

Annektrin Wagner, Stephan Hülsmann, Lothar Paul,  
Thomas Petzoldt, Thomas U. Berendonk und Jürgen Benndorf

## Der Einfluss von Klimavariabilität auf aquatische Nahrungsnetze

### 1 Einleitung

Für unsere Region sagen die meisten Szenarien der Klimaforscher eine Erwärmung um bis zu 5 °C innerhalb eines Jahrhunderts voraus, wobei die Erwärmung im Winter und Frühjahr vermutlich am stärksten ausfallen wird [1, 2]. In Sachsen wurde im Zeitraum 1991 bis 2005 im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1990 eine Erhöhung der mittleren und maximalen Temperatur von bis zu 1,6 °C bzw. 1,9 °C registriert, und zwar vor allem in den Monaten Januar bis Mai sowie im August [3]. Aufgrund der ausgeprägten Jahreszeiten in unseren Breiten zeigen die Organismen eine spezifische Phänologie, also ein saisonales Muster im Lebenszyklus. Deutliche Veränderungen der Phänologie als Reaktion auf klimatische Änderungen wurden sowohl für aquatische als auch für terrestrische Organismen gezeigt, wie beispielsweise eine zeitliche Vorverlagerung der Sukzessionsereignisse im Frühjahr [4]. Oftmals ist der Entwicklungsstart der Organismen an die Überschreitung einer spezifischen Schwellentemperatur gebunden.

Aquatische Ökosysteme erweisen sich als besonders geeignet für ökosystemare Forschung aufgrund der relativ guten Abgrenzbarkeit, der starken Größenstrukturierung der Biozönose und der engen Kopplung der trophischen Ebenen sowie der vielfach kurzen Generationszeiten der Organismen. Durch die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Mediums Wasser kann sich je nach Gewässertyp eine thermische Struktur herausbilden. Dies bewirkt zum Beispiel in tieferen Seen und Talsperren im saisonalen Verlauf eine Verzögerung der Temperaturentwicklung gegenüber der Lufttemperatur und einen „Memory-Effekt“. So ist im Sommer nur die oberflächennahe Wasserschicht (Epilimnion) durch die aktuelle Umgebungstemperatur beeinflusst, während die

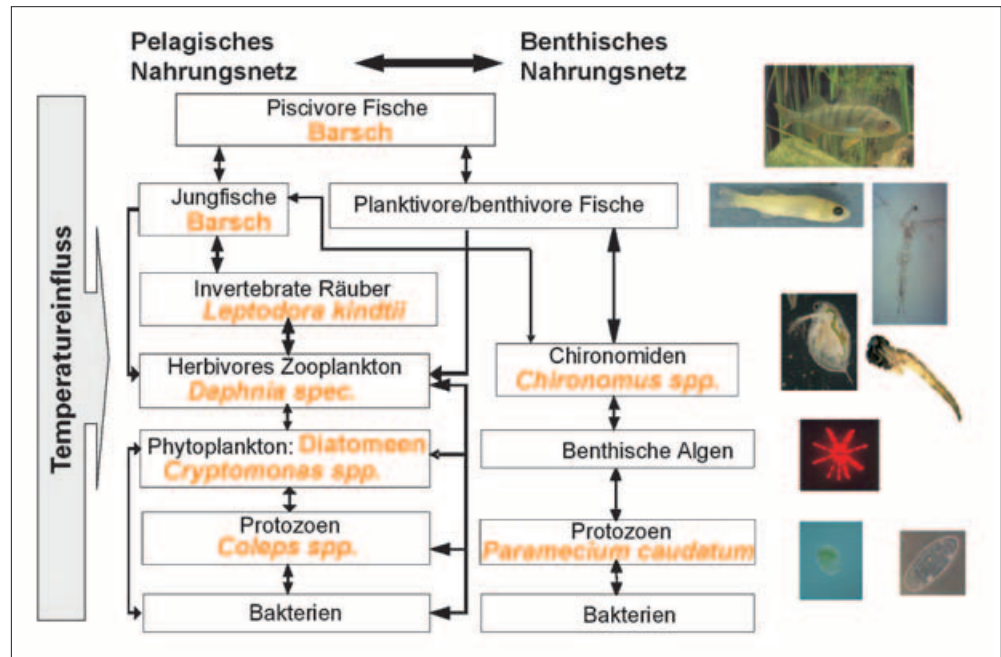
Temperatur des kälteren Tiefenwassers (Hypolimnion) von den Verhältnissen des vorangehenden Frühjahrs abhängt.

