



# **Aktueller Kenntnisstand über mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Fließgewässerökosysteme und die Biodiversität im Rheineinzugsgebiet**

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins

**Fachbericht Nr. 309**

### **Haftungsausschluss zur Barrierefreiheit**

Die IKSR ist bemüht, ihre Dokumente so barrierearm wie möglich zu gestalten. Aus Gründen der Effizienz ist es nicht immer möglich, sämtliche Dokumente in den verschiedenen Sprachversionen vollständig barrierefrei verfügbar zu machen (z. B. mit Alternativtexten für sämtliche Grafiken oder in leichter Sprache). Dieser Bericht enthält ggf. Abbildungen und Tabellen. Für weitere Erklärungen wenden Sie sich bitte an das IKSR-Sekretariat unter der Telefonnummer 0049261-94252-0 oder per E-Mail an [sekretariat@iksr.de](mailto:sekretariat@iksr.de).

### **Impressum**

#### **Herausgeberin:**

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR)  
Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, D-56068 Koblenz  
Postfach: 20 02 53, D-56002 Koblenz  
Telefon: +49-(0)261-94252-0  
Fax: +49-(0)261-94252-52  
E-Mail: [sekretariat@iksr.de](mailto:sekretariat@iksr.de)  
[www.iksr.org](http://www.iksr.org)

# Aktueller Kenntnisstand über mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Fließgewässerökosysteme und die Biodiversität im Rheineinzugsgebiet

## Inhalt

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>4</b>
<b>Einleitung .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Auswirkungen des Klimawandels auf aquatische und amphibische Lebensräume im Rheineinzugsgebiet .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Allgemeine Wirkungszusammenhänge .....</b>	<b>7</b>
1.1.1 Starkregen, hohe Abflüsse und Hochwasser .....	7
1.1.2 Niedrigwasser .....	8
1.1.3 Wassertemperatur .....	9
1.1.4 Sensitivitätsleitwerte Temperatur .....	11
1.1.5 Sensitivitätsleitwerte Sauerstoff .....	12
1.2 Phytoplankton .....	13
1.3 Makrophyten / Phytobenthos .....	16
1.4 Makrozoobenthos .....	16
1.5 Fischfauna .....	19
1.5.1 Feinmaterialeinträge und Geschiebe .....	19
1.5.2 Niedrigwasser .....	20
1.5.3 Wassertemperatur .....	22
1.5.4 Längsverteilung der Fischgemeinschaften .....	24
1.5.5 Fischwanderung .....	26
1.5.6 Krankheiten .....	26
1.6 Neobiota .....	27
1.6.1 Makrophyten .....	28
1.6.2 Makrozoobenthos .....	29
1.6.3 Fischfauna .....	30
<b>2. Auswirkungen des Klimawandels auf semiaquatische und terrestrische Lebensräume im Rheineinzugsgebiet .....</b>	<b>31</b>
<b>3. Mögliche Handlungsperspektiven zur Abmilderung negativer Auswirkungen des Klimawandels auf das Ökosystem Rhein .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Stärkung der Ökosysteme durch Schutz und Vernetzung von     Lebensräumen .....</b>	<b>35</b>
3.2 Abmilderung der Auswirkungen erhöhter Wassertemperaturen .....	37
3.3 Abmilderung der Auswirkungen von Niedrigwasser .....	39
3.4 Abmilderung von Bodenerosion und Sedimenteinträgen infolge von Starkregen und Hochwasser .....	40
<b>Referenzen .....</b>	<b>42</b>
<b>Anlagen .....</b>	<b>49</b>

## Zusammenfassung

Der Klimawandel verschärft für die meisten Organismen in aquatischen Ökosystemen den Einfluss von Stressoren, die durch die vielfachen anthropogenen Interessen bereits bestehen. Dies gilt im Besonderen für das dicht besiedelte, stark industrialisierte und intensiv landwirtschaftlich genutzte Rheineinzugsgebiet.

Die Effekte des Klimawandels sind breit gestreut und wirken kumuliert und gleichzeitig auf die Ökosysteme.

Klimawandelbedingte Veränderungen der Wassertemperatur und der Wasserverfügbarkeit wirken sich direkt auf den Stoffwechsel der Organismen und auf deren Habitate aus, aber auch indirekt über die Sauerstoff- und Nährstoffverfügbarkeit. Änderungen des Niederschlagsregimes haben zudem direkte Auswirkungen auf den Stoffhaushalt und die Hydrodynamik der Gewässerlebensräume.

Die wasserwirtschaftlichen Datensätze erlauben derzeit noch kein umfassendes Bild der Veränderungen und Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässerbiologie. Dennoch zeigen Niedrigwasserereignisse wie 2018, dass die klimawandelbedingten Auswirkungen auf Gewässerökosysteme wesentlich schneller und gravierender voranschreiten, als aus den Projektionen abzuleiten war. Dies betrifft insbesondere Trockenheit und Niedrigwasser. Die neusten Abflussprognosen für den Rhein zeigen für die kommenden Jahrzehnte eine Zunahme des Abflusses in den Wintermonaten und eine Abnahme in den Sommermonaten und eine Verstärkung dieses Trends zum Ende des 21. Jahrhunderts. Prognosen zur Wassertemperatur im Rhein zeigen eine Zunahme der Wassertemperatur im Jahresmittel für das gesamte Einzugsgebiet zwischen +1,1 und +1,8 °C in der nahen Zukunft und eine Zunahme zwischen +2,9 und +4,2 °C in der fernen Zukunft. Die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen der Schwellenwert von 25 °C überschritten wird, steigt in der nahen Zukunft auf 1-2 Wochen. In der fernen Zukunft schwankt die Anzahl der Tage, an denen 28 °C überschritten werden, zwischen  $1 \pm 0,5$  Wochen pro Jahr.

Der Erhalt und die Ausweitung bestehender sowie die Ausweisung neuer Schutzgebiete und die Verbesserung der Qualität, der Vielfalt und der Vernetzung der Lebensräume durch verschiedene Renaturierungsmaßnahmen werden sowohl Arten, die bereits jetzt bedroht sind, als auch Arten, die im Zuge des Klimawandels bedroht sein könnten, stärken.

Die Vernetzung der Lebensräume ist für eine ökologische Resilienz der Wasserarten hervorzuheben. Dies bezieht neben der zumeist im Fokus stehenden longitudinalen Durchgängigkeit auch die laterale und vertikale ökologische Durchgängigkeit ein. Nur so können angebundene Gewässerkompartimente zum Aufsuchen günstigerer Habitate bzw. als Refugien funktional genutzt werden. Auf Ebene des Einzugsgebietes, sind eine vermehrte Beschattung durch Bestockung der Ufer und eine Verbesserung des Landschaftswasserhaushalts zentrale Teile der Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels.

Das IKSR-Programm „Rhein 2040“ führt weitere Maßnahmen und konkrete Ziele auf, die in den Staaten umgesetzt bzw. insgesamt erreicht werden sollen, um den Rhein und sein Einzugsgebiet resilienter gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels zu machen. Dazu gehören u. a. die Ausdehnung wasserabhängiger stromnaher Lebensräume durch die Wiederherstellung von 200 km<sup>2</sup> Auenflächen und die Wiederanbindung von 100 Altarmen und Nebengewässern an den Rhein sowie die Erhöhung der Strukturvielfalt an 400 km Uferlinie.

Neben langfristigen Maßnahmen können auch kurzfristige Maßnahmen als Teil eines Notfallkonzepts helfen, z. B. um die Folgen erhöhter Wassertemperaturen für die Fischfauna abzumildern.

## **Einleitung**

Die Arbeitsgruppe „Ökologie“ (AG B) und ihre Expertengruppen EG BMON, EG FISH und EG BIOTOP haben aktuelle wissenschaftliche Kenntnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässerökosysteme und die Biodiversität zusammengetragen und den IKSR-Fachbericht Nr. 204 „Aktueller Kenntnisstand über mögliche Auswirkungen von Änderungen des Abflussgeschehens und der Wassertemperatur auf das Ökosystem Rhein und mögliche Handlungsperspektiven“ aus dem Jahr 2013 aktualisiert.

Neue Erkenntnisse aus aktuellen Studien und Erfahrungen aus den Dürreereignissen der vergangenen Jahre, z. B. 2018, wurden berücksichtigt und eine Bestandsaufnahme der auf nationaler Ebene vorhandenen Synthesen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökologie durchgeführt.

Der vorliegende Bericht beschreibt die erwarteten Auswirkungen auf die vier aquatischen Organismengruppen Phytoplankton, Makrophyten/Phytobenthos, Makrozoobenthos und Fische. Weitere Kapitel befassen sich mit dem Aspekt Neobiota und mit den Auswirkungen auf die semiaquatischen und terrestrischen Lebensräume. Abschließend werden mögliche Handlungsperspektiven zur Abmilderung der durch den Klimawandel erwarteten negativen Auswirkungen aufgezeigt.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten der AG B wurden im Rahmen des IKSR-Workshops zur Klimawandelanpassung am 19./20. März 2025 in Arnhem (NL) vorgestellt und sind ein wichtiger Beitrag zur Aktualisierung der IKSR-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel, die 2025 veröffentlicht werden soll.

## 1. Auswirkungen des Klimawandels auf aquatische und amphibische Lebensräume im Rheineinzugsgebiet

Der Klimawandel verschärft für die meisten Organismen in aquatischen Ökosystemen den Einfluss von Stressoren, die durch die vielfachen anthropogenen Interessen bereits bestehen.<sup>1</sup> Dies gilt im Besonderen für das dicht besiedelte, stark industrialisierte und intensiv landwirtschaftlich genutzte Rheineinzugsgebiet.

Besonders gefährdet durch die sich ändernden Umweltbedingungen sind im Allgemeinen

- seltene Arten;
- Arten mit kleinen bis mittleren Arealgrößen;
- endemische Arten, die in einer bestimmten, räumlich klar abgegrenzten Region vorkommen;
- Arten, die nur geringe Schwankungen der Umweltfaktoren vertragen, so genannte stenöke oder stenotope Arten.

Bei den Lebensräumen sind neben Mooren, Wald, Trockenrasen und Heidegebieten vor allem auch Quellen, Gewässeroberläufe, Gewässerufer, Seen und Küstenhabitate sensibel gegenüber dem Klimawandel.<sup>2</sup>



**Abbildung 1: Magerrasen im Schutzgebiet Taubergießen (Foto: Regierungspräsidium Freiburg)**

Das Schadensrisiko eines Ökosystems hängt von der Ausprägung des Klimawandels in einer Region sowie von der Anpassungsfähigkeit des Ökosystems bzw. der in ihm vorkommenden Arten ab.

Ein hohes Schadensrisiko wird im Rheineinzugsgebiet für die Ökosysteme folgender Regionen angenommen:

- Im Oberrheingraben werden sich die Lebensbedingungen für Organismen voraussichtlich durch höhere Temperaturen, höhere Verdunstungsraten, häufigere Hochwässer und Starkregenereignisse sowie eine Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter verändern. Die Wasserverfügbarkeit wird dadurch insgesamt abnehmen und es wird zu häufigeren, verstärkten und längeren Hitze- und Dürrephasen im Sommer kommen<sup>3</sup>.
- In den Alpen wird der Klimawandel voraussichtlich besonders ausgeprägt sein und eine hohe Anzahl von endemischen Tier- und Pflanzenarten treffen, die teils auf kleinklimatischen Sonderstandorten leben und kaum Ausweichmöglichkeiten haben.

Im Rahmen des KLIWA-Projekts<sup>4</sup> wurden direkte und indirekte Veränderungen durch den Klimawandel sowohl auf abiotische Faktoren als auch auf Organismen(gruppen)

<sup>1</sup> diverse in RABITSCH et al. 2010

<sup>2</sup> RABITSCH et al. 2010

<sup>3</sup> SCHMIDT et al. 2023

<sup>4</sup> KLIWA 2010, <https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie.htm>

zusammengestellt. Bedingt durch die vielfältig wirkenden Faktoren und Nutzungen in großen Einzugsgebieten stellen sich die Wirkungsbeziehungen in den Unterläufen der Fließgewässer komplexer dar als in den Ober- und Mittelläufen. Ein Großteil des Rheinhauptstroms fällt in die Kategorie "Unterlauf eines Gewässers". Eindeutige Reaktionen in eine Richtung (Verstärkung/Abschwächung) können hier oft nicht abgeleitet werden, da bei Untersuchungen häufig gegensätzliche Phänomene beobachtet wurden. Direkte Effekte des Klimawandels, wie z. B. Temperaturerhöhungen, treten in ihrer Bedeutung oft hinter anderen Faktoren (z. B. Stoffkonzentrationen) oder anthropogene Nutzungen zurück. Im Gegensatz zu den Ober- und Mittelläufen ist vor allem in staugeregelten Abschnitten der mögliche Sauerstoffmangel ein wichtiger Faktor. Die Ergebnisse dieser umfangreichen Literaturstudie zu den gefundenen Wirkungsbeziehungen in Ober-, Mittel- und Unterläufen sind in den Abbildungen in Anlage 1 dargestellt.

### **1.1 Allgemeine Wirkungszusammenhänge**

Die Klimaveränderungen führen über verschiedene Wirkungspfade zu Änderungen in den Lebensräumen. Der Klimawandel hat Einfluss auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt der Lebensräume. So gibt es eine direkte Auswirkung von Temperatur und Wasserverfügbarkeit auf den Stoffwechsel der Organismen und auf deren Habitate, aber auch eine indirekte über die Sauerstoff- und Nährstoffverfügbarkeit. Änderungen des Niederschlagsregimes haben zudem direkte Auswirkungen auf den Stoffhaushalt und die Hydrodynamik der Gewässerlebensräume.

Hoch- und Niedrigwasser, die vom Menschen in Ausnahmefällen als empfindliche Störungen und katastrophale Ereignisse wahrgenommen werden, kommen grundsätzlich natürlicherweise vor und sind charakteristisch und wichtig für das Ökosystem Fließgewässer. Die Dynamik der Wasserstände gibt den Organismen im und am Gewässer immer wieder neue Möglichkeiten zur Besiedlung und Ausbreitung; viele Arten haben spezifische Überlebensstrategien entwickelt. Die klimawandelbedingte Änderung der Abflusssdynamik und die Wirkungen extremer Wasserstände mit häufigerer Wiederkehr,<sup>5</sup> wie sie rezent auftreten, auf Organismen ist allerdings noch wenig untersucht und könnte weitreichendere Folgen haben. Da die Lebensgemeinschaften in großen Flüssen (abhängig von der Artengruppe) ca. 1 bis 2 Jahre benötigen, um sich zu regenerieren, kann eine Zunahme der Zahl und Dauer von Hoch- und Niedrigwasserständen mittel- und langfristig zu einer Änderung der Besiedlungsstrukturen im Fließgewässer führen.<sup>6</sup>

Ebenfalls zu beachten sind neben kurzfristig extrem hohen Wassertemperaturen, die häufig auch letale Auswirkungen auf die Individuen haben können, eine länger andauernde oder sogar dauerhafte Erhöhung der Wassertemperatur, denn diese steuert viele lebensnotwendige Prozesse in Organismen (vgl. Kap. 1.1.4). Sie verändert die Biozönose langfristig und fördert wärmetolerante und anpassungsfähige Arten.

#### **1.1.2 Starkregen, hohe Abflüsse und Hochwasser**

Bei hohen Abflüssen und Hochwasser sowie bei Starkregen und den nachfolgenden Erosions- und Abschwemmungsprozessen werden höhere Mengen von organischen Stoffen, Nährstoffen und Schadstoffen in die Gewässer eingetragen. Hierdurch kann – bei entsprechend hohen Temperaturen – der mikrobielle Abbau und damit die Sauerstoffzehrung im Gewässer ansteigen, insbesondere unterhalb von Kläranlagen infolge von Niederschlagswasserentlastungen.<sup>7</sup>

---

<sup>5</sup> STAHL et al. 2022

<sup>6</sup> KOOP et al. 2007

<sup>7</sup> KOOP et al. 2007

Bei einer früher einsetzenden Schneeschmelze oder infolge von Starkregen können, insbesondere nach längeren Trockenzeiten, von Ackerflächen Sedimente, Nährstoffe und Pestizide (aus der Vorsaatbehandlung) in erheblichem Umfang in die Gewässer eingetragen werden. Durch den Feinstoffeintrag kann es zu Kolmation („Verstopfung“) von Lebensräumen in Kieslücken an der Gewässersohle (im Bereich von Laichplätzen der phytophilien Arten) und dadurch zu Sauerstoffmangel kommen. Andererseits können sich durch Geschiebeumlagerungen lokal auch lückenreiche Kiesbänke vergrößern oder neu entstehen.

Ein weiterer positiver Effekt höherer Abflüsse wäre dort, wo die Verbindung zwischen Fluss und Aue dies zulässt, eine (kurzzeitige) Ausweitung des aquatischen und semi-aquatischen Lebensraums hinein in die Auen, wo wassergebundene Biotope wie Sümpfe, Röhrichte und Hochstaudenfluren, Grünland und Auenwälder von der hydrologischen Dynamik und der Verbreitung von Pflanzensamen profitieren würden. Bei einer besseren Anbindung der Aue an den Fluss wäre die ökologische Flutung von Überschwemmungsgebieten unter Umständen bei kleineren und mittleren Hochwässern häufiger möglich. Infolge des Klimawandels werden auch häufiger unvorhersagbare sommerliche Starkregen, wie im Sommer 2021, auftreten. Dadurch verursachte Hochwasserwellen können insbesondere in ausgebauten und begradigten Flussabschnitten, in denen das Wasser schnell und beinahe ohne Überflutungen der angrenzenden Flächen abgeführt wird, Fischbrut und Jungfische mit sich reißen und deren weitere Entwicklung beeinträchtigen. Wenn jedoch eine dauerhafte oder zeitweise (z. B. bei Sommer-Hochwasser) Verbindung vom Gewässerhauptstrom zur Aue besteht, können sich die Fische und Fischbrut bei Hochwasser vom Hauptstrom in die angrenzenden Auengewässer zurückziehen, um dort Zuflucht zu finden. Mit Ablauf des Hochwassers können sie wieder in den Fluss zurückkehren. Bestandsdichten können erhalten bleiben. Überflutung im Frühjahr und ein langsames Zurückweichen des Wassers im Sommer bietet in diesen Überschwemmungsgebieten die besten ökologischen Entwicklungsmöglichkeiten.

### **1.1.3 Niedrigwasser**

Bei Niedrigwasser nehmen die trockenfallenden Flächen im Uferbereich der Flüsse zu, wodurch – bei einer entsprechenden Uferstruktur – neue terrestrische Lebensräume sowie vom Fluss isolierte Restgewässer geschaffen werden. Währenddessen verkleinern sich Volumen und Fläche des mit Wasser gefüllten Lebensraums.

Frei bewegliche Wasserlebewesen folgen soweit möglich (wenn Durchgängigkeit vorhanden) dem absinkenden Wasserspiegel, während sessile (festsitzende) Organismen die Trockenheit überdauern müssen (z. B. durch die Bildung von Dauerstadien), gefressen werden (z. B. von Möwen und Krähen) oder durch Austrocknung und hohe Temperaturen absterben.

Im noch vorhandenen Wasserkörper in der Flussmitte steigen sowohl die Anzahl der Arten als auch die Abundanzen (Individuenzahlen je Flächen- oder Volumeneinheit). Da die Fließgeschwindigkeiten hier meist höher sind als in den nun trockengefallenen Lebensräumen in Ufernähe, sind zahlreiche Organismen der Gefahr ausgesetzt, abzudriften oder von Prädatoren, die sich im tiefen Wasser aufhalten, gefressen zu werden.

In Niedrigwasserperioden werden Auengewässer zunehmend vom Fluss isoliert und fallen teilweise oder vollständig trocken. In aufgestauten Flussbereichen (z. B. Nederrijn/Lek) nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten im Hauptstrom des Flusses im Verlauf von Niedrigwasserperioden deutlich ab. Dies kann zur Folge haben, dass an strömendes Wasser angepasste und durch Stauregulierungen ohnehin beeinträchtigte Wirbellose und Fische weitere Bestandseinbußen erleiden.

Vegetationsfreie Kiesflächen im Uferbereich werden von Vögeln, wie dem Flussregenpfeifer oder dem Flusssuferläufer, als Brutstandort sowie von Laufkäfern und Spinnen als nahrungsreicher Lebensraum genutzt.



**Abbildung 2: Schalen der Körbchenmuschel (*Corbicula*) am Ufer der Rheins bei Oberwesel am 24. August 2003 (Foto: W. Wiechmann, BfG)**

Niedrigwasser kann zu einer erhöhten Schad- und Nährstoffbelastung führen, da die z. B. über Abwasser aus Kläranlagen eingetragenen Stofffrachten weniger verdünnt werden. Hierdurch kommt es zu einer zunehmenden Eutrophierung und Salzbelastung, wodurch empfindliche Organismen geschädigt werden können. Bei Niedrigwasser kann es zudem zu einer Aufkonzentrierung von Pathogenen kommen, insbesondere, wenn in dem verkleinerten Wasservolumen gleichzeitig die Temperatur und die Sauerstoffzehrung ansteigen (vgl. Kap. 1.1.4). Niedrige Wasserstände wirken sich zudem auf den Grundwasserspiegel in den Auen aus, wodurch verschiedene amphibische, aber auch terrestrische, grundwasserabhängige Vegetationstypen mit dazugehöriger Fauna bedroht sind.

Eine Studie des niederländischen Wissensnetzwerks für Naturqualitätsentwicklung und -management (OBN)<sup>8</sup> zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Flussökologie führt niedrige Abflüsse im Frühjahr und Sommer als eine der größten Klimaauswirkungen auf die Fischgemeinschaften in den großen niederländischen Flüssen auf. Fehlendes Hochwasser im Frühjahr und niedrige Sommerabflüsse werden umso mehr zum Trockenfallen der Auen führen, je weiter der Prozess der gewässerbaulich bedingten Tiefenerosion der Flusssohle und die damit einhergehende weitgehende Entkopplung von Fluss und Auen fortschreitet. Denn dieser Prozess führt dazu, dass die Auen ihre wichtige Funktion als Wasserspeicher verlieren.

In den vergangenen Jahren traten im Rheineinzugsgebiet mehrere extreme Niedrigwasserereignisse, u. a. 2018 und 2022 auf. Deren Auswirkungen, auch auf die Ökologie und die Wasserqualität wurden in zwei IKSR-Fachberichten dokumentiert.<sup>9</sup> Die neusten Abflussprognosen für den Rhein zeigen, dass der Abfluss in den Sommermonaten in den kommenden Jahrzehnten abnehmen wird, wohingegen der Abfluss in den Wintermonaten steigen wird. Dieser Trend wird sich zum Ende des 21. Jahrhunderts weiter verstärken.<sup>10</sup>

### **1.1.4 Wassertemperatur**

Die Umgebungstemperatur ist für Tiere und Pflanzen einer der wichtigsten Umweltfaktoren, die u. a. Reproduktion, Wachstum, Entwicklung und Wanderung steuert.

---

<sup>8</sup> DORENBOSCH et al. 2022

<sup>9</sup> IKSR 2020a und IKSR 2024b

<sup>10</sup> IKSR 2024a

Besonders betroffen sind wechselwarme (poikilotherme) Organismen wie Fische und Makroinvertebraten, die ihre Körpertemperatur nicht selbst regulieren können, sondern deren Körpertemperatur durch die Umgebungstemperatur bestimmt wird sowie stenotherme Arten mit engem Toleranzbereich hinsichtlich der Wassertemperatur.

Durch höhere Wassertemperaturen können sich die Artenzusammensetzung und die Dominanzstruktur entlang der Flussläufe verändern. Besonders empfindlich sind kaltstenotherme Arten, die nur in einem engen Temperaturbereich vorkommen und in der Regel nur niedrige Maximal-Temperaturen tolerieren (z. B. die Fischarten Äsche *Thymallus thymallus* und Quappe *Lota lota*). Ihre Areale können sich durch die Temperaturzunahme in Gewässern nach Norden oder in höhere Gewässerregionen verschieben. Insbesondere für die Arten der Quellbereiche und Oberläufe sind steigende Wassertemperaturen problematisch, da diese nicht noch weiter flussaufwärts in kühlere Gewässerstrecken ausweichen können. Dieses Phänomen wird als „Gipfel-Falle“ bezeichnet und kann im schlimmsten Fall zum lokalen Aussterben sensibler Arten und damit zu einer Artenabnahme an den betroffenen Gewässern führen. Eurytherme Arten, die große Temperaturschwankungen ertragen können, sowie Wärme liebende Arten, darunter zahlreiche Neobiota, die bisher eher in den mündungsnahen Bereichen vorkamen, werden begünstigt und können sich weiter oben in den Flussläufen ansiedeln. Dies betrifft v. a. Vertreter des Makrozoobenthos und der Fische, aber auch Makrophyten und andere Wasserpflanzen. Niedrige Wasserstände erhöhen den Effekt des Temperaturanstiegs. Seichte Stillgewässer in den Auen werden isoliert und erwärmen sich schneller je weiter der Wasserstand sinkt. Staubereiche mit bei Niedrigwasser weiter abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten begünstigen ebenfalls die Wassererwärmung und das Algenwachstum.

Hohe Temperaturen führen zudem zu einem erhöhten Metabolismus wechselwarmer Tiere. Bei einer Temperaturerhöhung von 10 °C kommt es ungefähr zu einer Verdoppelung des Energieverbrauchs (van't Hoff'sche oder RGT-Regel). Wenn nicht ausreichend Nahrung zur Verfügung steht, wirkt sich das beeinträchtigend auf Wachstum und Bestandsgrößen wechselwarmer Tiere aus. Die relative Wachstumsrate von Fischen zeigt typischerweise einen raschen Anstieg bei steigender Temperatur, bis zur Erreichung der jeweiligen optimalen Temperatur, nimmt allerdings bei Überschreitung dieses Optimums rasch ab.<sup>11</sup> Es gibt Hinweise, dass der Klimawandel Arten geringerer Größe begünstigen könnte.<sup>12</sup> Im Zusammenspiel von Nahrungsknappheit und hohen Temperaturen kann zudem das Immunsystem geschwächt werden. Hohe Temperaturen fördern auch die Verbreitung einiger Pathogene und Parasiten etc.<sup>13</sup>

Vor allem in den Unterläufen der großen Flüsse sind die pflanzlichen Biokomponenten (Phytoplankton, Makrophyten und Phytobenthos) auch durch die zunehmende Nährstoffkonzentration und intensivere Strahlungseinwirkung betroffen. Diese begünstigt ein intensives Pflanzenwachstum mit teils positiven (z. B. zunehmende Strukturvielfalt für andere Organismen), teils negativen (z. B. Sauerstoffzehrung beim Abbau pflanzlicher Substanz) Auswirkungen auf andere Biota.

Eine Untersuchung der Rheinwassertemperaturen über den Zeitraum 1987-2023 zeigt mit einer Ausnahme für alle Messstation eine voranschreitende Erwärmung der Wassertemperatur<sup>14</sup>. Die größten Erwärmungstrends sind im Hoch-, Ober- und Mittelrhein zu sehen. Eine weitere Studie zeigt, dass in allen Abschnitten des Rheins für die nahe (2045-2065) und ferne Zukunft (2081-2100) wärmere Wassertemperaturen prognostiziert werden<sup>15</sup>. In der nahen Zukunft schwankt die Zunahme der Wassertemperatur im Jahresmittel für das gesamte Einzugsgebiet zwischen +1,1 und +1,8 °C und in der fernen Zukunft zwischen +2,9 und +4,2 °C. Sommer und Herbst erwärmen sich schneller als der Jahresdurchschnitt, während die Erwärmung im Winter

---

<sup>11</sup> IMSLAND et al. 2005

<sup>12</sup> ABDOLI et al. 2005, ABDOLI et al. 2007

<sup>13</sup> KOOP et al. 2007, RABITSCH et al. 2010

<sup>14</sup> IKSR 2024C

<sup>15</sup> IKSR 2025

und Frühjahr langsamer verläuft. Die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen der Schwellenwert von 25 °C überschritten wird, schwankt in der nahen Zukunft zwischen 1-2 Wochen. In der fernen Zukunft schwankt die Anzahl der Tage, an denen 28 °C überschritten werden, zwischen  $1 \pm 0,5$  Wochen pro Jahr.

Eine Studie des niederländischen Wissensnetzwerks für Naturqualitätsentwicklung und -management (OBN)<sup>16</sup> zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Flussökologie zeigt außerdem, dass es immer früher im Frühjahr zu höheren Wassertemperaturen kommt. Beispielsweise hatte das Flusswasser des Rheinarms Waal um den 1. April 2020 bereits 15 °C; 1990 war das erst Ende April der Fall. Die frühere Erwärmung des Wassers im Frühjahr wird sich wahrscheinlich weiter fortsetzen. Dies kann zur Folge haben, dass die Entwicklungszyklen verschiedener Organismen nicht mehr zeitgleich stattfinden (z. B. beschleunigtes Wachstum des Makrozoobenthos und somit verfrühtes Nahrungsangebot für die Fischfauna). Auch kann es Auswirkungen auf die Phänologie beispielsweise des Lachses haben (z. B. Abnahme von Größe und Gewicht).<sup>17</sup> Zudem können Temperaturschwankungen die Laichzeitpunkte verschiedener Fischarten beeinflussen. Der Anstieg der Wassertemperatur über einen kritischen Wert hinaus hat negative Auswirkungen auf das Wanderverhalten von Lachsen.<sup>18</sup>

### **1.1.5 Sensitivitätsleitwerte Temperatur**

Relevant sind sowohl die mittleren Temperaturen als auch die Höchsttemperaturen. Präferenzen bezüglich der Wassertemperaturen sind insbesondere für viele Fischarten gut dokumentiert (s. Kapitel 1.5.3).

In den Niederlanden darf sich die Temperatur aufgrund von Wärmeeinleitungen um nicht mehr als 3 °C im Vergleich zur Hintergrundtemperatur ändern. Im Jahr 2004 wurde festgelegt (CIW-Bewertungssystem für Wärmeeinleitungen), dass eine Temperatur von 28 °C nicht überschritten werden sollte; derzeit wird ein neues Bewertungssystem entwickelt, das den Standard von 25 °C enthält. Dies entspricht dem in den Niederlanden festgelegten Standard der Wasserrahmenrichtlinie von 25 °C für einen guten ökologischen Zustand der Flüsse<sup>19</sup>.

In Frankreich schreibt der am 9. Oktober 2023 geänderte Erlass vom 25. Januar 2010 bezüglich der Bewertung des ökologischen Zustands zwei Schwellenwerte für die Höchsttemperatur (90-Perzentil) vor: 21,5 °C für Salmonidengewässer und 25,5 °C für die Cyprinidengewässer. Diese Schwellenwerte entsprechen der Grenze des guten ökologischen Zustands und finden grundsätzlich in gleicher Weise bei den erheblich veränderten Gewässern Anwendung. Diese Schwellenwerte können jedoch für die Bewertung des ökologischen Potentials auf der Grundlage von Expertenmeinungen angepasst werden.

