Zum Fressen gern: Unsere Gewässer aus der Vogelperspektive

Cornelia W. Twining, Christine Weber, Carmen Kowarik, Martin M. Gossner, Catherine H. Graham, Blake Matthews, J. Ryan Shipley

Zusammenfassung

Fische, Invertebraten oder Makrophyten – im Gewässermanagement stehen traditionellerweise die aquatischen Lebewesen im Vordergrund. Im vorliegenden Artikel betrachten wir unsere Flüsse und Seen aus der Vogelperspektive – mit speziellem Fokus auf die insektenfressenden Vögel. Wir zeigen, dass aquatische Insekten eine besonders wichtige Nahrungsquelle sind aufgrund der spezifischen Fettsäuren, die sie enthalten. Für insektenfressende Vögel ist es deshalb entscheidend, dass in kritischen Lebensphasen, wie z. B. während der Aufzucht der Jungen, genügend aquatische Insekten vorhanden sind. Menschliche Eingriffe in die Umwelt, wie z. B. die Intensivierung der Landwirtschaft oder der Klimawandel, haben die Menge, Qualität und zeitliche Verfügbarkeit von Insekten verändert und damit auch die Nahrungsgrundlage für insektenfressende Vögel. Wir schliessen mit Überlegungen, wie das Gewässermanagement (z. B. Revitalisierung, Gewässerschutz, Einzugsgebietsmanagement) zum Schutz der Vogelvielfalt und zur Förderung des grün-blauen Nahrungsnetzes beitragen kann.

Resumé

Poissons, invertébrés ou macrophytes – dans la gestion des cours d'eau, les organismes aquatiques sont traditionnellement au premier plan. Dans le présent article, nous considérons nos rivières et nos lacs du point de vue des oiseaux – avec un accent particulier sur les oiseaux insectivores. Nous montrons que les insectes aquatiques sont une source de nourriture particulièrement importante en raison des acides gras spécifiques qu'ils contiennent. Pour les oiseaux insectivores, il est donc crucial de disposer de suffisamment d'insectes aquatiques durant les phases critiques de leur vie, comme pendant l'élevage des jeunes. Les interventions humaines dans l'environnement, telles que l'intensification de l'agriculture ou le changement climatique, ont modifié la quantité, la qualité et la disponibilité temporelle des insectes, et donc la base alimentaire des oiseaux insectivores. Nous concluons par des réflexions sur la manière dont la gestion des cours d'eau (p. ex. revitalisation, protection des eaux, gestion des bassins versants) peut contribuer à la protection de la diversité des oiseaux et à la promotion du réseau alimentaire vert et bleu.

1. Im Flug gefangen

Wer je Schwalbennester an einem Bauernhaus beobachtet hat, weiss: Die Aufzucht der Jungen ist eine besonders intensive Zeit für insektenfressende Vögel. Durchschnittlich 18 Mal pro Stunde besuchen Schwalbeneltern ihr Nest; dabei versorgen sie ihre Jungen mit ungefähr 18 Insekten (oder ~24 mg Biomasse) pro Besuch *(McCarty, 2002)*. Über die gesamte Brutzeit verfüttern Rauchschwalben ihren Jungen ca. 1 kg Trockengewicht an Insekten *(Knaus et al., 2018)*, was 50 Mal dem durchschnittlichen Körpergewicht einer erwachsenen Schwalbe entspricht.

Die meisten Singvögel ernähren sich von Insekten, besonders im Frühjahr und im Sommer während der Jungenaufzucht *(Winkler et al., 2015)*. So fressen 65 Prozent der Brutvögel in der Schweiz Insekten und/oder verfüttern sie an ihre Jungen *(Bild 1; Knaus et al., 2018)*. Einige Vogelarten, wie die Meisen, nutzen Insekten nur in Zeiten hoher Verfügbarkeit, d. h. im Frühling und Sommer; in den übrigen Jahreszeiten mit geringem Insektenvorkommen weichen sie auf andere Nahrungsquellen wie Samen oder Früchte aus. Andere Arten, wie z. B. die Mehlschwalben, fressen ausschliesslich Insekten; sie ziehen entsprechend im Winter in wärmere Gebiete, wo die Insektenverfügbarkeit höher ist. Für Insektenfresser hat ein Rückgang im Insektenvorkommen gravierende negative Auswirkungen auf das Wachstum und Überleben der Jungtiere *(Shipley et al., 2020)* und kann zu einer Bestandsabnahme führen *(Manning & Sullivan, 2021)*.

Viele insektenfressende Vogelarten sind von einem starken Rückgang betroffen, sowohl lokal als auch global. Beispielsweise haben in der Schweiz die Bestände der reinen Insektenfresser im von der Landwirtschaft geprägten Offenland in den vergangenen 25 Jahren kontinuierlich abgenommen *(Knaus et al., 2018)*. In Nordamerika sind jene Vogelarten am stärksten gefährdet, die Insekten im Flug erbeuten; sie verzeichneten in den vergangenen 40 Jahren Rückgänge von 32 bis 59 Prozent *(Nebel et al., 2020)*. Verschiedene Prozesse werden für den Rückgang verantwortlich gemacht, hauptsächlich der Klimawandel, die Intensivierung der Landwirtschaft mit einem verstärkten Einsatz von Pestiziden sowie der Verlust von Brutgebieten und Überwinterungslebensräumen *(Bowler et al., 2019)*. All diese Faktoren können interagieren und die Nahrungsgrundlage der Vögel verstärkt beeinträchtigen *(Spiller & Dettmers, 2019)*.

Insekten kommen fast überall vor, nutzen sie doch ein breites Spektrum an Lebensräumen für Fortpflanzung und Entwicklung. Viele Insektenarten verbringen ihr ganzes Leben an Land und pflanzen sich im Boden oder in Pflanzenmaterial fort. Andere Arten sind dagegen komplett aquatisch (z. B. Elmidae – Klauenkäfer). Und schliesslich gibt es viele Insektenarten, die zwischen Wasser und Land hin- und herwechseln, also auf beide Ökosysteme angewiesen sind: Dabei legen die erwachsenen Tiere ihre Eier im oder am Wasser ab, sei es in nur kurzzeitig verfügbaren Pfützen, wassergefüllten Baumlöchern im Wald

(Gossner et al., 2016), in stehenden Gewässern wie Tümpeln oder Seen oder in Fliessgewässern unterschiedlicher Grösse. Die Larven- und z. T. auch Puppenentwicklung erfolgen im Wasser, bevor die erwachsenen Insekten das Wasser verlassen (Emergenz). Insekten, die ihre frühen Lebensstadien im Wasser und ihr Erwachsenenleben an Land verbringen, sind enorm wichtig für Vögel, ganz besonders zu den Zeiten im Jahr, wo terrestrische Insekten rar sind, wie z. B. früh im Frühjahr oder im Spätherbst und Winter *(Nakano & Murakami, 2001)*. Generell gibt es einen positiven Zusammenhang zwischen dem Vorkommen von insektenfressenden Vögeln, dem Vorkommen von emergierenden Insekten und der Uferlänge von Fliessgewässern, d. h. der seitlichen Vernetzung zwischen Wasser und Land *(Schilke et al., 2020)*.