Untersuchungen zum Einfluss von klimatischen Änderungen auf Ökosysteme beruhen zu großen Teilen auf der Analyse von Langzeitdaten. Beobachtete Veränderungen zum Beispiel in der Phänologie einzelner Arten oder in der biologischen Besiedlung werden hinsichtlich eines Zusammenhangs mit klimatischen Rahmenbedingungen (z. B. Temperatur oder integrierende Indizes, wie die Nord-Atlantische Oszillation, NAO) untersucht. Solche korrelativen Untersuchungen stellen hohe Anforderungen an die Qualität der verfügbaren Daten, wie zum Beispiel die zeitliche und taxonomische Auflösung. Es erweist sich jedoch selbst bei guter Datenlage oftmals als schwierig, klare Ursachen-/Wirkungszusammenhänge zu bestimmen, da neben dem Klimawandel auch sich ändernde Nährstoffbelastungen (Eutrophierung, Reoligotrophierung) und Managementstrategien zu berücksichtigen sind. Weiterhin erlauben Langzeitdaten nur eine retrospektive Analyse, jedoch keine Projektion in die Zukunft. Hierfür sind Modellstudien unabdingbar. Die Güte der Voraussage hängt dabei vom Prozessverständnis und von den Unsicherheiten der eingehenden Modellparameter ab. Noch immer bestehen große Defizite bei der Beschreibung komplexer Interaktionen und Rückkopplungen innerhalb von Nahrungsnetzen. Auch bei den physiologischen Daten, die den Modellfunktionen zugrunde liegen, gibt es erhebliche Lücken, insbesondere hinsichtlich der Reaktionen auf Extremwerte am oberen und unteren Ende der Temperaturfunktionen.

*In den gemäßigten Breiten zeigte sich die allgemeine Erwärmung der letzten Jahrzehnte insbesondere im Winter und im zeitigen Frühjahr. Dementsprechend traten Veränderungen in der Phänologie, dem zeitlichen Verlauf von Populations- und Entwicklungsprozessen von Organismen (z. B. Zeitpunkt der Knospung bei Pflanzen oder der Laichperiode bei Fischen), vor allem im Frühjahr auf. Obwohl generell eine frühere und beschleunigte Entwicklung als Reaktion auf die Erwärmung beobachtet wurde, zeigten sich doch Unterschiede in der Sensitivität von Organismen. Dadurch kann es in Nahrungsnetzen zu Match- oder Mismatch-Situationen in Räuber-Beute-Beziehungen kommen. Am Beispiel der komplexen Interaktionen im Nahrungsnetz der Talsperre Saldenbach wird der Einfluss verschiedener Erwärmungsszenarien auf Schlüsselorganismen und deren Interaktionen im Nahrungsnetz und letztlich auf die Wassergüte in dieser Trinkwassertalsperre im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms AQUASHIFT analysiert.*

*In temperate regions, the warming trends of the last decades have been observed primarily in winter and early spring. Accordingly, changes in the phenology of individual species, e.g. sprouting in plants or spawning of fish, occurred mainly in spring. Although the general pattern is earlier and faster development in response to warming, differences in sensitivity have been apparent between species, potentially giving rise to match or mismatch scenarios in predator-prey relations. The impact of warming scenarios on key species, their interactions and ultimately on the water quality is studied at Saldenbach Reservoir within the framework of the DFG priority program AQUASHIFT.*

Bild 1. Die Untersuchung von klimabedingten Veränderungen in der Struktur des Nahrungsnetzes sowie der Interaktion der trophischen Ebenen erfolgt über Schlüsselarten im Nahrungsnetz. Fotos von oben bzw. links: adulter Barsch, juveniler Barsch, *Leptodora kindtii* (Raubwasserfloh), *Daphnia spec.* (Wasserfloh), Puppe von *Chironomus spec.*, *Asterionella formosa* (Sternalge, gehört zu den Kieselalgen (Diatomeen), Aufnahme mit Fluoreszenzmikroskop), *Coleps spec.*, *Paramecium caudatum*, nicht maßstabsgerecht.



## 2 Verschiebung der Zeitfenster des Zusammentreffens von Räuber und Beute

Die Mehrzahl der Organismen weist artspezifische Temperatur-Optimumskurven unter anderem hinsichtlich der Wachstums- und Konsumtionsraten auf, wobei jeweils nur innerhalb eines bestimmten Fensters eine Massenentwicklung möglich ist. Daher liegt die Annahme nahe, dass die Temperatur auch als primärer Zeitgeber für das Timing der Interaktionen zwischen den Organismengruppen fungiert. Eine Vorhersage von Veränderungen in den Gewässerökosystemen wird folglich nur möglich sein, wenn Folgereaktionen im gesamten Nahrungsnetz in die Analyse einbezogen werden [5, 6]. Diese Fragen stehen daher im Zentrum des DFG-Schwerpunktprogramms AQUASHIFT („The impact of climate variability on aquatic ecosystems: Match and mismatch resulting from shifts in seasonality and distribution“). Ausgangspunkt des Programms ist die „Match-Mismatch-Hypothese“ [7], die am Beispiel der Interaktion von Fischlarven und deren essenziellen Beuteorganismen (Nauplius-Larven von kleinen planktischen Krebsen) entwickelt wurde. Ein starker Fischjahrgang entwickelte sich nur dann, wenn ein ausreichendes Angebot von Nauplien in der Phase, in der die Fischlarven darauf angewiesen sind, vorhanden war. Wenn sich das Klima jedoch verändert, können sich die saisonalen Zyklen von Räuber und Beute verschieden stark verschieben und damit kann die bisherige Gleichzeitigkeit („match“) von Angebot und Nachfrage verloren gehen („mismatch“).

