

3.5 Biologischer Wandel im Rheinsystem

BRUNO STREIT

Biologischer Wandel im Rheinsystem: Die biologische Zusammensetzung des Rheinsystems änderte sich in der Erdgeschichte durch den Wechsel der Kalt- und Warmzeiten, durch Anzapfen anderer Flusssysteme und durch Evolutionsprozesse. Zusätzliche zivilisationsbedingte Veränderungen sind seit der Römerzeit bekannt. Im 19. Jahrhundert hat die Rheinregulierung zu einer erheblichen biologischen Verarmung im Rhein geführt. Im 20. Jahrhundert sind zudem die Umweltbelastungen erheblich angestiegen. In den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts hat eine massive Überformung der Fauna durch nicht-einheimische Arten eingesetzt, die großenteils aus dem pontokaspischen Raum stammen. Viele Rhein-Arten sind dadurch stark zurückgedrängt worden, kommen allerdings teilweise noch in Nebenflüssen vor. Der globale Klimawandel kann nicht als zentrale Ursache für den Artenwandel gesehen werden, hat allerdings beigetragen.

Biological change in the Rhine River system: The biological community of the Rhine River system has changed gradually during the earth history as a consequence of glacial and interglacial periods, by stream captures, and by evolutionary processes. Major human-induced changes probably started in the Roman period. But it was especially in the 19th and 20th centuries, that river engineering led to a severe impoverishment of the biological communities. In the 20th century, pollution increased considerably. During the last decades of this century, the inherited fauna was transformed to a great extent by invasive species, largely from the Ponto-Caspian region. Many original Rhine species have suffered from a severe reduction, but still partly live in affluents. The global climate change is not considered a crucial factor to drive and shape the species turnover.

Ein ungeplantes Großexperiment

Die biologische Besiedlung des Rheins und vieler seiner Nebengewässer hat sich in den letzten 200 Jahren grundsätzlich gewandelt. Die Veränderungen infolge Uferverbauungen, chemischen Belastungen und der Vermischung mit exotischen Tier- und Pflanzenarten haben gleichsam zu einem neuen Ökosystem mit geänderter Artenzusammensetzung und mit dynamisch sich ändernden biologischen Wechselbeziehungen geführt.

Zuweilen wird argumentiert, dass Vermischungen von Faunen und Floren erdgeschichtlich auch früher schon stattfanden. Der natürliche Faunen- und Florenaustausch erfolgte jedoch in der Regel nur mit benachbarten Flusssystemen, wenn sie temporär in Verbindung traten. Einen entfernten bis gar interkontinentalen Austausch gab es allenfalls in gewissem Ausmaß als Folge von Kontinentaldrift oder Superkontinentbildungen auf der Erde, was sich aber nur im Abstand von hunderten von Millionen Jahren formte. Die heutige rasche globale Artenvermischung ist daher faktisch singulär und mit offenem Ausgang. Sie verläuft wie ein ungeplantes und zielloses Großexperiment, das nicht mehr zu steuern ist.

Das Rheinsystem im Laufe der Erdgeschichte

Die Veränderung des Rheinlaufs kann einigermaßen kontinuierlich ab dem Mittelmiozän, seit gut 16 Mio. Jahren, verfolgt werden (PREUSSER 2008). Er entwickelte sich aus einem Fluss, der wohl bei den damals entstandenen Kaiserstuhlvulkanen im Oberrheingraben seine Quelle hatte. Dieser Ur-Rhein wandte sich beim heutigen Worms nach Nordwesten in Richtung Alzey und von dort nach Bingen. Er durchquerte das Rhei-

nische Schiefergebirge in einem noch breiten und flachen Tal und vereinigte sich mit dem alten Flusssystem der Mosel. Bereits im Gebiet um Köln-Düsseldorf war die Ur-Nordseeküste erreicht, wo damals in Sumpfmoo- ren die rheinischen Braunkohlelager entstanden.