Vögel sind nicht die einzigen Insektenfresser. Fledermäuse nutzen Ultraschall, um nachtaktive Insekten zu lokalisieren *(Lam et al., 2013)*. Spinnen weben gut versteckte Netze, um fliegende Insekten zu erbeuten *(Kato et al., 2004)* oder sie überraschen die emergierenden Insekten an der Uferlinie. Wasserspitzmäuse tauchen sogar im Wasser, um Insektenlarven zu fangen *(Churchfield, 1985)*, und eine Vielzahl an Fischen ernährt sich sowohl von Larven aquatischer Insekten wie auch von terrestrischen Insekten, die ins Wasser fallen *(Nakano & Murakami, 2001)*. Insekten sind somit von grosser Bedeutung für das Nahrungsnetz sowohl im Wasser als auch im umgebenden Land.

2. Quantität ist nicht alles

Aquatisch oder terrestrisch – für Insektenfresser spielt es eine Rolle, woher ein Insekt kommt, bestimmt doch der Ursprung seine Qualität als Nahrungsbestandteil. Unterschiede im Nährwert der Insekten entstehen aufgrund von Unterschieden in der Zusammensetzung der Fettsäuren an der Basis des Nahrungsnetzes: Aquatische Algen sind die Hauptproduzenten von langkettigen ungesättigten Omega-3-Fettsäuren (im Englischen als n-3 LCPUFA / long-chain polyunsaturated fatty acids bezeichnet). Gefässpflanzen sind nicht in der Lage, diese Substanzen zu produzieren. Langkettige Fettsäuren haben einen wichtigen Einfluss auf das Wachstum von Tieren, ihre Fortpflanzung und das Überleben, u. a. weil sie in der Hormonregulation wirken, die Immunabwehr steuern oder am Aufbau von Nervengewebe beteiligt sind (siehe *Box 1; Twining et al., 2016*). Aquatische Insekten ernähren sich von den Algen, die auf den Sedimenten am Gewässergrund leben und v. a. in Seen auch in der Wassersäule vorkommen, oder sind Räuber und fressen ihrerseits andere Algenfresser.

«Du bist, was Du isst.» Aufgrund der Unterschiede in ihrer Nahrungsgrundlage unterscheiden sich aquatische und terrestrische Insekten in ihrer Fettsäurezusammensetzung *(Bild 2a)*. Diese Unterschiede sind ziemlich ausgeprägt: So enthalten viele Insekten, die ihre Entwicklung im Wasser durchlaufen, 10 bis 20 Mal mehr langkettige Omega-3-Fettsäuren als die terrestrischen Insekten *(Twining et al., 2021; Shipley et al., 2022)*. Der Gehalt an langkettigen Omega-3-Fettsäuren von einer Gewichtseinheit an Eintagsfliegen (Ephemeroptera) entspricht ungefähr jenem von 10 Einheiten von terrestrischen Käfern (Coleoptera) oder 35 Einheiten von Schnabelkerfen (z. B. Wanzen, Blattläusen, Zikaden; Hemiptera). Das bedeutet, dass ein Vogel 10 bis 35 Mal mehr von diesen terrestrischen Beutetieren fangen und fressen muss, um dieselbe Menge an Omega-3-Fettsäuren aufzunehmen, die eine Einheit Eintagsfliegen enthält *(Shipley et al., 2022)*. Selbst wenn Vögel und andere Insektenfresser den grössten Teil an Nahrung (= Biomasse = Energie) von terrestrischen Insekten gewinnen, sind sie für ihre Versorgung mit langkettigen Omega-3-Fettsäuren dennoch stark auf aquatische Insekten angewiesen *(Bild 2b; Twining et al., 2019)*.

Für Nestlinge ist die Versorgung mit langkettigen Omega-3-Fettsäuren besonders wichtig. Werden die Nestlinge mit Nahrung gefüttert, die reich an langkettigen Omega-3-Fettsäuren ist, so wachsen sie schneller und können beinahe doppelt so schwer werden wie Nestlinge, die weniger langkettige Omega-3-Fettsäuren erhalten *(Twining et al., 2019)*. Wachstum und Gewichtszunahme sind sehr wichtig für Nestlinge, damit sie fliegen lernen und ihr Nest verlassen können, um nicht Räubern zum Opfer zu fallen. Nestlinge, die Zugang zu aquatischen Insekten haben, die reich an langkettigen Omega-3-Fett-

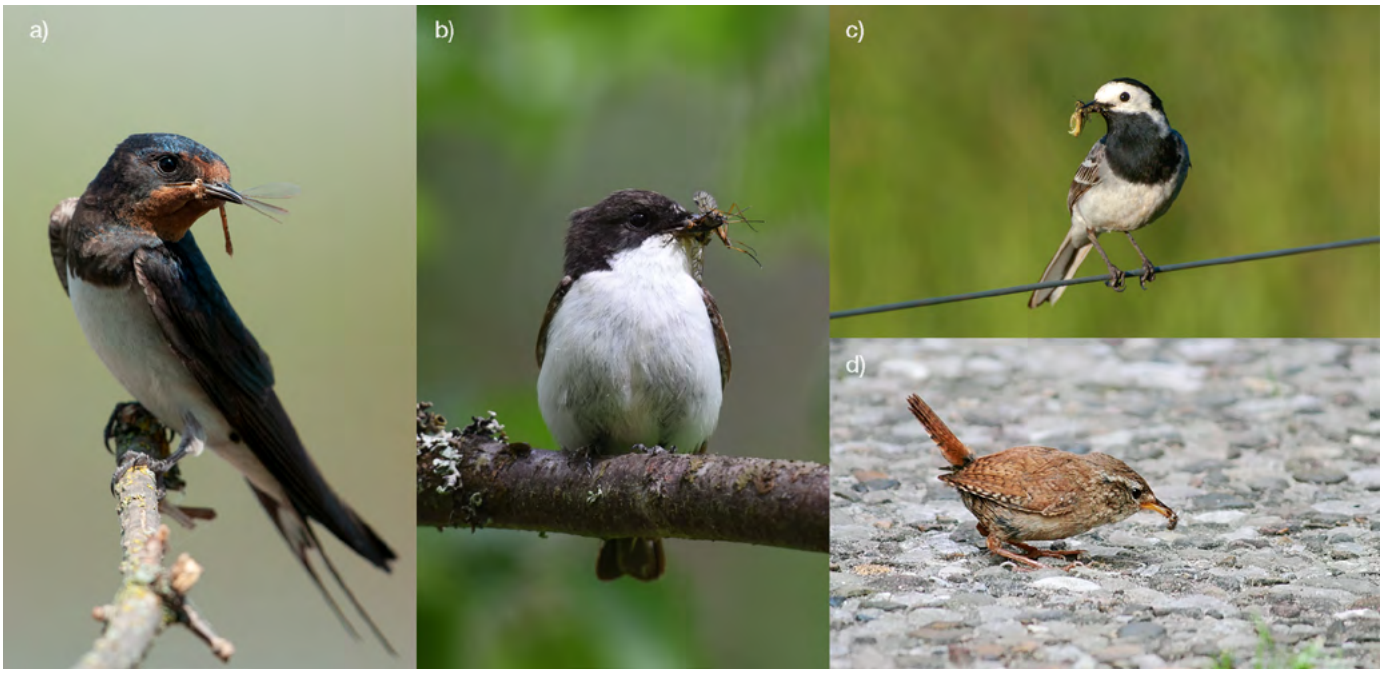

Bild 1: Beispiele von insektenfressenden Vögeln: a) Rauchschwalbe (*Hirundo rustica*; © Christian Schmalhofer); b) Trauerschnäpper (*Ficedula hypoleuca;* © Martti Perämäki); c) Bachstelze (*Motacilla alba*; © Michael Gerber); d) Zaunkönig (*Troglodytes troglodytes*; © Losch/ Wikimedia Commons).