Die Identifikation solcher sensitiven Interaktionen und zeitlichen Perioden in aquatischen Ökosystemen ist das vordringliche Ziel von AQUASHIFT, welches auf einen systemübergreifenden Ansatz unter Einbeziehung von Meeren, Seen und Fließgewässern an 16 Standorten in ganz Deutschland setzt. Eine Vielzahl an Match- und Mismatch-Situationen ist denkbar. Es können durch die veränderten Sukzessionsmuster einem Räuber zeitgleich auch zwei oder mehr alternative Beuteorganismen zur Verfügung stehen, was bei selektiver Bevorzugung einer Beutearart zu Verschiebungen im gesamten Nahrungsnetz führt. Ein Beuteorganismus kann durch das veränderte Timing dem Fraßdruck von mehreren Räubern zeitgleich ausgesetzt sein. Perioden mit

Futtermangel können mehr oder weniger mit erhöhtem Fraßdruck überlappen. Die Vermeidung des Zusammentreffens solcher kritischer Situationen von Räuber und Beute war ein wesentlicher Antrieb für die „Fitnessoptimierung“ der Organismen während der Evolution. Die gegenwärtigen Klimaänderungen laufen möglicherweise aber in einem Zeitmaßstab ab, der eine evolutionäre Anpassung insbesondere der Organismen mit langen Generationszeiten an die geänderten Zeitfenster nicht zulässt. Es könnte deshalb nicht nur zu graduellen Veränderungen der biologischen Besiedlung, sondern auch zum Verschwinden ganzer Populationen kommen.

## 3 Talsperre Saidenbach: Ein Modellgewässer zur Untersuchung der Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Gewässerökosysteme

Langjährige Beobachtungsreihen simultan erhobener meteorologischer, hydrologischer, physikalischer, chemischer und biologischer Daten sind nur für wenige Gewässer verfügbar. Daher wurde die Trinkwassertalsperre Saidenbach im Westerzgebirge (mittlere Tiefe 15,3 m, maximale Tiefe 48 m), für die eine umfassende Datenreihe seit 1975 vorliegt (z. B. [8]), als Modellökosystem für die Untersuchung von Auswirkungen der Klimaerwärmung ausgewählt. Trendanalysen ergaben, dass beispielsweise das Jahresmittel der oberflächennahen Wassertemperatur in der Talsperre Saidenbach seit 1975 um durchschnittlich  $0,074 \text{ K a}^{-1}$  zugenommen hat. Für die Monate von April bis August beträgt der mittlere Temperaturanstieg sogar etwa  $0,10 \text{ K a}^{-1}$ . Im Rahmen des Schwerpunktprogramms AQUASHIFT werden innerhalb des Clusters „Talsperre Saidenbach“ in mehreren koordinierten Teilprojekten nicht nur ökologische Fragestellungen, sondern auch genetische und physiologische Charakteristika von Schlüsselarten des Nahrungsnetzes bzw. höheren taxonomischen Einheiten untersucht (Bild 1). Dies geschieht durch die Kombination von statistischen Analysen der Langzeitdaten, zeitlich, räumlich und taxonomisch hoch aufgelösten Freilanduntersuchungen, Laborexperimenten und Szenarienanalysen mit verschiedenen Prozess- und Ökosystemmodellen. Eine solche Verknüpfung

methodischer Ansätze ermöglicht eine fundierte Identifizierung von Organismen, Interaktionen und Phasen, die besonders sensitiv auf eine Klimaerwärmung reagieren und sich daher als mögliche „Marker“ eignen (s. Bild 1). Folgende Schlüsselorganismen wurden identifiziert:

- Einzeller (*Coleps*, *Paramecium*): Sie sind Konsumenten von Bakterien, die sich aufgrund ihrer sehr kurzen Generationszeit gut für evolutionsökologische Studien eignen.
- Phytoplankton: Sie gelten als wichtigste Primärproduzenten in tiefen Gewässern, wobei insbesondere Diatomeen (Kieselalgen) eine Massenentwicklung im Frühjahr ausbilden und auf klimatische Signale reagieren.
- Chironomiden (Zuckmücken): Die Larven dominieren das Benthos (Organismengemeinschaft am Gewässerboden), während die stark pigmentierten Puppen die gesamte Wassersäule durchwandern, um an der Oberfläche emergieren zu können.
- *Daphnia sp.* (Wasserflöhe) sind wichtige Filtrierer von Phytoplankton, Protozoen und Bakterien im Pelagial (der Lebensgemeinschaft des Freiwassers). Sie erhöhen maßgeblich die Klarheit eines Gewässers und sind ein Beuteorganismus von *Leptodora*, Jungfischen und älteren Barschen.
- Jungfische (Barsch) und *Leptodora kindtii* (Raubwasserfloh) sind Räuber der Daphnien, aber auch Beute der älteren Barsche.
- Ältere Barsche nutzen als opportunistische Sichträuber sowohl Chironomidenpuppen, Jungfische und Daphnien wie auch *Leptodora* als Beute.