Die heutigen Nebenflüsse Main und Neckar gehörten großenteils noch dem Donausystem an. Der Unterrhein ab Spessart dürfte vor etwas über 2 Mio. Jahren zum Rheinsystem gestoßen sein; Ober- und Mittelmain kamen vor vielleicht 1 Mio. Jahre hinzu. Ähnliches gilt für den Neckar, der vom tief und nahe gelegenen Oberrhein durch rückwärtige Erosion angezapft wurde. Die Donau bezog ihre Wassermassen allerdings noch zum großen Teil aus dem Alpenbereich: Hier war die Aare, korrekter die »Aare-Donau«, der zentrale Zufluss. Vor vielleicht ebenfalls etwa 1 Mio. Jahre wandten sich jedoch die Wasser von Aare und Hochrhein in Richtung Oberrheingraben, womit die Verbindung zu dem in die Nordsee entwässernden Rhein etabliert wurde. Nur der Alpenrhein oberhalb des Bodensees war noch Teil des Donausystems und mittlerweile deren Hauptquellfluss. Dem Hochrhein wandte sich der Alpenrhein vor 400.000 bis 500.000 Jahren zu.

Vor rund 70.000 Jahren, also in der letzten Kaltzeit, wurde der oberste Teil des im Schwarzwald noch verbliebenen Donau-Oberlaufs, die »Feldberg-Donau«, zum Rhein abgelenkt und bildete die heutige Wutach. Der Rheinfall im Hochrhein entwickelte sich in seiner jetzigen Form am Ende der letzten Kaltzeit vor etwa 16.000 Jahren, weshalb für Wanderfische seitdem dort die Grenze für deren Aufwärtswanderung ist. Lediglich von Aalen wird öfters (wissenschaftlich aber vielleicht nicht belegt) berichtet, dass sie in Ufernähe über Land den Wasserfall passieren können (TAGESANZEIGER 2016).

Vor etwa 12.900 Jahren gab es während mehrerer Ausbruchphasen des Laacher-See-Vulkans temporär große Veränderungen im Mittelrhein, als Vulkanasche und Bims das Wasser bei Koblenz und Brohl bis zu 18 m hoch ansteigen ließen und damit ein vorübergehendes see- bis fjordähnliches Gewässer tief ins Mittelrheingebiet – und vielleicht darüber hinaus – entstehen ließen. Infolge eines darauf folgenden Dammbrechens mit einer bis zu 15 m hohen Flutwelle rheinabwärts wurden diese Barrieren wieder abgebaut (PARK & SCHMINCKE 2009).

Im Mündungsgebiet des Rheins stellten sich infolge der wechselnden Meeresspiegelhöhe und damit alternierender Erosion oder Sedimentation der Flüsse sowie infolge zahlreicher weiterer Einflussfaktoren immer wieder neue Verbindungen oder aber Unterbrechungen zu den benachbarten Flusssystemen ein. Solche wechselhaften Beziehungen bestanden zur Maas, Schelde, Themse, Somme und sogar zur Seine. Die Mündung dieses großen Paläo-Rheinstroms der jeweiligen Kaltzeiten lag also weit draußen im heutigen Ärmelkanal. Selbst in der Nacheiszeit, dem Holozän, gab es infolge geomorphologischer Prozesse beständige Veränderungen in den Rheinnebenarmen und auch in der Lage des eigentlichen Mündungsbereichs.

Natürlicher Faunen- und Florenwechsel

Die Verflechtung von Rhein- und Donausystem ist also schon erdgeschichtlich vorgegeben, doch kann der heutige Faunenimport in den Rhein, der besonders auffällig aus dem Donausystem erfolgt, nicht mit einem Hinweis auf den früher wohl auch schon stattgefundenen Austausch relativiert werden. Die Anpassungen durch rückwärtige Erosion erfolgten langsam und vielfach im Oberlaufbereich, wo eher kühl-tolerante Arten den



Abb. 3.5-1: Felsen, wie der Kleine und der Große Leisten bei Assmannshausen, waren ehemals im Mittelrhein häufig, sind heute aber zum großen Teil weggesprengt. Am gegenüberliegenden Ufer sind rechts vom Schiff sowie am rechten Bildrand künstliche Buhnen erkennbar, die, wie die natürlichen Felsen, ebenfalls den steinebesiedelnden Organismen Lebensraum bieten (Foto: B. Streit, 29.5.2011).