In Deutschland werden die Anforderungen für Maximaltemperatur und Temperaturerhöhung für den sehr guten und für den guten ökologischen Zustand bzw. das gute ökologische Potenzial in Abhängigkeit der verschiedenen Fischgemeinschaften, Gewässertypen und Zeiträume in der Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung – OGewV 2016) definiert. Beim Rhein sind von April bis November für die Äschenregion eine Wassertemperatur von  $\leq 21,5$  °C, für die Barbenregion von  $\leq 25$  °C, für die Brassen- sowie Kaulbarsch-/Flunderregion von  $\leq 28$  °C für das gute ökologische Potenzial erforderlich. Die Temperaturerhöhung darf 1,5 K (Äschenregion) bzw. 3 K (Barben- sowie Kaulbarsch-/Flunderregion) nicht übersteigen. Im Rahmen des Projekts O 10.20 des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“ (2020) wurden die Temperaturorientierungswerte in der OGewV für

---

<sup>16</sup> DORENBOSCH et al. 2022

<sup>17</sup> BAGLINIERE et al. 2004, BAL 2011

<sup>18</sup> SCHLÄPPI 2021

<sup>19</sup> VAN DER GRINTEN et al. 2007

verschiedene Fischartengemeinschaften geprüft und Empfehlungen zu deren Anpassung veröffentlicht.<sup>20</sup> Derzeit ist ein Praxistest dazu im Gange.

In der Schweiz und in Luxemburg darf die Temperatur eines Fließgewässers durch Wärmeeintrag oder -entzug gegenüber dem möglichst unbeeinflussten Zustand um höchstens 3 °C, in Gewässerabschnitten der Forellenregion um höchstens 1.5 °C verändert werden; dabei darf die Wassertemperatur 25 °C nicht übersteigen (CH: GSchV, Art.12, Absatz 4 ; LU: Règlement grand-ducal du 15 janvier 2016 relatif à l'évaluation de l'état des masses d'eau de surface).

Neben den Maximaltemperaturen ist vor allem die Dauer einer Hitzeperiode entscheidend für das Überleben von Wasserorganismen. So wurde im Sommer 2003, als die Temperatur des Rheinhauptstroms an 41 Tagen über 25 °C lag, ein Massensterben von Muscheln und Aalen beobachtet.<sup>21</sup> Zwischen Juli und August 2018 wurde im Rhein bei Koblenz an 31 aufeinanderfolgenden Tagen der für viele im Rhein lebenden Fisch- und Wirbellosenarten kritische Wert von 25 °C überschritten. Es ist davon auszugehen, dass Hitzeperioden in den nächsten Jahren zunehmen werden und auch solche Massensterben erneut auftreten können.

Speziell von hohen Wassertemperaturen betroffen sein können Ausflüsse von großen Seen und größere Rückstaubereiche, die sich stärker als Fließgewässer erwärmen. So führte die extreme Hitzeperiode im Sommer 2003 im Hochrhein in der direkt unterhalb des Bodensees liegenden Rheinstrecke zu einem Massensterben von rund 50.000 Äschen (20,9 Tonnen Fische, ca. 90 % des Bestandes). Bei Stein am Rhein wurden am 12. August 2003 in 4 m Tiefe Wassertemperaturen von 25,9 °C gemessen, im Uferbereich stiegen die Werte über 27 °C.<sup>22</sup> Solche extremen Temperaturen treten immer häufiger auf; diese Temperaturrekorde wurden 2018 und 2022 noch überschritten, was trotz Notfallkonzept für die Fische insbesondere im Jahr 2018 wiederum zu Fischsterben führte.<sup>23</sup> Im Jahr 2022 blieb ein großes Fischsterben aus, es fehlten die Fische, die noch hätten sterben können, da im Jahr 2018 der Äschenbestand des Rheins bei Schaffhausen bereits um 90 Prozent reduziert wurde.

Auch in den Wintermonaten können erhöhte Wassertemperaturen zu einem Fischsterben führen.<sup>24</sup> (s. Kapitel 1.5.3)

### **1.1.6 Sensitivitätsleitwerte Sauerstoff**

Die Sauerstoffkonzentration im Wasser ist unter anderem abhängig von der Wassertemperatur; warmes Wasser kann weniger Sauerstoff aufnehmen als kaltes Wasser. Die Löslichkeit von Sauerstoff in Wasser sinkt mit steigender Temperatur. Beispielsweise sind bei 100 % Sättigung und normalem Luftdruck (1 bar) in 5 °C kaltem Wasser 12,7 mg O<sub>2</sub>/l gelöst, während es in 25 °C warmen Wasser nur noch 8,3 mg O<sub>2</sub>/l sind.<sup>25</sup>

In den Niederlanden muss für den guten ökologischen Zustand die Sauerstoffsättigung eines Gewässers bei > 60 % (entspricht bei 15 Grad 6 mg/l) liegen.

---

<sup>20</sup> LAWÄ 2021

<sup>21</sup> KOOP et al. 2007

<sup>22</sup> BUWAL 2004

<sup>23</sup> IKSR 2020a, METEOSCHWEIZ (2022);

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/hydrologisches-jahrbuch-der-schweiz.html>;

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/hitze-und-trockenheit.html>

<sup>24</sup> BRODERSEN et al. 2011

<sup>25</sup> <https://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/s/sauerstoffgehalt-wasser.php>

In Frankreich legt der Erlass vom 9. Oktober 2023 den Grenzwert für den guten ökologischen Zustand auf 6 mg/l für Sauerstoff fest, ohne Unterscheidung nach der Fischart des Flusses. Der Grenzwert für den Sättigungsgrad liegt bei 70 %.

Als „fischkritisch“ werden meist Werte unter 3-4 mg O<sub>2</sub>/l angesehen, d. h. bei einem Unterschreiten dieser Werte ist mit Fischsterben zu rechnen. Subletale Beeinträchtigungen sind bereits bei noch etwas höheren Werten zu erwarten. Zudem hängen Schwellenwerte für Fischsterben oder subletale Beeinträchtigungen von einer Reihe unterschiedlicher Faktoren wie der Wassertemperatur oder der Fischart ab. Aufgrund des hohen Sauerstoffbedarfs der Fische bei hohen Wassertemperaturen liegen die kritischen Schwellenwerte niedriger als bei geringen Wassertemperaturen. Zudem sind einige Fischarten robuster als andere (z. B. sind Aale wesentlich robuster als Lachse).

In Deutschland werden die Anforderungen für die Sauerstoffkonzentration für den sehr guten und für den guten ökologischen Zustand bzw. das gute ökologische Potenzial in Abhängigkeit des Fließgewässertyps in der Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung – OGewV 2016) definiert. Je nach Fließgewässertyp betragen die Werte für den guten Zustand zwischen  $\geq 4$  bis 8 mg/l. Beim Rhein sind  $\geq 7$  mg/l erforderlich.

Ist das Gewässer organisch belastet, kann die Sauerstoffzehrung, insbesondere bei hohen Temperaturen, stark ansteigen. Wird eine Sauerstoffkonzentration von 4 mg/l in Cyprinidengewässern oder von 6 mg/l in Salmonidengewässern unterschritten, wird dies als kritische Grenze für die jeweilige Fischfauna dieser Gewässer angesehen. Selbst bei niedrigen Temperaturen können die meisten Fischarten bei Sauerstoffkonzentrationen  $< 3$  mg/l nicht überleben.<sup>26</sup>

## 1.2 Phytoplankton

Eine Verbesserung der Lebensbedingungen für das Phytoplankton – Verlangsamung der Fließgeschwindigkeit, erhöhte Nährstoffgehalte und erhöhte Temperaturen über einen längeren Zeitraum im Jahr – bedeutet in der Regel eine Abnahme der ökologischen Qualität des Gewässers.

Vor allem in Stillgewässern führt ein stärkeres Wachstum des Phytoplanktons zunächst zu einer Sauerstoffübersättigung, dann zu Sauerstoff zehrenden Abbauprozessen, während die benthischen Filtrierer – also „Planktonfresser“ wie z. B. die Körbchenmuscheln der Gattung *Corbicula* und die Dreikantmuscheln der Gattung *Dreissena* ihre Tätigkeit reduzieren. Dadurch verstärkt sich wiederum das Planktonwachstum.

Modellergebnisse sagen zumeist eine Zunahme z. B. der Chlorophyll-Konzentrationen voraus, bedingt durch geringere Abflüsse, gestiegene Temperaturen und Eutrophierungsprozesse.<sup>27</sup>

Ein Experiment zeigte aber auch, dass eine Temperaturerhöhung einen negativen Einfluss auf die Phytoplankton-Biomasse, die mittlere Zellgröße und den Anteil an Mikroplankton-Diatomeen haben kann und damit über die Nahrungskette einen geringeren Energietransfer von Primärproduzenten zu Fischen erwarten lässt.<sup>28</sup>

Bei einer Trockenperiode wie z. B. im Sommer 2003 und einer damit einhergehenden Zunahme der Wassertemperatur wurde u. a. im Rhein eine starke Zunahme sowohl des Phytoplanktons als auch der Makrophyten beobachtet.<sup>29</sup> Vor allem Diatomeen vermehrten sich stark. Neben der Verkräutung der Gewässer besteht auch die Gefahr

---

<sup>26</sup> aus KOOP et al. 2007; CASSELMANN & HARVEY 1975

<sup>27</sup> aus KLIWA 2010; ZEBISCH et al. 2005; WAGENSCHNEIN 2006, STADTHAGEN 2007, DUCHARNE et al. 2007, QUIEL et al. 2008

<sup>28</sup> aus KLIWA 2010; SOMMER & LENGFELLNER 2008

<sup>29</sup> Bundesanstalt für Gewässerkunde 2006

einer starken Zunahme von Blaualgen (Cyanobakterien).<sup>30</sup> Im Sommer 2018 trat wie bereits 2017 eine Cyanobakterienblüte der potenziell Toxine bildenden Gattung *Microcystis* in der gesamten Mosel auf, die erst gegen Ende Oktober endete. Im Vergleich zu 2017 war die Cyanobakterienblüte 2018 mit Spitzenwerten von mehr als 80 µg/L Cyanobakterien-Chlorophyll deutlich stärker ausgeprägt und aufgrund der lang anhaltenden niedrigen Abflussverhältnisse länger andauernd. Die Entstehung der „Blaualgenblüten“ wurde durch die aufgrund des Niedrigwassers lange Aufenthaltszeit des sehr langsam fließenden Wassers in den Staustufen in der Mosel bis Ende Oktober begünstigt<sup>31</sup>. Starke Sonneneinstrahlung und hohe Temperaturen durch die Wettersituation verstärkten dies.

Neben dem Einfluss der Algenbildung auf den Sauerstoffhaushalt im Gewässer (siehe oben) kann es auch zu einer „biogenen Entkalkung“ durch starkes Algenwachstum kommen. Wie 2003 am Hochrhein beobachtet werden konnte, verfärbt sich das Wasser durch die Kalkausscheidungen der Algen milchig und es bildet sich Schaum. Bei entsprechend hohen pH-Werten wird Ammonium zunehmend in das für Fische giftige Ammoniak überführt.<sup>32</sup>

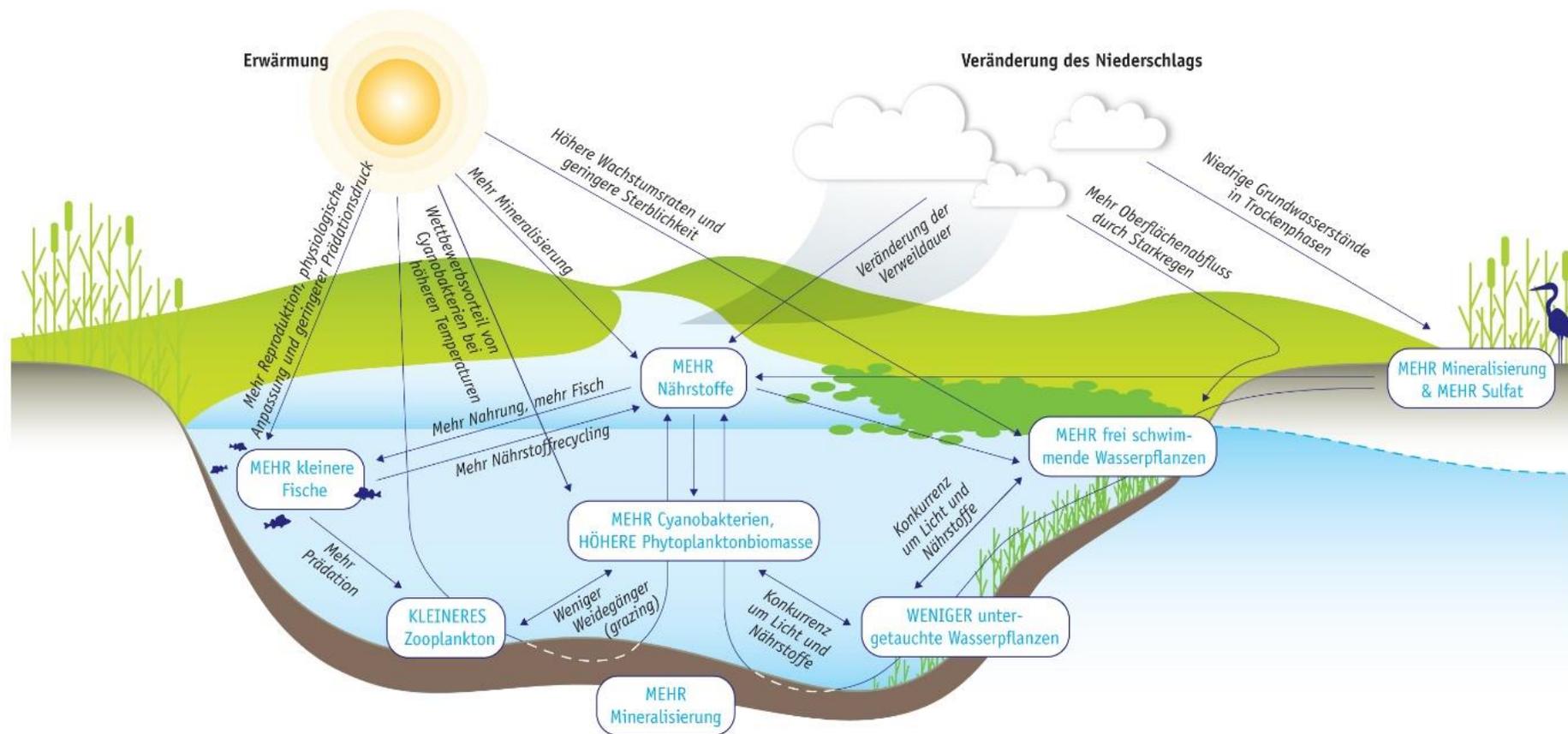


**Abbildung 3: Verschiedene Ansichten von Gewässern mit starker Vermehrung von Cyanobakterien. (Quelle: M. Leitão, Guide pratique des Cyanobactéries planctoniques du Grand Ouest de la France)**

<sup>30</sup> Iksr 2020a

<sup>31</sup> KLEINTEICH ET AL. 2024

<sup>32</sup> BUWAL 2004



**Abbildung 4: Wichtigste Effekte des Klimawandels.**

Konzeptuelle Darstellung der wichtigsten Effekte des Klimawandels auf Eutrophierung und Eutrophierungseffekte. Quelle: STOWA 2011, nach Moss et al. 2011 (International Society for Limnology).

### 1.3 Makrophyten / Phytobenthos

Das Abflussgeschehen und der damit verbundene Geschiebetransport haben erheblichen Einfluss auf das Wachstum der Makrophyten und das Phytobenthos.<sup>33</sup> Vor allem bei Hochwasser wird in erhöhtem Maße Sediment bewegt, was sich sowohl auf das Phytobenthos wie auf Makrophyten negativ auswirkt. Von einer zunehmenden Eutrophierung durch diffuse Nährstoffeinträge, z. B. bei Starkregen, dürften einzelne Makrophytenarten (z. B. Flutender Hahnenfuß, *Ranunculus fluitans*) profitieren, bis hin zu einer starken Verkräutung des Gewässers<sup>34</sup>. Hiermit ist häufig eine Abnahme der Gewässerqualität und der Biodiversität verbunden. Insbesondere in Verbindung mit hohen Temperaturen und einer starken Strahlungsintensität kann sich die Biomasse von Phytobenthos und Makrophyten rasch entwickeln und es ist ein ebenso rascher Zusammenbruch möglich. Dieses Absterben und Zersetzen von organischem Material hat dann eine Erniedrigung der interstitiellen Sauerstoffgehalte, d.h. im Lückensystem der Gewässersohle, zur Folge ("biogen induzierte Kolmation"; vgl. "Fischfauna").<sup>35</sup> Von einer Temperaturerhöhung sind vor allem die kaltstenothermen Pflanzenarten der feinsedimentreichen kleinen Fließgewässer und Quellen sowie Bergseen negativ betroffen; bei seltenen Arten kann es zu einem Rückgang kommen. Beispiele sind Quellkraut (*Montia fontana*), Gegenblättriges Milzkraut (*Chrysosplenium oppositifolium*) und Alpen-Laichkraut (*Potamogeton alpinus*).<sup>36</sup>

### 1.4 Makrozoobenthos

Der Klimawandel beeinflusst auch das Makrozoobenthos. Eine Untersuchung von Zuflüssen des Mittelrheins (Wisper, Gründelbach, Nette, Saynbach, Ahr) ergab, dass durch die rückstauende Wirkung der Hochwasser des Rheins die Strömungsgeschwindigkeit in den Unterläufen reduziert und aufgrund der verringerten Schleppkraft des Wassers die Sedimentation erhöht wird. U. a. durch diese Störung gibt es in diesen Flussabschnitten weniger Makroinvertebratenarten als in den höher gelegenen Bereichen und es herrscht eine andere Dominanzstruktur vor: Der Anteil strömungsliebender (rheophiler) Arten nimmt ab. Im Laufe einiger Wochen nach einem Rheinhochwasser nimmt der Anteil rheophiler Arten im Zufluss dann wieder zu und es entwickelt sich wieder eine Zönose, die sich deutlich von der des Rheins unterscheidet.<sup>37</sup> Bei häufigeren Rheinhochwassern kann sich diese Erholungsphase verkürzen, so dass die Zönose dauerhaft verarmt.

Das Trockenfallen von Substraten bei Niedrigwasser kann dazu führen, dass die sonst dort typischen Arten zurückgedrängt werden. Die meisten Makroinvertebraten können einer Änderung des Wasserspiegels mit einer Geschwindigkeit von weniger als 40 bis 50 cm h<sup>-1</sup> mühelos folgen und nur extreme Ereignisse wirken sich auf die Lebensgemeinschaft aus.

Es wurden auch bereits massive Wanderungen von Makroinvertebraten in Richtung der Mündungen von Nebenflüssen beobachtet; hierdurch weichen die Tiere den Konzentrationseffekten durch Niedrigwasser sowie höheren Wassertemperaturen aus.<sup>38</sup>

Eine Temperaturerhöhung wird insbesondere das Makrozoobenthos in den Bächen, kleinen Flüssen und Quellregionen der Hoch- und Mittelgebirgsregionen treffen, darunter viele kaltstenotherme Arten. Eine Verschiebung der Lebensgemeinschaften entlang des

---

<sup>33</sup> IKSR (2020d) und IKSR (2020e)

<sup>34</sup> KLIWA (2010)

<sup>35</sup> IBISCH 2004

<sup>36</sup> MKUNLV 2010

<sup>37</sup> aus KLIWA 2010; BECKMANN 2002

<sup>38</sup> KLIWA 2010

Fließgewässerlängsverlaufes tritt auf, mit der Gefahr der „Gipfelfalle“ für kaltstenotherme Organismen, die nicht weiter nach oben ausweichen können (vgl. Fischfauna).<sup>39</sup>

Beispiele sind:

- mehrere Quellschneckenarten (*Bythinella* spp.),
- die Quell-Erbsenmuschel (*Pisidium personatum*),
- mehrere Libellenarten, z. B. Gestreifte Quelljungfer (*Cordulegaster bidentata*), Alpen-Mosaikjungfer (*Aeshna caerulea*), Hochmoor-Mosaikjungfer (*Aeshna subarctica elisabethae*) und Alpen-Smaragdlibelle (*Somatochlora alpestris*);
- Larven zahlreicher Steinfliegenarten (Plecoptera), z. B. *Nemoura marginata*, *Diura bicaudata* oder *Brachyptera seticornis*
- Larven einzelner Eintagsfliegenarten, z. B. *Baetis alpinus* oder alpine Arten der Gattung *Rhithrogena*.
- Larven zahlreicher Köcherfliegenarten (Trichoptera), z. B. *Chatopterygopsis maclachlani*, *Ecclisopteryx guttulata*, *Rhyacophila praemorsa* oder *Drusus discolor*.

<sup>40</sup>

Ein sekundärer Effekt beim Rückgang von wichtigen Weidegängern, zu denen v. a. Eintags- und Köcherfliegenlarven gehören, ist ein verstärkter Aufwuchs (Biofilm sowie Algenschichten auf Steinen; vgl. Makrophyten / Phytobenthos).

Vor allem in den Kalkalpen gibt es unter den Wirbellosen eine hohe Anzahl an Endemiten, die bei einer Temperaturerhöhung gefährdet wären.

Bei extrem heißen Sommertemperaturen und einhergehendem Niedrigwasser muss mit Muschelsterben gerechnet werden, wie im Sommer 2003 in Altrheinarmen und in Abschnitten des Rheinstroms aufgetreten.<sup>41</sup> Im Zusammenhang mit dem Niedrigwasserereignis 2018 wurden vereinzelt Muschelsterben berichtet, große Muschelsterben blieben jedoch aus.<sup>42</sup>

Vom Klimawandel profitieren könnten Generalisten wie z. B. bestimmte wärmetolerante Arten der Chironomiden, Gammariden oder Wärme liebende Arten, z. B. die Spitze Blasenschnecke (*Physella acuta*) aber auch viele Neozoen, die teils Konkurrenzdruck auf heimische Arten ausüben (vgl. „Neobiota“). Es ist anzunehmen, dass die Verschiebung der Dominanzstruktur zugunsten dieser Arten in der Regel eine Verschlechterung des ökologischen Zustandes nach WRRL bewirkt.<sup>43</sup>

Für die stark gefährdeten Vorkommen heimischer Flusskrebse (*Astacidae*), die im weiteren Sinne auch dem Makrozoobenthos zuzurechnen sind, hatten die Dürre- und Hitzeextreme der Jahre 2018 und 2019 mitunter bestandsgefährdende Folgen, bis hin zum Erlöschen einzelner Vorkommen (vgl. Abbildung 5).<sup>44</sup> In Bächen im Oberrhein-Einzugsgebiet kam es 2018 zu verbreiteten Niedrigwasserabflüssen und zum abschnittswisen bis vollständigen Trockenfallen. Die Dürre in 2018 wirkte in vielen Krebsbächen auch 2019 noch als Stressor nach, so dass im Folgejahr kaum eine Erholung eintrat. Unter den Folgen leiden insbesondere kleinräumige, isolierte Krebsbestände, wie sie für die heimischen *Austropotamobius*-Arten (Stein- und Dohlenkrebse) infolge der Abdrängung in die Gewässeroberläufe durch invasive Arten und die Krebspest typisch sind. Kommt es infolge von Dürre- und Hitzextremen zum lokalen Erlöschen von Beständen findet eine natürliche Wiederbesiedlung wegen der starken Verinselung der Vorkommen nicht mehr statt. Die Lebensräume verweisen somit dauerhaft. Mit zunehmender Intensität und Häufigkeit von Dürreereignissen wird diese Gefährdung absehbar zunehmen. Gleichzeitig führen auch zunehmende

---

<sup>39</sup> aus KLIWA 2010: CORDELLIER 2009, LORENZ & GRAF 2008; diverse in WWF 2009

<sup>40</sup> KLIWA 2018

<sup>41</sup> aus KLIWA 2010: LUBW 2004

<sup>42</sup> IKS 2020a

<sup>43</sup> DAUFRESNE et al. 2007, GROB 2003, LUBW 2004 und SCHÖLL 2007 in KLIWA 2010

<sup>44</sup> CHUCHOLL 2019

Starkregenabflüsse zu einer Gefährdung, insbesondere, wenn es zur tiefgründigen Mobilisierung normalerweise weitgehend stabiler Grobsubstrate (Meso- bis Megalithal) kommt, in deren Lückenraum sich die Tiere verstecken und eingraben.<sup>45</sup>



**Abbildung 5: A – verendeter Dohlenkrebs (*Austropotamobius pallipes*) im trockenen Unterlauf eines Dreisam-Zuflusses (Oberrhein-EZG). B – Frisch toter Dohlenkrebs in stark erwärmtem, stagnierendem Restwassertümpel (selbes Gewässer wie A). C – Lebender Dohlenkrebs (Kreis) im schwach durchströmten Interstitial (Versteck geöffnet; Oberlaufbach im Oberrhein-EZG). D – frische Krebshöhlen (Pfeile) im feuchten Ufer unterstrom eines Restwasserpools (selbes Gewässer wie C). Alle Fotos aus CHUCHOLL (2019).**

Erhöhte Winterwassertemperaturen können z. B. den vorzeitigen Abbruch eines Ruhestadiums oder veränderte Entwicklungszeiten bewirken.<sup>46</sup> Manche Arten zeigen auch einen höheren Voltinismus, d. h. sie reproduzieren sich häufiger und es gibt mehrere Generationen pro Jahr.<sup>47</sup> Das kann für die Population insofern nachteilig sein, als dass sich Generationen von Nachkommen zu Unzeiten

<sup>45</sup> ROBINSON et al. 2008

<sup>46</sup> MEHLIG & ROSENBAUM-MERTENS 2008, FISCHER 2003, LADEWIG 2004 in KLIWA 2010

<sup>47</sup> aus KLIWA 2010: BRAUNE et al. 2008

entwickeln, in denen z. B. nicht ausreichend Nahrungsressourcen zur Verfügung stehen. Die Nachkommen können sich in Folge der Nahrungsknappheit nicht entsprechend entwickeln und sterben ab. Für die Ausgangspopulation bedeutet dies einen massiven Energieverlust, der zum lokalen Aussterben der gesamten Population führen kann.

## 1.5 Fischfauna

### 1.5.1 Feinmaterialeinträge und Geschiebe

Klimaveränderungen führen zu Abflussveränderungen. So können Hochwässer den Geschiebehaushalt eines Flusses generell positiv beeinflussen, da mit dem Hochwasser transportiertes Sediment auf dem Flussbett und entlang der Ufer abgelagert werden kann. Dies ist auch wichtig für die Schaffung und Strukturierung von aquatischen Habitaten. Die natürliche Dynamik von Fluss-Meer-Systemen sorgt für ein dynamisches Gleichgewicht von Sedimentation, Resuspension und der erneuten Ablagerung von Sedimenten, wenn der Sedimenthaushalt nicht gestört ist.<sup>48</sup>

Mit dem Eintrag von feinem Bodenmaterial, z. B. bei Starkregen, gehen jedoch oft negative Effekte einher. So kann eine Kolmation des Interstitials erfolgen, d. h. die Zwischenräume der Kiesbetten am Flussgrund, in denen kieslaichende Fische und Neunaugen ihre Eier ablegen und in denen die geschlüpften Jungfische sich aufhalten, kann durch die eingetragenen Sedimente verfüllt und der verbleibende Sauerstoff im Wasser des Kieslückensystems reduziert werden.<sup>49</sup> Aufgrund der durch diffuse Feinmaterialeinträge verschlechterten Wasser- und Sedimentqualität können zudem Laich und Jungfische geschädigt werden.



**Abbildung 6: Lachsmännchen (Foto: Ulrich Haufe, LÖBF)**

Insbesondere strömungsliebende Fische, die auf sauberen Kies- und/oder Sandsubstraten laichen (u. a. Salmoniden, Barbe, Hasel, Gründling, Schmerle, Neunaugen), reagieren empfindlich auf Schlammablagerungen im Laichhabitat. Eier und frisch geschlüpfte Larven im Substrat vertragen ein plötzlich hohes Sedimentvorkommen mit vielen Schwebstoffen infolge hoher Abflüsse nur schlecht. Länger andauernde erhöhte Einträge feiner Sedimente verursachen eine Kolmation von Kiesbetten, bei denen die Sohle verdichtet und verfestigt wird und die Permeabilität stark abnimmt. Als Folge werden Kiesbetten nicht mehr durchströmt und mit Sauerstoff versorgt. Kolmatisierte Sedimente sind als Laichhabitate ungeeignet.

Die Geschiebedynamik (Transport und Umlagerung grober Sedimente) ist ein natürlicher Vorgang im Fließgewässer, der die Gewässersohle immer wieder neu strukturiert.

---

<sup>48</sup> BRILS et al. 2017

<sup>49</sup> MKUNLV 2010, IBISCH 2004, SCHLÄPPI 2021

Aufgrund zahlreicher Querbauwerke ist diese Dynamik in weiten Teilen des Rheinsystems jedoch stark gestört. Dort, wo sie noch stattfindet, ist sie eine wesentliche Voraussetzung für die stetige Erneuerung geeigneter Laichplätze für kieslaichende Fischarten. Allerdings sind Zeitpunkt und Häufigkeit entscheidend; diese werden sich durch den Klimawandel voraussichtlich ändern, z. B. wenn Winterniederschläge vermehrt als Regen fallen (Verschiebung nivaler Regime in Richtung pluvialer Bedingungen).

Durch das Abschmelzen der Gletscher und des Permafrostes in den Alpen wird Schutt freigelegt und es wird erwartet, dass viele Gebirgsflüsse infolgedessen künftig mehr Kies und Sand mitführen werden. Die Folge ist eine stärkere Geschiebebewegung, die insbesondere in frei fließenden Abschnitten des Gewässernetzes zur Bildung und Aufwertung von Kieslaichplätzen beitragen kann. Erfolgt eine starke Geschiebebewegung jedoch wiederholt während der Reproduktionszeit und während des Schlüpfens der Brut (bei der Bachforelle z. B. im Winter und zeitigen Frühjahr), wie es durch die saisonale Verlagerung von Niederschlägen durch den Klimawandel teilweise erwartet wird, können die Bestände kieslaichender Fischarten geschädigt werden.<sup>50</sup> Die Auswirkungen stärkerer Geschiebebewegungen auf das Rheinsystem unterhalb sind jedoch aufgrund zahlreicher Querbauwerke und Staustufen sowie dem Bodensee, die als Geschiebe- und Sedimentsinken wirken, voraussichtlich gering.