Die beobachtete Erwärmung in der Talsperre führt gleichzeitig auch zu Veränderungen im Timing von Eisauflauf und Totaldurchmischung sowie der Schichtungsstabilität. Dies beeinflusst indirekt auch die Phänologie der Wasserorganismen, da die Dauer geeigneter Temperaturbedingungen für einzelne Arten sehr unterschiedlich, entsprechend ihres thermischen Toleranzbereiches, verändert wird. Für die Schlüsselarten im Nahrungsnetz wurden „cardinal dates“ identifiziert. Dies sind zum Beispiel Beginn, Ma-

ximum und Ende der Phytoplanktonmassenentwicklung im Frühjahr, welche mit statistischen Methoden quantifiziert wurden und einen deutlichen Zusammenhang mit dem Zeitpunkt des Eisauflaufs zeigten [8]. Weitere „cardinal dates“ beziehen sich zum Beispiel auf die Verpuppungsphase der Chironomiden, das Laichen der Fische und den Schlupf der Nachkommen. Eine Korrelationsmatrix, die das Timing der „cardinal dates“ der jeweiligen Schlüsselart (s. Bild 1) in Abhängigkeit von der Wassertemperatur beschreibt (Bild 2), ermöglichte es erstmals, Schwellenwerte für sensitive Phasen abzuleiten und diese projektübergreifend als warm oder kalt zu charakterisieren. Als zielführend erwies sich, drei distinkte Phasen zu berücksichtigen: Winter (Phase der Eisbedeckung), Phase der frühen Schichtung (Mai) und die Phase der stabilen Schichtung (Juli bis August). Mit deren Hilfe können der Langzeitdatensatz der Talsperre Saldenbach und vergleichbare Datensätze über eine WWC-Kodierung (warm-warm-kalt entsprechend der Reihenfolge der oben genannten Phasen) klassifiziert werden.

Bezüglich des Schlüsselorganismus *Daphnia*, einem wesentlichen Bindeglied zwischen den Primärproduzenten und höheren trophischen Ebenen, war bereits aus früheren Studien bekannt, dass die Populationsentwicklung durch das komplexe Zusammenwirken von bottom-up-Faktoren (Futterbedingungen) und top-down-Faktoren (Fraßdruck) bestimmt wird [9, 10]. Die Startpopulation im Frühjahr wird wesentlich durch Bedingungen während des vorangehenden Winters bestimmt [9, 11]. Dabei kann, neben der bei Daphnien üblichen Fortpflanzungsform durch parthenogenetische Eier (Jungfernzeugung), auch die Rekrutierung aus sexuell produzierten Dauereiern bedeutsam werden, was bei früherer Erwärmung ein „mismatch“ mit der Phytoplanktonentwicklung begünstigt [12]. Aus den Langzeitdaten der Talsperre Saldenbach zeigte sich, dass neben der Struktur des Fischbestandes (Anteil an Raubfischen, vergl. [13]) die Wassertemperatur im Frühjahr die wichtigste Komponente für die Erklärung von Veränderungen der Biomasse der Daphnienpopulation bildet. Bei vorwiegend asexueller Fortpflanzung bilden die nahezu ausschließlich weiblichen Daphnien genetisch identische Nachkommen und es entwickelt sich eine Population, die aus einer Vielzahl an Klonen besteht. Darunter befinden sich solche, die in ihrem thermischen Optimum eher an kalte oder warme Bedingungen angepasst sind, was zu einer entsprechenden Dominanz dieser Klone führt [14]. Mittels Szenarienanalysen mit Ökosystem- bzw. Prozessmodellen werden diese empi-