Wechsel vom einen in das andere Einzugsgebiet mitgemacht haben mochten. Tatsächlich sind generell viele Flussoberlauf-Arten weit verbreitet und ähnliches gilt auch für Quell- und Grundwassertierte. In den tiefer liegenden und wärmeren Stromgebieten der Donau und der in die Nordsee mündenden Ströme haben sich aber sehr unterschiedliche Faunen und Floren entwickelt.

Die tierische und pflanzliche Besiedlung des Rheins war in den Warmzeiten des Pleistozäns natürlicherweise verschieden von der in den Kaltzeiten. Es wird regelmäßige Neubesiedlungen sowie auch Abwanderungen und Aussterben gegeben haben. In den Warmzeiten lebten auch Flusspferde und Wasserbüffel im Rheingebiet, die wohl aus mediterranen Regionen einwanderten. Die jetzige Warmzeit erlebten diese Populationen oder Arten hier aber nicht mehr; vermutlich war der menschliche Jagd- und Siedlungsdruck schon zu hoch.

Natürlich liefen in der gesamten Existenzzeit des Rheinsystems auch Evolutionsprozesse im Gewässer ab, indem neue Arten entstanden und andere infolge Aussterbens verschwanden. Wanderfische reagierten plastisch auf die immer wieder neuen Flussnetze.

Veränderungen in geschichtlicher Zeit

Schon für die Römerzeit vermutet man erste Umleitungen (insbesondere der IJssel) und weitere Veränderungen, ist sich aber nicht überall sicher. Ab dem Mittelalter haben Mühlwerke, Flussquerbauten und flussüberspannende Netze und Reusen den Zug der Wanderfische zunehmend behindert: Aus der Entwicklung von Anlandungen, Preisstrukturen und Steuern wurde errechnet, dass Migrationen und Populationsstärken der Wanderfische seit wenigstens 1.000 Jahren erheblich durch menschliche Eingriffe beeinflusst wurden (LENDERS et al. 2016). Ab dem 16. Jahrhundert entstanden in Europa erste Kanalbildungen mit Schiffsverkehr zwischen bislang getrennten Fluss-Systemen. Als eine Folge hiervon wird die Einwanderung der Wandermuschel (*Dreissena polymorpha*) nach Mitteleuropa im 18. Jahrhundert gesehen, die seit 1826 auch im Rhein vorkommt.

Eine fundamentale ökologische Veränderung erfolgte in den mittleren Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts durch die Oberrheinbegradigung. Die hiermit einsetzende Tiefenerosion des nun rasch abfließenden verkürzten und kanalisierten Rheinlaufs führte auch zu einer Grundwasserabsenkung um mehrere Meter, was im Verlaufe der folgenden 100 Jahre Randgewässer und Feuchtgebiete austrocknen ließ (siehe auch Abb. 2.4-1 in Kap. 2.4 - LOZÁN). Die Flussauen und ihre ursprünglichen Lebensgemeinschaften verschwanden weitgehend. Dem Oberrhein-Großprojekt folgten ähnliche Projekte am Niederrhein und am Alpenrhein.

Der fast durchgehende Umbau des Rheins führte dazu, dass Arten, die randliche Stillwasserbereiche und Flachufer mit Krautzonen benötigen, kaum noch Lebensraum fanden. Dafür wurden Arten begünstigt, die in stark fließendem Wasser und gegebenenfalls auf Kiesuntergrund gut leben oder ablaichen konnten. Wanderfische sowie obligat krautlaichende Fische, wie Hecht, Karpfen, Schleie und Rotfeder wurden infolge der Flussbaumaßnahmen und der aufkommenden Flusskraftwerke deutlich seltener, wozu auch die gleichzeitig ansteigende Wasserverschmutzung beitrug. Außer der Wandermuschel gelangte im 19. Jahrhundert durch bewusste »Einbürgerung« auch der Zander, dessen Ursprung im und um das europäische Russland liegt, in den Rhein.