### **1.5.2 Niedrigwasser**

Niedrige Abflüsse sind allgemein nachteilig für die Fischmigration. Bei Niedrigwasser sind die Zuflüsse inkl. Laichgewässer z. B. für aufsteigende Lachse schlechter auffindbar und außerdem kann die artspezifische Mindesttiefe für Migration unterschritten werden. Dauert eine Phase mit Niedrigwasserabfluss zu lange an, können Wanderfische ihr Zeitbudget bis zum Erreichen des Laichgewässers nicht einhalten und es kann zu Notablaichungen in suboptimalen Habitaten kommen. Zudem ist das Mortalitätsrisiko durch Prädation erhöht. Auch das Kollisionsrisiko mit Schiffsschrauben steigt, da die Fische durch die abnehmenden Wasserstände zunehmend in die Fahrrinne gedrängt werden. Dieses Risiko ist auf der Waal (Deltarhein) am größten, da sie stark befahren wird und die Hauptmigrationsroute für mehrere Arten ist. Aale sind durch Kollisionen mit Schiffen besonders gefährdet, da sie schlecht hören und sehen können. Die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstoßes zwischen Aalen und Schiffen ist bei niedrigem Wasserstand und kurz nach einem Anstieg des Wasserstandes am größten, da Aale dann zur Abwanderung angeregt werden.<sup>51</sup>

Durch das Austrocknen größerer Gewässerbereiche kommt es zum Habitatverlust für die gesamte aquatische Biozönose. Dadurch kann auch infolge veränderter Räuber-Beute- und Konkurrenz-Beziehungen das aquatische Nahrungsnetz beeinflusst werden. Weniger konkurrenzstarke Organismen (z. B. durch geringere Mobilität als die in der Regel hochmobile Fischfauna) können in ihren Beständen reduziert werden, wodurch auch die Nahrungsbedingungen für die Fischfauna negativ beeinflusst werden können. Nicht zuletzt können Trockenperioden, insbesondere in Verbindung mit höheren Wassertemperaturen, vermehrt Fischsterben sowie ein vermehrtes Auftreten von Krankheiten auslösen (vgl. Kap. 1.5.6).

Durch reduzierte Abflüsse rechnet man in den nächsten Jahrzehnten mit einem lokalen Verlust der Fisch-Biodiversität.<sup>52</sup> Eine Übersichtsstudie zum Einfluss von Abflussschwankungen in Fließgewässern auf die Abundanz und Biomasse von Fischen in gemäßigten Regionen hat gezeigt, dass sich niedrige Wasserstände, aber auch Hochwasserereignisse negativ auf beide Fischindizes auswirken.<sup>53</sup>

---

<sup>50</sup> BAFU 2012, Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016, KÖLLNER et al. 2017

<sup>51</sup> SCHULTE & VAN WINDEN 2024

<sup>52</sup> XENOPOULOS et al. 2005

<sup>53</sup> RYTWINSKI et al. 2023

OEXLE et al. (2020) untersuchten an 373 WRRL-Monitoringstellen die Folgen der extremen Niedrigwasserphasen 2018 und 2019 auf die Fischfauna in den Fließgewässern Baden-Württembergs (wobei 123 Monitoringstellen in direkten Rheinzufüssen lagen). Im Vergleich zu den Vorjahren nahmen der Anteil und die Abundanz kälteliebender Fischarten signifikant ab, während die Gesamtfischdichte (Ind./m<sup>3</sup>) zunahm. Letzteres war vor allem durch eine Zunahme wärmetoleranter Kleinfischarten bedingt. In der Summe ergaben sich dadurch Verschiebungen in der Zusammensetzung und Abundanz der Fischzönosen.

Niedrige Wasserstände sorgen auch dafür, dass die Strömungsgeschwindigkeiten im Fluss oder in Teilen davon, z. B. in einzelnen Nebenrinnen oder in gestauten Flussbereichen, stark zurückgehen. Strömungsliebende Arten verschwinden aus den Habitaten ohne Strömung (z. B. Salmoniden, Barbe und Larven des Flussneunauges). Zu geringe Strömungsgeschwindigkeiten beeinflussen außerdem das Wanderverhalten von Wanderfischen negativ, da sich diese bei der Migration u. a. an der Strömungsgeschwindigkeit orientieren.

Niedrige Wasserstände im Frühjahr bedeuten, dass weniger häufig charakteristische Überschwemmungsbereiche entstehen. Flachufer und vorübergehend überschwemmte Auen sind für viele Fischarten (z. B. Hecht) jedoch wichtige Laich- und Jungfischhabitate.

Ein durch den Klimawandel langfristig verändertes Abflussregime mit seltenen Hochwässern und im Jahresverlauf früheren Niedrigwässern kann Eutrophierungsprozesse insbesondere in der Äschen- und Barbenregion verstärken, was sich negativ auf den Fischbestand auswirken kann.<sup>54</sup>

Des Weiteren führt Niedrigwasser dazu, dass Auengewässer und z. T. auch Nebenarme zunehmend isoliert werden. Fische, die normalerweise nach ihrer juvenilen Lebensphase aus diesen Gewässerteilen in den Hauptstrom abwandern (z. B. Aland, Brachse, Rotaugen), sind dann in den Nebengewässern eingeschlossen. Es kann in Kombination mit Austrocknung und/oder hohen Wassertemperaturen zum Massensterben kommen. Einige Fischarten in wenig dynamischen Auengewässern, wie Schlammpeitzger und Karausche, sind allerdings an das vorübergehende vollständige oder teilweise Austrocknen der seichten Stillgewässer angepasst. Solche Situationen überdauern diese Arten, indem sie sich in den schlammigen, noch feuchten Untergrund eingraben.<sup>55</sup> Wenn das Trockenfallen jedoch zu lange andauert, sterben schließlich auch diese Arten.



**Abbildung 7: Niedrigwasser 2018 an einem Nebenarm des Rheins (Foto: Marc Braun)**

---

<sup>54</sup> BRUNKE 2023

<sup>55</sup> NLWKN 2011

### 1.5.3 Wassertemperatur

Um den Einfluss von Veränderungen der Wassertemperatur auf die Fischfauna einschätzen zu können, ist es wichtig die Temperaturpräferenzen verschiedener Fischarten zu kennen. Bei den Temperaturpräferenzen werden u. a. folgende Parameter unterschieden:

Die kritische Temperatur (CTMax oder CTMin) ist erreicht, wenn der Fisch die Fähigkeit verliert aus der kritischen Temperaturumgebung zu entfliehen. Im unteren/oberen kritischen Bereich kann eine klare Veränderung des Verhaltens auf Grund der Temperatur beobachtet werden. So gibt es beispielsweise eine Vermeidungstemperatur, eine Umherirrttemperatur und eine Störtemperatur (avoidance, restlessness bzw. disturbing temperature). Im Präferenzbereich nehmen die Fische Nahrung auf und es gibt keine Anzeichen eines temperaturbedingten, abnormalen Verhaltens. Die Vorzugstemperatur ist der Temperaturbereich, in dem sich der Fisch in einem Temperaturgradienten bevorzugt aufhält.<sup>56 57</sup>

Im Vergleich zu den relativ temperaturliberalen Cypriniden haben Salmoniden eine verhältnismäßig enge Temperaturtoleranz (vgl. Tabelle in Anlage 2).

Werte wie das kritische Temperaturmaximum und der Bereich der jeweiligen optimalen Temperaturen unterscheiden sich für die verschiedenen Lebensstadien, wobei Eier und Juvenile in der Regel temperaturempfindlicher sind als adulte Fische. Letztere haben insbesondere während der Laichzeit wiederum spezielle Ansprüche an die Wassertemperatur. Für die Entwicklung der Fische ist die Anzahl aufeinanderfolgender Tage, an denen eine bestimmte Wassertemperatur herrscht, entscheidend.<sup>58</sup>

Auch in den Wintermonaten können erhöhte Wassertemperaturen zu einem Fischsterben führen, wenn ein erhöhter Energieverbrauch aufgrund der erhöhten Wassertemperatur auf ein zu geringes Nahrungsangebot stößt.<sup>59</sup>

Zudem können Fischarten bzw. -populationen regionale Anpassungen zeigen. Kälteliebende Fischarten wie z. B. die Bachforelle (*Salmo trutta*, im Rheingebiet mehrere genetisch differenzierbare Stämme) sind durch hohe Wassertemperaturen und Niedrigwasser gefährdet.<sup>60,61</sup> Gemäß der Studie von BASEN et al. (2022) werden beispielsweise Bachforellen und Äschen in Südwestdeutschland 92 % bzw. 75 % der gegenwärtig gut geeigneten Lebensräume verlieren (bezogen auf die ferne Zukunft, 2070).<sup>62</sup> Bachforellen-Eier, -Embryonen und -Jungfische im Alpenraum (und evtl. auch in den Mittelgebirgen) werden möglicherweise durch die wärmeren Temperaturen den Winter besser überstehen können - aber auch nur bis zu einem gewissen Grad der Erwärmung.<sup>63</sup> Lokal angepasste Bachforellenpopulationen könnten sich als relativ tolerant gegenüber erhöhten Temperaturen erweisen und somit das Überleben der Art ermöglichen. Solche Toleranzen sind zumeist nicht physiologischer Art, sondern eine Anpassung im Lebenszyklus, wie zum Beispiel eine Verlagerung des Laichzeitpunktes.

Im Rahmen einer Studie des niederländischen Wissensnetzwerks für Naturqualitätsentwicklung und -management (OBN)<sup>64</sup> zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Flussökologie wurde in den niederländischen Flüssen für einen Großteil der Fischgemeinschaft geschätzt, wie gut die Arten länger anhaltende (20 Tage im Sommer) Wassertemperaturen von 21 °C (repräsentativ für die derzeitige Situation) und 24 °C (repräsentativ für die Situation mit sich erwärmendem Klima) vertragen. Durch

---

<sup>56</sup> ELLIOT 1981

<sup>57</sup> KÜTTEL et al. 2002, vgl. auch Tabelle in Anlage 2

<sup>58</sup> TISSON & SOUCHON 2010

<sup>59</sup> BRODERSEN et al. 2011

<sup>60</sup> EUROLIMPACS 2009, NOTTER & STAUB 2009

<sup>61</sup> BAFU 2021

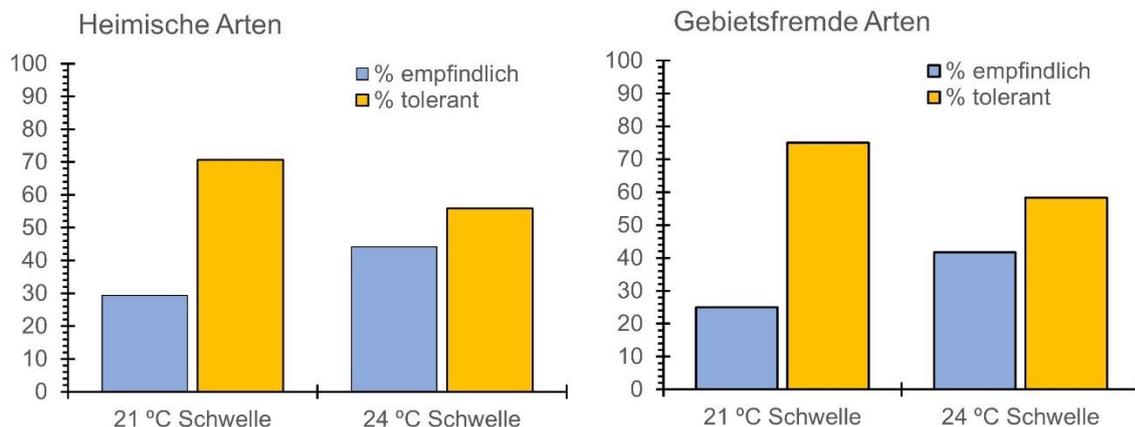
<sup>62</sup> BASEN et al. 2022a

<sup>63</sup> KÄRCHER et al. 2021

<sup>64</sup> DORENBOSCH et al. 2022

einen Vergleich dieser Temperaturen mit einer Datenbank mit bekannten Toleranzgrenzen von Fischen gegenüber der Wassertemperatur, wurden Fische in „empfindlich“ (Arten, die bei Exposition dieser Temperaturen geschädigt werden) und „tolerant“ (Arten, die keine Probleme bei Exposition dieser Temperaturen haben) eingeteilt. Auf der Grundlage der hohen Wassertemperaturen von 21 °C im Sommer, die mittlerweile regelmäßig im Fluss auftreten, sind ca. 30 % der heimischen Fische „empfindlich“ (ca. 25 % der gebietsfremden Fische). Bei einem sich erwärmenden Klima und der Annahme von höheren Wassertemperaturen im Sommer von 24 °C, steigt der Anteil „empfindlicher“ heimischer Fische auf ca. 44 % (ca. 41 % der gebietsfremden Fische). Ein zunehmend größerer Anteil der Fischgemeinschaft kann somit infolge hoher Wassertemperaturen aufgrund eines sich erwärmenden Klimas geschädigt werden. Bei gebietsfremden Arten ist der Anteil „empfindlicher“ Arten ähnlich hoch bzw. nur wenig geringer als bei heimischen Arten (vgl. Abbildung 8). Dennoch verbleiben mehrere, gegenüber steigenden Wassertemperaturen sehr tolerante gebietsfremde Arten, die zukünftig einen (weiter) zunehmenden Wettbewerbsvorteil haben werden.

Der Europäische Wels (*Silurus glanis*), die größte, einheimische Raubfischart im Rhein, pflanzt sich bei Temperaturen über 18 °C fort (Copp et al. 2009). Seit 1994 nimmt die Population zu (Van Aalderen en Beelen, 2011). Dies ist für die Wiederherstellung der Lachspopulation besorgniserregend (Brevé et al. 2014; Schneider et al. in Vorbereitung).



**Abbildung 8: Einteilung von Fischarten (heimisch, gebietsfremd) in „empfindlich“ und „tolerant“ gegenüber Wassertemperaturen von 21 °C (derzeitige Situation) und 24 °C (Klimaszenario) (DORENBOSCH et al. 2022)**

Das französische Amt für Biodiversität (*Office français de la biodiversité*, OFB) hat 2021 eine Studie zur Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Langdistanzwanderfische im Rhein und insbesondere den Atlantischen Lachs durchgeführt.<sup>65</sup> Die aus den Daten des französischen IPCC abgeleiteten Klimaszenarien (Lufttemperatur und Niederschlag) basieren auf der Untersuchung des repräsentativen Konzentrationspfads (RCP) 2.6, d. h. + 2 °C, die der Einhaltung des Pariser Abkommens entspricht, und des RCP 8.5, d. h. + 4 °C. Die Bilanzen wurden für den Verlauf des Oberrheins unter Berücksichtigung der Entwicklung der Indikatoren für meteorologische Daten, Wassertemperatur und Abflüsse, erstellt.

Gemäß dem Szenario RCP 2.6 bis 2100 ist eine Stabilisierung der Umweltparameter zu beobachten: Die Tagesmittelwerte der Luft- und Wassertemperatur stabilisieren sich gegen 2030-2040 ebenso wie der Gesamtniederschlag im Jahr 2020. Im Szenario RCP 8.5 sind die Entwicklungen deutlicher ausgeprägt: eine Zunahme des Tagesmittelwertes der Lufttemperatur um + 0,47 °C pro Jahrzehnt und der Wassertemperatur um + 0,3 °C

<sup>65</sup> DORIDANT 2021

pro Jahrzehnt sowie 2 Tage weniger Frost pro Jahrzehnt. Die Schneehöhe nimmt um 4 cm pro Jahrzehnt und der Schneefall um 2,5 Tage pro Jahrzehnt ab.

Die Ergebnisse der Studie für das Szenario RCP 8.5 deuten darauf hin, dass nur das Parr-Stadium nicht zu stark betroffen ist, da sich die Umwelt durch den Temperaturanstieg den optimalen Wachstumsbedingungen für das Lebensstadium annähert. Die Auswirkungen auf die anderen Lebensstadien von *Salmo salar* (Ei, Brütling, Smolt und adulte Tiere) sind sehr negativ. Im Ei-Stadium kommt es zu vorzeitigem Schlüpfen, einer Abnahme der Eigröße und einer geringeren Umwandlungsrate von Dotter zu Gewebe. Das Brütlingsstadium wird durch einen Anstieg der Prädation stark beeinflusst und das Erwachsenenstadium durch verzögerte Wanderungen, einen erhöhten Energieverbrauch und eine Abnahme der erreichbaren Laichplätze. Insgesamt sinkt die Überlebensrate der vier oben genannten Stadien. Nach dem Szenario RCP 8.5 ist das Überleben des Lachses bis zum Jahr 2100 stark gefährdet.

Das Szenario RCP 2.6 ist in Bezug auf die Zukunft des Lachses im Rhein ermutigender. Die Lebensbedingungen für die Art wären im Jahr 2100 ähnlich wie heute, so dass der Rhein als potenzieller Lebensraum erhalten bliebe, allerdings mit einem leichten Anstieg der Wassertemperaturen.

Die Ergebnisse der Studie sind mit Vorsicht zu behandeln. Unbekannte Faktoren und Grenzen der Studie bleiben bestehen, wie die Anpassungsfähigkeit der Arten, die Bedeutung der Zuflüsse, der Einfluss des Grundwassers und die Grenzen der Modellierung der Temperatur- und Abflussfaktoren.

#### **1.5.4 Längsverteilung der Fischgemeinschaften**

Die Temperaturabhängigkeit von Lebensprozessen (sowie weitere Faktoren wie Strömungsgeschwindigkeit und Substratbeschaffenheit) führen zu einer deutlichen und typspezifischen Längsverteilung der Fischgemeinschaften von der Quelle eines Flusses bis zu seiner Mündung in das Meer.<sup>66</sup> Man spricht von der Forellen-, Äschen-, Barben-, Brachsen- und Kaulbarsch-Flunder-Region. Diese grobe Einteilung ergibt sich u. a. durch die stetige Zunahme der Wassertemperatur und der Abnahme des Gefälles eines Flusses von der Quelle bis zur Mündung. So ist die Verbreitung der Salmoniden in der Regel auf die Oberläufe, die der Cypriniden überwiegend auf die Unterläufe beschränkt.

Bei einem Anstieg der Wassertemperaturen vergrößert sich der Lebensraum von thermophilen Fischarten wie Barbe, Brasse, Ukelei, Schmerle und Döbel. Sie können sich flussaufwärts ausbreiten und somit vom Klimawandel unter Umständen sogar profitieren. Gerade im Tieflandbereich der Rheinarne (Niederlande) gilt jedoch, dass sich diese Arten eher im oberen Bereich ihres Temperaturspektrums befinden und der Klimawandel zu einer Verkleinerung ihres Lebensraums führen kann. Die Höchsttemperatur für junge Barben liegt zum Beispiel um die 25 °C.<sup>67</sup>

Salmoniden hingegen sind an kühle Gewässer angepasst und werden in ihrem Lebensraum zurückgedrängt bzw. werden versuchen, durch Wanderung in höhere Lagen kritische Temperaturen zu vermeiden.<sup>68</sup> Modellierungen für sechs Fischarten in süddeutschen Gewässern zeigen, dass gegenwärtig gut geeignete Lebensräume von Salmoniden voraussichtlich erheblich abnehmen werden (prognostizierter Verlust geeigneter Habitate bei Bachforellen von 92 % und bei Äschen von 75 %).<sup>69</sup> In einem Modell für ein alpines Gewässers (Mur, Donaugebiet) wurde für eine Wassertemperaturerhöhung von ca. 1 °C beispielsweise eine Verschiebung der Salmonidenregionen bis zu 27 km in Richtung Quelle prognostiziert. Eine Modellierung ergab für den Oberrhein einen Rückgang der Bachforelle und eine gleichzeitige Zunahme

---

<sup>66</sup> VANNOTE et al. 1980

<sup>67</sup> MARIJS et al. 2020

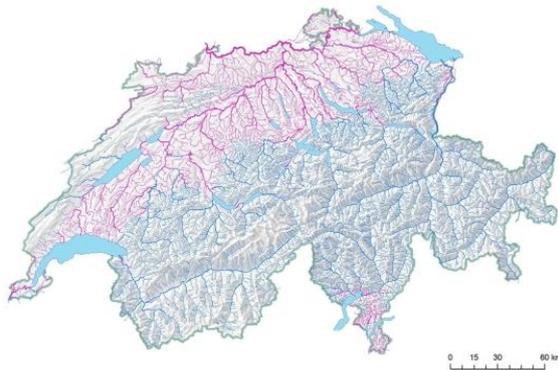
<sup>68</sup> RABITSCH et al. 2010, BASEN et al. 2022a

<sup>69</sup> BASEN et al. 2022a

des Döbels.<sup>70</sup> Die Erhöhung der Wassertemperatur im Oberlauf der Rhône (unterhalb des Genfer Sees) um 1,5 °C in den letzten 30 Jahren hat sich stärker auf die Fischfauna ausgewirkt als die Erhöhung um 3 °C im Unterlauf. Dort dominierten bereits vorher thermophile Arten. Einige rheophile Cyprinidenarten haben sich in höhere Regionen zurückgezogen.<sup>71</sup>

Die Wanderung in höhere Lagen ist allerdings nur möglich, wenn die flussaufwärts gelegenen Gewässerabschnitte zugänglich sind und eine geeignete Struktur aufweisen. Da die meisten Nebenflüsse des Rheins in bergigen Regionen durch Querbauwerke stark fragmentiert sind und somit die vorausgesagte Verschiebung (bzw. Abwanderung) von Fischgemeinschaften in höhere Lagen in vielen Fällen nicht oder nur eingeschränkt möglich ist, würden höhere Wassertemperaturen den Rückgang oder sogar das lokale Aussterben mancher Arten bzw. Populationen zur Folge haben (vgl. Tabelle in Anlage 2). Es ist anzustreben, mehr Flüsse wieder frei fließen zu lassen, d. h. bestehende Stauanlagen zurückzubauen oder, wo das nicht möglich ist, zumindest eine ökologisch funktionale Durchgängigkeit wiederherzustellen. Zudem sind viele Arten des Mittel- und Unterlaufs (Hyporhithral und Epipotamal) nicht an die hohen Fließgeschwindigkeiten der Oberläufe angepasst, so dass fraglich ist, ob sie sich dort ansiedeln können.

Durch Einwanderung ähnlicher Arten werden sich die Populationen im sommerkühlen bis leicht sommerwarmen Mittel- und Unterlauf (Hyporhithral und Epipotamal) zunehmend vereinheitlichen.<sup>72</sup>



**Abbildung 9: Mögliche Verbreitung der Bachforelle in der Schweiz im Jahr 2050 nach einem Modell des BAFU bei einer Lufttemperaturerhöhung von 5,5 °C.**

*In diesem Szenario würde sich der für Bachforellen optimale Lebensraum um 44 % der heutigen Fläche verringern (bei anderen Szenarien beträgt die Verringerung mindestens 6 %). Dies würde bedeuten, dass die Bachforelle im schweizerischen Mittelland praktisch nicht mehr vorkommt. Blau: Flussabschnitte, in denen Bachforellen leben können. Pink: Flussabschnitte, die zu warm für Bachforellen sind. Quelle: NOTTER & STAUB 2009*

Im niederländischen Teil des Rheineinzugsgebiets kommt die **Quappe** heutzutage hauptsächlich im Vechtdelta vor. Auch in der Beerze scheint sich die Quappe nach der Wiederansiedlung wieder selbst zu erhalten.<sup>73</sup> Diese Art reagiert ausgesprochen empfindlich auf Wassertemperaturen über 18 °C bis 20 °C. Früher gab es im Flussgebiet tiefe Senken oder Stillgewässer, die für die Quappe kalt genug waren, um zu überleben. Der jetzige Temperaturbereich der niederländischen Flüsse ist für die Quappe im Sommer zu hoch. Das ist einer der Gründe, weshalb diese Art fast aus dem niederländischen Rheingebiet verschwunden ist. Andere temperaturempfindliche Arten, die im Fluss vorkommen, wie Groppe, Hasel und die Larven des Flussneunauges, werden im Sommer schnell geschädigt, wenn die Wassertemperatur 20 °C überschreitet, vor allem wenn diese hohen Temperaturen über mehrere aufeinanderfolgende Tage auftreten (vgl.

<sup>70</sup> PONT 2003

<sup>71</sup> KHALANSKI et al. 2008

<sup>72</sup> aus KLIWA 2010: BUISSON & GRENOUILLET 2009

<sup>73</sup> [Kwabaal \(ravon.nl\)](http://Kwabaal.ravon.nl)

Tabelle in Anlage 2). Diese Situationen werden infolge des Klimawandels immer häufiger auftreten.

### 1.5.5 Fischwanderung

Eine gewisse Anpassungsfähigkeit der Wanderfische an die größere Variabilität von Niederschlägen und Abflüssen kann erwartet werden, da sie bekanntermaßen günstige Abflussverhältnisse für die Wanderung ausnutzen und in ungünstigen Phasen abwarten.

Durch Starkregen in kleineren Einzugsgebieten und durch temporär höhere Abflüsse in allen Fließgewässergrößen kann es kurzfristig und lokal günstigere Bedingungen für die Fischmigration geben. Das „Flood Pulse Concept“<sup>74</sup> besagt u. a., dass Wasser, das bei Hochwasser aus Richtung des Flusses in die Aue gelangt die Verbindung von Lebensräumen und dadurch die Wanderung zwischen den Lebensräumen ermöglicht.

Andererseits können sich zu warme Gewässerabschnitte zu einer thermischen Barriere für wandernde Fischarten (z. B. Lachs, Meerforelle) auf dem Weg vom Meer in ihre Laichgewässer entwickeln. Diese müssen die großen Cyprinidengewässer (insbesondere Rheinhauptstrom, Mosel, Main) durchwandern, bis sie ihre kühleren Reproduktionsgewässer (Metarhithral bis Epipotamal) erreichen. Wie u. a. bei Transponderuntersuchungen im Rhein festgestellt werden konnte, stellen aufwärtswandernde adulte Salmoniden ihre Wanderbewegungen bei Temperaturen um 25 °C ein. Dies ist als Anzeichen von Stress zu werten; das Zeitbudget, das den Rückkehrern bis zum Abbläuen zur Verfügung steht, wird durch die Unterbrechung der Wanderung belastet.<sup>75</sup> Hohe Temperaturen wie im Hitzesommer 2003, als die Wassertemperaturen im Rhein über einen Zeitraum von rund 6 Wochen im Juli / August nahe oder sogar über 27 °C lagen, und in Zuflüssen (z. B. Sieg) knapp 28 °C gemessen wurden, verursachten Unterbrechungen der Migration adulter Salmoniden, die sich bisher allerdings nur auf kurze Zeiträume erstreckten. In Verbindung mit anthropogenen Einflüssen (u. a. Wärmeeinleitungen) könnte eine erhöhte Wassertemperatur im Rhein und seinen Zuflüssen dennoch zukünftig ein limitierender Faktor für die Lachspopulation im Rhein darstellen.<sup>76</sup> Auch für die Smolt-Abwanderung spielt die Wassertemperatur eine wichtige Rolle. So können in wärmer werdenden Jungfischgewässern, in denen letale Temperaturen nicht überschritten werden, Wachstum und die Smolt-Produktion sogar zunehmen. Ein schnelleres Wachstum und höhere Temperaturen könnten jedoch auch zu einer früheren Migration von Smolts führen, was das Überleben in der marinen Phase beeinträchtigen könnte, wenn der Migrationszeitpunkt und die optimale Nahrungsverfügbarkeit nicht übereinstimmen.<sup>77</sup>

### 1.5.6 Krankheiten

Bei hohen Temperaturen unterhalb des letalen Bereichs steigt das Mortalitätsrisiko durch Stress und Infektionen.<sup>78</sup>

Bei Salmoniden wirken sich die erhöhten Temperaturen negativ auf das Immunsystem aus und machen die Tiere anfälliger für Krankheiten. So wird z. B. die Proliferative Nierenkrankheit (*Proliferative Kidney Disease*, PKD), die bei Bachforellen ab einer länger andauernden Wassertemperatur von über 15 °C insbesondere für Sömmerlinge oftmals

---

<sup>74</sup> JAARSMa et al. 2007 aus JUNK et al. 1998

<sup>75</sup> IKSr 2009a; BREUKELAAR (RWS), mündl. Mitteilung

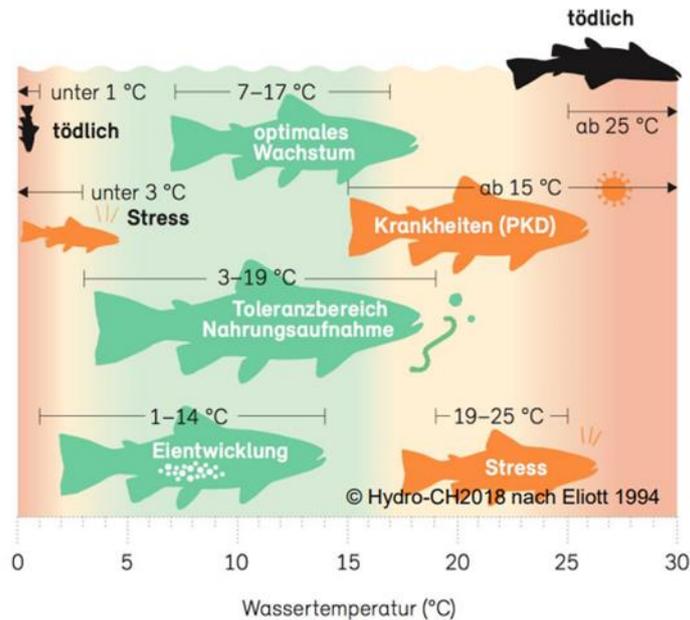
<sup>76</sup> IKSr 2009a

<sup>77</sup> ICES 2017

<sup>78</sup> IKSr 2009a

tödlich ist, durch den Klimawandel voraussichtlich vermehrt auftreten (vgl. Abbildung 10).<sup>79,80</sup>

Auch die Rotaalseuche, eine bakterielle Erkrankung beim Europäischen Aal, wird durch Hitzestress sowie durch das häufige Aufeinandertreffen der Fische im verringerten Wasservolumen offensichtlich begünstigt.<sup>81</sup>



**Abbildung 10. Auswirkungen des Klimawandels (Wassertemperatur) auf die Fischfauna am Beispiel der Bachforelle (BAFU 2021).**

## 1.6 Neobiota

Seit einigen Jahrzehnten, durch Schifffahrt und anthropogene Nutzung verstärkt, wird im Rhein und seinen Zuflüssen eine erhebliche und sehr dynamische Veränderung in den Lebensgemeinschaften durch einwandernde Neobiota beobachtet, so dass biologische Wechselwirkungen Effekte des Klimawandels teils überlagern.

Bei Verbreitung und Einwanderung gebietsfremder Arten ist der Klimawandel meist nicht der wichtigste Faktor; er kann jedoch bei einigen Arten die Ansiedlung erleichtern und die Abundanz stark beeinflussen.<sup>82</sup>

Viele Neobiota sind Generalisten und damit tolerant gegenüber höheren Temperaturen, Eutrophierung und Versalzung und profitieren damit indirekt vom Klimawandel. Da sie oft eine höhere Reproduktionsrate haben und/oder aggressiver territorial vorgehen<sup>83</sup>, haben sie häufig Wettbewerbsvorteil gegenüber heimischen Arten.