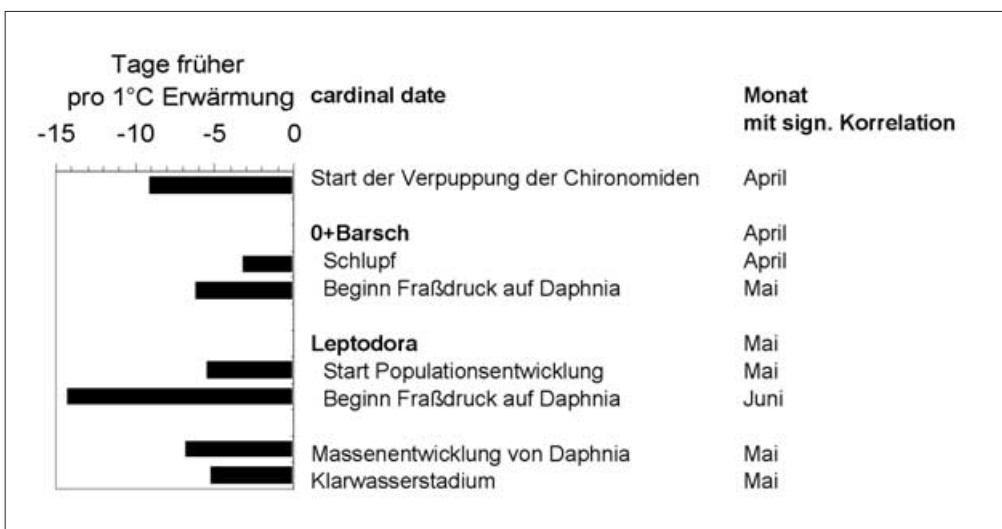


Bild 2. Zeiträume mit signifikanten Korrelationen zwischen den identifizierten Schlüsselereignissen und der Wassertemperatur sowie die prognostizierte Vorverlagerung der Schlüsselereignisse bei einer Erwärmung um 1 Kelvin



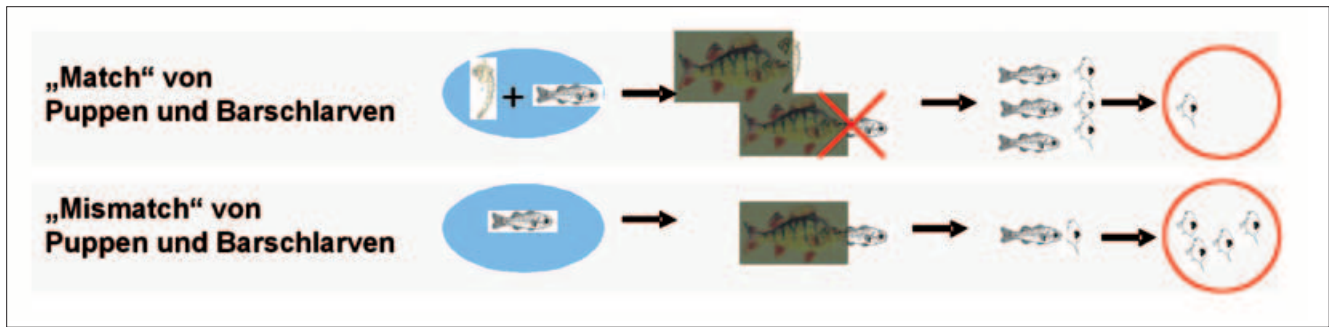


Bild 3. Schematische Darstellung der benthisch-pelagischen Kopplung und der Kaskadenwirkung einer zeitlichen Überlagerung (Match) der Verpuppungsphase und dem Auftreten von Barschlarven für die Daphnienpopulation in der Talsperre Saidenbach

rischen Befunde derzeit auf ihre Konsistenz überprüft und Vorhersagen für Auswirkungen von künftigen Klimaszenarien erarbeitet.

Ein weiterer wichtiger Baustein zur Erforschung des Klimaeinflusses sind Experimente, die sich mit den Fragen der Adaptation von Populationen mit kurzen Generationszeiten, wie den Einzellern *Coleps* sp. und *Paramecium aurelia* (vgl. Bild 1) befassen [15, 16]. Ergebnisse in diesem Bereich sind interessant im Zusammenhang mit einer möglichen Süd-Nord-Verschiebung in der Artenzusammensetzung und der Herausarbeitung zugrunde liegender Mechanismen sowie der Konsequenzen möglicher Invasionen bzw. Extinktionen einzelner Arten.

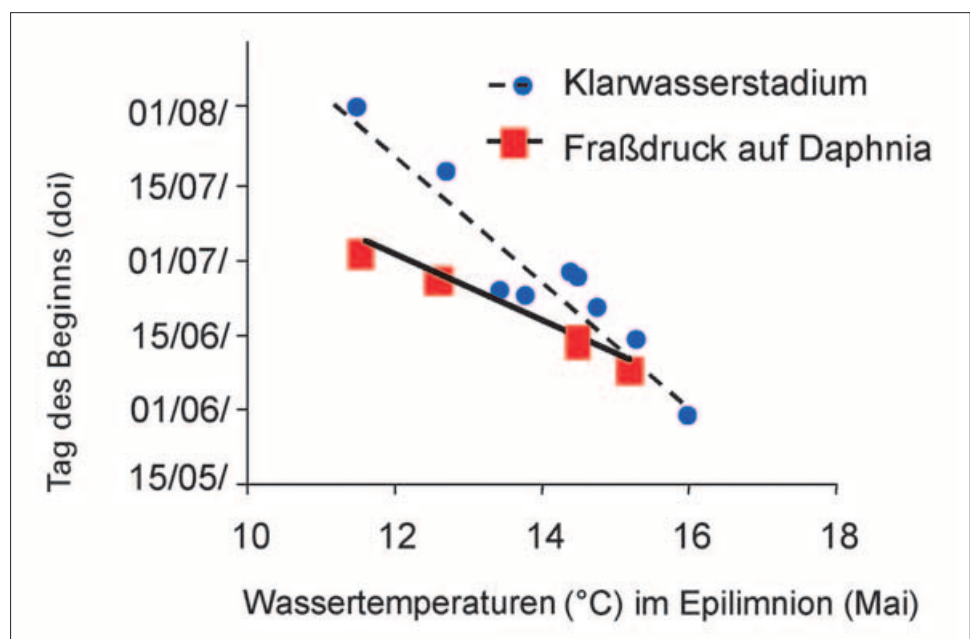
#### 4 Einfluss der Klimaerwärmung auf die Kopplung des benthischen und pelagischen Nahrungsnetzes der Talsperre Saidenbach