Zu einem ernsthaften Problem wurde die Einleitung ungeklärter häuslicher Abwässer, die stark den Sauerstoff im Wasser aufzehrten. Auch Industrieabwässer mit Schwermetall- und Salz-Frachten stiegen im 20. Jahrhundert erheblich an und führten zusammen mit den erniedrigten O_2 -Werten zur Lebensbedrohung für Fische und Wirbellose. Im Niederrhein verminderte sich die Artenzahl der Makro-Invertebraten (d.h. der

Wirbellosen, die mittels einer Lupe bestimmbar sind) von ehemals deutlich über 100 auf rund 25 Arten. Um das Jahr 2000 zählte man dank verbesserter Wasserqualität wieder 70-80 Arten (nach UEHLLINGER et al. 2009). Allerdings trugen nun die zunehmend artenreicher auftretenden »Neubürger« zum wieder erhöhten Ergebnis bei.

Weitreichende Artenumwälzung zur Jahrtausendwende

Auf die beginnende rasante Einschleppung und Einwanderung von immer mehr Arten in Ober- und Mittelrhein verwies als erster ausführlich KINZELBACH (1972) und führte hierbei den Begriff »Neozoa« ein, der in Anlehnung an den älteren Terminus Neophyta für eingeschleppte Pflanzen neu eingeschleppte Tiere charakterisieren sollte. Die Bezeichnung wurde in der Folge im deutschen Sprachraum zu einem festen wissenschaftlichen und auch in Medien verwendeten Begriff. Zu einem breiten Forschungs- und Öffentlichkeitsthema wurde der biologische Wandel im Rhein, mittlerweile auch im Hochrhein und Bodensee einsetzend, etwa ab Beginn der 1990er Jahre (STREIT 1992).

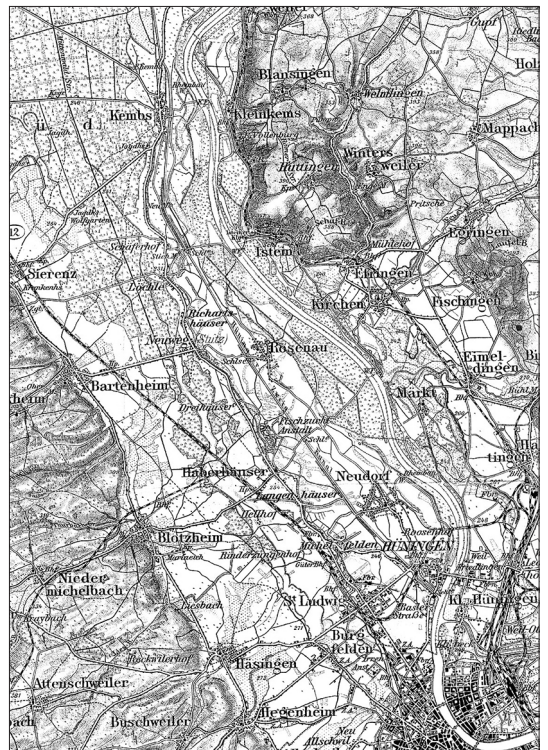


Abb. 3.5-2a und -2b: Ausschnitte aus Holdenecker (1836) links mit dem noch ursprünglich mäandrierenden Oberrhein und aus der Karte des Deutschen Reiches (1889) mit dem nunmehr kanalisiertem Rheinbett, wenigen Restarmen und neuen Aufforstungsflächen im früheren Auengebiet. Insgesamt wurde der Rheinlauf zwischen Basel und Bingen um 81 km verkürzt und der ökologische Charakter des Oberrheins gleich sich dem des rasch fließenden Hochrheins (rechts unten in den Karten) an.

Die beschleunigte Neozoen-Zunahme am Ende des 20. Jahrhunderts verlief annähernd parallel mit der Verbesserung der Wasserqualität, aber auch mit dem intensivierten europäischen Frachtverkehr. Zählte KINZELBACH (1995) im schiffbaren Rhein für 1830 nur gerade zwei Arten, waren es um 1900 zwölf, 1950 bereits 37 und 1990 dann 63 Neozoen-Arten.