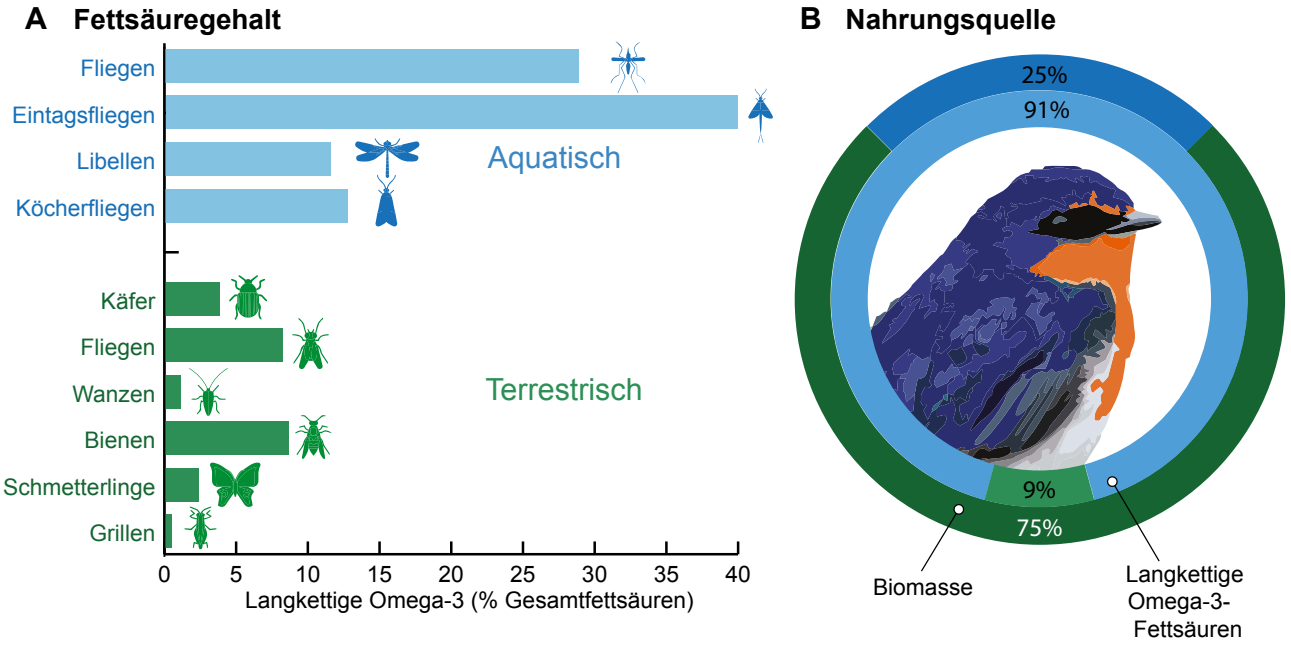

Bild 2: A. Gehalt an langkettigen ungesättigten Omega-3-Fettsäuren in aquatischen und terrestrischen Insekten (Daten aus Shipley et al., 2022). B. Nahrungszusammensetzung nach Nahrungsquelle. Blaue Kreisflächen symbolisieren aquatische Herkunft und grüne Kreisflächen terrestrischen Ursprung der Biomasse (= Energie; äusserer Kreis) und der langkettigen Omega-3-Fettsäuren (innerer Kreis). Ein hypothetischer Insektenfresser, der sich zu 75 Prozent von terrestrischen Insekten ernährt, bezieht dennoch 91 Prozent seiner langkettigen Omega-3-Fettsäuren von aquatischen Insekten.

säuren sind, überstehen mit höherer Wahrscheinlichkeit die Nestlingsphase *(Twining et al., 2018)*. Ein höheres Gewicht erhöht zudem die Chance, dass Jungvögel auch nach dem Verlassen des Nests überleben und selber Nahrung suchen können.

3. Aufs Timing kommt es an

Für viele Tiere liegt der optimale Zeitpunkt für die Partnersuche und Fortpflanzung innerhalb eines engen Zeitfensters. Typischerweise fällt die Fortpflanzung in eine Zeitspanne, in der Schlüsselressourcen (z. B. Nahrung) für die Aufzucht der Jungen in grossen Mengen vorhanden sind. Eine Reduktion oder ein Fehlen der Schlüsselressourcen führt zu einer Abnahme der Überlebenswahrscheinlichkeit der Elterntiere oder ihrer Jungen. In den gemässigten Breiten ist die Verfügbarkeit von aquatischen und terrestrischen Insekten nicht konstant über das Jahr. Vielmehr variiert sie, v. a. in Abhängigkeit von Temperatur, Niederschlag und Licht *(Bild 3; Winkler et al., 2013; Shipley et al., 2020)*. Die Emergenz von aquatischen Insekten kann gepulst und hoch synchronisiert sein über ein paar wenige Tage *(Walters et al., 2018)* oder Stunden (z. B. mehr als 60 Prozent der Emergenz innerhalb von zwei Stunden, *Jackson, 1988*). Dies führt zu kurzen Phasen, in denen qualitativ hochwertige Nahrung für Insektenfresser massenhaft verfügbar ist. Generell erreicht die Emergenz der aquatischen Insekten ihre höchsten Werte im Frühsommer und nimmt zum Spätsommer hin stark ab, wohingegen terrestrische Insekten ihren Höchststand später im Sommer erreichen *(Nakano & Murakami, 2001; Twining et al., 2018)*. Dabei gibt es aber starke Unterschiede, sowohl zwischen den Regionen wie auch den Höhenlagen, zwischen Fliessgewässern und Seen und in Abhängigkeit der Wassertiefe *(Mathieu-Resuge et al., 2021)*. Beispielsweise emergieren mehr Insekten aus seichteren Bereichen in Seen, in denen das Sonnenlicht den Grund erreicht und damit Algenwachstum ermöglicht wird, als in tiefen Bereichen, in denen das Licht nicht bis zum Grund vordringen kann *(Mathieu-Resuge et al., 2021)*. Zudem sind kleine Fliessgewässer häufig schon früh im Frühjahr produktiv; mit dem Blattausschlag nimmt die Beschattung zu und verlangsamt dadurch das Wachstum von Algen, die als Nahrungsgrundlage für aquatische Insekten dienen *(Gratton & Zanden, 2009)*. Auch die Aktivität der Insekten ist nicht immer gleich, sondern von Temperatur und Niederschlag abhängig *(Winkler*

Box 1: In aller Munde – Fettsäuren

Sämtliche Tiere, also auch wir Menschen, brauchen verschiedene Typen von Fettsäuren für eine Vielzahl an Funktionen. Beispielsweise werden langkettige ungesättigte Omega-3-Fettsäuren nicht nur für den Aufbau von Hirn oder Augen benötigt, sondern auch für die Regulation der Immunabwehr, der Fortpflanzung oder des Herz-Kreislauf-Systems. Langkettige ungesättigte Fettsäuren sind Fettsäuren, die aus 20 oder mehr Kohlenstoffatomen bestehen, die untereinander über Doppelbindungen verknüpft sind. Langkettige Omega-3-Fettsäuren haben ihre erste Doppelbindung drei Kohlenstoffatome entfernt vom Ende der Kohlenstoff-Kette. Einige Tiere, zum Beispiel Pflanzenfresser wie Kühe oder Hühner, sind in der Lage, langkettige Omega-3-Fettsäuren aus kürzeren Omega-3-Fettsäuren aufzubauen (= Synthese), wie sie in terrestrischen Pflanzen enthalten sind.

