- eine zunehmende Häufigkeit mikrobieller Kontaminationen

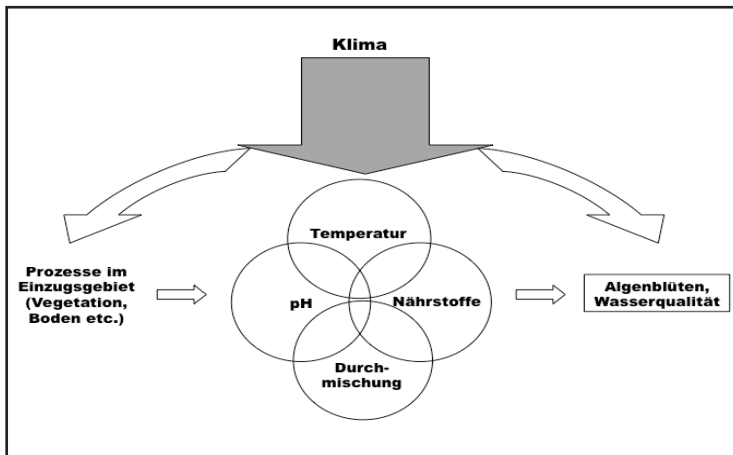


Abb. 3.2.4-2: Der Einfluss des Klimas auf die Prozesse in Einzugsgebieten und Seen und ihrer Interaktion (verändert nach ANDERSON 2000).

Jedoch ist zu beachten, dass viele bislang veröffentlichte Studien nur einzelne Faktoren betrachten haben, insgesamt gibt es bisher nur wenige ganzheitliche Untersuchungen. Diese sind aber notwendig, um Prozesse im Gesamtsystem Klima- Einzugsgebiet-See zu verstehen. Man kann als Vergleich die Krankheiten beim Menschen hinzuziehen, viele können wir diagnostizieren, aber von vielen ist die Ursache oftmals unbekannt, da die ganzheitliche Betrachtung des komplexen Systems fehlt. Somit wurden in diesem Kapitel ausdrücklich nur die Effekte vorgestellt, die in den meisten Studien sowie einigen Experimenten und Modellstudien gefunden wurden. Ziel war, ein objektives Bild darzustellen und von allzu vager Spekulation Abstand zu nehmen. Auch ist zu bedenken, dass es nur für einige einzelne Seen in Europa Langzeitstudien gibt, was eine Generalisierung von untersuchten Phänomenen einschränkt.

Die zusammenfassende *Abb. 3.2.4-2* macht deutlich, dass Klimaveränderungen direkt das Gewässereinzugsgebiet beeinflussen, wie z.B. die Länge der Vegetationsperiode oder die Bodenfeuchte. Weiterhin beeinflusst das Klima das Seeökosystem über Wassertemperatur, Durchmischung der Wassersäule und Nährstoffkonzentration. Zudem wird der See durch den Zufluss aus dem Einzugsgebiet mitbestimmt, insbesondere durch den Zufluss von Nährstoffen und Säureschüben, die den pH-Wert verändern können. Die Kombination der direkten und indirekten Klimaeinflüsse bestimmen dann die Wahrscheinlichkeit von Blaualgenblüten sowie die gesamte Wasserqualität in naher Zukunft.

Um eine weitere Verschlechterung der Wasserqualität zu verhindern, sollten folgende Maßnahmen, auch im Hinblick auf die Klimaprognosen, in Betracht gezogen werden: Da die Landnutzung in Einzugsgebieten von Seen nachwievor von extremer Wichtigkeit ist, sollten hier deutlich die diffusen Nährstoffeinträge

vermindert werden. Weiterhin sollte eine langfristige Planung der Wasserbewirtschaftung durch die Einbeziehung des Faktors Klima, insbesondere bei Seen die zur Trinkwasserversorgung genutzt werden, ergänzt werden. Hierbei sollten die Seen auf Klimasensibilität (wie z.B. Wasseraufenthaltszeit, Einzugsgebiet) sowie auf die Möglichkeit einer Erhöhung der internen Phosphoranreicherung hin überprüft werden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine klimabedingte Gefährdung der Wasserqualität in Europa deutlich nachweisbar ist. Daher sollte der Faktor Klima in der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie stärker berücksichtigt werden.

Literatur

- ANDERSON N. J., (2000): Diatoms, temperature and climatic change. *European Journal of Phycology* 35, 307-314.
- BLÉNCKNER T., A. OMSTEDT & M. RUMMUKAINEN (2002): A Swedish case study of contemporary and possible future consequences of climate change on lake function. *Aquatic Science* 64, 171-184.
- BLÉNCKNER T., R. ADRIAN, L. ARVOLA, M. JÄRVINEN, P. NÖGES, T. NÖGES, K. PETERSSON, & G.A. WEYHENMEYER (2010): "The Impact of climate change on lakes in Northern Europe.", pp 339-358, In *Climate and Lake Impacts in Europe*, editor Glen George, Springer Aquatic Ecology series, 507 p, ISBN: 978-90-481-2944-7
- GEORGE D. G., S. C. MABERLY & D. P. HEWITT (2004): The influence of the North Atlantic Oscillation on the physical, chemical and biological characteristics of four lakes in the English Lake District. *Freshwater Biology*, 49 760-774.
- GERTEN D. & R. ADRIAN (2001): Differences in the persistency of the North Atlantic Oscillation signal among lakes. *Limnology and Oceanography* 46, 448-455.
- IPCC (2007): IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). www.ipcc.ch.

- LIVINGSTONE D. M. & M. T. DOKULIL (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, 1220-1227.
- LIVINGSTONE D.M., R. ADRIAN, L. ARVOLA, T. BLENCKNER, M.T. DOKULIL, R.E. HARI, G.D. GEORGE, T. JANKOWSKI, M. JÄRVINEN, E. JENNINGS, P. NÖGES, T. NÖGES, D. STRAILE & G.A.WEYHENMEYER (2010): "Regional and Supra-Regional Coherence in Limnological Variables" , pp 311-338, In *Climate and Lake Impacts in Europe*, editor Glen D. GEORGE, Springer Aquatic Ecology series, 507 p, ISBN: 978-90-481-2944-7
- MALMAEUS J. M., T. BLENCKNER, H. MARKENSTEN & I. PERSSON (2005): Lake phosphorus dynamics and climate warming: A mechanistic model approach, *Ecological Modelling*. 190, 1-14
- PSENNER R., (2003): Alpine lakes: Extreme ecosystems under the pressure of global change. *EAWAG news* 55: 12-14.
- RÄISÄNEN J., U. HANSSON, A. ULLERSTIG, R. DÖSCHER, L. P. GRAHAM, C. JONES, H. E. M. MEIJER, P. SAMUELSSON & U. WILLEN (2004): European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Climate Dynamics* 22: 13-31.
- ROSE J. B., S. DAESCHNER, D. R. EASTERLING, F. C. CURRIERO, S. LELE & J. A. PATZ (2000): Climate and waterborne diseases outbreaks. *Journal of the American Water Works Association*, 92,77-87.

*Prof. Assoc. Dr. Thorsten Blenckner,
Baltic Nest Institute - Stockholm Resilience Center
Stockholm University
SE-106 91 Stockholm, Sweden
tblen@mbox.su.se*