Als ein biologisch-ökologischer Grund, warum manche Neankömmlinge unter den Wirbellosen und Fischen so erfolgreich waren, gilt die relative Artenarmut des Rheins: Zum einen war der nördlich der Alpen fließende Rhein als Folge der letzten Kaltzeit generell ärmer an Arten als etwa die Donau, die von einem erleichterten Artenzugang aus wärmeren Gewässern profitierte. Zum anderen hatten die strukturellen Umgestaltungen und chemischen Belastungen des 19. und 20. Jahrhunderts zu einem Verlust vieler Arten geführt, so dass manche ökologischen Nischen auch hierdurch weniger dicht besetzt waren als im Donaauraum. Einwandernde Arten konnten somit teilweise direkt Nischenlücken füllen.

In Einzelfällen spielten wohl auch physiologische oder sonstige Präadaptationen (günstige genetische Eigenschaften) eine Rolle: Nach einem großen Chemieunfall bei Basel im Jahre 1986 gelangten Quecksilberverbindungen und Phosphorsäureester in großem Maße in den Rhein und führten über hunderte von Kilometern zu einem Massensterben von Aalen, Flohkrebse und weiteren Tiergruppen. Die aus Nordamerika stammende Flohkrebseart *Gammarus tigrinus* fand sich aber nach einer gewissen Zeit wieder auffallend häufig im Rhein, wohingegen einheimische Verwandte, wie *Gammarus fossarum*, noch seltener als zuvor aufgefunden wurden. Experimentelle Untersuchungen zeigten, dass der erfolgreiche Neubesiedler zufällig auch erheblich toleranter gegenüber Phosphorsäureestern war, als die einheimischen Arten (STREIT & KUHN 1994). Er dürfte also robuster reagiert und zu einem größeren Prozentsatz überlebt haben und hat für einige Jahre eine hohe Populationsdichte entwickelt. Später ist diese Art allerdings selber durch neue und größere Flohkrebse, speziell den Großen Höckerflohkrebs *Dikergammarus villosus*, verdrängt worden.

Das Phänomen, dass eingeschleppte Arten nach einer gewissen Anlaufphase massenhaft werden, danach aber selber anderen Neankömmlingen weichen müssen, ist in Anlehnung an ähnliche Fluktuationen in der Finanzwelt als *Boom and Bust-Zyklus* bezeichnet worden. Gerade bei Kleinkrebsearten wurden in den 1990er Jahren auffällige derartige Massenverschiebungen beobachtet (HAAS et al. 2002).

Von den ursprünglichen einheimischen Arten, Gattungen und Familien der Makro-Invertebraten kommen

in den letzten zehn Jahren im Mittelrhein noch einigermaßen häufig Zuckmückenlarven (Chironomidae), Schlammröhrenwürmer (Tubificidae), kleine Ruderwanzen (*Micronecta*) oder die Flussmützenschnecke *Ancylus fluviatilis* vor (BERNAUER & JANSEN 2006). Manche andere Art findet man eher nur noch vereinzelt. Von den Neozoen sind für den Rheinuferwanderer bei Niedrigwasser die millionenfach auftretenden ca. 2 cm großen Gehäuseschalen der aus Asien stammenden und um 1990 eingeschleppten Asiatischen Körbchenmuscheln der Gattung *Corbicula* besonders auffallend.

Die starken Veränderungen haben auch den Bodensee-Obersee und -Untersee erreicht: So fand sich der erwähnte Große Höckerflohkrebs bereits 2013 im fast ganzen Uferbereich der beiden Seen, bei Romanshorn gar mit einem Massenvorkommen (ANEBO 2016). Die Aale, die bisher nur durch künstlichen Besatz überleben konnten, werden andererseits in der Zukunft vielleicht verschwinden, weil der natürliche Nachzug über den Rheinfall zu gering ist und der Besatz aus ökonomischen Gründen vor rund zehn Jahren aufgegeben wurde.