Andere Tiere, so auch Fleischfresser wie Wiesel oder Wildkatze, müssen dagegen alle langkettigen Omega-3-Fettsäuren direkt aus der Nahrung gewinnen. Menschen erhalten ihre langkettigen Omega-3-Fettsäuren in der Regel aus einer Kombination von Nahrungsmitteln wie Fisch, Eiern oder Fleisch sowie aus der Synthese.

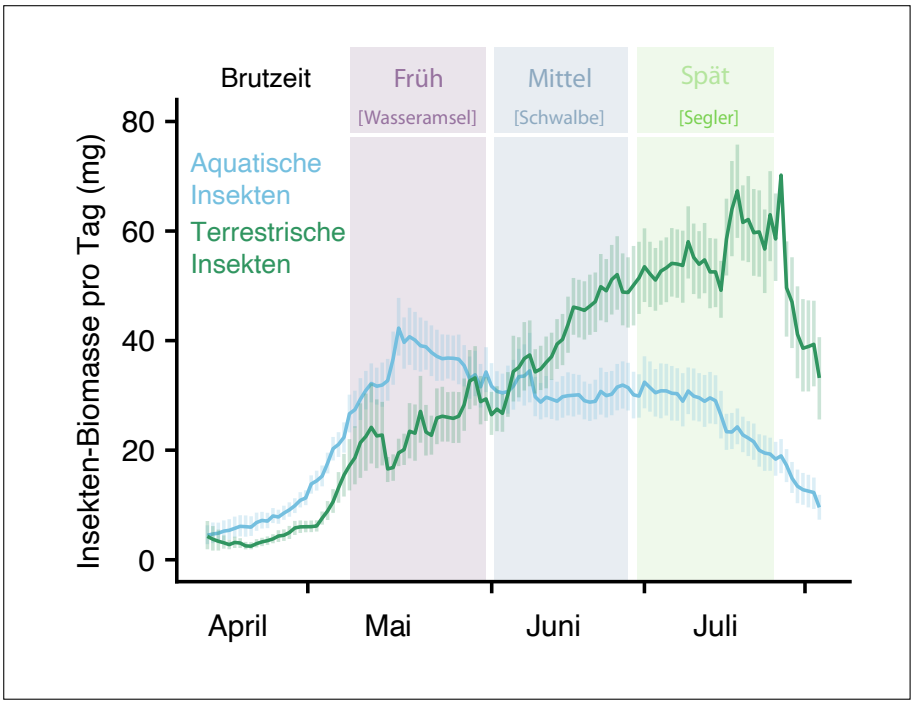

Bild 3: Biomasse an aquatischen Insekten (blau) und terrestrischen Insekten (grün) pro Tag im Verlauf der Brutsaison an einem Untersuchungsstandort in Ithaca, New York, USA. Dargestellt ist der Mittelwert aus dem Untersuchungszeitraum zwischen 1989 bis 2014 (Kurve) sowie die Schwankungsbereiche zwischen den Jahren (Balken mit dem 95-Prozent-Vertrauensintervall). Insektendaten aus Twining et al. (2018) und Shipley et al. (2022). Beispiele von Arten mit frühem, mittlerem oder spätem Brutzeitpunkt basierend auf generellen Mustern von repräsentativen Arten/Gruppen der Schweiz (www.vogelwarte.ch).

et al., 2013; Shipley et al., 2020). Beispielsweise besteht für viele fliegende aquatische und terrestrische Insekten ein enger Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Aktivitätslevel. Dadurch kann es passieren, dass Insekten zwar emergieren, für Vögel, die ihre Beute im Flug fangen, aber dennoch unerreichbar sind. Phasen mit hoher Emergenz von Insekten, aber tiefen Temperaturen können sich für diese Vogelarten entsprechend schnell von einem Überfluss in einen Mangel verwandeln *(Winkler et al., 2013; Shipley et al., 2020)*.

Insektenfressende Vögel haben sich an die jahreszeitlichen Schwankungen in der Insektenverfügbarkeit angepasst, indem sie versuchen, die Zeit der Brut und der Jungenaufzucht an den Zeitpunkt der Emergenz der Insekten zu koppeln. Schwalben und andere insektenfressende Vögel gehören oft zu den Zugvögeln, die am frühesten in ihre Brutgebiete zurückkehren und mit dem Eierlegen beginnen. Dies erlaubt ihnen, im Frühling und Frühsommer von den grossen Mengen an emergierenden aquatischen Insekten zu profitieren. So haben Schwalben, die früh im Frühling schlüpfen, wenn aquatische Insekten häufig sind, eine höhere Überlebenswahrscheinlichkeit bis zum Verlassen des Nests als gleichaltrige Artgenossen, die später im Jahr schlüpfen, wenn terrestrische Insekten häufig sind *(Twining et al., 2018)*. Allerdings birgt ein früher Brutzeitpunkt auch die Gefahr, dass kalte Temperaturen vorherrschen und überhaupt keine aquatischen Insekten verfügbar sind *(Winkler et al., 2013; Shipley et al., 2020)*. Insektenfressende Vögel müssen ihren Brutzeitpunkt entsprechend umsichtig festlegen; sie müssen abwägen zwischen den Risiken eines zu frühen Brutzeitpunkts mit unvorhersehbaren Temperaturen resp. Insektenverfügbarkeiten und jenen eines zu späten Brutzeitpunkts, an dem die Insektenemergenz, v. a. der aquatischen Insekten, bereits vorüber ist.

4. Das Menü verändert sich

Die zeitliche Verfügbarkeit und die Qualität von Insekten auf der Speisekarte der Vögel in der Schweiz und der ganzen Welt wandelt sich als Folge menschlicher Eingriffe in die Umwelt, wie z. B. der Klimaerwärmung oder der veränderten Landnutzung. So sind Insekten und Vögel generell früher im Jahr aktiv und starten entsprechend auch früher mit der Fortpflanzung; diese Verfrühung verläuft allerdings bei den Insekten in der Regel schneller als bei den Vögeln *(Shipley et al., 2022)*.

Die Veränderungen im Menü der Vögel können wir anhand einer einzigartigen Datenreihe aus Nordamerika aufzeigen, in der während über 30 Jahren täglich an derselben Stelle die Biomasse der vorkommenden aquatischen und terrestrischen Insekten bestimmt wurde *(Bild 4; Shipley et al., 2022)*. Verglichen mit den 1990er Jahren findet man heute schon früher im Jahr mehr Insekten (inkl. aquatische Insekten), wohingegen später im Jahr weniger Insekten vorkommen. Daraus ergibt sich, dass die Nahrungsverfügbarkeit für frühbrütende Vögel und ihre Jungen nun höher ist, während spätbrütenden Vögeln vor allem weniger qualitativ hochwertige Nahrung für ihre Jungen zur Verfügung steht. Brut und Insektenverfügbarkeit sind für diese Arten entsprechend nicht mehr gekoppelt *(Visser et al., 2006)*.