Die Vermehrung und Verbreitung der meisten Wärme liebenden Neobiota wird durch milde Winter gefördert und durch anhaltende niedrigere winterliche Wassertemperaturen (z. B. <5 °C bei Quagga-Muscheln<sup>84</sup> oder <10 °C bei Regenbogenforellen<sup>85</sup>) eingeschränkt.

<sup>79</sup> ROS ET AL. 2022

<sup>80</sup> BAFU 2021

<sup>81</sup> IKSR 2004, KOOP et al. 2007

<sup>82</sup> STOWA 2011

<sup>83</sup> VAN KESSEL et al. 2011

<sup>84</sup> BORCHERDING 1991

<sup>85</sup> BUWAL 2002

### 1.6.1 Makrophyten

Die Anzahl neophytischer Wasserpflanzen und deren Vorkommenshäufigkeit hat in Europa in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten deutlich zugenommen. Viele der Arten (u.a. *Elodea nuttallii*) profitieren, wie z.T. auch einheimische Wasserpflanzenarten, von ansteigenden Temperaturen und verlängerten Wachstumsperioden.

Die Schmalblättrige Wasserpest *Elodea nuttallii* ist ein Neophyt, der seit Mitte des letzten Jahrhunderts in Mitteleuropa nachgewiesen wurde und sich rasant ausgebreitet hat. Er ist tolerant gegenüber einer hohen Temperaturamplitude. Bei Temperaturen ab 4 °C kann Wachstum erfolgen, ebenso kurzzeitig noch bei Wassertemperaturen über 28 °C. Die Art könnte demnach bei steigenden Wassertemperaturen vom Klimawandel profitieren. Massenbestände von *Elodea nuttallii* haben negative bzw. verdrängende Auswirkungen auf andere submerse Makrophyten und auch Planktonalgen.

Von höheren Wassertemperaturen im Winter profitieren insbesondere auch immergrüne Wasserpflanzen. Diese können einheimische, saisonale Arten verdrängen, wie dies für die Verdrängung von submersen Igelkolben *Sparganium emersum*-Beständen durch den submersen Neophyten *Vallisneria spiralis* in der Erft dokumentiert wurde. Aber auch am Niederrhein konnte dieser immergrüne Neophyt, vermutlich ausgehend von Eintragungen der Art aus den Rheinzufüssen Erft und Mosel, bereits an einigen Stellen und z.T. seit mehreren Jahren nachgewiesen werden, wobei das derzeitige Ausmaß der Bestände nicht bekannt ist. Das ebenfalls immergrüne, neophytische, submerse Verschiedenblättrige Tausendblatt *Myriophyllum heterophyllum*, das sich derzeit in Nordfrankreich in Kanälen rasch ausbreitet, ist aktuell nur aus Rheinzufüssen bekannt. Eine Etablierung in langsam fließenden oder Stillwasserbereichen im Rhein und rheinangebundenen Gewässern erscheint möglich.

Einige frostempfindliche neophytische Wasserpflanzen, wie die bevorzugt flutend/emers wachsenden und im Sediment verwurzelte *Myriophyllum aquaticum* profitieren bei ihrer Etablierung von ansteigenden Luft- und Wassertemperaturen im Winter. Hohe Sonneneinstrahlung verbunden mit warmen (Luft-)Temperaturen und hohen Nährstoffverfügbarkeiten führen zudem zu einem schnellen Wachstum dieser Arten. Im Sediment verwurzelte und flutend bzw. emers wachsende Arten siedeln sich vornehmlich im flacheren Uferbereich an. Diese Bereiche fallen in den Sommermonaten am Rhein vermehrt trocken bzw. unterliegen starken Wasserstandsschwankungen, welche für diese Wuchs- und Lebensform eher nachteilige Habitatbedingungen verursachen. Durch die Wuchsform und die durch dichte Bestände verursachte starke Beschattung der Wassersäule beeinflussen Massenbestände dieser Arten das Wachstum von submersen Makrophyten und Planktonalgen. Zudem verändert sich das Habitat für das Makrozoobenthos und die Fische.

Frei schwimmende Arten, wie der Große Algenfarn *Azolla filiculoides* oder der Wassersalat *Pistia stratiotes*, die beide bereits im Rheineinzugsgebiet vorkommen, können nur in strömungsgeschützten Bereichen größere Bestände ausbilden, da sie ansonsten verdriftet werden. Die Vorkommen von *Pistia stratiotes* sind bislang auf die Erft mit ihren anomal hohen Wassertemperaturen im Winter beschränkt, die der Art die vegetative Überwinterung erlaubt. Eine Überwinterung mittels gebildeter Samen ist ebenfalls nachgewiesen, aber vermutlich eher nur als die Ausnahme anzusehen. Ausgehend von der Erft gelangen vor allem in den Sommermonaten tausende Pistia-Pflanzen in den Rhein, die allerdings dort noch keine weiteren Bestände aufbauen konnten. Insbesondere rheinangebundene Stehgewässer weisen jedoch günstigere Bedingungen für die Ansiedlung frei schwimmender Neophyten auf. Mit ansteigenden Temperaturen verbessern sich die Wuchsbedingungen dieser Arten und in geeigneten Gewässerbereichen könnte die Ausbildung von Massenbeständen der Art gefördert

werden, welche durch die Beschattung des Wasserkörpers vielfältige Auswirkungen hätten.

### 1.6.2 Makrozoobenthos

Das Vorkommen vieler neozoischer Invertebraten ist von einer hohen Dynamik geprägt; so wurde beispielsweise die aus Südostasien stammende Grobgerippte Körbchenmuschel (*Corbicula fluminea*) in Hoch- und Oberrhein als dominante Massenart zunächst von der Dreikant- bzw. Zebramuschel (*Dreissena polymorpha*) und anschließend von der Quagga-Muschel (*Dreissena rostriformis bugensis*) abgelöst.

Aktuell stellt die aus dem pontokaspischen Raum stammende Quagga-Muschel *D. rostriformis bugensis* als invasives Neozoon einen Großteil der Biomasse der Makrozoobenthos-Gemeinschaft des Hoch- und Oberrheins durch Massenvorkommen von mehreren Tausend Individuen pro Quadratmeter und übertrumpft damit ihre ebenfalls neozoische Schwesterart *D. polymorpha* in Anzahl und Dichte.

*D. polymorpha* reagiert bis zu einer Temperatur von 30 °C mit einer gesteigerten Wachstumsrate, ab 30 °C nimmt das Wachstum ab und bei Temperaturen über 32 °C sterben die meisten Individuen der Zebramuschel. Im Gegensatz dazu scheint die Quagga-Muschel weniger tolerant gegenüber hohen Temperaturen zu sein; so steigt die Mortalität der Quagga-Muschel bereits bei Temperaturen von 30 °C bis 31 °C signifikant an. Im Gegensatz zu *D. polymorpha*, die zur erfolgreichen Reproduktion auf eine Wassertemperatur von mindestens 12 °C angewiesen ist, kann sich *D. rostriformis bugensis* jedoch selbst bei Wassertemperaturen unter 5 °C fortpflanzen und reproduziert sich somit nahezu ganzjährig<sup>86</sup>. Das bedeutet, dass die Quagga-Muschel bereits bei Wassertemperaturen unter 5 °C stabile Populationen aufbauen kann<sup>87</sup>, während *D. polymorpha* zur gleichzeitigen Freisetzung von männlichen und weiblichen Gameten mindestens 12 °C benötigt und damit in Gewässern mit einer Tageshöchsttemperatur von weniger als 12 °C über das gesamte Jahr keine lebensfähigen Populationen etablieren kann.

*C. fluminea* reagiert ebenfalls empfindlich auf niedrige Wassertemperaturen, weshalb ihre Ausbreitung vermutlich in Richtung Osten begrenzt ist, während man sie z. T. massenhaft unterhalb von Warmwassereinleitungen auffindet. Bei solch massenhafter Ausbreitung können Körbchenmuscheln heimische Süßwassermollusken zurückdrängen. Bei maximalen Wassertemperaturen von bis zu 30 °C sinkt die Überlebenszeit von *C. fluminea* allerdings von mehr als einem Monat auf wenige Tage, so dass es, wie 2003 im Rhein beobachtet, zu einem Massensterben kommen kann.<sup>88</sup>

Generell ist davon auszugehen, dass neozoische Arten und genetische Artenstämme, die aus der Pontokaspis über den Main-Donau-Kanal in das Rheineinzugsgebiet eingewandert sind und noch einwandern, wie z. B. der Große Höckerflohkrebs (*Dikerogammarus villosus*), der an vielen Untersuchungsstellen des Rheins den Tiger-Flohkrebs (*Gammarus tigrinus*) bereits ersetzt hat oder pontokaspische Stämme der ursprünglich im Rhein beheimateten Gemeinen Kahnschnecke (*Theodoxus fluviatilis*), aufgrund ihrer höheren Temperaturtoleranz zumindest im Bereich der Wasserstraßen weiter profitieren werden. Zudem deuten aktuelle Beobachtungen in den Uferbereichen rheinland-pfälzischer Rheinabschnitte darauf hin, dass Hartsubstrat bewohnende, Biofilm abweidende Arten von längeren Niedrigwasserphasen, die meist auch mit geringeren Schwebstofffrachten und verstärkten Wachstumsraten des Biofilms einhergehen, profitieren. Dazu gehören z. B. die oben genannten Stämme der Gemeinen Kahnschnecke oder auch die Neuseeländische Zwergdeckelschnecke (*Potamopyrgus antipodarum*).

---

<sup>86</sup> KARATAYEV & BURLAKOVA 2022

<sup>87</sup> BORCHERDING 1991

<sup>88</sup> KOOP et al. 2007

### 1.6.3 Fischfauna

Die Schwarzmeergrundeln stellen unter den Rheinfischen die derzeit häufigsten Neozoen dar. Sie stammen ursprünglich aus dem pontokaspischen Raum und breiteten sich von der Donau über den Mai-Donau-Kanal bis ins Rheingebiet aus. Aufgrund der weiten Ausbreitung und des Massenaufkommens muss von deutlichen Effekten auf die heimische Fischfauna, wie gegenseitiger Konkurrenz, ausgegangen werden.<sup>89</sup>

Die Kessler-Grundel (*Neogobio kessleri*) toleriert Wassertemperaturen von 25 °C bis 30 °C. Dadurch, dass sie räuberisch von Invertebraten lebt, steht sie in Konkurrenz mit heimischen Fischarten. Zudem frisst sie Fischlaich und Jungfische und könnte somit die Wiederansiedlungsprogramme von Lachs und anderen, darunter auch standorttreuere Fischarten, negativ beeinflussen.

Ein ähnliches Verhalten zeigt die Schwarzmaulgrundel (*Neogobio melanostomus*). Diese Fischart könnte zudem aufgrund ihrer nächtlichen Nahrungssuche heimische Fische verdrängen.

Die zur kommerziellen Nutzung eingeführte und bereits lange etablierte Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*) ist im Vergleich zur heimischen Bachforelle (*Salmo trutta fario*) toleranter gegenüber höheren Wassertemperaturen (10 °C bis 24 °C) und geringeren Sauerstoffgehalten und könnte damit ebenfalls vom Klimawandel profitieren.<sup>90</sup>

---

<sup>89</sup> BORCHERDING & GERTZEN 2016

<sup>90</sup> BUWAL 2002

## **2. Auswirkungen des Klimawandels auf semiaquatische und terrestrische Lebensräume im Rheineinzugsgebiet**

Die ökologischen Verhältnisse eines Fluss-Auen-Ökosystems (Strukturen und Funktionen der Biotope sowie die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften) werden unmittelbar durch die hydrologischen und morphodynamischen Prozesse (Erosion, Transport, Sedimentation, Umlagerung) des Fließgewässers (Rheinstrom, Seitenarme, Nebengewässer) sowie dem Grundwasserflurabstand geprägt<sup>91</sup>.

Folglich werden die entsprechenden Lebensgemeinschaften vielfach als empfindlich gegenüber klimatisch bedingten Veränderungen des Abflussregimes eingeschätzt. Andererseits ist der Lebensraum Aue durch sehr variierende Lebensbedingungen geprägt. Arten, die sich hier etablieren, müssen an starke hydrologische Schwankungen und damit verbundene Änderungen der Habitats angepasst sein. Daher wird ihnen generell eine hohe Anpassungskapazität zugesprochen, die entlang des hydrologischen Gradienten unterschiedlich ausgeprägt ist<sup>92</sup>.

Zudem werden Klimawirkungen von anderen anthropogenen Belastungen überlagert oder die Effekte verstärken sich gegenseitig. Die natürliche Anpassungsfähigkeit der Auenökosysteme gegenüber klimatisch bedingten Veränderungen des Abflussregimes und die Habitatvielfalt werden durch die Fragmentierung dieser Ökosysteme u. a. durch intensiv landwirtschaftlich genutzte Flächen sowie durch Siedlungs- und Gewerbeflächen und anthropogene Veränderungen des Wasserhaushaltes stark beeinträchtigt.

Entscheidend für die Erfüllung der zahlreichen wichtigen Ökosystemleistungen wie beispielsweise die Regulierung des lokalen Klimas, Hochwasserretention, Lebensraumfunktion sowie die Speicherung von Treibhausgasen ist der ökologische Zustand der entsprechenden Ökosysteme und die Funktionsfähigkeit ihrer zugrundeliegenden hydrologischen Prozesse, die durch ein natürliches Überflutungsregime gekennzeichnet sind<sup>93</sup>.

Infolge des Klimawandels wird sich voraussichtlich die Überschwemmungsfrequenz ändern, wobei die Fläche, die seltener überschwemmt wird (bis zu 10 Tage im Jahr), zunehmen wird und die Fläche, die zwischen 20 - 60 Tage im Jahr überschwemmt ist, abnehmen wird<sup>94</sup>. Dies trägt zur allgemeinen Austrocknung der Auen bei, mit negativen Auswirkungen auf vor allem nassere Biotope (flache Auengewässer, Sümpfe, Röhrichte und Hochstaudenfluren, Auenwälder feuchter Standorte).

Während längerer Trockenphasen im Sommer kann es durch Austrocknung und Verdunstung in Feuchtbiotopen wie Röhrichtern, Hochstaudenfluren, Feucht- und Nasswiesen sowie Auwäldern zu einem niedrigeren Grundwasserstand kommen. Zahlreiche Arten der semiaquatischen Lebensräume sind auf eine hohe Bodenfeuchte und / oder eine bestimmte Vegetation angewiesen und bei sich verändernden Bedingungen vom Aussterben bedroht.<sup>95</sup> Die veränderte Häufigkeit und Dauer von Hochwasser und der damit einhergehenden Überschwemmungen vermindern die Konkurrenzfähigkeit der spezialisierten Arten des wechselfeuchten bzw. wechsellückigen Grünlandes sowie der Auenwälder.

Ein zweiter Effekt flächenhafter Austrocknung ist, dass es zu einer verstärkten Humus- und Torfmineralisation und dadurch zu einer erhöhten Nährstofffreisetzung und Eutrophierung kommen kann. Die Leistungen zur Kohlenstoffspeicherung und Denitrifikation, die effizienter in feuchten und nassen Böden geschehen, würden abnehmen<sup>96</sup>. In trockenen Biotopen hingegen kommt es zu einer geringeren Nährstoffverfügbarkeit und somit zu einer Oligotrophierung.

---

<sup>91</sup> GRÖNITZ et al. 1994

<sup>92</sup> CAPON et al. 2013

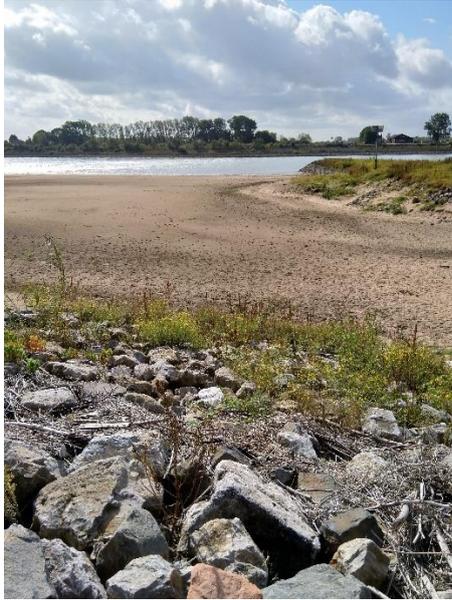
<sup>93</sup> HEGER et al. 2021, CAPON et al. 2013

<sup>94</sup> DORENBOSCH et al. 2022

<sup>95</sup> MKUNLV 2010

<sup>96</sup> BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 2021

Andererseits können als Folge des Klimawandels häufiger Sommerhochwasser auftreten, wie z. B. im Juli 2021. Im Allgemeinen vertragen die Auenvegetationen Winterhochwasser gut, sind jedoch weit weniger widerstandsfähig gegenüber Überschwemmungen in der Wachstumsperiode<sup>97</sup>. Für Tiere ist eine generalisierende Aussage nicht möglich, es ist unter anderem Mobilität, Lebensdauer, Dauer der Larvalentwicklung und Fortpflanzungsstrategie ausschlaggebend.



**Abbildung 11: Gelderse Poort im deutsch-niederländischen Grenzgebiet. Niedrigwasser im September 2019 (Foto:Wendy Vercuijsse, Rijkswaterstaat)**

Physiologische und phänologische Effekte führen zu Verschiebungen im Jahres- und Lebenszyklus von Pflanzen und Tieren. So blühen viele Pflanzen früher, haben eine verlängerte Vegetationsperiode und auch das Flugverhalten von Zugvögeln kann sich ändern. Diese Verschiebungen können zu einer Entkopplung von Wechselbeziehungen in der Lebensgemeinschaft führen, so z. B. bei dem Austrieb von Futterpflanzen und den Schlupfzeiten von Tagfaltern. Außerdem ändern sich die Nutzungen der Lebensräume. Im Grünland ist zukünftig mit einem früheren Beginn von Mahd und Beweidung zu rechnen. Die genannten Vorgänge führen zu Veränderungen des Lebensraumes in seinen Wasser- und Nährstoffverfügbarkeiten, den Wechselbeziehungen und Konkurrenzverhältnissen und somit zu Verschiebungen des Artenspektrums, die auch mit dem Verlust seltener Arten einhergehen können.

Verändern sich Umweltbedingungen können sich die Populationen entweder anpassen, abwandern oder auch aussterben. Neben der Anpassungsfähigkeit der Art ist vor allem die Ausbreitungsfähigkeit entscheidend. Es kommt zu Arealveränderungen, bei der sich sub-mediterran verbreitete Arten nach Norden ausbreiten.

In Trockenbiotopen können sich darüber hinaus mediterrane Arten ansiedeln und ausbreiten, die längere Trockenzeiten aushalten können, darunter gegebenenfalls auch Neophyten. Viele Wärme liebende Arten (z. B. einige Orchideen, Vögel oder Fluginsekten), die im Rheineinzugsgebiet heimisch, aber am nördlichen Rand ihres Verbreitungsgebietes sind, werden andererseits voraussichtlich von den steigenden Temperaturen profitieren und eventuell auch verlorene Lebensräume zurückerobern können. Hierbei kommt dem Rheintal zwischen Oberrhein und Deltarhein eine besondere Bedeutung als Wanderkorridor von Süd nach Nord zu.

---

<sup>97</sup> DORENBOSCH et al. 2022

Vom Aussterbeprozess besonders betroffen sind v. a. Artengruppen, die sich nur langsam entwickeln und vermehren, sich nur langsam ausbreiten, allgemein wenig mobil sind und ohnehin kleine, isolierte Verbreitungsareale aufweisen. Darüber hinaus sind besonders spezialisierte Arten mit geringer Anpassungsfähigkeit betroffen sowie auch Arten die hohe Feuchte- und niedrige Wärmeansprüche haben und dabei eine geringe Toleranz aufweisen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts KLIWAS wurde u. a. untersucht, inwieweit Lebensräume von Auenpflanzen durch den Klimawandel verändert oder beeinträchtigt werden könnten. Hierzu wurden Habitatmodelle für eine Reihe auentypischer Pflanzenarten anhand von hydrologischen Projektionsdaten entwickelt und insbesondere Auenhabitate entlang des Rheins untersucht<sup>98</sup>.

Die Ergebnisse der Habitatmodellierung zeigen, dass veränderte Wasserstände und deren Variabilität die Zusammensetzung der Pflanzenarten in den Auen beeinflusst und kleinräumige Verbreitungsmuster sich ändern werden. Dabei werden einzelne Arten und Artengemeinschaften unterschiedlich auf veränderte Umweltbedingungen reagieren, sodass eine einfache Verschiebung aller Habitate entsprechend veränderter Wasserstände nicht zu erwarten ist. Die zukünftige Eignung eines Habitats für bisherige Arten hängt u.a. von spezifischen räumlichen Faktoren ab.

Am stärksten gefährdet sind, gemäß der Habitatmodellierung des KLIWAS Projektes, Lebensräume tief liegender Standorte in der Aue (Röhrichte, Seggenriede, Flutrasen, Pioniervegetation), die schon heute eine geringe Ausdehnung haben.

Entscheidend wird die Verfügbarkeit von geeigneten Habitatstrukturen und die Erreichbarkeit für die entsprechenden Arten in der Zukunft sein. Sind geomorphologisch heterogene Strukturen vorhanden wie beispielsweise Altarme, Flutmulden oder Senken, die auch bei den zukünftig veränderten Wasserständen und Abflussereignissen als Habitate fungieren können? Die Autoren der KLIWAS-Studie kommen zum Schluss, dass jeder Flussabschnitt kleinräumig zu betrachten ist, um abschätzen zu können, ob bestimmte Vegetationstypen künftig vorkommen können.

Eine weitere Studie im Rahmen des KLIWAS-Projektes analysierte eine Langzeitdatenreihe (14 Jahre) zur Vegetationsentwicklung von Auenwiesen der aktiven Aue an der Mittleren Elbe. Innerhalb der drei untersuchten Grünlandtypen (Flutrinnen, nasses und frisches Grünland) waren deutliche Ausfälle zu beobachten, aber auch Wiederbesiedlungstendenzen einzelner Arten nach hydrologischen Extremereignissen. Diese Veränderungen zeigten sich vor allem in den nassen und trockenen Randbereichen des hydrologischen Gradienten, den Flutrinnen und dem frischen Auengrünland. Die Daten deuten darauf hin, dass die Artengemeinschaft der untersuchten Elbe-Auenwiesen Störungen durch hydrologische Extremereignisse innerhalb weniger Jahre abpuffern konnte. Es bleibt jedoch die Frage offen, wie häufig Extremereignisse maximal auftreten dürfen und in welcher Abfolge, um dem System eine Rückkehr in den Ausgangszustand zu erlauben und inwiefern sich die Ergebnisse auf andere Flusssysteme und Regionen wie den Rhein übertragen lassen.

---

<sup>98</sup> MOSNER UND HORCHLER 2014

### **3. Mögliche Handlungsperspektiven zur Abmilderung negativer Auswirkungen des Klimawandels auf das Ökosystem Rhein**

Das IKSR-Programm „Rhein 2040“<sup>99</sup>, beschlossen auf der 16. Rheinministerkonferenz 2020 der IKSR, zielt auf ein nachhaltig bewirtschaftetes Rheineinzugsgebiet mit wertvollen Lebensadern für Mensch und Natur ab, das resilient gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels ist. Herausforderungen wie ausgeprägteren Niedrig- und Hochwasserphasen sowie höheren Wasser- und Lufttemperaturen im Zuge des Klimawandels begegnet das Programm mit vier verschiedenen Handlungsfeldern: Ziele des Programms sind (1) ein gesundes Ökosystem Rhein, das eine hohe Artenvielfalt aufweist und für Tiere passierbar ist („Vernetzte Lebensräume – mehr Biodiversität“), (2) eine gute Wasserqualität, (3) die Minderung von Hochwasserrisiken und (4) die Abmilderung der negativen Auswirkungen von Niedrigwasser. Dabei unterstützt das Programm die Erreichung des „guten chemischen und ökologischen Zustands bzw. Potenzials“ entsprechend der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) und zielt auf eine Verringerung der Hochwasserrisiken entsprechend der Zielsetzung der europäischen Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (EG-HWRM-RL) ab.

Die ökologischen, morphologischen und chemischen Qualitätsziele der WRRL scheinen geeignet, die Resilienz der Gewässer gegenüber veränderten klimatischen Bedingungen zu erhöhen.

Es gibt Einschätzungen, nach denen für Gewässer, die heute im Grenzbereich zwischen Zielzustand und „mäßigem Zustand“ liegen, ein erhöhtes Risiko besteht, infolge der bis 2050 erwarteten Auswirkungen des Klimawandels den „guten Zustand“ zu verfehlen. Für Wasserkörper, die nach heutigen Kriterien den „guten Zustand“ aufweisen, wird dieses Risiko geringer eingeschätzt. Es wird erwartet, dass, je geringer die organische und trophische Belastung eines Wasserkörpers (Oberflächenwasser, Grundwasser) und je geringer die morphologischen Beeinträchtigungen der Oberflächenwasserkörper sind, desto geringer die Auswirkungen eines zu erwartenden Temperaturanstiegs auf die Wasser- und Gewässergüte sein werden.<sup>100</sup>

Entsprechend gilt es, diese Beeinträchtigungen zu minimieren, um die Vulnerabilität von Arten, Lebensgemeinschaften und Ökosystemen am Rhein von „hoch“ auf „mäßig“ zu reduzieren.

Die im Folgenden aufgeführten Handlungsperspektiven stammen größtenteils aus den bereits vorliegenden nationalen Anpassungsstrategien sowie internationalen Berichten zum Klimawandel. Eine tabellarische Darstellung hierzu findet sich in Anlage 3.

---

<sup>99</sup> IKSR 2020b

<sup>100</sup> „mittelharte“ bzw. „harte“ Aussage, entnommen aus BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT Österreich 2010

### **Erkenntnisse aus dem IKSR-Workshop zur Anpassung an den Klimawandel am 19./20. März 2025 zum Thema Ökologie**

Seit der Veröffentlichung der ersten IKSR-Strategie zur Klimawandelanpassung 2015 sind vermehrt Extremereignisse wie Niedrigwasser und Starkregen im Rheineinzugsgebiet aufgetreten. Steigende Wassertemperaturen im Rhein sowie Veränderungen des Abflussgeschehens unterstreichen den Bedarf, die Strategie zu aktualisieren.

Die Erhöhung der Resilienz der wasserbezogenen Ökosysteme ist essenziell für die Abmilderung der Auswirkungen des Klimawandels. Hierfür sollen wertvolle Lebensräume im und am Wasser erhalten und wiederhergestellt werden. Ein verbesserter Landschaftswasserhaushalt, in dem Wasser möglichst in der Fläche zurückgehalten wird, und die Umsetzung weiterer naturbasierter Lösungen sind wichtige Beiträge. Eine frühzeitige Einbindung anderer Sektoren und Berücksichtigung der Nutzungen bei der Maßnahmenplanung ist dabei essenziell und kann möglichen Interessenskonflikten entgegenwirken.

Diese und weitere Ergebnisse des Workshops werden in die Aktualisierung der IKSR-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel einfließen.

### **3.1 Stärkung der Ökosysteme durch Schutz und Vernetzung von Lebensräumen**

Infolge des Klimawandels ist mit Änderungen der Verbreitung der Ökosysteme und der darin vorkommenden Arten zu rechnen. Gerade deshalb kommt dem Schutz der Lebensräume weiterhin eine besondere Bedeutung zu. Der Erhalt und die Ausweitung bestehender sowie die Ausweisung neuer Schutzgebiete und die Verbesserung der Lebensräume werden sowohl Arten, die bereits jetzt bedroht sind, als auch Arten, die im Zuge des Klimawandels bedroht sein könnten, stärken.

Schutzkonzepte für Schutz- und Schongebiete sollten flexibel und an neue Gegebenheiten anpassbar sein.<sup>101</sup> Angesichts des Aussterbens einzelner Arten oder des Rückgangs von Arten, die bisher nicht bedroht waren, sollten z. B. Zielartenkataloge angepasst werden können. Der Referenzzustand (u. a. Artgemeinschaft) sollte ggf. überprüft werden. Zudem muss die Konnektivität zwischen Schutz- und Schongebieten verbessert werden, um klimabedingte Ausweich- und Wanderbewegungen zu ermöglichen. Dabei sind auch die Anforderungen von aquatischen Arten zu berücksichtigen, die normalerweise keinen oder kaum Migrationsbedarf haben, beispielsweise die Groppe. Wo Arten keine Möglichkeit haben ihrer Klimanische selbstständig zu folgen, muss im Einzelfall auch über sog. „assisted migration“, also das gezielte Ansiedeln in Klimarefugien oder klimatisch neu geeigneten Schutzgebieten nachgedacht werden.

Gebietsfremde, insbesondere invasive Arten (Neozoen, Neophyten) sollten beobachtet und erforscht werden (vgl. Kap. 1.6). Im Süßwasserlebensraum können steigende Temperaturen ein Faktor für die Ausdehnung des Verbreitungsgebiets oder der Populationsgröße von invasiven Arten sein, die sich negativ auf die heimischen Arten auswirken. Prävention und Kontrolle sind jedoch insbesondere in den Wasserstraßen enge Grenzen gesetzt.<sup>102</sup>

Vor dem Hintergrund von sich verändernden Umweltbedingungen bekommt der Prozessschutz eine höhere Bedeutung. Hierzu zählt das Zulassen der natürlichen

<sup>101</sup> BASEN ET AL. 2022b

<sup>102</sup> WIESNER et al. 2010, LUWG 2011

Sukzession und Naturverjüngung sowie das Ermöglichen der freien Wanderung von Arten (siehe unten).

Ein vielfältiges Mosaik an Lebensräumen fördert bekanntermaßen die Biodiversität. Am Rhein und seinen Nebenflüssen sind dies zum Beispiel:

- frei fließende Strecken, insbesondere mit Laichplätzen für rheophile Fischarten;
- naturnah umgestaltete Ufer;
- an den Hauptstrom angeschlossene Altarme, Nebenrinnen und sonstige Nebengewässer;
- Brackwasserzonen (naturnäherer Übergang von Süß- zu Salzwasser)

sowie alle Ersatzlebensräume für durch Ausbaumaßnahmen verschwundene Lebensräume im Strombett und deren qualitative Verbesserung.

Auen und Auengewässer sollten möglichst wieder ans Fließgewässer angebunden werden. Auen sollten extensiv als Grünland oder Wald und nicht für den Ackerbau genutzt werden. Dies sind Beispiele für Win-Win-Maßnahmen, die neben dem Nutzen für die Biodiversität, den Biotopverbund und den guten Zustand des Gewässers auch in zweierlei Hinsicht zum Hochwasserschutz beitragen: Durch die Rückhaltung von Hochwasser in der Fläche und vorsorgend durch die Minderung von Schadenspotenzialen und Risiken in den Überschwemmungsgebieten.