Einen direkten Zusammenhang zwischen der Ausbreitung von Neozoen im Gewässer und der Intensität des Schiffsverkehrs wurde für Flohkrebse und für Grundelarten (Gobiidae) gezeigt (CHEN et al. 2012, ROCHE et al. 2013). Auffallend war in den letzten zehn Jahren die Einwanderung einiger Grundelarten aus dem Donau-System mit anschließenden teilweise explosionsartigen Vermehrungen im Rhein und in seinen Nebengewässern:

- Schwarzmaulgrundel (= Schwarzmundgrundel, *Neogobius melanostomus*), seit 2004, zuerst im niederländischen Rheinabschnitt;



Abb. 2.5-3: Gegen Ende des 20. Jahrhunderts setzte auf den Fels- und Gesteinsoberflächen des schiffbaren Rheins eine stark beschleunigte Veränderung der Artenzusammensetzung ein. Auf dem 1994 entstandenen Foto werden die ebenfalls erst 1826 eingewanderten Wandermuscheln von dem in den 1980er Jahren wohl über Ballastwasser eingeschleppten Süßwasserröhrenkrebs *Chelicorophium curvispinum* praktisch zugewachsen: Ein Boom-Bust-Zyklus in Aktion! – Foto B. Streit

- Flussgrundel (*Neogobius fluviatilis*), seit 2008 im Niederrhein (STEMMER 2008);
- Kessler-Grundel (*Ponticola kessleri* = *Neogobius kessleri*), seit 2006, zuerst bei Königswinter;
- Die Nackthalsgrundel (*Babka gymnotrachelus*) wandert möglicherweise derzeit ins Rheinsystem ein.

Die Flussgrundel und die Kessler-Grundel sind wohl direkt über den Main-Donau-Kanal verschleppt worden oder eingewandert. Die Schwarzmaulgrundel ist aber vermutlich um 1990 in die Ostsee und erst von dort in den (zunächst niederländischen) Rhein verschleppt worden. In der Donau waren bis etwa 1970 alle genannten Arten nur unterhalb des Eisernen Tores zu finden (ADRIAN-KILCHHAUSER et al. 2016); Änderungen baulicher Art und im Frachtverkehr erleichterten zunächst die Aufwärtsverschleppung und dann den Übertritt ins Rheinsystem.

Obwohl die Artenzahl invasiver Fische bislang in allen Rheinregionen unterhalb derjenigen der einheimischen Fische bleibt und um 15-35% ausmacht (UEHLINGER et al. 2009), übersteigt die Individuenhäufigkeit der Neubesiedler die Individuenhäufigkeit aller übrigen Fischarten zusammen genommen inzwischen meist um ein Vielfaches und gleicht in dieser Hinsicht der Situation bei den Makro-Invertebraten!

Die seit Ende des 20. Jahrhunderts begonnenen Wiedereinbürgerungen verschwundener Wanderfischarten, wie Lachs, Maifisch, Stör und Nordseeschnäpel, sind zwar medienwirksam und bringen einige Arten zurück, doch bleiben diese numerisch und in der ökologischen Funktion für das Rheinsystem wenig bedeutend (s. auch Kap. 2.4 - LOZÁN).

Ökologische und genetische Veränderungen durch die neuen Arten

Die invasiven Arten sind in ihren Ursprungsgebieten an andere Umweltbedingungen angepasst als im Rheinsystem und erweisen sich in Tests als teilweise weniger effizient und systemgerecht eingepasst als einheimische Arten, wie JOURDAN et al. (2016) bei Ernährungsversuchen mit Flohkrebseis zeigen. Bei den invasiven Grundelarten wird diskutiert, ob sie einheimische Fischpopulationen durch Habitat- oder Nahrungskonkurrenz, vielleicht auch durch direktes Fressen von Eiern oder Jungbrut, schwächen (s. Kap. 3.2 - JOURDAN & PLATH).