Gewisse Vogelarten haben ihren Bruttermin als Reaktion auf diese Veränderungen in der Ressourcenverfügbarkeit nach vorne verlegt; ihnen droht durch den früheren Brutzeitpunkt aber das oben erwähnte Risiko von ungünstigen Wetterbedingungen, was zu bedeutend erhöhter Mortalität bei den Jungen führen kann *(Shipley et al., 2020)*. Andere Arten, wie die Zugvögel, die lange Distanzen zurücklegen, haben keine Möglichkeit, die Bedingungen an den Brutplätzen vorauszusehen; sie können ihren Bruttermin entsprechend nicht nach vorne verlegen *(Both & Visser, 2001)*.

Zusätzlich zu den Veränderungen im Zeitpunkt der Insektenverfügbarkeit kann der Klimawandel auch den Nährwert von aquatischen Insekten verringern, und zwar durch Veränderungen an der Basis des Nahrungsnetzes. Es wird erwartet, dass höhere Temperaturen den Gehalt an langkettigen Omega-3-Fettsäuren in den Algen reduzieren *(Colombo et al., 2020)*. Dieser Effekt überträgt sich über das Nahrungsnetz und kann zu einem verringerten Gehalt an langkettigen Omega-3-Fettsäuren in den emergierenden Insekten führen.

Veränderungen in der Landnutzung wie z. B. im Zuge der Intensivierung der Landwirtschaft oder der Urbanisierung, können die Insekten an Land wie im Wasser beeinflussen *(Cavallaro et al., 2019)*. Der Einsatz von Pestiziden, die häufige Mahd des Grases oder das Anlegen von Monokulturen (z. B. Getreide) reduzieren die Biomasse und die Vielfalt an terrestrischen Insekten *(Raven & Wagner, 2021)*. Man vermutet, dass der weitverbreitete Pestizid-Einsatz sowie der Verlust von naturnahem Grasland mitverantwortlich sind für den Rückgang von Insekten und Vögeln in Eu-

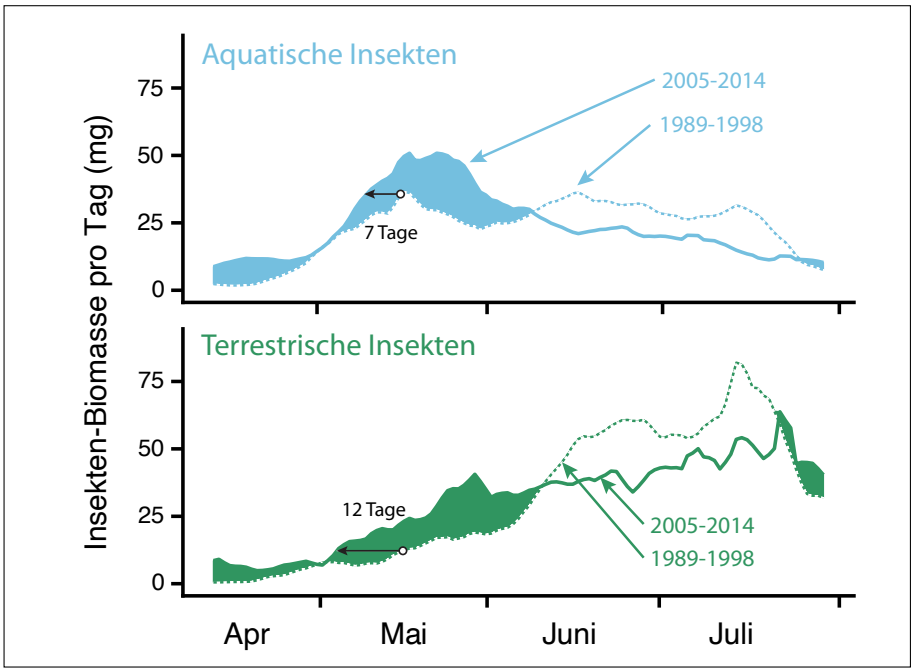

Bild 4: Verfügbarkeit von aquatischen und terrestrischen Insekten, angegeben als Biomasse pro Tag, an einem Untersuchungsstandort in Ithaca, New York, USA, zwischen 1989 bis 1998 (gepunktete Linie) und 2005 bis 2014 (ausgezogene Linie). Zuwachs (gefüllte Fläche zwischen den Linienschnittpunkten) und Rückgang (weisse Fläche zwischen den Linienschnittpunkten) in der Insektenbiomasse als Folge der phänologischen Verfrühung. Spezifische Beispiele von Verfrühungen (in Tagen) werden zur Verdeutlichung angegeben (Pfeile). Die Datenreihe mit den Insektenbiomassen pro Tag stammen aus Shipley et al. (2022).

ropa und weltweit *(Wagner et al., 2021)*. Pestizide, die auf Landwirtschaftsland zum Einsatz kommen, sind auch für aquatische Insekten schädlich: Sie können die Biomasse reduzieren und die Artenzusammensetzung der emergierenden aquatischen Insekten verändern *(Barmentlo et al., 2021)*. Die Insekten, die überleben und emergieren, können schwer belastet sein, so dass sich insgesamt der Fluss an Pestiziden für die Insektenfresser erhöht *(Kraus et al., 2021)*. Zusätzlich zu Pestiziden sind Gewässer im Landwirtschaftsgebiet auch von einem erhöhten Einschwemmen von Feinsedimenten und anorganischen Nährstoffen betroffen (z. B. von Dünger oder Gülle; *Burdon et al., 2013*). Der Feinsedimenteintrag in Fliessgewässer kann die Biomasse aquatischer Insekten reduzieren sowie deren Artenzusammensetzung verändern *(Burdon et al., 2013)*, und die Eutrophierung aufgrund übermässigen Nährstoffeintrags kann ebenfalls die Artenzusammensetzung verändern und damit wahrscheinlich auch den Fluss von wertvollen Nährstoffen wie den langkettigen Omega-3-Fettsäuren *(Burdon, 2020)*. Es wird angenommen, dass die kombinierten Effekte aus der Intensivierung der Landwirtschaft zu einem Rückgang der EPT-Arten führen (Eintagsfliegen/Ephemeroptera, Steinfliegen/Plecoptera und Köcherfliegen/Trichoptera), wohingegen kleine Insekten wie die Chironomiden (Zuckmücken) in der Häufigkeit zunehmen *(Raitif et al., 2019)*. Da EPT-Arten meist grösser sind (und damit einfacher zu sehen und zu erbeuten) und einen höheren Gehalt an langkettigen Omega-3-Fettsäuren aufweisen als beispielsweise die kleinen Chironomiden, wird ihr Rückgang deutliche Auswirkungen auf die Insektenfresser haben.