Eine mechanistische Analyse von temperaturbedingten Veränderungen der Interaktionen von Schlüsselarten durch vergleichende Untersuchungen von warmen und kalten Perioden ist einer der Arbeitsschwerpunkte im AQUASHIFT-Cluster Saidenbach. Dabei postulieren wir zwei alternative trophische Kaskaden, deren Eintreten durch das Temperaturregime gesteuert wird und über eine benthisch-pelagische Kopplung letztlich die Populationsdynamik von *Daphnia* im Sommer bestimmt (Bild 3):

- (1) Die Barsche fressen selektiv die aus dem Sediment aufsteigenden Chironomidenpuppen während der Phase der intensivsten Verpuppung im Mai und Juni und nutzen ihre eigenen Nachkommen erst danach als Beute (Match von zwei alternativen Beutetypen), oder
- (2) das massenhafte Auftreten der Chironomidenpuppen ist infolge höherer Wintertemperaturen bereits beendet, wenn die Nachkommen der Barsche schlüpfen, woraufhin die älteren Barsche ihre Nachkommen bereits unmittelbar nach deren Schlupf dezimieren (Juni, Bild 3 unten).

Im Fall (1) ist die Zahl der überlebenden Barschlarven und damit auch deren Fraßdruck auf die Daphnien höher (Bild 3 oben). Wird die Daphnienpopulation neben den Jungfischen zeitgleich auch noch von den älteren Barschen sowie von wirbellosen Räubern (z. B. *Leptodora*) als Hauptbeuteorganismus genutzt (Match mehrerer Räuber), führt die daraus resultierende hohe Mortalität zu einer Destabilisierung der Daphnienpopulation. Wenn diese Phase hoher Fraßverluste der Daphnien zeitlich von einer Phase der Futterlimitation für die Daphnien überlagert wird, kann die geringe Reproduktion die hohen Fraßverluste nicht mehr ausgleichen und die Daphnienpopulation bricht zusammen. In der Regel ist dies auch mit einer Verschlechterung der Wassergüte verbunden, weil das enorme Biofiltrationspotenzial der Daphnien wegfällt.

Bild 4. Ein Temperaturanstieg im Mai führt zu einer zeitlichen Vorverlagerung sowohl der Phase der Futterlimitation während des Klarwasserstadiums als auch des Beginns des Fraßdrucks auf *Daphnia* durch die 0+Barsche. Entscheidend ist, dass es bei Wassertemperaturen > 14 °C zu einer Überlagerung beider für die Daphnien ungünstigen Bedingungen und damit zu einer Destabilisierung der Population kommt.



Die Phase, in der eine Kopplung des benthischen und pelagischen Nahrungsnetzes beobachtet wurde, dauerte während des Untersuchungszeitraumes seit 2005 zwischen drei (2006, 2007) und acht Wochen (2005) und war jeweils an die Hauptperiode der Verpuppung von drei Chironomidenarten (von insgesamt 73 identifizierten Arten) im Mai und Juni gekoppelt. Nur in dieser Phase stieg der Anteil der Chironomidenpuppen an der Nahrung der Barsche auf bis zu 68 % an. Diese Kopplung war jeweils dann beendet, wenn die Anzahl der aufsteigenden Puppen abnahm und die Totallänge (TL) der Jungfische erstmals die der größten Puppen (17 mm) übertraf. Damit wird deutlich, dass das Zeitfenster einer benthisch-pelagischen Kopplung sowohl vom Timing der Verpuppungsphase als auch vom Schlupfzeitpunkt (TL = 4 mm) und dem Wachstum der Barsche abhängig ist. Der Zeitpunkt der Totaldurchmischung, die mit einem deutlichen Anstieg der Wassertemperatur (auf > 4 °C) selbst in 40 m Tiefe verbunden ist, erwies sich als maßgeblicher Faktor, der den Übergang vom letzten Larven- zum Puppenstadium der Chironomiden induziert. Timing und Synchronisierung der Verpuppungsphase sind signifikant von der Wassertemperatur im April abhängig, wobei der Unterschied hinsichtlich des Beginns der Verpuppung zwischen dem kältesten und wärmsten Jahr bei sechs Wochen liegt, das heißt die Verpuppung startet um neun Tage früherer im Jahr pro Kelvin Erwärmung im April (s. Bild 2).