Ebenfalls erst teilweise untersucht sind Hybridisierungen zwischen invasiven und verwandten einheimischen Arten sowie auch zwischen verwandten Neozoen-Arten. Eine neue und nur molekular definierbare genetische Linie ist beispielsweise für die Asiatischen Körbchenmuscheln nachgewiesen worden (PFENNIGER et al. 2002).

Schließlich haben sich Symbiose- und Wirt-Parasit-Beziehungen infolge des Arten-Turnovers und der Verschleppungen teilweise aufgelöst oder aber neu formiert (SURES & STREIT 2001, EMDE et al. 2012). Dabei können auch neuartige Infektionen induziert werden, die erst gerade Selektionsprozesse in Gang setzen und zunächst erhebliche Schäden anrichten können.

Schlussbetrachtung: Die Bedeutung des Klimawandels

Der derzeitige Klimawandel beeinflusst den Rhein durch tendenziell höhere Wasserabflusswerte im Winter und einen Anstieg der Wassertemperatur. Wie stark aber ist der Klimawandel für den beobachteten Artenwechsel verantwortlich? Tatsächlich erfolgt der Artenumbruch in einer Zeit, da der Klimawandel eklatant geworden ist, und die Massenvermehrung etwa der Körbchenmuscheln wird auch in Zusammenhang mit gemilderten winterlichen Wassertemperaturen gesehen (MÜLLER & BAUR 2011). Allerdings hat sich das Rheinwasser auch unabhängig von der Lufttemperatur infolge zahlreicher Einleitungen erwärmt und ist z.B. im Niederrhein in den letzten 90 Jahre um durchschnittlich 2 °C angestiegen (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY 2012). Seit dem Winter 1962/63 ist es auch nicht mehr zu einer nennenswerten Eisbildung unterhalb Basels gekommen.

Der Klimawandel ist insgesamt wohl eher ein Nebenfaktor für den Artenwandel im Rhein. Er wird beigetragen haben, wärmeliebende Invasoren zu begünstigen und manche einheimische Arten, die einen Konkurrenzvorteil unter eher kühleren Bedingungen hätten, zurückzudrängen. Die Hauptfaktoren für den Wandel in den letzten 40 Jahren sind aber der globalisierte Frachtverkehr, der Durchstich des Main-Donau-Kanals, die bewusste und unbewusste Freisetzung von Arten aus privater und kommerzieller Haltung sowie die Uniformität des Flussbettes. Häufig geworden sind jene Arten, die sich unter diesen heutigen Bedingungen durchsetzen können. Die ehemalige einheimische Fauna und Flora war an ein anderes Rhein-Ökosystem angepasst, das untergegangen ist und nur noch einigen dieser Arten ein Dasein, teilweise nur noch ein Nischendasein ermöglicht.

Literatur

- ADRIAN-KALCHHAUSER, I., P. E. HIRSCH, A. N'GUYEN, S. WATZLAWCZYK et al. (2016): The invasive bighead goby *Ponticola kessleri* displays small scale genetic differentiation and large scale genetic homogeneity in relation with shipping patterns. *Mol. Ecol.* 25: 1925-1943.
- ANEBO (Aquatische Neozoen im Bodensee): <http://www.neozoen-bodensee.de/neozoen/dikerogammarus>, Stand 4.7.2016