Veränderungen im Abflussregime und der Struktur der Fliessgewässer können die Verfügbarkeit an emergierenden Insekten sowie den Zeitpunkt der Emergenz beeinflussen – mit grossen Auswirkungen auf die Insektenfresser *(Muehlbauer et al., 2020)*. Beispielsweise legt eine Studie aus Nordschweden nahe, dass die Wasserkraftnutzung zur Elektrizitätsproduktion die Vogeldichten verringern kann, da sie die Verfügbarkeit an aquatischen Insekten reduziert *(Jonsson et al., 2012)*: Zur Brutzeit war die kumulative Dichte an Vögeln, die sich von grossen Insekten und/oder Samen resp. kleinen Insekten ernährten, in hydroelektrisch genutzten Gewässern reduziert, verglichen mit freifliessenden Gewässern. Die Wasserkraftnutzung kann auch das Temperaturregime eines Gewässers verändern, was sich auf den Zeitpunkt und die Dauer der Emergenz von Insekten auswirkt *(Anderson et al., 2019)*. Menschliche Eingriffe in die Gewässerstruktur (z. B. Kanalisierung, Uferverbau), die die Ufer steiler und höher machen und die Gerinnekomplexität verringern, können das Menü für Insektenfresser auch verändern: Hohe, hart verbaute Ufer können unüberwindbare Barrieren für die Ausbreitung aquatischer Insekten darstellen und zu einer räumlichen Trennung von Räubern und ihrer Beute führen *(Muehlbauer et al., 2014)*. Auch eine Reduktion der Gerinnekomplexität kann die Interaktionen zwischen Räubern und Beutetieren reduzieren *(Paetzold & Tockner, 2005)*, wohingegen Fliessgewässer mit einer längeren und komplexeren Uferlinie auch mehr Vögel beherbergen können *(Iwata et al., 2010)*.

5. Unsere Biodiversität schützen

Zum Schutz der Biodiversität müssen wertvolle Lebensräume erhalten werden, im Wasser wie an Land. Für insektenfressende Vögel ist es entscheidend, dass aquatische Lebensräume, und insbesondere Tümpel und Feuchtgebiete, nicht im Zuge der Urbanisierung oder Intensivierung der Landwirtschaft zerstört werden (z. B. Zuschütten von Tümpeln). Auf regionaler Ebene kann das Vorhandensein von Tümpeln die Bestandesstabilität von Insektenfressern erhöhen *(Berzins et al., 2021)*. Der Eintrag von Feinsedimenten, Nährstoffen oder Pestiziden aus der Landwirtschaft in die Gewässer soll möglichst verhindert werden, da sie die Menge sowie die Qualität von emergierenden aquatischen Insekten reduzieren können. Der Erhalt und die Förderung einer naturnahen Ufervegetation entlang der Gewässer kann helfen, den Eintrag zu reduzieren (Daniels & Gilliam, 1996), ebenso wie ein umsichtig gewählter Zeitpunkt des Pflügens oder des Einsatzes von Dünger oder Gülle *(Kelly et al., 2019)*.

Die Revitalisierung beeinträchtigter Tümpel sowie die Schaffung neuer Tümpel kann die Emergenz von Insekten und damit die Diversität von Vogelgemeinschaften fördern, insbesondere in landwirtschaftlich genutzten Regionen, wo Tümpel zugeschüttet wurden oder aufgrund von fehlendem Unterhalt verlandeten. Im Osten von England wurden das Vorkommen von emergierenden Insekten durch das Freilegen von Tümpeln um Faktor 18 erhöht verglichen mit verlandeten Tümpeln, bei der Biomasse sogar um Faktor 25 *(Lewis-Phillips et al., 2020)*. Das Vorkommen wie auch die Artenzahl an Vögeln zeigten einen positiven Zusammenhang mit der Insektenemergenz.

Beim Bau von Revitalisierungsprojekten sind mögliche negative Auswirkungen

auf den Vogelbestand zu beachten *(Heinrich et al., 2014)*. Die alleinige Revitalisierung von Strukturen reicht oft nicht aus, um die volle Funktionsfähigkeit des Gewässer-Ökosystems wiederherzustellen. Zusätzlich gilt es, auch Ökosystem-Prozesse wie das Abflussregime zu berücksichtigen. Dies zeigt eine Studie zu einem Auenrevitalisierungsprojekt im unteren Colorado (USA), in welcher das Vorkommen von Insekten als Nahrungsgrundlage für Vögel untersucht wurde *(Rubin et al., 2019)*. Aufgrund der Wassernutzung für Bewässerung und Elektrizitätsproduktion wird die Aue nicht ausreichend überflutet. Dies führt dazu, dass am Ort der Aufwertungsmassnahmen verglichen mit den Flächen unmittelbar an der Wasserlinie 96 Prozent weniger aquatische Insekten, 75 Prozent weniger Insekten insgesamt und 50 Prozent weniger Arten vorkommen. Die aufgewerteten Auenbereiche haben entsprechend für insektenfressende Vögel nur begrenzt Wirkung.

Aquatische Insekten können, abgesehen von ihren Vorteilen bzgl. Nährwert, auch eine Quelle von Schadstoffen sein für Insektenfresser an Land wie Spinnen, Reptilien oder Vögel, insbesondere in Gebieten mit hohem menschlichem Nutzungsdruck *(Richmond et al., 2018)*. Entsprechend wichtig ist es, dass Revitalisierungsprojekte, wo immer möglich, auch die Reduktion oder Sanierung von Schadstoffen beinhalten, wie z. B. von PCBs (Polychlorierten Biphenylen), Schwermetallen, Pestiziden oder Mikroplastik. Dies ist besonders zentral für Schadstoffe wie Methylquecksilber *(Morel et al., 1998)* oder zahlreiche PCBs *(Walters et al., 2016)*, welche sich im Nahrungsnetz verstärken oder akkumulieren können, was zu einer Vielzahl an negativen Auswirkungen für die insektenfressenden Vögel führt *(Hallinger et al., 2010)*. Organische Schadstoffe wie PCBs oder Neonicotinoid-Pesitizide sind ein besonderes Problem, da sie, im Gegensatz zu den Metallen, während der Entwicklung und Emergenz der aquatischen Insekten nicht mit der Häutung abgeworfen werden *(Kraus et al., 2014)*.

Das komplexe Wechselspiel zwischen aquatischen und terrestrischen Organismen und Energieflüssen innerhalb des Nahrungsnetzes zeigt die enge Kopplung von zwei Ökosystemen, die bisher oft als diskrete, separate Teile der Landschaft wahrgenommen, untersucht und gemanagt wurden. In den vergangenen Jahren rückten der Schutz und die Revitalisierung der blau-grünen Infrastruktur und Biodiversität zunehmend ins Bewusstsein *(siehe Box 2)*. Voraussetzung dafür ist, dass alle involvierten Beteiligten eine gesamtheitliche Perspektive hinsichtlich der betroffenen Landschaften und Organismen annehmen und somit Zusammenarbeiten über disziplinäre Grenzen und Berufsfelder hinweg etabliert werden *(Moor et al., 2021)*.