Wo möglich, sollte die natürliche Dynamik der Fließgewässer wieder zugelassen werden.<sup>103</sup>

Beispiele für Programme im Rheineinzugsgebiet, die dieses aufgreifen, sind folgende:

- „Flussrevitalisierungen“ in der Schweiz<sup>104</sup>
- „Trame verte et bleue“ in Frankreich<sup>105</sup>
- „Bundesprogramm Blaues Band“ in Deutschland<sup>106</sup>
- „Integriertes Rheinprogramm“ in Baden-Württemberg<sup>107</sup>
- „Aktion Blau“ / „Aktion Blau Plus“ in Rheinland-Pfalz<sup>108</sup>
- „Lebendige Gewässer“ in Nordrhein-Westfalen<sup>109</sup>
- „Raum für den Fluss“ in den Niederlanden<sup>110</sup>
- Der „Rhein verbindet“ in den Niederlanden und Nordrhein-Westfalen<sup>111</sup>
- der „Masterplan Wanderfische Rhein“ der IKSR im gesamten Rheineinzugsgebiet<sup>112</sup>
- Maßnahmen im Zuge der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie.

---

<sup>103</sup> PARTENARIAT FÜR UMWELT UND KLIMA 2011, Luxemburg; MAKASKE & MAAS 2013

<sup>104</sup> vgl. SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT 2020, BAFU et.al., 2020

<sup>105</sup> vgl. <https://www.ecologie.gouv.fr/trame-verte-et-bleue>

<sup>106</sup> vgl. [https://www.blaues-band.bund.de/Projektseiten/Blaues\\_Band/DE/00\\_Home/home\\_node.html](https://www.blaues-band.bund.de/Projektseiten/Blaues_Band/DE/00_Home/home_node.html)

<sup>107</sup> vgl. <https://rp.baden-wuerttemberg.de/themen/wasser/irp/>

<sup>108</sup> vgl. <https://lfu.rlp.de/service/publikationen/umweltschutz/publikationen-wasser/fliessgewaesser/gewaesserentwicklung/-aktion-blau-plus>

<sup>109</sup> vgl. <https://www.umwelt.nrw.de/umwelt/umwelt-und-wasser/gewaesser/programm-lebendige-gewaesser/>

<sup>110</sup> vgl. <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/maatregelen-om-overstromingen-te-voorkomen/ruimte-voor-de-rivieren>

<sup>111</sup> <https://www.derrheinverbindet.de/>

<sup>112</sup> vgl. IKSR 2018

Potenzielle Klima-Refugialräume könnten identifiziert und mit aktuellen Arealen bedrohter Fischarten vernetzt werden.<sup>113</sup>

Durch eine Biotopvernetzung wird Arten, deren Lebensraum sich z. B. durch Temperaturerhöhung nach Norden oder ins Gebirge verschiebt, die Wanderung in klimatisch günstigere Gebiete ermöglicht.

Die Umsetzung des „Biotopverbundes am Rhein“<sup>114</sup>, in dem die vorgenannten Aspekte für den Rheinhauptstrom und seine Auen genau beschrieben werden, wird somit auch aus Gründen der Abmilderung der Auswirkungen des Klimawandels immer wichtiger. Das IKSR-Programm „Rhein 2040“<sup>115</sup>, beschlossen auf der 16. Rheinministerkonferenz 2020, hat das Ziel gesetzt, bis 2040 rheintypische Habitate zu erhalten, zu schützen und wiederherzustellen. Der Biotopverbund am Rhein soll sich aufgrund der Ausweitung von Kerngebieten und der Vernetzung geeigneter ausreichend großer Trittsteinbiotope wesentlich verbessern. Der digitale Atlas<sup>116</sup> zum Biotopverbund am Rhein zeigt neben den Ergebnissen der Biotoptypengruppenkartierung von 2020 Maßnahmen und deren Projektbeschreibung. Außerdem werden Schwerpunkt- und Defiziträume mit Bedeutung für bzw. Auswirkung auf den Biotopverbund inklusive Handlungsempfehlungen pro Biotoptypengruppe dargestellt. Der Biotopatlas kann als ergänzendes Instrument für eine großräumige Planung gesehen werden.

Eine heterogenere Flusslandschaft mit einem hohen Maß an Vernetzung macht das Flusssystem im Allgemeinen dem Klimawandel gegenüber widerstandsfähiger. Mehrere Habitate zusammen, möglicherweise mit einer Verbindung zu ehemaligen Auengebieten, geben den Arten den Spielraum, sich unter verschiedenen Bedingungen zwischen den Habitaten zu entscheiden. Die Arten können leichter wandern, Deckung suchen und sich wieder ansiedeln.

### **3.2 Abmilderung der Auswirkungen erhöhter Wassertemperaturen**

Wenn Nebengewässer mit dem Hauptstrom vernetzt sind, haben Fische und andere Gewässerorganismen aus dem Rhein lokale Rückzugsmöglichkeiten in kühleren (z. B. schattigeren) Seitenarmen und Zuflüssen. Revitalisierungen ermöglichen zudem den Austausch des Flusswassers mit dem Grundwasser. Die morphologischen Prozesse wie Bank- und Kolkbildung, Geschiebeablagerung und Veränderung des Längengefälles spielen dabei eine wichtige Rolle. Ihr Ausmaß hängt einerseits von den Abmessungen der Flussaufweitung (Länge und Breite) und andererseits von den übergeordneten naturräumlichen Randbedingungen ab.<sup>117</sup>

Bei hohen Wassertemperaturen sind kalte Grundwasseraufstöße auch ein Rückzugsort für Fische. Jedoch sinken die Grundwasserspiegel und an vielen Stellen entlang des Flusses tritt sowohl qualitativ als auch quantitativ weniger Sickerwasser aus. Entlang der Ufer der kleinen und mittleren Nebengewässer sollten Gehölze gepflanzt bzw. die Eigenbesiedlung zugelassen werden, um den Anstieg der Wassertemperatur durch Beschattung zu begrenzen. In einer Studie der Länderkooperation KLIWA wurden mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen erhebliche Kühleffekte errechnet. In vielen Gewässern könnte eine Reduktion sommerlicher Maximaltemperaturen von über 2 °C und in einigen Bereichen sogar von über 5 °C erreicht werden<sup>118</sup>.

Für große Teile des Rheinhauptstroms und für die großen Zuflüsse ist diese Maßnahme aufgrund der Gewässerbreite wenig wirksam, aber für Nebengewässer in den Auen kann

---

<sup>113</sup> FREYHOF 2009 in RABITSCH et al. 2010

<sup>114</sup> IKSR 2006, IKSR 2022

<sup>115</sup> IKSR 2020b

<sup>116</sup> [https://geoportal.bafg.de/karten/iksr\\_biotopatlas\\_2020/](https://geoportal.bafg.de/karten/iksr_biotopatlas_2020/)

<sup>117</sup> HUNZINGER 2004

<sup>118</sup> KLIWA 2023

sie zweifellos relevant sein. Auch das Auslegen von Totholz sorgt für Schatten unter Wasser.

Tiefe Sand- und Tongruben in den Flusssauen können als Thermorefugium dienen. Tiefe (angebundene) Stillgewässer sind durch ihre große Tiefe durchgängig geschichtet und verfügen daher im Sommer über kaltes Tiefenwasser. Diese Stillgewässer können als Thermorefugium für temperaturempfindliche Fische genutzt werden, z. B. indem diese naturnah angelegt und/oder an den Fluss angebunden werden. Ebenso sollte bei Plänen zum Verflachen der Stillgewässer in der Aue die mögliche Funktion eines tiefen Stillgewässers als Thermorefugium berücksichtigt werden.<sup>119</sup>

Ebenso können Nebengewässer im Flussgebiet noch besser zur Anpassung an den Klimawandel genutzt werden. Eine optimale Vernetzung (Aufstieg) erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass temperaturempfindliche Fische kalte Bäche als Thermorefugium nutzen können. Bäche können bei plötzlichem Sommerhochwasser als Rückzugsmöglichkeit genutzt werden. Viele Bachmündungen sind derzeit noch suboptimal mit dem Fluss verbunden.

Neben langfristigen Maßnahmen, die einem Anstieg der Wassertemperaturen entgegen wirken, wie die Wiederherstellung der Längsvernetzung und Anbindung von Seitengewässern oder die Beschattung durch Bestockung der Ufer, können auch kurzfristige Maßnahmen als Teil eines Notfallkonzepts getroffen werden, um die Folgen immer häufiger über die Toleranzgrenze empfindlicher Fische tretenden Wassertemperaturen abzumildern.<sup>120</sup> In diesem Zusammenhang kann die Entwicklung eines Alarmplanes ein wichtiges Instrument für den Schutz der Gewässerökologie darstellen.<sup>121</sup> Beispielsweise wurden gemäß dem Alarmplan Main Gewässerökologie während des Niedrigwassers 2022 zeitweise vorbeugend Maßnahmen zur Stabilisierung des Sauerstoffhaushalts ergriffen (Turbinenbelüftung, Wehrüberfall).<sup>122</sup> Weitere kurzfristige Notmaßnahmen reichen von der Schaffung künstlicher Kaltwasserzonen mittels Ausbaggerungen mit zusätzlicher Beschattung durch künstliche Abdeckung bis hin zu Notabfischungen.<sup>123</sup> Zusätzliche Sofortmaßnahmen wären zudem das sofortige Einstellen aller Wärmeeinleitungen sowie die Reduzierung oder das Einstellen aller nicht notwendiger Wasserentnahmen. Allen gemein ist das Ziel, die Fische vor akutem Hitzestress zu schützen und dadurch deren Überlebenschancen kurzfristig zu verbessern. Sie ersetzen aber keine der langfristigen Maßnahmen, welche nachhaltig einen Beitrag zum Erhalt einer vielfältigen Fischgemeinschaft in den Fließgewässern im Zuge des Klimawandels ermöglicht. Aufgrund der Erfahrungen im Hitzesommer 2003 hat der Kanton Schaffhausen in der Schweiz ein solches Notfallkonzept für die Fische im Rhein erarbeitet, das seither in den Hitzesommern wie 2015, 2018 und 2022 umgesetzt wird. Die im Konzept vorgesehenen Sofortmaßnahmen tragen dazu bei, die negativen Auswirkungen der hohen Wassertemperaturen zu mildern, können sie aber nicht vollständig aufheben: Auch in den Hitzesommern 2015, 2018 und 2022 kam es im Rhein und auch in anderen Gewässern der Schweiz zu einem Fischsterben, wenn auch in geringerem Ausmaß als 2003.<sup>124</sup>

Eine zusätzliche anthropogene Erhöhung der Wassertemperatur durch Wärmeeinleitungen sollte auf ein Mindestmaß beschränkt werden bzw. bei Niedrigwasser untersagt sein und darf der Erreichung des guten ökologischen Zustands bzw. des guten ökologischen Potenzials nicht entgegenstehen. In den Staaten werden die Anforderungen für Maximaltemperatur und Temperaturerhöhung für den sehr guten und für den guten ökologischen Zustand bzw. das gute ökologische Potenzial in Abhängigkeit der verschiedenen Fischgemeinschaften, Gewässertypen und Zeiträume in nationalen Verordnungen bzw. Gesetzgebungen definiert (z. B. in Deutschland

---

<sup>119</sup> VERSTIJNEN et al. 2022

<sup>120</sup> AQUAPLUS 2022

<sup>121</sup> [Alarmplan Donau](#) und [Alarmplan Main](#)

<sup>122</sup> IKS 2024b

<sup>123</sup> BAFU 2016, BAFU et al. 2019

<sup>124</sup> BAFU 2016, BAFU et al. 2019

Oberflächengewässerverordnung – OGewV 2016, s. Kapitel 1.5). Durch wasserrechtliche Beschränkungen nimmt die einleitbare Abwärmemenge mit zunehmender Wassertemperatur ab, in Abhängigkeit des Gewässers und dessen Lebensgemeinschaften ist bei Temperaturen über 21,5 - 28 °C in der Regel kein zusätzlicher Wärmeeintrag mehr zulässig.<sup>125</sup>

Neuartige Steuerungsinstrumente können dazu beitragen, die Einhaltung jahreszeitabhängiger Leitwerte mit ökologisch optimaler Wirkung und geringstmöglichem ökonomischen Verlust zu gewährleisten. Droht ein Leitwert überschritten zu werden, kann der Betrieb von Wärmekraftwerken gedrosselt oder es können andere Maßnahmen zur Reduzierung der Wärmeeinleitung ergriffen werden.<sup>126</sup> Im Fall von Hitzeperioden sollten der Informationsaustausch über getroffene Maßnahmen zur Reduzierung von Wärmeeinleitungen und die internationale Vernetzung der Akteure verbessert werden.

Die Stilllegung einiger wärmeeinleitender Kraftwerke entlang des Rheins und seiner Nebenflüsse wie beispielsweise dem Neckar im Rahmen der Energiewende in Deutschland führte zu einem messbaren Rückgang der mittleren Temperaturerhöhung.<sup>127</sup> Dies zeigt, dass dies auch in Niedrigwasserzeiten und Hitzeperioden eine wirksame Maßnahme darstellen würde.

Bei Besatzmaßnahmen mit Fischen sollte überprüft werden, ob sich der ausgewählte Flussabschnitt hinsichtlich seiner Temperaturen aktuell und künftig für die gewünschte Art eignet, auch wenn die Art früher dort ansässig war.<sup>128</sup>

### **3.3 Abmilderung der Auswirkungen von Niedrigwasser**

Erhöhte Wassertemperaturen und das Risiko von Sauerstoffdefiziten treten oft in Kombination mit Niedrigwasser auf, so dass viele der in Kapitel 3.2 genannten Maßnahmen auch dazu beitragen, die Resilienz gegenüber Niedrigwasser zu erhöhen.

Insbesondere die Vernetzung von Lebensräumen und die Wiederanbindung von Auen und Seitengewässern spielt eine zentrale Rolle, um den Verlust von aquatischen Lebensräumen durch das Austrocknen von Seitenarmen und Uferbereichen zu minimieren bzw. den Organismen die Möglichkeit zu geben Ausweichhabitate zu erreichen.

Weitere langfristige Maßnahmen, die den Auswirkungen von Niedrigwasser entgegenwirken sind Uferrenaturierungen bzw. das Entfernen künstlicher Uferbefestigungen und die Begrenzung der Vertiefung der Flusssohle durch gezielte Entfernung oder Anlage von strömungslenkenden Kies- und Sandablagerungen oder den Bau von Parallelwerken.

Das IKSR-Programm „Rhein 2040“, zielt darauf ab, bis 2040 die Auswirkungen von Niedrigwasser und Dürre im Rheineinzugsgebiet zu mindern. Hierzu sollen das Niedrigwassermonitoring verbessert, die zukünftige Wasserverfügbarkeit bis 2050 analysiert und grenzüberschreitende Lösungsansätze entwickelt werden.

Die IKSR betreibt seit 2018, in Zusammenarbeit mit der BfG, eine Niedrigwasserüberwachung am Rhein und in seinem Einzugsgebiet ([https://undine.bafg.de/rhein/zustand-aktuell/rhein\\_nw\\_mon.html](https://undine.bafg.de/rhein/zustand-aktuell/rhein_nw_mon.html))<sup>129</sup>. Neben Abflussdaten sind dort auch Informationen zu Wassertemperaturen und Sauerstoffgehalt für verschiedene Pegel im Rhein und einigen Zuflüssen abrufbar.

---

<sup>125</sup> IKSR 2021

<sup>126</sup> HOFFMANN et al. 2011

<sup>127</sup> IKSR 2009b

<sup>128</sup> FIBER-Newsletter 03/2010,

[https://www.fischereiberatung.ch/fileadmin/sites/fiber/angebot/fiber\\_publ/newsletter/archiv/2010-03-d.pdf](https://www.fischereiberatung.ch/fileadmin/sites/fiber/angebot/fiber_publ/newsletter/archiv/2010-03-d.pdf)

<sup>129</sup> IKSR 2019

Die Auswirkungen der Niedrigwasserereignisse 2018 und 2022 sowie die als Reaktion in den Staaten kurzfristig umgesetzten Maßnahmen wurden in zwei IKSR-Fachberichten dokumentiert.<sup>130</sup> Durch den trockenen und heißen Sommer 2022 kam es zu einem deutlich erhöhten Wasserverbrauch, zahlreichen Wasserentnahmeverboten (u.a. für die landwirtschaftliche Nutzung) und Aufrufen zum Wassersparen (Öffentlichkeit, Landwirtschaft, Industrie). Allgemein konzentrierten sich die Einschränkungen der Wassernutzung auf die Entnahme an kleineren und mittleren Fließgewässern sowie lokaler Grundwasservorkommen.

Laut der 2023 von der IKSR in Auftrag gegebenen Lachsstudie für den Rhein kommt es bei niedrigen Abflüssen zu einer erhöhten Fischsterblichkeit, insbesondere aufgrund des verstärkten Temperaturanstiegs und der Verschärfung der Auswirkungen der Schifffahrt bei Niedrigwasser (Kollision mit Schiffsschrauben).

Niedrige Abflüsse und Temperaturanstiege werden die Bedingungen für den Aufstieg, die Fortpflanzung und das Wachstum von Fischen im Fluss und seinen Nebenflüssen immer stärker beeinträchtigen.

Um die Auswirkungen von Niedrigwasser auf das biologische Leben und insbesondere auf die Fischbestände abzumildern, könnten ein Einsatz rund um die Niedrigwasserunterstützung und/oder die Anpassung der Schifffahrt (Gewichtsbegrenzung von Containerschiffen, Form der Schiffe, Regulierung der Anzahl der Schiffe in kritischen Zeiten) wirksame Maßnahmen sein. Die Regulierung oder Unterstützung von Niedrigwasser könnte sich auch positiv auf die Begrenzung des Temperaturanstiegs, die Verbesserung des Sauerstoffgehalts der Umwelt und die Gewährleistung der Funktionsfähigkeit von Lebensräumen und Renaturierungsmaßnahmen auswirken, die für die Rückzugs- und Widerstandsfähigkeitszonen des Flusses nützlich sind.

### **3.4 Abmilderung von Bodenerosion und Sedimenteinträgen infolge von Starkregen und Hochwasser**

Feinmaterialeinträge, z. B. infolge von Starkregen oder Hochwasser, können die Zwischenräume im Kiesbett eines Flusses verfüllen (Kolmation), sodass diese Habitate nicht mehr als Laichplatz genutzt werden können (vgl. Kap. 1.5.1). Um diesem Prozess entgegenzuwirken, sollten zunächst Maßnahmen am Entstehungsort und im Gewässerumfeld getroffen werden, bevor Maßnahmen im Gewässer umgesetzt werden.

Durch Uferrenaturierung und extensivierte landwirtschaftliche Nutzung im Uferbereich, z. B. durch die Bevorzugung von Grünland (Dauerwiesen und -weiden) gegenüber Ackerland, können die Bodenerosion und Sedimenteinträge, insbesondere bei Starkregen oder Hochwasser, eingeschränkt werden (vgl. Kap. 1.5.1).

Zudem kann die natürliche Strömungsdynamik reaktiviert werden, indem Störobjekte, wie z. B. Totholz, ausgelegt werden. Auch eine Reduzierung der Flächenversiegelung<sup>131</sup> und Maßnahmen zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushalts, die eine flächendeckende Versickerung fördern, können hierzu einen wichtigen Beitrag leisten und sind zudem vorbeugende Maßnahmen gegen Hochwasser (*win-win*).

Die Begrenzung der Vertiefung der Flusssohle mildert die Auswirkungen niedriger Wasserstände ab. Flusssufer, Altarme, Nebenrinnen und niedrig gelegene Auen können durch Maßnahmen wie das gezielte Entfernen oder die Strömung lenkende Anlegen von Kies- und Sandablagerungen, den Bau von Parallelwerken oder das Verflachen der Flusssohle länger mit dem Fluss verbunden bleiben. Zudem kann das Entfernen der künstlichen Uferbefestigung zu mehr Erosion der Ufer und möglicher Ablagerung auf dem

---

<sup>130</sup> IKSR 2020a und IKSR 2024b

<sup>131</sup> PARTENARIAT FÜR UMWELT UND KLIMA 2011, Luxemburg

Gewässerboden führen. Wichtig ist, dass dies auch von der Schifffahrtsfunktion her zulässig ist (notwendiger Tiefgang).

Zur Bekämpfung von Austrocknung und für den Rückhalt von Wasser müssen Überschwemmungsflächen wiederhergestellt werden. Diese Überschwemmungsflächen müssen robust gegen den Klimawandel angelegt werden, beispielsweise tief genug, um auch bei zukünftig zu erwartenden Wasserspiegellagen so lang mit Wasser bedeckt zu sein, dass wichtige ökologische Funktion, wie die Reproduktion von Fischen, gewährleistet sind.

## Referenzen

- ABDOLI A., PONT D. and SAGNES P. (2005): Influence of female age, body size and environmental conditions on annual egg production of the bullhead. *Journal of Fish Biology* (2005) 67, 1327-1341.
- ABDOLI A., PONT D. and SAGNES P. (2007): Intrabasin variations in age and growth of bullhead: the effects of temperature. *Journal of Fish Biology* (2007) 70, 1224-1238.
- AKADEMIEN DER WISSENSCHAFTEN SCHWEIZ (2016): Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. *Swiss Academies Reports* 11(5), Bern: 218 S.
- AQUAPLUS (2022): Fischschutzmaßnahmen bei Hitzeereignissen. Arbeitshilfe. Pilotprojekt F.13 im Rahmen des Pilotprogrammes zur Anpassung an den Klimawandel.  
[https://aquaplusblog.files.wordpress.com/2023/03/aquaplus\\_fischschutzmassnahmen\\_bei\\_hitzeereignissen\\_arbeitshilfe\\_2022.pdf](https://aquaplusblog.files.wordpress.com/2023/03/aquaplus_fischschutzmassnahmen_bei_hitzeereignissen_arbeitshilfe_2022.pdf).
- BAFU (2006): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2020–2025. Bundesamt für Umwelt, Bern. 164 S.
- BAFU (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217: 76 S.
- BAFU (2016): Hitze und Trockenheit im Sommer 2015. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1629: 108 S.
- BAFU (2019): Hitze und Trockenheit im Sommer 2018. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1909: 91 S.
- BAFU (2020): Klimawandel in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 2013: 105 S.
- BAFU (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101: 134 S.
- BAL, G. (2011): Évolution des populations françaises de saumon atlantique (*Salmo salar* L. ) et changement climatique. Dissertation. 352 S. [http://quillaume-bal.fr/images/bal\\_phd\\_thesis.pdf](http://quillaume-bal.fr/images/bal_phd_thesis.pdf).
- BAGLINIÈRE J.L., DENAIS L., RIVOT E., PORCHER J.P., PRÉVOST E., MARCHAND F., VAUCLIN V. (2004): Length and age structure modifications of the Atlantic salmon (*Salmo salar*) populations of Brittany and Lower Normandy from 1972 to 2002. *Technical Report, INRA-CSP*, 24 S.
- BASEN, T., ROS, A., CHUCHOLL, C., OEXLE, S., BRINKER, A. (2022a): Who will be where: Climate driven redistribution of fish habitat in southern Germany. *PLOS Clim* 1(5): e0000006
- BASEN, T., CHUCHOLL, C., OEXLE, S., ROS, A., BRINKER, A. (2022b) Suitability of Natura 2000 sites for threatened freshwater species under projected climate change. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 32(12): 1872–1887, doi: 10.1002/aqc.3899
- BEHRENS M., FARTMANN T., HÖLZEL N., BERNDT A., BUNZEL-DRÜKE M., CONZE K. J., WEDDELING K. (2009): Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biologische Vielfalt: Pilotstudie zu den voraussichtlichen Auswirkungen des Klimawandels auf ausgewählte Tier- und Pflanzenarten in Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW).

- BORCHERDING, J. (1991): The annual reproductive cycle of the freshwater mussel *Dreissena polymorpha* Pallas in lakes. *Oecologia* 87, S. 208-218.
- BORCHERDING, J., GERTZEN, S. (2016): Die aktuelle Fischbestandsdynamik am Rhein uner besonderer Berücksichtigung invasiver Grundeln. Monitoring und adaptives Management für eine nachhaltige Fischerei und Verbesserung des ökologischen Potenzials am Rhein. Fischereiverband Nordrhein-Westfalen e.V..
- BREVÉ N. W. P., VERSPUI R., DE LAAK G. A. J., BENDALL B., BREUKELAAR A. W., SPIERTS I. L. Y. (2014): Explicit site fidelity of European catfish (*Silurus glanis*, L., 1758) to man-made habitat in the River Meuse, Netherlands. *Journal of applied Ichthyology*, Volume 30, Issue 3.
- BRILS, J., DE BOER, E., DE BOER, P., SCHIELEN, R., VAN DER SPEK, A., BLOM, A., HAMILTON, M., STERK, M., SMEEDES, R., PEERDEMAN, R., FRINGS, R., LASEROMS, R., VELLINGA, R., HUISMANS, Y., WIEGERS, J. (2017): Sediment uit balans. *Deltares*. 14 maart 2017.
- BRODERSEN, J., RODRIGUEZ-GILL, J.L., JÖNSSON, M., HANSSON, L.A., BRÖMARK, C., NILSON, P.A., NICOLLE, A., BERGLUND O. (2011): Temperature and resource availability may interactively affect over-wintering success of juvenile fish in a changing climate.  
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0024022>
- BRUNKE, M (2023): Der Einfluss von Nährstoffbelastungen auf die Fischfauna in Fließgewässern. *Wasserwirtschaft* 10: 20-27.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2021): Die Niedrigwassersequenz der Jahre 2015 bis 2018 in Deutschland – Analyse, Einordnung und Auswirkungen. *Mitteilungen Nr. 35*, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 412 S., DOI: 10.5675/BfG\_Mitteilungen\_35.202
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2010): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. [www.klimawandelanpassung.at](http://www.klimawandelanpassung.at).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2010): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Kurzfassung. Wien.
- BUNZEL-DRÜKE, M. (2011): Wie reagieren Fische und Rundmäuler auf den Klimawandel? *Natur in NRW* 4/11, S. 27-32.
- BUWAL (2002): Einwanderung von Fischarten in die Schweiz – Rheineinzugsgebiet. *Mitteilungen zur Fischerei*, Nr. 72, Bern.
- BUWAL (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. *Schriftenreihe Umwelt* Nr. 369, Bern.
- CAPON S.J., CHAMBERS L.E., MAC NALLY R. ET AL. (2013): Riparian Ecosystems in the 21st Century: Hotspots for Climate Change Adaptation?. *Ecosystems* 16, 359–381. <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9656-1>
- CHUCHOLL, C. (2019). Dürre und Hitze 2018: Folgen für die baden-württembergischen Stein- und Dohlenkrebsbestände. *AUF AUF* 1: 22-27.
- COPP G., BRITTON J., CUCHEROUSSET J., GARCÍA-BERTHOU E., KIRK R., PEELER E., STAKÉNAS S. (2009): Voracious invader or benign feline? A review of the environmental biology of European catfish *Silurus glanis* in its native and introduced ranges, *Fish and Fisheries*, 10, 252–282
- DORENBOSCH, M., DE LA HAYE, M., VAN DE HATERD, R., HUTHOFF, F., VAN KLEUNEN, A., LIEFVELD, W. (2022): Klimaateffecten op riviernatuur, Rapport nummer OBN-2020-121-RI, Kennisnetwerk OBN, Driebergen.