- BERNAUER, D. & W. JANSEN (2006): Recent invasions of alien macroinvertebrates and loss of native species in the upper Rhine River, Germany. *Aquatic Invasions* 1(2): 55-71.
- CHEN, W., D. BIERBACH, M. PLATH, B. STREIT & S. KLAUS (2012): Distribution of amphipod communities in the Middle to Upper Rhine and five of its tributaries. – *BioInvasions Records*: 1(4): 263-271.
- EMDE, S., S. RUECKERT, H. W. PALM & S. KLIMPEL (2012): Invasive Ponto-Caspian amphipods and fish increase the distribution range of the Acanthocephalan *Pomphorhynchus tereticollis* in the River Rhine. *PLOS ONE* 7: e53218.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2012): Water temperature of large European rivers and lakes. www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/trends-in-water-temperature-of.
- HAAS, G., M. BRUNKE & B. STREIT (2002): Fast turnover in dominance of exotic species in the Rhine River determines biodiversity and ecosystem function. In: LEPPÄKOSKI, E. et al. (eds.): *Invasive aquatic species of Europe: Distribution, impact and management*. Kluwer-Academic Publ., Dordrecht. 426-432.
- HOLDENECKER, A. (Hrsg.) (1836): *Basel und seine Umgebungen nach den neuesten und besten Quellen bearbeitet*. J. Holdenecker & Fils Libres, Basle.
- JOURDAN, J., B. WESTERWALD, A. KIECHLE, W. CHEN et al. (2016): Pronounced species turnover, but no functional equivalence in leaf consumption of invasive amphipods in the river Rhine. *Biol. Invasions*: in press. DOI: 10.1007/s10530-015-1046-5.
- KARTE DES DEUTSCHEN REICHES (1889): Blatt 656 (Mülhausen im Elsaß).
- KINZELBACH, R. (1972): Einschleppung und Einwanderung von Wirbellosen in Ober- und Mittelrhein. In: *Mainzer Naturwissensch. Archiv* 11: 109-150.
- KINZELBACH, R. (1995): Neozoans in European waters – Exemplifying the worldwide process of invasion and species mixing. *Experientia* 51: 526-538.
- LENDERS, H. J. R., T. P. M. CHAMULEAU, A. J. HENDRIKS, R. C. G. M. LAUWERIER et al. (2016): Historical rise of waterpower initiated the collapse of salmon stocks. *Scientific Reports* 6: Article nr. 29269.
- MÜLLER, O. & B. BAUR (2011): Survival of the Invasive Clam *Corbicula fluminea* (Müller) in Response to winter water temperature. *Malacologia* 53: 367-371.
- PARK, C. & H.-U. SCHMINCKE (2009): Apokalypse im Rheintal. *Spektr. d. Wiss. Febr.* 2009: 78-87.
- PFENNINGER, M., REINHARDT, F. & B. STREIT (2002): Evidence for cryptic hybridisation between different evolutionary lineages of the invasive clam genus *Corbicula* (Veneroidea, Bivalvia). *J. Evol. Biol.* 15: 818-829.
- PREUSSER, F. (2008): Characterisation and evolution of the River Rhine system. *Netherl. J. Geosciences* 87: 7-19.
- ROCHE, K., M. JANAC & P. JURAJDA (2013): A review of Gobiid expansion along the Danube-Rhine corridor - geopolitical change as a driver for invasion. *Knowl. Managt. Aquatic Ecosyst. Nr.* 411, 2013.
- STEMMER, B. (2008): Flussgrundel im Rhein-Gewässersystem. Vierte neue Grundelart im nordrhein-westfälischen Rhein nachgewiesen. *Natur in NRW* 33(4): 57-60.
- STREIT, B. (1992): Zur Ökologie der Tierwelt im Rhein. *Verh. Naturf. Ges. Basel* 102: 323-342.
- STREIT, B. & K. KUHN (1994): Effects of organophosphorous insecticides on autochthonous and introduced *Gammarus* species. *Water Sci. Techn.* 29: 233-240.
- SURES, B. & B. STREIT (2001): Eel parasite diversity and intermediate host abundance in the River Rhine, Germany. *Parasitology* 123: 185-191.
- TAGESANZEIGER (2016): Eine Qual für den Aal. *Tagesanzeiger (Zürich)* vom 4.2.2016.
- UEHLINGER, U., K. M. WANTZEN, R. S. E. W. LEUVEN & H. ARNDT (2009): The Rhine River Basin. In: *Tockner, K. et al. - Rivers of Europe*. Elsevier, Amsterdam. 199-245.

Kontakt:

Prof. Dr. Bruno Streit
Goethe-Universität Frankfurt am Main
Campus Riedberg – Biologicum
streit@bio.uni-frankfurt.de

Streit, B. (2016): *Biologischer Wandel im Rheinsystem*. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, R. Müller & E. Rachor, (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Die Biodiversität*. pp. 130-135. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.21.