Die folgenden vier Punkte sind von besonderer Relevanz für Gewässerforschung und -management:

1. Viele Gewässer im landwirtschaftsgeprägten Offenland sind stark beeinträchtigt oder wurden ganz zerstört. Insektenfressende Vögel zeigen hier einen starken Rückgang in der Schweiz und im übrigen Europa *(Bowler et al., 2019)*. Die Bedeutung von emergierenden aquatischen Insekten hinsichtlich Nähr- und Energiewert für diese Arten ist zu klären.
2. Insekten können auch Schadstoffe enthalten, so z. B. Pestizide. Entsprechend wichtig ist es, die Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Verfügbarkeit von emergierenden aquatischen Insekten als Nahrung für Insektenfresser zu verstehen, sowohl hinsichtlich der nützlichen Bestandteile wie langkettigen Omega-3-Fettsäuren wie auch der schädlichen Stoffe.
3. Viele Schweizer Vogelarten verschieben ihre Aktivität aufgrund des Klimawandels zunehmend in höhere Lagen: So hat der Bestand verschiedener Arten in tieferen Lagen abgenommen, während er weiter oben zunahm; die Schweizer Brutvögel brüten heute durchschnittlich 24 m höher als noch in den 1990er Jahren *(Knaus et al., 2018)*. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel ist einerseits zu klären, inwiefern insektenfressende Vögel früher brüten, als Reaktion auf die früher stattfindende Emergenz der aquatischen Insekten. Anderseits gilt es auch die Veränderung in der räumlichen Verbreitung der Vogel- und Insektenarten zu untersuchen.
4. Massnahmen zum Schutz und zur Revitalisierung der Gewässer und der sie umgebenden terrestrischen Landschaften haben das grosse Potential, das Lebensraumangebot und damit das Überleben und die Fortpflanzung sowohl der Vögel wie auch der aquatischen Insekten zu verbessern – und folglich auch die vielen wichtigen Verbindungen zwischen den beiden Organismengruppen. Im Idealfall wird eine grün-blaue Perspektive bereits in die Planung von Schutz- oder Revitalisierungsmassnahmen eingebracht. Dies kann den Projektverantwortlichen und ihren Teams helfen, frühzeitig Unklarheiten und Missverständnisse zu klären, die sich aus den unterschiedlichen fachlichen Hintergründen ergeben. Zudem lassen sich explizite und konkrete Projektziele formulieren. Dadurch kann eine Wirkungskontrolle aufgegleist werden, in der sich die gesetzten Ziele anhand ausreichender Daten zur Vogel- und Insekten-Fauna auch überprüfen lassen *(Weber et al., 2017; Sprecher et al., 2020)*.

Im vorliegenden Artikel wurde aufgezeigt, dass naturnahe Fliessgewässer, Tümpel oder Seen und ihr Umland für Vögel ein «All-you-can-eat-Buffet in Bioqualität» darstellen, d. h. ein Lebensraum, in welchem sie überdurchschnittlich wertvolle Nahrung in grossen Mengen vorfinden. Daneben bieten naturnahe Gewässer den Vögeln auch Lebensraum, Brutplätze, Schutz vor Räubern und Rastplätze während des Vogelzuges. Der Schutz naturnaher Gewässer wie auch die Revitalisierung beeinträchtigter Systeme stellt entsprechend einen wichtigen Beitrag zum Schutz der fantastischen Vogelvielfalt dar.

Box 2: Die BGB-Initiative von Eawag und WSL

Die biologische Vielfalt ist für das menschliche Leben und Wohlergehen unverzichtbar. Neben dem Klimawandel ist der Verlust an Biodiversität und den damit verbundenen Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen eine der grössten Herausforderungen für die Menschheit. Um diesen Verlust einzudämmen oder gar umzukehren, sind weitere Forschung und Massnahmen von entscheidender Bedeutung. Der ETH-Rat finanziert darum die Forschungsinitiative Blue-Green Biodiversity (BGB) an der Schnittstelle von Wasser und Land, um dieses drängende wissenschaftliche und gesellschaftliche Problem anzugehen. Er will damit die interdisziplinäre Biodiversitätsforschung zwischen WSL und Eawag stärken, aber auch innerhalb des ETH-Bereichs und darüber hinaus. Ziel ist es, die Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Artenverlust und den Veränderungen der Biodiversität so schnell wie möglich zu verstehen und darauf zu reagieren *(Moor et al., 2021)*.