- DORIDANT, J. (2021): Etude de l'impact du changement climatique sur les communautés vivantes du Rhin et plus particulièrement les poissons grands migrateurs. [https://infodoc.agroparistech.fr/doc\\_num.php?explnum\\_id=6780](https://infodoc.agroparistech.fr/doc_num.php?explnum_id=6780)
- ELLIOT, J. M. (1981): Some Aspects of Thermal Stress on Freshwater Teleosts. In Stress and Fish (A. D. Pickering, ed), S. 209-245. London: Academic Press.
- Euro-Limpacs-Projekt (2009): Definition of indicators for Climate Change effects on freshwater ecosystems. <http://www.climate-and-freshwater.info>.
- EUROPEAN COMMISSION (2009): River Basin Management in a changing climate. Technical Report 2009-040, Guidance document No. 24, Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). (Leitfaden Nr. 24 zur Gemeinsamen Umsetzungsstrategie zur Wasserrahmenrichtlinie).
- GRÖNITZ, KATZMAREK UND SIEPE (1994): Grundsatzpapier Auenschutz und Auenrenaturierung. Materialien zum Integrierten Rheinprogramm. Karlsruhe
- HEGER A, BECKER JN, VASCONEZ NAVAS LK & ESCHENBACH A (2021): FACTORS CONTROLLING SOIL ORGANIC CARBON STOCKS IN HARDWOOD FLOODPLAIN FORESTS OF THE LOWER MIDDLE ELBE RIVER. GEODERMA 404: 115389. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.GEODERMA.2021.115389](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115389)
- HOFFMANN, A., KAUEMANN, G., WINDMANN, M., TISCHBIERECK, J., LEONHARD, V. (2011): Temperaturmanagement in der Wupper. Natur in NRW 1/11, S. 34-40.
- HUNZINGER, L. (2004): Flussaufweitungen: Möglichkeiten und Grenzen. Wasser Energie Luft. 96. Jahrgang, Heft 9/10, Schweiz.
- IBISCH, Ralf B. (2004): Biogene Steuerung ökologischer Systemeigenschaften des hyporheischen Interstitials der Lahn (Hessen). Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Wasserwesen, Institut für Hydrobiologie, Dresden.
- ICES (2017): Report of the Workshop on Potential Impacts of Climate Change on Atlantic Salmon Stock Dynamics (WKCCISAL), 27–28 March 2017, Copenhagen, Denmark. ICES CM 2017/ACOM:39. 90 S.
- IKSR (2004): Wärmebelastung der Gewässer im Sommer 2003. Zusammenfassung der nationalen Situationsberichte. 70. Plenarsitzung 8./9. Juli 2004 - Bern. IKSR-Bericht Nr. 142d, [www.iksr.org](http://www.iksr.org).
- IKSR (2006): Biotopverbund am Rhein. Bericht & Atlas, [www.iksr.org](http://www.iksr.org) – Broschüren.
- IKSR (2009a): Fischökologische Gesamtanalyse einschließlich Bewertung der Wirksamkeit der laufenden und vorgesehenen Maßnahmen im Rheingebiet mit Blick auf die Wiedereinführung von Wanderfischen. IKSR-Bericht Nr. 167 (Langfassung), [www.iksr.org](http://www.iksr.org).
- IKSR (2009b): Darstellung der Entwicklung der Rheinwassertemperaturen auf der Basis validierter Temperaturmessungen von 1978 bis 2011. IKSR Bericht Nr. 209, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- IKSR (2018): Masterplan Wanderfische Rhein. IKSR-Bericht Nr. 247, [www.iksr.org](http://www.iksr.org).
- IKSR (2019): IKSR-Niedrigwasserüberwachung am Rhein und in seinem Einzugsgebiet. IKSR-Bericht Nr. 261, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- IKSR (2020a): Bericht zum Niedrigwasserereignis Juli-November 2018. IKSR-Bericht Nr. 263, [www.iksr.org](http://www.iksr.org).
- IKSR (2020b): Programm Rhein 2040. Der Rhein und sein Einzugsgebiet: nachhaltig bewirtschaftet und klimaresilient, [www.iksr.org](http://www.iksr.org).
- IKSR (2020c): Das Phytoplankton des Rheins 2018. IKSR-Bericht Nr. 273, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- IKSR (2020d): Makrophytenverbreitung im Rhein 2018/2019, IKSR-Bericht Nr. 274, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)

- IKSr (2020e): Benthische Diatomeen im Rhein 2018/2019, IKSr-Bericht Nr. 275, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- IKSr (2021): International koordinierter Bewirtschaftungsplan 2022-2027 für die internationale Flussgebietseinheit Rhein, [www.iksr.org](http://www.iksr.org).
- IKSr (2022): Methodenentwicklung und Ergebnisse der Erfolgskontrolle des Biotopverbunds am Rhein 2020. IKSr-Bericht Nr. 284, [www.iksr.org](http://www.iksr.org).
- IKSr (2023): Rhein-Messprogramm Biologie 2024/2025. IKSr-Bericht Nr.291, [www.iksr.org](http://www.iksr.org).
- IKSr (2024a): Klimawandelbedingte Abflussszenarien für das Rheineinzugsgebiet. IKSr-Bericht Nr. 297, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- IKSr (2024b): Bericht zum Niedrigwasser- und Dürreereignis des Jahres 2022. IKSr-Bericht Nr. 299, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- IKSr (2024c): Entwicklung der Rheinwassertemperaturen 1978 bis 2023. IKSr-Bericht Nr. 301, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- IKSr (2025): Simulation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development– update IPCC AR5. IKSr-Bericht Nr. 302, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- IMSLAND, A.K., FOSS, A., FOLKVORD, A., STEFANSSON, S.O., T.M. JONASSEN (2005): The interrelation between temperature regimes and fish size in juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*): effects on growth and feed conversion efficiency. *Fish Physiology and Biochemistry* (2005) 31:347-361.
- JAARMA, N., KLINGE, M., POT, R., (red.) (2007): Achtergronddocument referenties en maatlatten visseren ten behoeve van de kadderrichtlijn water.
- JUNK, W.J., BAYLEY, P.B., SPARKS, R.E. (1989). The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. P. 110-127. In D. Dodge (cd.) *Proceedings of the International Large River Symposium*. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 106.
- KANGUR A., KANGUR P., KANGUR K., MÖLS T. (2007): The role of temperature in the population dynamics of smelt *Osmerus eperlanus eperlanus m. spirinchus* Pallas in Lake Peipsi (Estonia/Russia). *Hydrobiologia* 584, 433–441.
- KANGUR K., KANGUR A., KANGUR P., LAUGASTE R. (2005): Fish kill in Lake Peipsi in summer 2002 as a synergistic effect of cyanobacterial bloom, high temperature and low water level. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Biology Ecology* 54, 67–80.
- KANGUR A., Kangur P., Kangur K., Möls T. (2013): Long-term effects of concurrent eutrophication and environmental extremes on the fish community of Lake Peipsi (Estonia/Russia). Submitted to *Fishery Management and Ecology*.
- KARATAYEV, A.Y. & BURLAKOVA, L.E. (2022): What we know and don't know about the invasive zebra (*Dreissena polymorpha*) and quagga (*Dreissena rostriformis bugensis*) mussels. *Hydrobiologia*, <https://doi.org/10.1007/s10750-022-04950-5>.
- KÄRCHER O., FLÖRKE M., MARKOVIC D. (2021): Different life stage, different risks: Thermal performance across the life cycle of *Salmo trutta* and *Salmo salar* in the face of climate change. *Ecology and Evolution*, <https://doi.org/10.1002/ece3.7731>.
- KHALANSKI, M., CARREL, G., DESAINT, B., FRUGET, J.-F., OLIVIER, J.-M., POIREL, A., SOUCHON, Y. (2008): Étude thermique globale du Rhône - Impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés (*Global thermal study of the Rhone - Hydrobiological impact of cumulative warming - with english summary*). *Hydroécologie Appliquée* 16: 53-108.

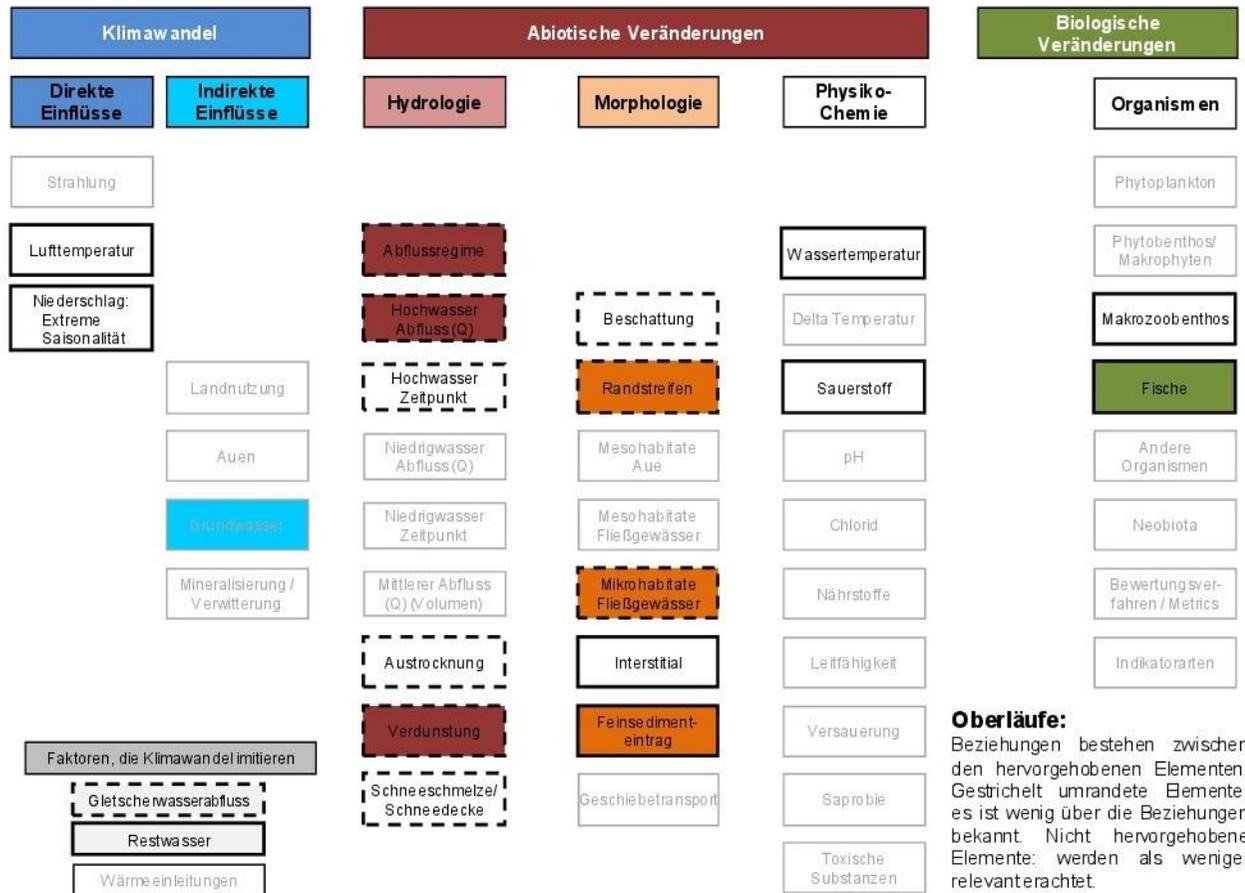
- Kleinteich, J., Frassl, M.A., Schulz, M., Fischer, H. (2024): Climate change triggered planktonic cyanobacterial blooms in a regulated temperate river. *Sci Rep* 14, 16298 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66586-w>
- KLIWA (2010): Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literaturlauswertung und erste Vulnerabilitätseinschätzung. Bericht im Auftrag des KLIWA-Konsortiums. 59 S. + Anhang.
- KLIWA (2010): Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (Kooperation zwischen dem Deutschen Wetterdienst (DWD), dem Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg, dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit und dem Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz: „Fließgewässerbiologie und Klimawandel“
- KLIWA (2023): 2-Grad-Ziel für unsere Bäche - Wassertemperatur und Beschattung. KLIWA-Kurzbericht, [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)
- KLIWA (2018): KLIWA Index<sub>MZB</sub>: Liste mit allen Makrozoobenthosarten und den taxaspezifischen Temperaturpräferenzen. Anhang zum Projektabschlussbericht – Praxistest und Verifizierung des KLIWA-Index<sub>MZB</sub>, Projektteam umweltbüro essen – chromgruen – SENCKENBERG im Auftrag der KLIWA-Kooperation. <https://www.kliwa.de/publikationen-projektberichte.htm>
- KÖLLNER P., GROSS C., SCHÄPPI B., FÜSSLER J., LERCH J., NAUSER M. (2017): Klimabedingte Risiken und Chancen. Eine schweizweite Synthese. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1706: 148 S.
- KOOP, J.H.E., BERGFELD, T., KELLER, M. (2007): Einfluss von extremen Niedrigwasser-Ereignissen und gleichzeitigen "Hitzeperioden" auf die Ökologie von Bundeswasserstraßen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 51, Heft 5, S. 202-209.
- KÜTTEL, S., PETER, A., WÜEST, A. (2002): Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fließgewässer. Rhône Revitalisierung, Publikation Nummer 1.
- KURSTJENS, G., NIJSSEN, M., VAN WINDEN, A., DORENBOSCH, M., MOLLER PILLLOT, H., VAN TURNHOUT C., VELDT, P. (2020): Natte overstromingsvlakten in het rivierengebied. Ecologisch functioneren en ontwikkelkansen, rapport 2020/OBN237-RI. VBNE, Driebergen.
- LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) (2021): Temperaturempfindlichkeiten der Fischgemeinschaften in deutschen Fließgewässern – Überprüfung der Orientierungswerte für die Temperatur. Abschlussbericht. Projekt O 10.20 des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“ 2020. [http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/static/LFP/Dateien/LAWA/AO/O\\_10\\_20\\_211119\\_Endbericht\\_O10.20\\_TempEmpf\\_Fische.pdf](http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/static/LFP/Dateien/LAWA/AO/O_10_20_211119_Endbericht_O10.20_TempEmpf_Fische.pdf)
- LUWG (Hrsg.) (2011): Neubürger in Rhein und Mosel. – Infoblatt Gewässerschutz 01/11.
- MAKASKE, B., MAAS, G. (2013): Klimaatverandering en riviernatuur in de periode 2015-2050; Klimaatverandering en riviernatuur in de periode 2015-2050; Een verkenning van effecten en adaptatiemogelijkheden. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2484. 56 S.; 25 Abb.; 11 Tab.; 39 Ref.
- MARIJS, L.B., ACHTERKAMP, B., COLLAS, F.P.L., DE LA HAYE, M., DORENBOSCH, M., LIEFVELD, W.M., MAATHUIS, M., VAN GEEST, G., VAN KESSEL, N. (2020): KRW Leidraad Rijkswaterstaat.
- METEOSCHWEIZ (2022): Klimabulletin Sommer 2022. Zürich.

- MKULNV (MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ NRW) (2010): Natur im Wandel: Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt in Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- MOSNER E., HORCHLER P. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation der Flussauen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.06. KLIWAS-53/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_53/2014\_5.06, URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_53\\_2014\\_5.06.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_53_2014_5.06.pdf)
- NLWKN (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz) (Hrsg.) (2011): Vollzugshinweise für Arten und Lebensraumtypen. [https://www.nlwkn.niedersachsen.de/naturschutz/natura\\_2000/vollzugshinweise\\_arten\\_und\\_lebensraumtypen/vollzugshinweise-fuer-arten-und-lebensraumtypen-46103.html#fische](https://www.nlwkn.niedersachsen.de/naturschutz/natura_2000/vollzugshinweise_arten_und_lebensraumtypen/vollzugshinweise-fuer-arten-und-lebensraumtypen-46103.html#fische)
- NOTTER, B., STAUB, E. (2009): Lebensraum der Bachforelle um 2050. GWA Gas, Wasser, Abwasser. Nr. 1/2009: 39-44. HOP, J, Kleppe, R., Koole, M., Bleile, N. (2022): Overleving van jonge vis in het IJsselmeer – literatuurstudie. Rapportnr. 20220253/01. ATKB, Waardenburg.
- OEXLE, S, GAYE-SIESSEGGGER, J, BASEN, T, BRINKER, A (2020): Untersuchungen zu den Auswirkungen der Extremsommer 2018 und 2019 auf die Fischbestände in baden-württembergischen Fließgewässern. AUF AUF: 1–12
- PARTENARIAT FÜR UMWELT UND KLIMA (2011): « Paquet Climat » (6 mai 2011), Synthesedokument der *groupe de pilotage* für eine nationale Nachhaltigkeitsstrategie, Luxemburg.
- PONT, D. (Koordinator) (2003): Programme GICC – AQUABIO. Conséquences potentielles du changement climatique sur les biocénoses aquatiques et riveraines francaises - Rapport final. CNRS, Université de Lyon.
- RABITSCH, W., WINTER, M., KÜHN, E., KÜHN, I., GÖTZL, M., ESSL, F., GRUTTKKE, H. (2010): Auswirkungen des rezenten Klimawandels auf die Fauna in Deutschland. BfN-Heft Nr. 98, Bonn.
- REESE, M. (2011): Die Anpassungen an den Klimawandel im Bewirtschaftungssystem der Wasserrahmenrichtlinie. Zeitschrift für Wasserrecht, Heft 2/2011, S. 61-82.
- ROBINSON, C.A., THOM, T.J., LUCAS, M. C. (2008): Ranging behaviour of a large freshwater invertebrate, the white-clawed crayfish *Austropotamobius pallipes*. *Freshwater Biology*, 44, 509–521. Available from: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2000.00603.x>
- ROS, A., SCHMIDT-POSTHAUS, H., BRINKER, A. (2022): Mitigating human impacts including climate change on prlifervative kidney disease in salmonids of running waters. *Journal of Fish Diseases*, Volume 45, Issue 4, <https://doi.org/10.1111/jfd.13585>
- RYTWINSKI, T., LIN, H.-Y., HARPER, M., SMOKOROWSKI, K.E., SMITH, A., REID, J.L., TAYLOR, J.J., BIRNIE-GAUVIN, K., BRADFORD, M.J., CROSSMAN, J.A., KAVANAGH, R., LAPOINTE, N.W.R., TURGEON, K., COOKE, S.J. (2023): How do natural changes in flow magnitude affect fish abundance and biomass in temperate regions? A systematic review. *Ecological Solutions and Evidence*, Vol. 4, 1.
- SCHLÄPPI, T. (2021): Atlantischer Lachs und Klimawandel, Zusammenstellung bestehender Studien und Grundlagen, Bericht im Auftrag des WWF Schweiz, 24 S.
- SCHMIDT, M., SCHINDLER, D., ARNETH, A., KESSELRING, S., LÖBBE, S., PEHNT, M. (2023): Klimawandelbedingte Gebietsniederschlagsänderung in Baden-Württemberg von 1881 bis 2099. Kurzpapier des Klima-Sachverständigenrats. 01I09I2023.

- SCHULTE L. & A. VAN WINDEN (2024): Effect van droogte en lage rivierafvoeren op riviernatuur. Bureau Stroming in opdracht van WWF. effect droogte en lage rivierafvoeren op riviernatuur 4 2024.pdf (levenderivieren.nl)
- STAHL, K., WEILER, M., VAN TIEL, M., KOHN, I., HÄNSLER, A., FREUDIGER, D., SEIBERT, J., GERLINGER, K., MORETTI, G. (2022): Impact of climate change on the rain, snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries. CHR report no. I 28. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad.
- STERUD, E., FORSETH, T., UGEDAL, O., POPPE, T.T., JOERGENSEN, A., BRUHEIM, T., FJELDSTAD, H.-P., MO, T. A. (2007): Severe mortality in wild Atlantic salmon *Salmo salar* due to proliferative kidney disease (PKD) caused by *Tetracapsuloides bryosalmonae* (Myxozoa). *Disease of Aquatic Organisms*, 77: 191-198.
- STOWA (Stichting toegepast onderzoek waterbeheer) (2011): Een frisse blik op warmer water. Over de invloed van klimaatverandering op de aquatische ecologie en hoe je de negatieve effecten kunt tegengaan. Stowa-Bericht Nr. 2011-20 im Auftrag von Rijkswaterstaat waterdienst. Amersfoort.
- TISSOT, L., SOUCHON, Y. (2010): Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen (*Synthesis on thermal tolerances of the principal freshwater fish species of large Western Europe rivers*). *Hydroécologie Appliquée*, Band 17, S. 17-76.
- VAN AALDEREN, R., BEELEN, P. (2011): De opkomst van de meerval in Nederland. Verspreidingsonderzoek. Sportvisserij Nederland, Bilthoven.
- VAN DER GRINTEN, E.; VAN HERPEN, F.C.J.; VAN WIJNEN, H.J.; EVERS, C.H.M.; WUIJTS, S. EN VERWEIJ, W. (2007): Afleiding maximumtemperatuurnorm goede ecologische toestand (GET) voor Nederlandse grote rivieren. RIVM Rapport 607800003/2007
- VAN KESSEL, N., DORENBOSCH, M., DE BOER, M.R.M., LEUVEN, R.S.E.W., VAN DER VELDE, G. (2011): Competition for shelter between four invasive gobiids and two native benthic fish species. *Current Zoology* 57: 844-851.
- VANNOTE, R. L., MINSHALL, G.W., CUMMINS, K.W., SEDELL, J.R., CUSING, C.E. (1980). The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37: 130-137
- VERSTIJNEN, Y., SMOLDERS, A.J.P., WESTENDORP, P.J., DE SENERPONT DOMIS, L., TEURLINCX, S., VAN GEEST, G., GROEN, M., DORENBOSCH, M., VAN ELS, P. (2022): Diepe uiterwaardplassen: verondiepen of niet? Rapportnummer 2022/OBN252-RI, VBNE, Driebergen.
- WAHLI, T., KNUESSEL, R., BERNET, D., SEGNER, H., PUGOVKIN, D., BURKHARDT-HOLM, P., ESCHER, M., SCHMIDT-POSTHAUS, H. (2002): Proliferative kidney disease in Switzerland: current state of knowledge. *Journal of Fish Disease*, 25: 491-500.
- WIESNER, C., WOLTER, C., RABITSCH, W., NEHRING, S. (2010): Gebietsfremde Fische in Deutschland und Österreich. BfN-Skripten 279, 192 S.
- XENOPOULOS, M. A., LODGE, D. M., ALCAMO, J., MÄRKER, M., SCHULZE, K. VAN VUUREN, D. P. (2005): Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawal. *Global Change Biology*, 11/10: 1557-1564.

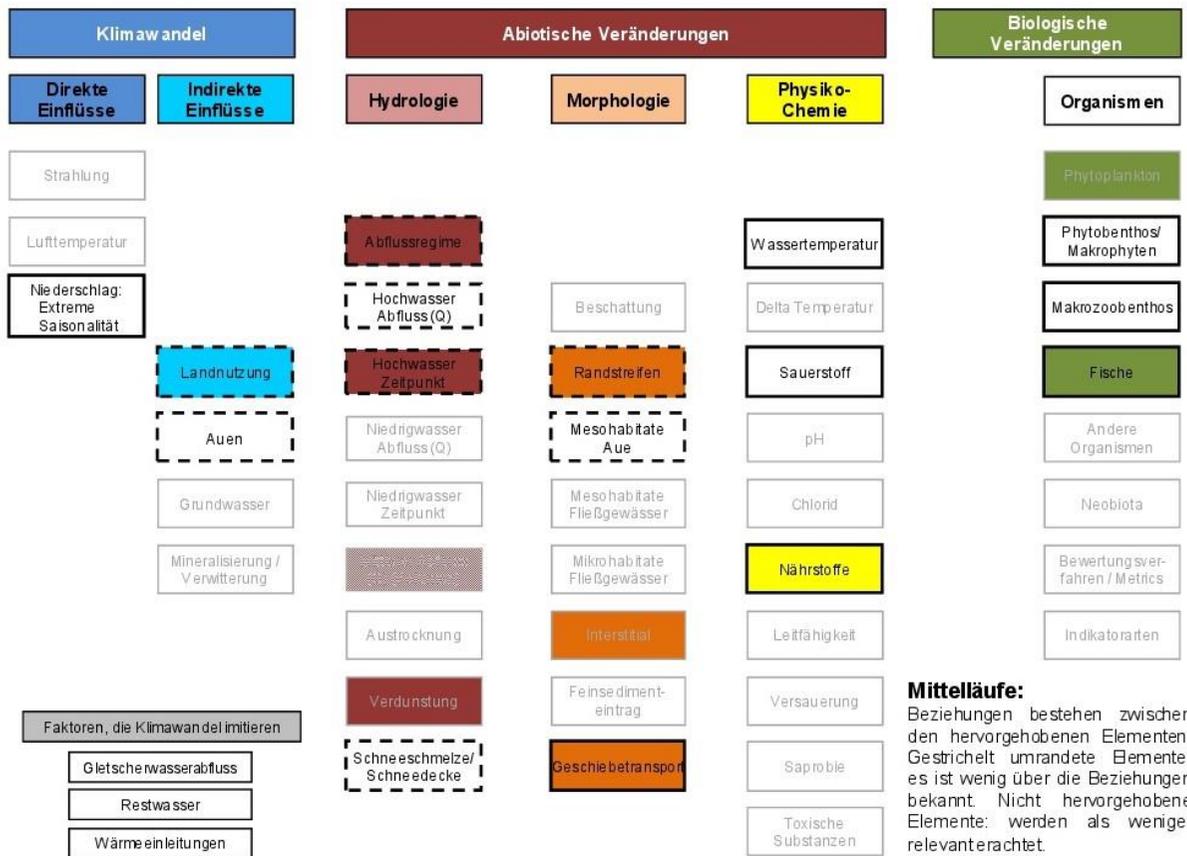
# Anlagen

## Anlage 1



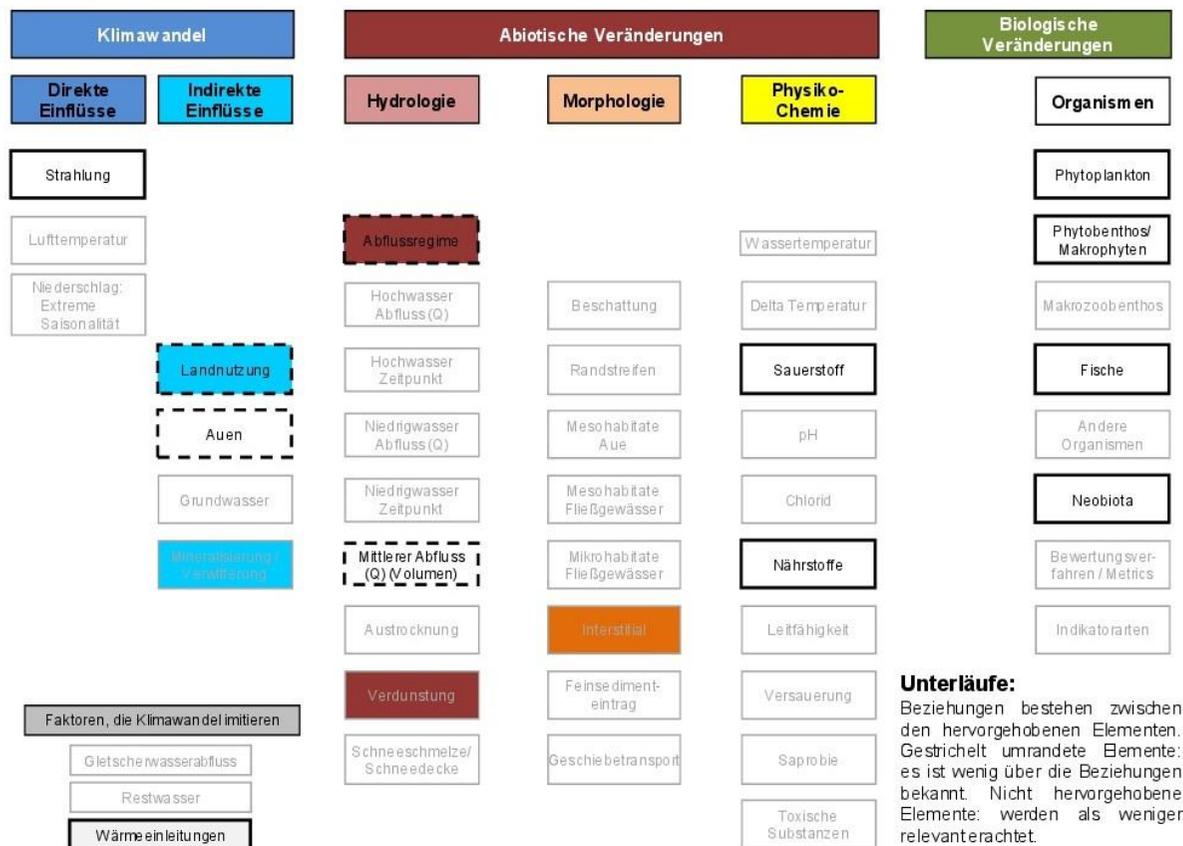
**Abbildung 1: Abiotische Faktoren und Organismengruppen im Oberlauf eines Gewässers, auf die der Klimawandel einen Einfluss haben kann.**

Beziehungen bestehen zwischen den hervorgehobenen Elementen. Gestrichelt umrandete Elemente: es ist wenig über die Beziehungen bekannt. Nicht hervorgehobene Elemente: werden als weniger relevant erachtet. Quelle: <https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie.htm>



**Abbildung 2: Abiotische Faktoren und Organismengruppen im Mittellauf eines Gewässers, auf die der Klimawandel einen Einfluss haben kann.**

Beziehungen bestehen zwischen den hervorgehobenen Elementen. Gestrichelt umrandete Elemente: es ist wenig über die Beziehungen bekannt. Nicht hervorgehobene Elemente: werden als weniger relevant erachtet. Quelle: <https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie.htm>



**Abbildung 3: Abiotische Faktoren und Organismengruppen im Unterlauf eines Gewässers, auf die der Klimawandel einen Einfluss haben kann.**

Beziehungen bestehen zwischen den hervorgehobenen Elementen. Gestrichelt umrandete Elemente: es ist wenig über die Beziehungen bekannt. Nicht hervorgehobene Elemente: werden als weniger relevant erachtet. Quelle: <https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie.htm>

## Anlage 2

**Tabelle 1: Prognostizierter Einfluss eines Temperaturanstiegs auf Fische und Rundmäuler im Rheingebiet und in anderen mitteleuropäischen Flüssen**

Erläuterungen: **EU-Aalverordnung:** Nr. 1100/2007/EG des Rates vom 18.9.2007 mit Maßnahmen zur Wiederauffüllung des Bestands des Europäischen Aals; **FFH- oder Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie** Nr. 92/43/EWG des Rates vom 21.5. 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen; **CITES:** Washingtoner Artenschutzabkommen

<b>Fischart wissenschaftl. Name</b>	<b>Fischart deutscher Name</b>	<b>Prognose</b>	<b>Schutzstatus, Herkunft</b>	<b>Bemerkung</b> <u>tolerierete Temperaturen / Extremwerte (und Optimum)</u>	<b>Quelle</b>
<i>Abramis brama</i>	Brassen	Zunahme		Eier 8-28 °C (18-23 °C) Larven 17,5-19,5 °C Juvenile 14-34 °C Adulte 8-28 °C / 35 °C (23-26 °C) Laichzeit 8-23 °C / 28 °C (12-20 °C) Vergrößerung des Lebensraums in den Fließgewässern der Mittelgebirge und in den Alpen	KÜTTEL et al. 2002, diverse in TISSON & SOUCHON 2010
<i>Alburnus alburnus</i>	Ukelei	Abnahme		Abnahme in französischen Flüssen bei einem Temperaturanstieg von 2 °C prognostiziert	PONT & CRANE in PONT 2003
		Zunahme		Kann Wassertemperaturen von > 20 °C tolerieren; starke Zunahme prognostiziert Eier 21-27 °C Larven 22,5 °C Adulte 20-38 °C (20-30 °C) Laichzeit 14-28 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, MKUNLV 2010, diverse in TISSON & SOUCHON 2010
<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Schneider	Abnahme		Bedingt durch voraussichtlich geringere Ausdehnung der Äschenregion Eier 16,3-19,3 °C Larven 12-24 °C Adulte 1,9-23,9 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, diverse in TISSON & SOUCHON 2010

				Laichzeit 12-25 °C	
<i>Alosa alosa</i>	Maifisch	Zunahme	FFH Anhang II & V	Aufgrund des Wiederansiedlungsprojekts, nicht aufgrund des Klimawandels	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Anguilla anguilla</i>	Aal	Abnahme	CITES Anhang II, EU-Aalverordnung	Juvenile (Glasaale): > 15 °C Adulte: > 0/ 8 °C, < 30 / 39 °C (8-29 °C / 22-23 °C) Gefährdung durch Stress und Krankheiten in Hitzeperioden; Rotaalseuche wird begünstigt	KÜTTEL et al. 2002, IKSr 2004
				Keine Veränderung	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Aspius aspius</i>	Rapfen	Zunahme	FFH Anhang II & V		BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Barbus barbus</i>	Barbe	Abnahme	FFH Anhang V	bei einem Temperaturanstieg von 2 °C	PONT 2003
		Zunahme		Eier 12,1-21 °C (16-19 °C) Larven 14,8-18,9 °C (18,5 °C) Juvenile 7-27 °C Adulte 7-30 °C Laichzeit 8-20 °C / 29 °C Verlängerung des Lebensraums in den Fließgewässern der Mittelgebirge und in den Alpen	KÜTTEL et al. 2002
<i>Barbatula barbatula</i>	Bachschmerle	Zunahme		Kann Wassertemperaturen von > 20 °C tolerieren In Gewässern von Baden-Württemberg wird der Lebensraum für Bachschmerlen insgesamt evtl. etwas zunehmen.	MKUNLV 2010, BUNZEL-DRÜKE 2011, BASEN et al. 2022a
		Abnahme		Abnahme in französischen Flüssen bei einem Temperaturanstieg von 2 °C prognostiziert	PONT 2003
<i>Blicca bjoerkna</i>	Güster	Zunahme		Eier 15-20 °C Adulte 15-25 °C Laichzeit 9,6-29 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, diverse in TISSON & SOUCHON 2010
<i>Carassius carassius</i>	Karassche	Abnahme		Aufgrund von sommerlicher Austrocknung kleiner Stillgewässer und Gräben	BUNZEL-DRÜKE 2011

<i>Chondrostoma nasus</i>	Nase	Abnahme		Eier: 8,6-19 °C Larven 10-28 °C (15 °C) Juvenile 7-27 °C Adulte 4-24 °C Laichzeit 6-16,2 °C	KÜTTEL et al. 2002, PONT 2003, diverse in TISSON & SOUCHON 2010
<i>Cottus gobio</i>	Groppe	Abnahme	FFH Anhang II	Juvenile < 28 °C (5-27 °C) Adulte < 16-20 °C (10-15 °C) Laichzeit 7-14 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, KÜTTEL et al. 2002, PONT 2003
<i>Cyprinus carpio</i>	Karpfen	Zunahme	Durch Besatz weit verbreitet	Laichzeit: > 17 °C Juvenile: 16-25 °C Fortpflanzungserfolg groß bei Überflutung von terrestrischer Vegetation im Mai/Juni	BALON 1995, STEFFENS 2008 u. a. in BUNZEL- DRÜKE 2011
<i>Esox lucius</i>	Hecht			Eier 2-23 °C (8-15 °C) Larven 12,3-21 °C Juvenile 9-28 °C (26 °C) Adulte 10-30 / 34 °C (20-26 °C) Laichzeit 0-20 °C (7-17 °C)	EUROLIMPACS; KÜTTEL et al. 2002, diverse in TISSON & SOUCHON 2010
<i>Gasterosteus aculeatus</i>	Dreistachliger Stichling	(Abnahme)		Sehr anpassungsfähige Pionierart, die vom zeitweiligen Trockenfallen von Gewässern profitieren könnte, jedoch konkurrenzschwach; meidet zudem Temperaturen über 20 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, KÜTTEL et al. 2002
<i>Gobio gobio</i>	Gründling	Abnahme		Eier 16-20 °C Larven 20,5 °C Juvenile 7-27 °C Adulte 5-30,9 / 37 °C (15-27 °C) Laichzeit 12-17 °C	KÜTTEL et al. 2002, diverse in TISSON & SOUCHON 2010
<i>Gymnocephalus cernuus</i>	Kaulbarsch	Abnahme		Eier 9-21 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, diverse in

				Larven 16,5-30 °C Juvenile 7-24,8 °C Laichzeit 2-18 °C	TISSON & SOUCHON 2010
<i>Lampetra planeri</i>	Bachneunauge	Abnahme	FFH Anhang II	Abnahme in französischen Flüssen bei einem Temperaturanstieg von 2 °C prognostiziert	BUNZEL-DRÜKE 2011, PONT 2003
<i>Lepomis gibbosus</i>	Sonnenbarsch	Abnahme		Allochthone Art Eier 22,5 °C Larven 20,4-23,5 °C Juvenile 13-28 °C (31,5 °C) Adulte 11,9-40 °C (24,2-30 °C) Laichzeit 20-25 °C (22,5 °C)	PONT 2003, diverse in TISSON & SOUCHON 2010
	Gemeiner Sonnenbarsch	Zunahme			BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Leucaspius delineatus</i>	Moderlieschen	Abnahme		Aufgrund von sommerlicher Austrocknung kleiner Stillgewässer und Gräben	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Leuciscus (Squalius) cephalus</i>	Döbel	Zunahme		Eier 12,3-30 °C (17-23 °C) Larven 14-25 °C (17,5-25 °C) Juvenile 7-24 °C Adulte 7-27 / 34 °C (8-25 °C) Laichzeit 14-20 °C Ausbreitung stromaufwärts	BUNZEL-DRÜKE 2011, KÜTTEL et al. 2002, PONT 2003, diverse in TISSON & SOUCHON 2010
<i>Leuciscus leuciscus</i>	Hasel	Abnahme		Eier 4-23 °C (6-15 °C) Larven 16-25 °C (12,3-17,5 °C) Juvenile & Adulte 10-20 °C Laichzeit 5-16,5 °C (8-9 °C)	KÜTTEL et al. 2002, PONT 2003, diverse in TISSON & SOUCHON 2010
<i>Lota lota</i>	Quappe, Trüsche	Abnahme		Starke Abnahme erwartet, u. a. im IJsselmeer aufgrund von zeitweisem Sauerstoffmangel	BUNZEL-DRÜKE 2011, LAMMENS 2012, mündl. Mitt.