Laich- und Schlupfzeitpunkt der Jungfische sowie deren Wachstum ist hingegen von der Erwärmung des Epilimnions abhängig. Höhere Wassertemperaturen im Mai (> 14 °C) führen durch einen Anstieg der Wachstumsraten dazu, dass die Totallänge der jungen Barsche und damit auch deren Maulgröße bereits Anfang Juni so groß ist, dass sie problemlos ihre Vorzugsbeute Daphnien nutzen [17]. Eine Erwärmung der Wassertemperatur in 3 m Tiefe um 1 K führt dazu, dass die Barsche sieben Tage früher beginnen Daphnien zu fressen. In Jahren mit niedrigeren Wassertemperaturen im Mai erreichen die jungen Barsche hingegen zu keinem Zeitpunkt Biomassen bzw. Konsumtionsraten, die die Daphnienpopulation gefährden könnten. Das Gleiche gilt für den wirbellosen Daphnien-Räuber *Leptodora*. Während bei Wassertemperaturen > 14 °C im Frühsommer das Populationsmaximum und damit auch hohe Konsumtionsraten bereits im Juni während des Klarwasserstadiums auftreten, ist in kälteren Jahren der Fraßdruck zumindest während der für die Daphnien kritischen Phase des Klarwasserstadiums noch unbedeutend [17]. Im Vergleich zu den anderen Schlüsselarten ergibt sich für *Leptodora* die höchste zeitliche Vorverlagerung infolge einer Erwärmung, nämlich von 14 Tagen pro 1 K Erwärmung (s. Bild 2).

Neben dem Timing der Räuber beeinflusst die Wassertemperatur im Mai aber auch den Beginn des Klarwasserstadiums (Bild 4). Noch bedeutender als die zeitliche Verschiebung dieser Einzelereignisse ist jedoch, dass bei Wassertemperaturen > 14 °C regelmäßig eine Match-Situation des zeitgleichen Auftretens von hohen Fraßverlusten von Daphnien und geringer Reproduktion während des Klarwasserstadiums auftritt (Bild 4). Eine wesentliche Schlussfolgerung ist, dass bereits eine moderate Erwärmung während einer kritischen Phase erhebliche Veränderungen im gesamten Nahrungsnetz induzieren kann, wobei das Temperatursignal (im Mai) häufig aufgrund der indirekten Effekte erst mit einem erheblichen Zeitverzug (z. B. im Juli) wirksam wird. Die beobachteten Veränderungen im Nahrungsnetz sind primär eine Folge der Unterschiede hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit der zeitlichen Verschiebung der „cardinal

dates“ (2 – 14 Tage pro 1 K Erwärmung im Mai, Bild 2), die eine parallele Verschiebung der Sukzession aller trophischen Ebenen verhindern und stattdessen deren Interaktionen erheblich beeinflussen.

## 5 Ausblick

Die weiteren Untersuchungen zielen darauf zu prüfen, inwieweit die in der Talsperre Saldenbach gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere Gewässer(-typen) übertragbar sind. Die Identifizierung sensibler Phasen und ihre Klassifizierung in einen WWC-Code bieten dafür ein geeignetes Werkzeug. Weiterhin erweist sich bereits jetzt, vor Abschluss des Schwerpunktprogramms, die Kopplung von methodischen Ansätzen und die „Clustering“ um ein Modell-Ökosystem als zwingend notwendig für eine tiefgehende Analyse. Es ist zu erwarten, dass die Kopplung und vergleichende Auswertung der im Rahmen des Schwerpunktprogramms erhobenen Daten während der letzten Projektphase zu wesentlichen Fortschritten hinsichtlich der Vorhersage von klimabedingten Änderungen in aquatischen Nahrungsnetzen führen wird.

### Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung, ULRICH SOMMER für die Leitung des Schwerpunktprogramms AQUASHIFT und den zahlreichen Projektmitarbeitern für die Datenbereitstellung.