<i>Misgurnus fossilis</i>	Schlammpeitzger	Abnahme	FFH Anhang II	Aufgrund von sommerlicher Austrocknung kleiner Stillgewässer und Gräben	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Neogobio kessleri</i>	Kessler-Grundel	Zunahme	Gebietsfremde Art	aus dem Schwarzmeerraum 25 °C bis 30 °C, Konkurrenz und Räuber für heimische Arten und deren Laich, u. a. auch Lachs	KLIWA 2010
<i>Neogobio melanostomus</i>	Schwarzmundgrundel	Zunahme	Gebietsfremde Art	vgl. Kessler-Grundel	KLIWA 2010
<i>Neogobio fluviatilis</i>	Fluss-Grundel	./.	Gebietsfremde Art	Dürfte wegen ihres vergleichsweise engen Bereichs der optimalen Temperaturen von 4 °C bis 20 °C weniger vom Klimawandel profitieren als andere Grundelarten	KLIWA 2010
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Regenbogenforelle	Zunahme	Für die Nutzung eingeführte Art	Eier < 20 / 18 °C (8-11 °C) Juvenile 26 °C (17 °C) Adulte < 26 °C (16-19 °C) Zur kommerziellen Nutzung eingeführt; toleranter gegenüber höheren Wassertemperaturen als Bachforelle; könnte diese verdrängen	BUNZEL-DRÜKE 2011, KLIWA 2010
<i>Osperus eperlanus</i>	Stint	Abnahme		Tritt in Seen (z. B. im IJsselmeer) Sauerstoffmangel auf, kann dieser für den Stint letal sein	LAMMENS 2012, mündl. Mitt.
		./.		Für NRW keine Bestandsänderung prognostiziert	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Perca fluviatilis</i>	Flussbarsch	Zunahme?		Eier 5-21 °C Larven 5-30 °C (11-15,5 °C) Juvenile > 8 °C / < 36 °C (25 °C) Adulte 10-31 °C / 36,2 °C Laichzeit 5-19 °C	diverse in TISSON & SOUCHON 2010, BASEN et al. 2022a
<i>Phoxinus phoxinus</i>	Elritze	Abnahme		Bedingt durch voraussichtlich geringere Ausdehnung der Äschenregion	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Pseudorasbora parva</i>	Blaubandbärbling	Abnahme	Gebietsfremde Art	Aufgrund von sommerlicher Austrocknung kleiner Stillgewässer und Gräben	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Pungitius pungitius</i>	Neunstachliger Stichling	Abnahme		Aufgrund von sommerlicher Austrocknung kleiner Stillgewässer und Gräben	BUNZEL-DRÜKE 2011

<i>Rhodeus amarus</i>	Bitterling	Zunahme	FFH Anhang II	Adulte 12-30 °C / 37 °C (25 °C) Laichzeit 12-22 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, diverse in TISSON & SOUCHON 2010
<i>Rutilus rutilus</i>	Rotaugen	Zunahme		Eier 5-27 °C (12-20 °C) Larven 17,5 °C Juvenile 7-21 °C Adulte 12-30 °C / 36 °C (8 / 20-25 °C) Laichzeit 5-22 °C (8-19 °C)	KÜTTEL et al. 2002, diverse in TISSON & SOUCHON 2010, BASEN et al. 2022a
<i>Salmo trutta</i>	Bach-, & Meer- und Seeforelle	Abnahme		Eier 0-13 °C (7-12 °C) Juvenile < 23 / 28 °C (6-14 °C / 8-13 °C) Adulte < 25 / 28 °C (4-19 °C / 14-17 °C) Laichzeit 1-10 °C (6 °C)  Abnahme zumindest im südeuropäischen Raum wahrscheinlich, weiter nördlich evtl. Vorteile durch Überleben der Brut in milderen Wintern, wo die Wanderung in höhere Lagen nicht möglich ist, kann sie aussterben.	BUNZEL-DRÜKE 2011, EUROLIMPACS, MKUNLV 2010, NOTTER & STAUB 2009, PONT 2003, WEBB & WALSH 2004 in WWF 2009, BASEN et al. 2022a, KÜTTEL et al. 2002
<i>Salmo salar</i>	Lachs	Abnahme	FFH Anhang II & Anhang V (im Süßwasser)	Eier < 16 °C (4-11 °C) Juvenile < 17 °C (< 10 °C) Brütlinge < 23 °C Sömmerlinge (2-3 Monate alt) < 28,7-29,2 °C Parrs (0+ bis 1+) < 27,4-32,8 °C abwandernde Smolts < 19 °C (7-14,3 °C) Adulte < 28-32 °C (9-17 °C) Laichzeit < 10 °C (6-8 °C)  Einstellung der Wanderung bei ca. 25 °C  Eine leichte Temperaturerhöhung im Winter wirkt sich positiv auf die Eientwicklung aus.	BUNZEL-DRÜKE 2011, KÜTTEL et al. 2002, RABITSCH et al. 2010

				Mittlere Risikoklasse im Rahmen einer Klimasensibilitätsanalyse	
<i>Salvelinus fontinalis</i>	Bachsaibling	Abnahme	Gebietsfremde Art	Bewohner des Epi- und Metarhithrals	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Sander (Stizostedion) lucioperca</i>	Zander	?		Eier 3-24 °C / 25 °C Larven 13,1-26 °C (13,1-15,5 °C) Juvenile 27,3-30 °C Adulte < 33,3 °C Laichzeit 3-26 °C	diverse in TISSON & SOUCHON 2010
<i>Silurus glanis</i>	Wels	Zunahme		Eier 22-25 °C Juvenile > 13 °C (24,5 °C) Adulte 7-33 °C (27 °C) Laichzeit 17-25 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, STOWA 2011, diverse in TISSON & SOUCHON 2010, BASEN et al. 2022a
<i>Thymallus thymallus</i>	Äsche	Abnahme	FFH Anhang V	Eier 6-13 / 14 °C (9 °C) Adulte < 18 / 24 °C (15-17 °C) Laichzeit < 15 °C (6-10 °C)  Benötigt kühle Gewässer von bestimmter Breite; wo diese in höheren Lagen nicht vorhanden oder nicht erreichbar sind, könnte die Art vollends verschwinden.  Mittlere Risikoklasse im Rahmen einer Klimasensibilitätsanalyse	BUNZEL-DRÜKE 2011, KÜTTEL et al. 2002, PONT 2003, NOTTER & STAUB 2009, RABITSCH et al. 2010, BASEN et al. 2022a
Betrachtung aller vorkommenden Fischarten		Zunahme: 26 %		Insgesamt – teils auch durch andere Aspekte des Klimawandels - werden etwa ein Drittel, der im deutschen Bundesland Nordrhein-Westfalen vorkommenden Arten der Fische und Rundmäuler, negativ beeinflusst.	MKUNLV 2010

**Anlage 3****Tabelle 1: Maßnahmen gegen die Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökologie**

<b>Maßnahme</b>	<b>Welchen Auswirkungen des Klimawandels wird durch die Maßnahme entgegengewirkt?</b>	<b>Welcher Art oder welchen Arten kommt die Maßnahme zugute?</b>	<b>Wirksamkeit einer Maßnahme (kurzfristig, mittelfristig, langfristig)</b>
Erhalt und Ausweitung bestehender Schutzgebiete, Ausweisung neuer Schutzgebiete	Abnahme der Habitatflächen und Verschlechterung der Habitatqualität  Aussterben oder Rückgang einzelner Arten	Arten, die bereits akut vom Klimawandel bedroht sind und solche, die zukünftig davon bedroht sein könnten  Arten, die neben dem Klimawandel durch weitere Stressoren (z. B. Fischerei) zusätzlich bedroht sind	langfristig
Anpassung der Zielartenkataloge und ggf. Überprüfung des Referenzzustands (u.a. Artengemeinschaft). Der Schutz sollte schnell in Abhängigkeit von neuen Umweltbedingungen erfolgen.	Aussterben oder Rückgang einzelner Arten	Arten, die bisher nicht bedroht waren, die aber zukünftig durch die Auswirkungen des Klimawandels bedroht sein könnten	langfristig
Beobachtung und Erforschung gebietsfremder und insbesondere invasiver Arten	Ausdehnung des Verbreitungsgebiets oder Ausbreitung invasiver gebietsfremder Arten	Heimischen Arten	langfristig
Prozessschutz: z.B. Zulassen der natürlichen Sukzession, der Naturverjüngung sowie der freien Wanderung von Arten	Ausdehnung des Verbreitungsgebiets oder der Populationsgröße invasiver Arten  Anstieg der Wassertemperaturen	Heimischen Arten	langfristig

<b>Maßnahme</b>	<b>Welchen Auswirkungen des Klimawandels wird durch die Maßnahme entgegengewirkt?</b>	<b>Welcher Art oder welchen Arten kommt die Maßnahme zugute?</b>	<b>Wirksamkeit einer Maßnahme (kurzfristig, mittelfristig, langfristig)</b>
Wiederherstellung der Funktionalität von Habitaten, insbesondere durch die Vernetzung von vielfältigen Biotopen	Abnahme der Habitatflächen und Verschlechterung der Habitatqualität	Heimischen Arten; Wandernden Arten; Biodiversität	langfristig
Wiederanbindung von Auen und Auengewässern	Anstieg der Wassertemperaturen; Niedrigwasser	Heimischen Arten	langfristig
Identifizierung von Klima-Refugialräumen und Vernetzung dieser mit aktuellen Arealen bedrohter Fischarten	Anstieg der Wassertemperaturen; Niedrigwasser	Allen Fischarten, insbesondere temperaturempfindlichen Arten	langfristig
Verbesserung der Längsvernetzung / Ermöglichung der freien Wanderung von aquatischen Arten	Anstieg der Wassertemperaturen; Niedrigwasser	Allen Arten, insbesondere temperaturempfindliche und wandernde Arten	langfristig
Beschattung in den kleineren und mittleren Nebengewässern durch Bestockung der Ufer sowie lokale Einbringung von Totholz; Zulassen der Eigenbesiedlung lokaler Arten	Anstieg der Wassertemperaturen	Allen Arten, insbesondere temperaturempfindliche und wandernde Arten, aber auch ortstreue Arten	mittelfristig
Erhalt und naturnahe Entwicklung von tiefen (angebundenen) Stillgewässern in den Flussauen als Thermorefugium; Berücksichtigung tiefer Stillgewässer auch beim Verflachen der Stillgewässer in der Aue	Anstieg der Wassertemperaturen	Temperaturempfindlichen Arten	kurzfristig, langfristig
Maßnahmen eines Notfallkonzepts, wie z. B. Schaffung künstlicher Kaltwasserzonen und Notabfischungen	Anstieg der Wassertemperaturen und akuter Hitzestress	Temperaturempfindlichen Fischarten	kurzfristig

<b>Maßnahme</b>	<b>Welchen Auswirkungen des Klimawandels wird durch die Maßnahme entgegengewirkt?</b>	<b>Welcher Art oder welchen Arten kommt die Maßnahme zugute?</b>	<b>Wirksamkeit einer Maßnahme (kurzfristig, mittelfristig, langfristig)</b>
Beschränkung und Reduzierung der anthropogenen Wärmeeinleitung sowie Verbesserung des diesbezüglichen Informationsaustausches auf internationaler Ebene	Anstieg der Wassertemperaturen	Temperaturempfindlichen Arten Heimischen Arten	kurzfristig, langfristig
Erneute Überprüfung der Eignung ausgewählter Flussabschnitte für Besatzmaßnahmen	Anstieg der Wassertemperaturen	Fischarten für Wiederansiedlung	langfristig
Uferrenaturierung und Extensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung	Bodenerosion und Sedimenteinträge sowie Kolmation, insb. bei Starkregen oder Hochwasser  Anstieg der Wassertemperaturen  Entkopplung von Fluss und Aue durch zunehmendes Niedrigwasser  Abnahme der Habitatqualität  Durch den Klimawandel möglicherweise zunehmende Stressoren (z. B. Pestizideinträge)	Allen Arten	langfristig, kurzfristig
Reaktivierung der natürlichen Strömungsdynamik	Kolmation  Abnahme der Habitatvielfalt	Allen Arten	langfristig

<b>Maßnahme</b>	<b>Welchen Auswirkungen des Klimawandels wird durch die Maßnahme entgegengewirkt?</b>	<b>Welcher Art oder welchen Arten kommt die Maßnahme zugute?</b>	<b>Wirksamkeit einer Maßnahme (kurzfristig, mittelfristig, langfristig)</b>
Reduzierung der Flächenversiegelung	Bodenerosion und Sedimenteinträge sowie Kolmation, insb. bei Starkregen oder Hochwasser	Allen Arten	langfristig
Verbesserung des Landschaftswasserhaushalts (Schwammlandschaften, infiltrationsfördernde Bodenbedeckung)	Überschwemmung, Bodenerosion, Sedimenteinträge, Kolmation insb. bei Starkregen oder Hochwasser; Austrocknung und Sinken der Wasserspiegellagen	Allen Arten	langfristig
Begrenzung der Vertiefung der Flusssohle durch gezielte Entfernung oder Anlage von strömungslenkenden Kies- und Sandablagerungen, durch den Bau von Parallelwerken und durch Verflachen der Flusssohle	Entkopplung von Fluss und Aue durch zunehmendes Niedrigwasser	Allen Arten	Kurzfristig, langfristig
Entfernung künstlicher Uferbefestigung	Entkopplung von Fluss und Aue durch zunehmendes Niedrigwasser	Allen Arten	langfristig
Wiederherstellung von Überschwemmungsflächen	Austrocknung und Sinken der Wasserspiegellagen	Allen Arten	langfristig



**Anlage 4: Bestandsaufnahme der auf nationaler Ebene vorhandenen Synthesen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökologie (living document)**

Stand: 25.09.2024

- Der Schwerpunkt bei der Abfrage lag auf Studien, die die Auswirkungen auf Biota beschreiben (d. h. auf Arten/Gemeinschaften/Ökosystemfunktionen). Studien die sich mit abiotischen Faktoren beschäftigen (z. B. mit Abfluss und Wassertemperatur) wurden nicht mit aufgenommen werden, da sich EG HCLIM und EG STEMP mit diesen Themen befassen.
- Die Tabelle führt zunächst Beiträge auf, die sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässerökologie befassen und weiter unten auch Beiträge zum Thema „Maßnahmen und Management“ (siehe letzte Spalte „Kategorie“). Die beiden Bereiche sind jeweils sortiert nach Erscheinungsjahr (chronologisch absteigend) > Land (A-Z) > Autor/Herausgeber (A-Z).
- Erläuterungen zu den einzelnen Tabellenfeldern finden sich im Tabellenblatt "Erläuterungen\_Tabelle".
- Erläuterungen zum DPSIR-Ansatz inkl. Definitionen finden Sie im Tabellenblatt "Erläuterungen\_DPSIR-Ansatz".

Angaben zur Studie						Charakterisierung der Studien unter Verwendung des DPSIR-Ansatzes									
Titel	Originaltitel	Autor/Herausgeber	Erscheinungsjahr	Link	Land	Inhaltliche Zusammenfassung	Keywords	Bemerkung "Angaben zur Studie"	"Pressures" (= Belastungen)	"State" (=Zustand)	"Impacts" (=Auswirkungen)	"Responses" (=Reaktion)	Bemerkung "Responses"	Hinweis	Kategorie
Räumliche Auswirkungen klimawandelbedingter Wassertemperaturerhöhungen auf die Fließgewässer-Fischgemeinschaften	Räumliche Auswirkungen klimawandelbedingter Wassertemperaturerhöhungen auf die Fließgewässer-Fischgemeinschaften	KLIWA – AG Gewässerökologie Fließgewässer, KLIWA-Konsortium	2023	<a href="https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie-flora-fauna-fische.htm">https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie-flora-fauna-fische.htm</a>	DE	In dieser laufenden Studie werden modellgestützte Analysen zusammengefasst, die sich einerseits mit der räumlich-zeitlichen Entwicklung der Habitatsteignung (basierend auf den Vorgaben der OGewV für den guten fischökologischen Zustand) für die Fischgemeinschaften befassen. Andererseits werden auch zukünftige Entwicklungen bezüglich der Fisch-Referenzzönosen anhand der Bedürfnisse entsprechender Schirmarten beleuchtet, um über die simulierte Wassertemperaturentwicklung bis zum Jahr 2100 Rückschlüsse auf zukünftig wahrscheinliche Verbreitungsmuster machen zu können.	Klimawandelbedingte Wassertemperaturerhöhung; kaltstenotherme Arten; Fischgemeinschaften; Schirmarten; räumliche Verbreitungsmuster	Simulationsbasierte Studie (fortlaufend)	Temperaturanstieg Wasser	potenziell vorkommende Fischfauna	veränderte Habitatsteignung	Erhöhung der Temperaturresilienz der Gewässer durch Beschattung von naturnahen Gewässerrandstreifen	Erhalt und Entwicklung naturnaher Gewässerrandstreifen und Auen durch Förderung der Sukzession bzw. entsprechender Renaturierungsmaßnahmen	derzeit in Konzeption; Übertragung/Anpassung auf Invertebrate Lebensgemeinschaften (Makrozoobenthos) wird geprüft	Auswirkungen
Who will be where: Climate driven redistribution of fish habitat in southern Germany	Who will be where: Climate driven redistribution of fish habitat in southern Germany	Basen et al.	2022	<a href="https://journals.plos.org/climate/article?id=10.1371/journal.pclim.0000006">https://journals.plos.org/climate/article?id=10.1371/journal.pclim.0000006</a>	DE	To improve the robustness of projections of freshwater fish distributions under climate change, species distribution models (SDMs) were calculated for six fish species in southwestern Germany with different ecological requirements along an upstream-downstream gradient in a multi-general circulation model (GCM) approach. Even when accounting for broad variation in GCMs and realistic RCPs, these results suggest climate change will drive a significant redistribution of fish habitat. Ausfließen und weit weg wird sein und ganz mit dem Klimawandel ist längst in Deutschland angekommen. Dabei erleben wir ihn nicht nur in Großereignissen, die bundesweit durch die Medien gehen. Viele Auswirkungen des globalen Temperaturanstiegs äußern sich schleichend und oftmals schwer wahrnehmbar, ganz besonders in unseren heimischen Gewässern. Die vorliegende Broschüre wirft deshalb ein wissenschaftlich fundiertes Schlaglicht auf diesen einzigartig vielfältigen und zugleich stark bedrohten Lebensraum: seinen aktuellen Zustand, künftige Entwicklungen, aber auch konkrete Handlungsmöglichkeiten. Denn noch haben wir es selbst in der Hand, die Folgen der Klimakrise für die baden-württembergische Fischfauna abzumildern, heimische Arten vor dem Aussterben zu bewahren und so auch den Fortbestand der Fischerei langfristig zu sichern.	Klimafolgen; Fischverbreitung	Untersuchung			affected the distribution of four of the six fish species. The potential ranges of salmonids are predicted to decline by up to 92% (brown trout) and 75% (grayling). In contrast; habitat suitability for perch and roach is predicted to increase by up to 108% and 53%, respectively. Even when accounting for broad variation in GCMs and realistic RCPs; these results suggest climate change will drive a significant redistribution of fish habitat. Salmonid-dominated communities in				Auswirkungen
Auf schmalem Grad° - Die Zukunft der Fische in der Klimakrise. Analysen, Vorhersagen, Handlungsmöglichkeiten	Auf schmalem Grad° - Die Zukunft der Fische in der Klimakrise. Analysen, Vorhersagen, Handlungsmöglichkeiten	Basen et al.	2022	<a href="https://fortbildung-lazbw.lgl-bw.de/lazbw/webbasys/index.php?kathaupt=601&amp;dsnr=77&amp;kathauptalt=600">https://fortbildung-lazbw.lgl-bw.de/lazbw/webbasys/index.php?kathaupt=601&amp;dsnr=77&amp;kathauptalt=600</a>	DE	Erläuterung der Ergebnisse der Seen-Klimaforschung aus über 15 Jahren und Aufzeigen von zukünftige Forschungsthemen.	Klimafolgen; Fischverbreitung; Fischarten	Untersuchung							Auswirkungen
Bayerische Seen im Klimawandel	Bayerische Seen im Klimawandel	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz	2022	<a href="#">Bayerische Seen im Klimawandel (2022)</a>	DE	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	aquatische Lebensräume und Lebensgemeinschaften; Ökosystemleistung	Forschungsergebnisse	Erwärmung; Durchmischung; Nährstoffverteilung	Wasserpflanzen; Schilf; Algen; Sedimente	Veränderungen mit Siegern und Gewinnern	Vermeidung von Einträgen; Renaturierung; reduzierte Wassernutzung			Auswirkungen
Blitzlichtstudie „Seen und Klimawandel“	Blitzlichtstudie „Seen und Klimawandel“	Bundesamt für Naturschutz	2022	<a href="#">Blitzlichtstudie „Seen und Klimawandel“ (2022)</a>	DE	Das hier entwickelte Modul kombiniert das Wissen zu Temperaturbedürfnissen der einzelnen Arten mit den Verteilungen der Fischgemeinschaften in den Gewässern des Landes. Für jeden einzelnen Gewässerabschnitt werden die Fischarten der Referenzzönose aufgelistet, und in ihren Bedürfnissen der vorherrschenden Wassertemperatur gegenübergestellt. Mögliche Veränderungen der Temperatur können durchgespielt werden, um so die Defizite in verschiedenen Lebensphasen und Entwicklungsabschnitten einzelner Fischarten aufzuzeigen. Mit diesem Modul sind wir nun in der Lage, für die gesamte vorhandene (und fehlende) Fischgemeinschaft thermische Defizite aufzudecken, um diese im zukünftigen fischereilichen Management zu beseitigen.	Fischarten; Fischgemeinschaften	Studie	Trockenheit; veränderte Hydrologie; Wasserbewirtschaftung		Verlust an Wasserfläche ; Veränderung Brutbedingungen	Vermeidung von Einträgen; Renaturierung; reduzierte Wassernutzung			Auswirkungen
TeMFI TemperaturModul für heimische Fischarten	TeMFI TemperaturModul für heimische Fischarten	Fischereiforschungsstelle Baden-Württemberg	2022	<a href="https://temfi.fz.fzw.de/app/2_Login/">https://temfi.fz.fzw.de/app/2_Login/</a>	DE	Darstellung der Klimatischen Änderungen und deren Auswirkungen mit besonderem Fokus auf Wasserextreme (Hochwasser, Starkregen, Wassermangel)	Klimawandel; Klimafolgen; Anpassung; Wasserextreme; Hochwasser; Starkregen; Wassermangel; u.a. Auswirkung auf Gewässerökologie			Darstellung der Veränderungen von Abfluss und Niederschlagsregimen	Gibt Hinweise auf die Temperaturempfindlichkeit konkreter Gewässerabschnitte	[Hinweise können bei der Maßnahmenplanung unterstützen: Beschattung fördern; Einleiterlaubnisse anpassen]			Auswirkungen
Zu viel   Zu wenig Extreme meistern   Extremen begegnen	Zu viel   Zu wenig Extreme meistern   Extremen begegnen	KLIWA	2022	<a href="https://www.kliwa.de/_download/broschueren/KLIWA-Broschuere-2022-d.pdf">https://www.kliwa.de/_download/broschueren/KLIWA-Broschuere-2022-d.pdf</a>	DE	In der vorliegenden Studie wurden die Effekte der Beschattung durch UV-vegetation auf Tagesmittel der Wassertemperatur untersucht.		Modellierungsstudie	Temperaturanstieg Wasser		Die Karten geben Hinweise für konkrete Gewässer auf die durch Beschattung möglichen Effekte auf die Wassertemperaturen.	[Karten können bei der Maßnahmenplanung unterstützen: Beschattung fördern; Einleiterlaubnisse anpassen]			Auswirkungen
2 °C-Ziel für unsere Bäche Wassertemperatur und Beschattung	2 °C-Ziel für unsere Bäche Wassertemperatur und Beschattung	KLIWA	2022	<a href="https://www.kliwa.de/_download/poster/2%20%C2%B0C-Ziel%20f%C3%BCr%20unsere%20B%C3%A4che%20-%20Wassertemperatur%20und%20Beschattung.pdf">https://www.kliwa.de/_download/poster/2%20%C2%B0C-Ziel%20f%C3%BCr%20unsere%20B%C3%A4che%20-%20Wassertemperatur%20und%20Beschattung.pdf</a>	DE	Auswirkungen des Klimawandels auf Gewässer im süddeutschen Raum; mit Fokus auf die spezifischen physikalischen und ökologischen Auswirkungen auf Seen	Diversitätsverlust; Veränderungen im Lebenszyklus; Konkurrenzbedingungen	Literaturstudie (Erstveröffentlichung 2015, aktualisiert 2022)	Temperaturanstieg Wasser; Durchmischung		Diversität in Süßwasserlebensräumen sinkt				Auswirkungen

Angaben zur Studie							Charakterisierung der Studien unter Verwendung des DPSIR-Ansatzes								
Titel	Originaltitel	Autor/Herausgeber	Erscheinungsjahr	Link	Land	inhaltliche Zusammenfassung	Keywords	Bemerkung "Angaben zur Studie"	"Pressures" (= Belastungen)	"State" (=Zustand)	"Impacts" (=Auswirkungen)	"Responses" (=Reaktion)	Bemerkung "Responses"	Hinweis	Kategorie
Handbuch zur Anwendung von Diagnosetools für die Identifikation ursächlicher Belastungen auf der Basis des Makrozoobenthos im Rahmen der Fließgewässerbewertung nach WRRL	Handbuch zur Anwendung von Diagnosetools für die Identifikation ursächlicher Belastungen auf der Basis des Makrozoobenthos im Rahmen der Fließgewässerbewertung nach WRRL	LUBW	2022	<a href="https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10250">https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10250</a>	DE	Die vorliegende Dokumentation „Handbuch zur Anwendung von Diagnosetools für die Identifikation ursächlicher Belastungen auf der Basis des Makrozoobenthos im Rahmen der Fließgewässerbewertung nach WRRL“ dokumentiert die Ziele der Diagnose, erläutert Aufbau und Anwendung der Diagnosetools sowie die Interpretation der Diagnoseergebnisse. Diese ermöglicht es, zur Ableitung geeigneter Maßnahmen, sowohl die einzelnen Belastungen zu identifizieren als auch deren Wirkungen auf die Makrozoobenthos-Gemeinschaft zu erkennen und zu hierarchisieren. Unter anderem wird auch die Wahrscheinlichkeit einer	Klimafolgen; Wirkung auf MZB-Gemeinschaft	Untersuchung	Temperaturanstieg Wasser	MZB		[Diagnosetool kann bei der Maßnahmenplanung unterstützen: Beschattung fördern; Einleiterlaubnis anpassen]			Auswirkungen
Entwicklung der ökologischen Beschaffenheit von Oberflächengewässern im Klimawandel	Entwicklung der ökologischen Beschaffenheit von Oberflächengewässern im Klimawandel	Umweltbundesamt	2022	<a href="https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/oberflaechengewasser/entwicklung-der-okologischen-beschaffenheit-von-oberflaechengewassern-im-klimawandel">Entwicklung der ökologischen Beschaffenheit von Oberflächengewässern im Klimawandel</a>	DE	Es werden in einer umfassenden Wirkpfadanalyse die Auswirkungen des Klimawandels auf die abiotischen und biotischen Faktoren in Fließgewässern und Seen sowie die Auswirkungen auf die verschiedenen Organismengruppen beleuchtet.	EG-WRRL; aquatische Ökosysteme; Wirkungszusammenhang; Modellierung; Mindestwasserbedarf	Literaturstudie/ Experteninterviews	Trockenheit; Dürre; Wasserbewirtschaftung	Fischpopulation; Biomasse	Wachstumsraten; Mortalitätsraten	Wiederherstellung naturnaher Gewässerstrukturen; hydrologische Leitbilder			Auswirkungen
Klimafolgen für die Flusslandschaft	Klimaeffekten op riviernatuur	Dorenbosch et al	2022	<a href="https://edepot.wur.nl/571889">https://edepot.wur.nl/571889</a>	NL	Diese Untersuchung fasst alle Kenntnisse zu den Klimafolgen für die Natur im Flussgebiet zusammen und bewertet, welche Management- und Gestaltungsmaßnahmen am vielversprechendsten sind für den Erhalt und die Stärkung der typischen Flusslandschaft in einem veränderten Klima. Das Projekt Hydro-CH2018 hat die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässer in der Schweiz untersucht. Mit dem Klimawandel verändert sich der gesamte Wasserhaushalt, besonders aber die jahreszeitliche Verteilung der Wasserressourcen in Oberflächengewässern und im Grundwasser. Niedrigwasser wird häufiger und die Gewässer werden wärmer. Dies hat grosse Auswirkungen auf die Gewässerökologie, den Hochwasserschutz und die Wassernutzung. Der Bericht «Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer» bietet eine kompakte Übersicht über die Ergebnisse und ist ein Einstieg zu weiteren Fachinformationen und Daten. Das Projekt wurde als The menshwerpunkt im National Centre for Climate Services (NCCS) durchgeführt.	Klimafolgen; Flusslandschaft; Temperatur; Abfluss; Grundwasser; Sickerwasser; Flutung; Maßnahmen	Literaturstudie	Extreme Niederschläge; niedrigerer Grundwasserstand in der Aue; Versäuerung; Temperaturanstieg Luft; Meeresspiegelanstieg	Primärerzeugung und Pflanzen; Wirbellose und Makrofauna; Fische; Amphibien; Vögel; Habitat	positiv für einige Arten und negativ für andere	Mehr Bewuchs zur Abmilderung höherer Temperaturen; Schaffung tieferer Wasserbereiche als kühles Refugium; Unterstützung von Sickerwasserbereichen (Sickerwasser hat niedrigere Temperatur); Beschränkung von Kühlwassereinleitungen; Verringerung der Erosion im Sommerbett / Anhebung der Flusssohle für höhere Grundwasserstände in der Aue; Vorlandabsenkung für höhere Grundwasserstände; Förderung von Flutungen; Längerer Wasserrückhalt	Renaturierungsmaßnahmen; Gesetzgebung; Management		Auswirkungen
Auswirkungen des Klimawandels auf Schweizer Gewässer	Auswirkungen des Klimawandels auf Schweizer Gewässer	BAFU	2021	<a href="https://www.bafu.admin.ch/dam/data/2021/01/auswirkungen-des-klimawandels-auf-die-schweizer-gewaesser-senat-2021.pdf">Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer (senat.ch) (2021)</a>	CH	Die Artenvielfalt der Fische wird räumlich und taxonomisch hoch aufgelöst im gesamten Aare-Einzugsgebiet erfasst. Ökologische Nischenmodellierung wird angewendet, um die Bedürfnisse aller Arten zu erfassen. Mittels der Modelle wird statistisch erfasst, welche menschengemachten Einflussfaktoren neben dem Klimawandel den stärksten Einfluss auf die Verbreitung von Fischarten haben. Mit Hilfe der Nischenmodelle und unter Einbezug von Klimamodellen werden zu erwartende Veränderungen der Biodiversität der Gewässer vorausgesagt. Schliesslich werden Vorschläge zur Verbesserung der Situation und zur Abmilderung der Folgen des Klimawandels erarbeitet.	Modellierung; Biodiversität; multiple Stressoren	Forschungsprojekte	Diverse	Diverse	Diverse	Diverse		laufendes Projekt; noch kein Bericht verfügbar	Auswirkungen
2021 Klimawandel und seine Folgen – Ergebnisse aus dem Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring	Klimabericht NRW 2021 Klimawandel und seine Folgen - Ergebnisse aus dem Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring	LANUV	2021	<a href="https://www.klimawandel.nrw.de/medien/klimabericht-nrw-2021">Klimabericht NRW 2021</a>	DE	Der LANUV Fachbericht 120 „Klima wandel und Klimawandelfolgen in Nordrhein-Westfalen – Ergebnisse aus dem Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring“ stellt die Ergebnisse des gegenüber dem herkömmlichen Klimafolgenmonitoring erweiterten Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring Nordrhein-Westfalens vor.	Klimawandel; Klimafolgenmonitoring	fortlaufendes Klimawandelmonitoring in NRW	veränderte Abflussdynamik; Wassertemperaturanstieg	biologische und chemische Qualitätskomponenten gemäß EU-WRRL	Veränderungen im aquatischen Lebensraum	wird noch erarbeitet	Detaillierte Temperatur und Abflussmessungen zur Bewertung der Klimafolgen in den Gewässern	fortlaufendes Programm zum Monitoring der Auswirkungen des Klimawandels	Auswirkungen
Klimawandel und der Hitzesommer 2018: Folgen für die Fischbestände	Klimawandel und der Hitzesommer 2018: Folgen für die Fischbestände	Oexle et al.	2021	<a href="https://www.researchgate.net/publication/352035366_Klimawandel_und_der_Hitzesommer_2018_Folgen_fur_die_Fischbestande">https://www.researchgate.net/publication/352035366_Klimawandel_und_der_Hitzesommer_2018_Folgen_fur_die_Fischbestande</a>	DE	The year 2018 has been the warmest year since 1881, when regular measurements started in Germany. It has also been one of the driest years, with ten months in succession being too dry. This combined heat and drought wave caused severe impacts on most freshwater ecosystems. It led to overheated water bodies and critically low water levels in many lakes and rivers, up to completely dried out riverbeds. Often, this resulted in high fish mortality. Fish-stock surveys in Baden-Württemberg showed a significant decline in the overall abundance of fish species. Especially the proportion of cold-adapted fishes decreased. However, in some parts, warm-adapted carp-like species became more abundant. Ongoing research will determine if fish stocks are able to recover from this record heat summer or if future weather extremes will further exacerbate the situation. To mitigate negative impacts of climate change on the local fish fauna and aquatic ecosystems, possible management measures are discussed. Diese Studie ist eine Analyse der Auswirkungen der Erwärmung auf die niederländischen großen Gewässer auf der Grundlage der internationalen Literatur und Datenreihen von Rijkswaterstaat und dem KNMI. Dabei wurde der Fokus auf folgende drei Fragen gelegt: 1) Wie wirkt sich dies auf das Nahrungsnetz und die Artengruppen aus, 2) wie ist die Beziehung mit anderen Stressoren und 3) was für Folgen hat dies für die WRRL- und Natura 2000-Bewertung. Bei der Beantwortung der ersten Frage wurde zwischen den vier Hauptgewässersystemen Wattenmeer, Südwestliches Delta, Flussinzugsgebiet und IJsselmeergebiete unterschieden.	Klimafolgen; Fischverbreitung; Fischarten	Untersuchung	Temperaturanstieg Wasser; Temperaturanstieg Luft	Ökosystem; Nahrungsnetz; Primärerzeugung; Makrofauna; Fische; Vögel; Säugetiere	Vorzeltige Phytoplanktonblüte; Wechselwirkung mit abnehmendem Nährstoffangebot; Verschiebung der Abundanz von Zooplankton; Verschiebung der Vögel Richtung Norden	Der Bericht gibt keine Empfehlungen für Reaktionen („Responses“)		Auswirkungen	
Literaturstudie Temperatur	Effecten van temperatuurtoename op de grote wateren : een literatuurstudie met data-overzicht	Noordhuis et al.	2021	<a href="https://puc.overheid.nl/rikswaterstaat/doc/PUC_630000_31/">https://puc.overheid.nl/rikswaterstaat/doc/PUC_630000_31/</a>	NL		Temperatur; Flusslandschaft	Literaturstudie	Temperaturanstieg Wasser; Temperaturanstieg Luft	Ökosystem; Nahrungsnetz; Primärerzeugung; Makrofauna; Fische; Vögel; Säugetiere			Der Bericht gibt keine Empfehlungen für Reaktionen („Responses“)		Auswirkungen
Klimawandel am Bodensee	Klimawandel am Bodensee	IGKB	2020	<a href="https://www.igkb.ch/de/faktenblatt-klimawandel-am-bodensee-2020">Faktenblatt „KLIMAWANDEL AM BODENSEE“ (2020)</a>	CH		Wassertemperatur; Pegel und Zirkulation	Ergebnisse forschungsprojekt	Wassertemperatur; Pegel und Zirkulation	biologische und chemische Komponenten		Reduktion menschlicher Stressfaktoren		Auswirkungen	

Angaben zur Studie							Charakterisierung der Studien unter Verwendung des DPSIR-Ansatzes								
Titel	Originaltitel	Autor/ Herausgeber	Erscheinungsjahr	Link	Land	Inhaltliche Zusammenfassung	Keywords	Bemerkung "Angaben zur Studie"	"Pressures" (= Belastungen)	"State" (=Zustand)	"Impacts" (=Auswirkungen)	"Responses" (=Reaktion)	Bemerkung "Responses"	Hinweis	Kategorie
Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status	Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status	Eawag, Beneteau et al.	2019	<a href="#">Report_BAFU_Water_Quality_Ecological_Status_2018_-_final_version_(lib4ri.ch)</a>	CH	Climate change is one of the largest and possibly most impactful ongoing but also future environmental drivers. Understanding effects of climate change on aquatic ecosystems and their function is thus of high importance. Within the framework of the Hydro-CH2018 project, the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN) initiated a synthesis of climate change effects on water quality and the ecological status of freshwater ecosystems. The present report is the result of these synthesis efforts	ökologische Auswirkungen Klimawandel; Ökosystem; Nahrungsnetz	Literaturstudie	Diverse	Diverse	Diverse	Diverse			Auswirkungen
Klimafolgenmonitoring	Klimafolgenmonitoring	KLIWA – AG Gewässerökologie Fließgewässer und Seen, KLIWA-Konsortium,	2019	<a href="https://www.kliwa.de/gewaesser-ökologie-monitoring.htm">https://www.kliwa.de/gewaesser-ökologie-monitoring.htm</a>	DE	Langfristig angelegte Datenbasis zur Erfassung von klimawandelbedingten gewässerökologischen Folgen an 54 anthropogen gering beeinflussten Fließgewässer- und 9 Seemessstellen im gesamten KLIWA-Raum (BW, BY, RP, HE); Makrozoobenthos, Fischfauna und Abiotik	gewässerökologisches Klimafolgenmonitoring	fortlaufendes Monitoringprogramm	hauptsächlich Wassertemperaturanstieg; veränderte Abflussdynamik	BQK Fische und MZB	veränderte Arten- und Abundanzstruktur	Ggf. angepasste potenziell natürliche Referenzzönosen	Auswirkungen auf ökologische Gewässerbewertung	Langfristig angelegtes Programm; sinnvolle Auswertungen momentan noch nicht möglich	Auswirkungen
Klima Scan	Klimascan : programmatische aanpak grote wateren (PAGW)	Noordhuis et al.	2019	<a href="https://puc.overheid.nl/rjkswaterstaat/doc/PUC_624995_3/1/">https://puc.overheid.nl/rjkswaterstaat/doc/PUC_624995_3/1/</a>	NL	Weiche Auswirkungen hat der Klimawandel auf die großen Gewässer in den Niederlanden und wie kann deren Robustheit gegenüber dem Klima erhöht werden. Diese Frage steht im Fokus dieses Berichts. Es wird aufgezeigt, wie empfindlich die Systeme kurz- und langfristig sind und welche Maßnahmen die Vulnerabilität verringern können.	Klimafolgen; Flusslandschaft; Temperatur; Abfluss; Wasserqualität; Maßnahmen	Literaturstudie	Temperaturanstieg Wasser; Meeresspiegelanstieg; extreme Niederschläge; Hochwasser; Niedrigwasser; niedrigerer Grundwasserstand in der Aue	Ökosystem; Fischfauna; Primärerzeugung und Wasserpflanzen	positiv für einige Arten und negativ für andere	Verstärkung der Robustheit gegenüber dem Klimawandel durch Erhöhung der Diversität; Verbesserung der Vernetzung; Verbesserung der Wasserqualität und Wiederherstellung der natürlichen Dynamik	Empfehlungen für die Politik		Auswirkungen
Bestimmung der Auswirkungen von langanhaltender Dürre auf Fische in den niederländischen Gewässern	Verkenning van de gevolgen van langdurige droogte voor vissen in de Nederlandse wateren	van de Ven	2019	<a href="https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/water-ruimte/ecologie/droogte-vis/">https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/water-ruimte/ecologie/droogte-vis/</a>	NL	Das Jahr 2018 war ein besonders trockenes und warmes Jahr. Der Wassermangel, der die fehlenden Niederschlags und der stark verringerten Wasserzufuhren entstanden ist, führte zu großen Schäden in den unterschiedlichen Sektoren, u. A. Landwirtschaft, Schifffahrt, Trinkwasserversorgung und Natur. Dieser Bericht behandelt die Folgen der Dürre von 2018 für die Fische in den niederländischen Gewässern.	Dürre; Trockenfallen; Niedrigwasser; Fischfauna; Temperatur	Studie nach den Auswirkungen, Interviews mit Wasserbewirtschaftern	Dürre; Niedrigwasser	Fische	Negative Auswirkungen auf die Fischwanderung; zwischen Meer und Fluss und zwischen Fluss und Hinterland	Während Dürrezeiten sind tiefe Gewässer als Refugium für Fische notwendig. Nach dem Dürrezeitraum ist es wichtig, dass wieder eine Aufwärtswanderung für eine Wiederbesiedelung stattfinden kann.			Auswirkungen
Süßwasserfische in Zeiten des Klimawandels: Bestandsaufnahme und Anpassungsmöglichkeiten	Les poissons d'eau douce à l'heure du changement climatique: état des lieux et pistes pour l'adaptation	Florence BAPTIST, Nicolas POULET, Nirmla SEON-MASSIN /ONEMA/	2014	<a href="https://professionnels.ofb.fr/fr/">https://professionnels.ofb.fr/fr/</a>	FR	die beobachteten Auswirkungen des Klimawandels auf die Physiologie, die Phänologie und die Verbreitungsgebiete der Süßwasserfische im Laufe der letzten Jahrzehnte, unterschiedliche Projektionswerkzeuge und ihre Anwendungsgebiete, mit denen quantitative Antworten auf das Ausmaß der erwarteten Änderungen möglich sind, Anpassungsmaßnahmen, um die Vulnerabilität der Süßwasserfische und Süßwasserökosysteme zu begrenzen,	Klimawandel, aquatische Lebensräume, Anpassungsmaßnahmen, Fische, Temperatur, Hydrologie	Studie	Temperaturanstieg Wasser; Temperaturanstieg Luft; Wasserqualität	Wassertemperatur; Wasserqualität; Abfluss; Zustand der aquatischen Habitate	positiv für einige Arten und negativ für andere; Verschiebung Richtung Oberlauf, reduziertes Wachstum, Änderung der Zusammensetzung der Gemeinschaften	Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit; Begrenzung der Wasserentnahme, Erhöhung der Restwassermenge, Verbesserung der Wasserqualität, Wiederherstellung der aquatischen Habitate			Auswirkungen; Maßnahmen
Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literatursammlung und erste Vulnerabilitätsbewertung	Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literatursammlung und erste Vulnerabilitätsbewertung	KLIWA – Kooperationsvorhaben Klimaveränderung und Wasserwirtschaft	2010	<a href="#">Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literatursammlungen und erste Vulnerabilitätsbewertung (2010)</a>	DE	Wirkungszusammenhänge zwischen Klimawandel und Fließgewässerqualität vor der Gebietskulisse der drei Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz; erste Sensitivitätsuntersuchung und Vulnerabilitätsabschätzung von Biozönosen und Gewässertypen	Auswirkungen des Klimawandels auf Fließgewässer; Wirkungsketten; Betroffenheiten	Literatursammlung	Temperaturanstieg Wasser; Niedrigwasser; Trockenperioden	bewertungsrelevante Biokomponenten; Fische MZB; aquatische Flora; Phytoplankton in Abhängigkeit von Lage (Ober-; Mittel-; Unterlauf)				<a href="#">o_Literatursammlungen_Ubersicht_zu_Ursachen_und_Effekten_des_Klimawandels_(2010)_PDF</a>	Auswirkungen
Vollzugshilfe: Kriterien zur Ausübung des Ermessens bei Anträgen zu Wasserentnahmen (Wassermangelstrategie Baden-Württemberg)	Kriterien zur Ausübung des Ermessens bei Anträgen zu Wasserentnahmen (Wassermangelstrategie Baden-Württemberg)	Landesarbeitskreis Biologie	2023		DE	Vollzugshilfe in Form eines reinen GIS-Projektes, welches die (unteren) Wasserbehörden zur Ausübung des Ermessens bei Anträgen zu Wasserentnahmen unterstützt. In einer Karte werden Kriterien dargestellt, die aus gewässerökologischer Sicht die Ablehnung einer Wasserentnahme aus Fließgewässern oder eine Begrenzung insbesondere in Niedrigwasserperioden begründen können.	Unter anderem folgende Kriterien: Wasserabhängige FFH-Lebensraumtypen; Coenagrion mercuriale; Unio crassus; Dohlenkrebs; Steinkrebs; ...	GIS-Projekt				Bietet die Begründung Wasserentnahmen bei empfindlichen Gewässern einzuschränken und so mehr Wasser in der Fläche zu halten.			Maßnahme
Zukunftsplan Wasser Rheinland-Pfalz	Zukunftsplan Wasser Rheinland-Pfalz	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität	2023	<a href="https://mkuen.rlp.de/themen/wasser/zukunftsplan-wasser-rheinland-pfalz">https://mkuen.rlp.de/themen/wasser/zukunftsplan-wasser-rheinland-pfalz</a>	DE	Beim "Zukunftsplan Wasser Rheinland-Pfalz" handelt es sich um einen Beteiligungsprozess. Stakeholder der verschiedenen Interessengruppen sollen über die klimatisch-bedingten Veränderungen des Wasserangebots und der Wassernutzung in einem moderierten Diskussionsprozess Maßnahmen entwickeln. Darüber hinaus sind vom Land bereits verschiedene Maßnahmen initiiert und im Rahmen des Beteiligungsprozess vorgestellt. Das Arbeitsprogramm besteht aus 6 Handlungsbereichen zur Anpassung an klimatische Veränderungen des Wasserangebots, der Schutz von Gewässern (Ökologie) ist eines davon. Die Maßnahmen werden im Rahmen der Stakeholder-	Anpassungsstrategie; Maßnahmenentwicklung; höhere Wassertemperaturen; Wärmeinleitung; Niedrigwasser; Aufkonzentrierung von Schad- und Nährstoffen; invasive Arten;	Stakeholderprozess	Temperaturanstieg Wasser; extreme Niederschläge; Hochwasser; Niedrigwasser; Wasserentnahmen;	biologische und chemische Qualitätskomponenten gemäß EU-WRRL	aquatische Lebensräume und Biodiversität	naturnahe und eigendynamische Gewässerentwicklung; Gewässerrandstreifen; integriertes Wasserressourcen-Management; Minimierung von stofflichen und thermischen Belastungen; Landschaftswasserhaushalt	Renaturierungsmaßnahmen zur Stärkung der Resilienz gegenüber Extremereignissen	Beginn des Stakeholderprozess in 2023; Zeitskala 10 Jahre und länger.	Maßnahme
"RiverDiv" - Schutz der aquatischen Diversität und Verringerung der Gewässerverschmutzung an der Wieslauter: Klimawandelangepasstes Management	"RiverDiv" - Schutz der aquatischen Diversität und Verringerung der Gewässerverschmutzung an der Wieslauter: Klimawandelangepasstes Management	Interreg Oberrhein, RPTU, Uni Freiburg, Uni Strasbourg & CNRS, ENGEEES	2023	<a href="https://nuw.rptu.de/projekte/riverdiv">https://nuw.rptu.de/projekte/riverdiv</a>	DE; FR	Um die aquatische Biodiversität zu schützen und stoffliche Belastungen der Fließgewässer zu reduzieren, wird es in Zukunft immer wichtiger werden, dass Wasserressourcen grenzüberschreitend bewirtschaftet werden. Das grundlegende Projektziel von RiverDiv ist ein nachhaltiger Schutz der Biodiversität sowie der Gewässerqualität an der deutsch-französischen Wieslauter.	Klimawandelangepasstes Fluss-Management ; Biodiversität; Gewässerentwicklung; Refugialräume	laufendes länderübergreifendes Forschungsprojekt	Temperaturanstieg Wasser; Niedrigwasser; stoffliche Belastungen	BQK Fische und MZB; Chemie	aquatische Lebensräume und Biodiversität	wird noch erarbeitet	Detaillierte Temperaturmessungen im Längsverlauf zur Bewertung klimatisch bedingter thermischer Belastungen	Mittelfristiges Programm; Auswertungen liegen noch nicht vor	Maßnahme
Klimawandel in den Regierungsbezirken Bayerns: Auswirkungen des Klimawandels und Betroffenheit von Kommunen	Auswirkungen des Klimawandels und Betroffenheit von Kommunen	Bayerisches Landesamt für Umwelt	2022	<a href="https://www.lfu.bayern.de/klima/klimaanpassung_bayern/index.htm#steckbriefe">https://www.lfu.bayern.de/klima/klimaanpassung_bayern/index.htm#steckbriefe</a>	DE	Werkzeuge, Informationen, Handlungsempfehlungen, Praxisbeispiele sowie Maßnahmentabellen für die Umsetzung von Klimaanpassung in Bayern	Anpassung an den Klimawandel; Natürliche terrestrische und aquatische Lebensräume; Böden; Urbane Lebensräume; naturbasierte Lösungen	Ergebnis verschiedener Publikationen	Temperaturanstieg Wasser; Temperaturanstieg Luft	Belastung Gewässer und Lebewesen; Fische; Algen	Zuwanderung wärmeliebender Arten; vermehrtes Wachstum; Verdrängen;	Alarmplan Main			Maßnahme
Klimawandel Rhein-Maas - Plan zur Anpassung und Verminderung des Wasserangebots im Rhein-Maaseinzugsgebiets	Plan d'adaptation et d'atténuation au changement climatique	Comite de bassin Rhin-Meuse	2023	<a href="https://www.eau-rhin-meuse.fr/plan-dadaptation-et-dattenuation-au-changement-climatique-0">https://www.eau-rhin-meuse.fr/plan-dadaptation-et-dattenuation-au-changement-climatique-0</a>	FR	In Abhängigkeit des jeweiligen Gefährdungspotenzials schlägt der Plan konkrete Lösungen vor, in die alle mit dem Thema Wasser befassten lokalen Handlungsträger eingebunden sind. Der Plan gliedert sich in zehn strategische Achsen und ist mit quantifizierten Zielen versehen.	Anpassung an den Klimawandel; Natürliche terrestrische und aquatische Lebensräume; Böden; Urbane Lebensräume; naturbasierte Lösungen	Plan	Temperaturanstieg Luft; Temperaturanstieg Wasser; Sturzfluten und Sediment und Verunreinigungen (chemische Belastung); Niedrigwasser; Zunahme der Wasserentnahmen	Wassertemperatur; Wasserqualität; Abfluss; Zustand der aquatischen Habitate	Verschlechterung der Ökosysteme; Ausbreitung oder Verschwinden von Arten; Verschlechterung der Wasserqualität; ausgeprägtere Niedrigwasser; stärkere Hochwasser	Wiederbegrünung, Wiederherstellung von ökologischen Korridoren; Erhöhung der Versickerung/Entsiegelung; Landwirtschaftliche Systeme entwickeln, die nicht von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln abhängig sind; Reduktion des Eintrags von Mikroverunreinigungen; Entwicklung von Wiesen und Wäldern, die nachhaltig bewirtschaftet werden; Revitalisierung von Flusssufern; Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der Fließgewässer; Wiederherstellung der Ökosysteme; Wasserentnahmen bis 2030 um 10 % senken			Maßnahme

	Spalte	Inhalt der Spalte	Hinweis
Angaben zur Literatur und zur Studie	Titel der Studie	Titel der Studie	/
	Originaltitel	Titel der Studie in Originalsprache	/
	Autor/Herausgeber und Erscheinungsjahr	Referenz im Format Autor/Herausgeber und Erscheinungsjahr: z. B. Dorenbosch et al. 2022	/
	Link	Hyperlink zur Studie (Pdf, Website etc.)	/
	Land	Land, in dem die Studie durchgeführt wurde	/
	inhaltliche Zusammenfassung	Die wichtigsten Inhalte und Erkenntnisse der Studie sollen in ein bis zwei präzisen Sätzen zusammengefasst werden (fiktives Beispiel: „Die Studie befasst sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Bestände der europäischen Flusskrebse und zeigt, dass der Klimawandel im Tiefland zu schnelleren Verdrängungseffekten durch invasive Arten führt“).	/
	Keywords	Schlüsselwörter zur Studie (nicht mehr als 5)	/
	Bemerkung "Angaben zur Literatur und zur Studie"	Ergänzende Angaben, die in den Spalten A - G nicht gemacht werden können	/
Angaben "DPSIR-Ansatz"	Pressures (= Belastungen)	vgl. Tabellenblatt "Erläuterungen_DPSIR-Ansatz"	Bei mehr als einem Eintrag pro Zelle Einträge mit ";" trennen. Bitte verwenden Sie möglichst folgende Keywords: Temperaturanstieg Wasser; Temperaturanstieg Luft; Meeresspiegelanstieg; niedrigerer Grundwasserstand in der Aue; Versalzung; extreme Niederschläge; Hochwasser; Niedrigwasser; Sturzfluten und Erosion (physische Belastung); Sturzfluten und Sediment und Verunreinigungen (chemische Belastung); Zunahme der Wasserentnahmen
	States (=Zustand)	vgl. Tabellenblatt "Erläuterungen_DPSIR-Ansatz"	Bei mehr als einem Eintrag pro Zelle Einträge mit ";" trennen
	Impacts (=Auswirkungen)	vgl. Tabellenblatt "Erläuterungen_DPSIR-Ansatz"	Bei mehr als einem Eintrag pro Zelle Einträge mit ";" trennen
	Responses (=Reaktionen)	z. B. Maßnahmen (vgl. Tabellenblatt "Erläuterungen_DPSIR-Ansatz")	Bei mehr als einem Eintrag pro Zelle Einträge mit ";" trennen
		Ergänzende Angaben zu Maßnahmen aus Spalte "L", z. B. ob es sich um theoretische oder um geplante/ umgesetzte Maßnahmen handelt und ob/wie deren Finanzierung sichergestellt ist. auch Angaben zur Umsetzungsgeschwindigkeit der Maßnahme möglich: Unterscheidung zwischen den Kategorien "kurzfristige Umsetzung" (= Maßnahmen, die innerhalb eines Jahres umgesetzt werden), "mittelfristige Umsetzung" (=Maßnahmen, die innerhalb von 5 Jahren umgesetzt werden) und "langfristige Umsetzung" (=Maßnahmen, die innerhalb von 10 Jahren umgesetzt werden), oder einer Kombination aus mehreren.	Bei mehr als einem Eintrag pro Zelle Einträge mit ";" trennen.
		Bemerkung "Responses"	

Die Indikatorkategorien des aus der Umweltforschung stammenden DPSIR-Ansatzes werden in diesem Vorhaben auf die Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökologie bezogen und in Anlehnung an den Fachbericht Nummer 25/1999 der Europäischen Umweltagentur (<https://www.eea.europa.eu/publications/TEC25>) wie folgt definiert.

Hinweis: Angaben zu "Drivers" entfallen, da hier ohnehin immer "Klimawandel" anzugeben wäre.

	Indikatorname	Definition	Beispiele
"Pressures"	Belastungen/Belastungsindikatoren	Belastungen resultieren aus den Treibern und beschreiben die direkten Auswirkungen der Treiber auf die Umweltkomponenten, die wiederum zur Veränderung des Zustandes der Umwelt führen.	Zunahme der Winterniederschläge, Anstieg der Wassertemperatur (Sommer und Winter), Anstieg des Meeresspiegels (Ästuar)
"States"	Zustand/Zustandsindikator	Zustandsindikatoren beschreiben einen veränderten Umweltzustand, welcher aus den Belastungen resultiert und wiederum Auswirkungen auf weitere Umweltkomponenten hat.	Wasserabfluss, Fließgeschwindigkeiten, Wasserstände und Grundwasserstände in Überschwemmungsgebieten, Wasserqualität, Wassertemperatur Gewässerökologischer Zustand
"Impacts"	Auswirkungsindikatoren	Auswirkungsindikatoren beschreiben Veränderungen des Zustands durch die Belastungen, hier insbesondere auf die Ökologie/Lebensgemeinschaften/Arten. Die einzelnen Auswirkungen können sich gegenseitig beeinflussen.	Verlust der Biodiversität/Artensterben und Verschlechterung der Gewässerökologie; Verschmutzung von Gewässern durch Schadstoffe und Chemikalien; Algenblüte; Beeinträchtigung der Wasserverfügbarkeit und der Ökosystemdienstleistungen;
"Responses"	Reaktionsindikatoren	Reaktionsindikatoren bilden die gesellschaftliche Reaktion auf bestimmte Umweltprobleme ab, die sich auf alle vorgenannten Kategorien beziehen können, z. B. Art, Umfang und Erfolg von Strategien, Konzepten und Maßnahmen zum Erhalt, zur Anpassung oder zur Entwicklung der Umweltkomponente. Solche Reaktionen können unterschiedliche Bereiche umfassen und politischer, rechtlicher, planerischer oder finanzieller Art sein.	Maßnahmen können auf der Grundlage von Maßnahmentypen nach (1) Gesetzgebung (z. B. zur Begrenzung von Schadstoffeinträgen), (2) Politik, (3) Programm (z. B. das Programm Integriertes Flussmanagement und programmatischer Ansatz für große Gewässer in den Niederlanden), (4) Gestaltungsprojekte zur Umsetzung von Renaturierungsmaßnahmen, (5) Management (z. B. zur Verbesserung der Wassereffizienz) oder (6) Sensibilisierung (z. B. zur Bewusstseinsbildung für Wassernutzung) unterschieden werden.