### Literatur

- [1] IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [2] Enke, W.; Deutschlander, T.; Schneider, F.; Kuchler, W.: Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. In: Meteorologische Zeitschrift **14** (2005) 2, S. 247 – 257
- [3] Bernhofer, C.; Goldberg, V. et al.: Sachsen im Klimawandel – eine Analyse. Dresden: Zentraler Broschürenversand der Sächsischen Staatsregierung, 2008
- [4] Parmesan, C.; Yohe, G.: A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. In: Nature **421** (2003) 6918, S. 37 – 42
- [5] Stenseth, N. C.; Mysterud, A.: Climate, changing phenology, and other life history and traits: Nonlinearity and match-mismatch to the environment. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **99** (2002) 21, S. 13379 – 13381
- [6] Mooij, W. M.; Hülsmann, S.; De Senerpont Domis, L. N.; Nolet, B. A.; Bodelier, P. L. E.; Boers, P. C. M.; Dionisio Pires, M. L.; Gons, H. J.; Ibelings, B. W.; Noordhuis, R.; Portielje, R.; Wolfstein, K.; Lammens, E. H. R. R.: The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review. In: Aquatic Ecology **39** (2005) 4, S. 381 – 400
- [7] Cushing, D. H.: Plankton production and year-class strength in fish populations – an update of the match mismatch hypothesis. In: Advances in Marine Biology **26** (1990), S. 249 – 293
- [8] Rolinski, S.; Horn, H.; Petzoldt, T.; Paul, L.: Identifying cardinal dates in phytoplankton time series to enable the analysis of long-term trends. In: Oecologia **153** (2007), S. 997 – 1008
- [9] Benndorf, J.; Kranich, J.; Mehner, T.; Wagner, A.: Temperature impact on the midsummer decline of *Daphnia galeata*: an analysis of long-term data from the biomanipulated Bautzen Reservoir (Germany). In: Freshwater Biology **46** (2001), S. 199 – 212
- [10] Wagner, A.; Hülsmann, S.; Dörner, H.; Janssen, M.; Kahl, U.; Mehner, T.; Benndorf, J.: Initiation of the midsummer decline of *Daphnia* as related to predation, non-consumptive mortality and recruitment: a balance. In: Archiv für Hydrobiologie **160** (2004) 1, S. 1 – 23
- [11] Wagner, A.: Light limitation increases the edibility of *Asterionella formosa* Hass. for *Daphnia* during periods of ice-cover. In: Limnologia **38** (2008) 3 – 4, S. 286 – 301
- [12] De Senerpont Domis, L. N.; Mooij, W. M.; Hülsmann, S.; van Nes, E. H.; Scheffer, M.: Can overwintering versus diapausing strategy in *Daphnia* determine match-mismatch events in zooplankton-algae interactions? In: Oecologia **150** (2007) 4, S. 682 – 698
- [13] Benndorf, J.: Possibilities and limits for controlling eutrophication by biomanipulation. In: Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie **80** (1995), S. 519 – 534
- [14] Pinkhaus, O.; Schwerin, S.; Pirow, R.; Zeis, B.; Buchen, I.; Gigengack, U.; Koch, M.; Horn, W.; Paul, R. J.: Temporal environmental change, clonal physiology

- and the genetic structure of a *Daphnia* assemblage (*D. galeata-hyalina* hybrid species complex). In: *Freshwater Biology* **52** (2007) 8, S. 1537 – 1554
- [15] *Barth, D.; Przybos, E.; Fokin, S. I.; Schlegel, M.; Berendonk, T. U.*: Cytochrome b sequence data suggest rapid speciation within the *Paramecium aurelia* species complex. In: *Molecular Phylogenetics and Evolution* **49** (2008) 2, S. 669 – 673
- [16] *Barth, D.; Tischer, K.; Berger, H.; Schlegel, M.; Berendonk, T. U.*: High mitochondrial haplotype diversity of *Coleps* sp. (Ciliophora: Prostomatida). In: *Environmental Microbiology* **10** (2008) 3, S. 626 – 634
- [17] *Wagner, A.; Benndorf, J.*: Climate-driven warming during spring destabilises a *Daphnia* population: a mechanistic food-web approach. In: *Oecologia* **151** (2007) 2, S. 351 – 364

Manuskripteingang: 3.4.2009  
 Angenommen am: 2.5.2009



**Wagner, Annekatriin**

Dr. rer. nat.

Studium Hydrobiologie von 1988 bis 1990 an der Universität Rostock und von 1990 bis 1994 an der TU Dresden ♦ 1998 Promotion zur Dr. rer. nat. ♦ seit 1995 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Hydrobiologie, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden



**Petzoldt, Thomas**

Dr. rer. nat.

Studium Biologie von 1983 bis 1988 an der Universität Rostock und der TU Dresden ♦ 1996 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ seit 1988 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hydrobiologie, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden



**Hülsmann, Stephan**

Dr. rer. nat.

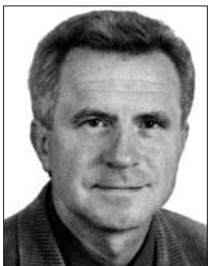
Studium Biologie von 1987 bis 1994 an der Georg-August-Universität Göttingen ♦ 2001 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ seit 2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hydrobiologie, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden



**Berendonk, Thomas U.**

Prof. Dr. rer. nat. habil.

Studium Biologie von 1989 bis 1996 an Universitäten in Osnabrück, Kansas und Kiel ♦ 1999 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ 2007 Habilitation zum Dr. rer. nat. habil. ♦ seit 2009 Professor für Limnologie (Gewässerökologie) und Direktor des Instituts für Hydrobiologie, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden



**Paul, Lothar**

Dr. rer. nat.

Studium Physik von 1969 bis 1973 an der Karl-Marx-Universität Leipzig ♦ 1985 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ seit 1977 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Ökologischen Station Neunzehnhain der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden



**Benndorf, Jürgen**

Prof. (i. R.) Dr. rer. nat. habil.

Studium Biologie von 1962 bis 1967 an der Universität Leipzig ♦ 1971 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ 1980 Habilitation zum Dr. sc. nat., 1991 als Dr. rer. nat. habil. anerkannt ♦ von 1992 bis 2008 Professor für Limnologie am Institut für Hydrobiologie, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden ♦ seit Oktober 2008 im Ruhestand