Quellen:
Anderson, H.E., Albertson, L.K., Walters, D.M. (2019). Thermal variability drives synchronicity of an aquatic insect resource pulse. Ecosphere 10: e02852.
Barmentlo, S.H., Schrama, M., de Snoo, G.R., van Bodegom, P.M., van Nieuwenhuijzen, A., Vijver, M.G. (2021). Experimental evidence for neonicotinoid driven decline in aquatic emerging insects. Proceedings of the National Academy of Sciences 118: e2105692118.
Berzins, L.L., Mazer, A.K., Morrissey, C.A., Clark, R.G. (2021). Pre-fledging quality and recruitment in an aerial insectivore reflect dynamics of insects, wetlands and climate. Oecologia 196: 89–100.
Both, C., Visser, M.E. (2001). Adjustment to climate change is constrained by arrival date in a long-distance migrant bird. Nature 411: 296–298.
Bowler, D.E., Heldbjerg, H., Fox, A.D., de Jong, M., Böhning-Gaese, K. (2019). Long-term declines of European insectivorous bird populations and potential causes. Conservation Biology 33: 1120–1130.
Burdon, F.J. (2020). Agriculture and mining contamination contribute to a productivity gradient driving cross-ecosystem associations between stream insects and riparian arachnids. In: Contaminants and Ecological Subsidies: The Land-Water Interface (eds. Kraus, JM, Walters, DM & Mills, MA). Springer International Publishing Cham, pp. 61–90.
Burdon, F.J., McIntosh, A.R., Harding, J.S. (2013). Habitat loss drives threshold response of benthic invertebrate communities to deposited sediment in agricultural streams. Ecological Applications 23: 1036–1047.
Cavallaro, M.C., Main, A.R., Liber, K., Phillips, I.D., Headley, J.V., Peru, K.M. et al. (2019). Neonicotinoids and other agricultural stressors collectively modify aquatic insect communities. Chemosphere 226: 945–955.
Churchfield, S. (1985). The feeding ecology of the European Water shrew. Mammal Review 15: 13–21.
Colombo, S.M., Rodgers, T.F.M., Diamond, M.L., Bazinet, R.P., Arts, M.T. (2020). Projected declines in global DHA availability for human consumption as a result of global warming. Ambio 49: 865–880.
Daniels, R., Gilliam, J. (1996). Sediment and chemical load reduction by grass and riparian filters. Soil Science Society of America Journal 60: 246–251.
Gossner, M.M., Lade, P., Rohland, A., Sichardt, N., Kahl, T., Bauhus, J. et al. (2016). Effects of management on aquatic tree-hole communities in temperate forests are mediated by detritus amount and water chemistry. Journal of Animal Ecology 85: 213–226.
Gratton, C., Zanden, M.J.V. (2009). Flux of aquatic insect productivity to land: comparison of lentic and lotic ecosystems. Ecology 90: 2689–2699.
Hallinger, K.K., Zabransky, D.J., Kazmer, K.A., Cristol, D.A. (2010). Birdsong differs between mercury-polluted and reference sites. The Auk 127: 156–161.
Heinrich, K.K., Whiles, M.R., Roy, C. (2014). Cascading ecological responses to an in-stream restoration project in a midwestern river. Restoration Ecology 22: 72–80.
Iwata, T., Urabe, J., Mitsuhashi, H. (2010). Effects of drainage-basin geomorphology on insectivorous bird abundance in temperate forests. Conservation Biology 24: 1278–1289.
Jackson, J.K. (1988). Diel emergence, swarming and longevity of selected adult aquatic insects from a Sonoran Desert stream. American Midland Naturalist: 344–352.
Jonsson, M., Strasevicius, D., Malmqvist, B. (2012). Influences of river regulation and environmental variables on upland bird assemblages in northern Sweden. Ecological Research 27: 945–954.
Kato, C., Iwata, T., Wada, E. (2004). Prey use by web-building spiders: stable isotope analyses of trophic flow at a forest-stream ecotone. Ecological Research 19: 633–643.
Kelly, P.T., Renwick, W.H., Knoll, L., Vanni, M.J. (2019). Stream nitrogen and phosphorus loads are differentially affected by storm events and the difference may be exacerbated by conservation tillage. Environmental Science & Technology 53: 5613–5621.
Knaus, P., Antoniazza, S., Wechsler, S., Guélat, J., Kéry, M.M.M., Strebel, N. et al. (2018). Schweizer Brutvogelatlas 2013–2016: Verbreitung und Bestandsentwicklung der Vögel in der Schweiz und im Fürstentum Liechtenstein. Schweizerische Vogelwarte, Sempach.
Kraus, J.M., Kuivila, K.M., Hladik, M.L., Shook, N., Mushet, D.M., Dowdy, K. et al. (2021). Cross-ecosystem fluxes of pesticides from prairie wetlands mediated by aquatic insect emergence: implications for terrestrial insectivores. Environmental Toxicology and Chemistry 40: 2282–2296.
Kraus, J.M., Walters, D.M., Wesner, J.S., Stricker, C.A., Schmidt, T.S., Zuellig, R.E. (2014). Metamorphosis alters contaminants and chemical tracers in insects: implications for food webs. Environmental Science & Technology 48: 10957–10965.
Lam, M.M.-Y., Martin-Creuzburg, D., Rothhaupt, K.-O., Safi, K., Yohannes, E., Salvarina, I. (2013). Tracking diet preferences of bats using stable isotope and fatty acid signatures of faeces. Plos One 8: e83452.
Lewis-Phillips, J., Brooks, S.J., Sayer, C.D., Patmore, I.R., Hilton, G.M., Harrison, A. et al. (2020). Ponds as insect chimneys: restoring overgrown farmland ponds benefits birds through elevated productivity of emerging aquatic insects. Biological Conservation 241: 108253.
Manning, D.W., Sullivan, S.M.P. (2021). Conservation across aquatic-terrestrial boundaries: linking continental-scale water quality to emergent aquatic insects and declining aerial insectivorous birds. Frontiers in Ecology and Evolution 9: 68.
Mathieu-Resuge, M., Martin-Creuzburg, D., Twining, C.W., Parmar, T.P., Hager, H.H., Kainz, M.J. (2021). Taxonomic composition and lake bathymetry influence fatty acid export via emergent insects. Freshwater Biology 66: 2199–2209.
McCarty, J.P. (2002). The number of visits to the nest by parents is an accurate measure of food delivered to nestlings in tree swallows. Journal of Field Ornithology 73: 9–14.
Moor, H., Gossner, M.M., Graham, C., Hobi, M.L.H., Holderegger, R., Reber, U. et al. (2021). Biodiversitätsschutz dank Ökosystem-übergreifendem Denken. Forschungsinitiative Blau-Grüne Biodiversität (BGB). Aqua & Gas 101: 44–49.
Morel, F.M.M., Kraepiel, A.M.L., Amyot, M. (1998). The chemical cycle and bioaccumulation of mercury. Annual Review of Ecology and Systematics 29: 543–566.
Muehlbauer, J.D., Collins, S.F., Doyle, M.W., Tockner, K. (2014). How wide is a stream? Spatial extent of the potential «stream signature» in terrestrial food webs using meta-analysis. Ecology 95: 44–55.
Muehlbauer, J.D., Larsen, S., Jonsson, M., Emilson, E.J. (2020). Variables affecting resource subsidies from streams and rivers to land and their susceptibility to global change stressors. In: Contaminants and Ecological Subsidies. Springer, pp. 129–155.
Nakano, S., Murakami, M. (2001). Reciprocal subsidies: dynamic interdependence between terrestrial and aquatic food webs. Proceedings of the National Academy of Sciences 98: 166–170.
Nebel, S., Casey, J., Cyr, M.-A., Kardynal, K.J., Krebs, E.A., Purves, E.F. et al. (2020). Falling through the policy cracks: implementing a roadmap to conserve aerial insectivores in North America. Avian Conservation and Ecology 15: 23.
Paetzold, A., Tockner, K. (2005). Effects of riparian arthropod predation on the biomass and abundance of aquatic insect emergence. Journal of the North American Benthological Society 24: 395–402.
Raitif, J., Plantegenest, M., Roussel, J.-M. (2019). From stream to land: ecosystem services provided by stream insects to agriculture. Agriculture, Ecosystems & Environment 270–271: 32–40.
Raven, P.H., Wagner, D.L. (2021). Agricultural intensification and climate change are rapidly decreasing insect biodiversity. Proceedings of the National Academy of Sciences 118: e2002548117.
Richmond, E.K., Rosi, E.J., Walters, D.M., Fick, J., Hamilton, S.K., Brodin, T. et al. (2018). A diverse suite of pharmaceuticals contaminates stream and riparian food webs. Nature Communications 9: 4491.
Rubin, Z., Rios-Touma, B., Kondolf, G.M., Power, M.E., Saffarinia, P., Natali, J. (2019). Using prey availability to evaluate Lower Colorado River riparian restoration. Restoration Ecology 27: 46–53.
Schilke, P.R., Bartrons, M., Gorzo, J.M., Vander Zanden, M.J., Gratton, C., Howe, R.W. et al. (2020). Modeling a cross-ecosystem subsidy: forest songbird response to emergent aquatic insects. Landscape Ecology 35: 1587–1604.
Shipley, J.R., Twining, C.W., Mathieu-Resuge, M., Parmar, T.P., Kainz, M., Martin-Creuzburg, D. et al. (2022). Climate change shifts the timing of nutritional flux from aquatic insects. Current Biology 32: 1–8.
Shipley, J.R., Twining, C.W., Taff, C.C., Vitousek, M.N., Flack, A., Winkler, D.W. (2020). Birds advancing lay dates with warming springs face greater risk of chick mortality. Proceedings of the National Academy of Sciences 117: 25590–25594.
Spiller, K.J., Dettmers, R. (2019). Evidence for multiple drivers of aerial insectivore declines in North America. The Condor 121.
Sprecher, L., Baumgartner, S., Thomas, G., Weber, C. (2020). Zwei Elemente – ein Ziel: wirkungsvolle Revitalisierungen. Ingenieurbiologie 20: 12–19.
Twining, C.W., Brenna, J.T., Lawrence, P., Shipley, J.R., Tollefson, T.N., Winkler, D.W. (2016). Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids support aerial insectivore performance more than food quantity. Proceedings of the National Academy of Sciences 113: 10920–10925.
Twining, C.W., Brenna, J.T., Lawrence, P., Winkler, D.W., Flecker, A.S., Hairston Jr., N.G. (2019). Aquatic and terrestrial resources are not nutritionally reciprocal for consumers. Functional Ecology 33: 2042–2052.
Twining, C.W., Razavi, N.R., Brenna, J.T., Dzielski, S.A., Gonzalez, S.T., Lawrence, P. et al. (2021). Emergent fresh-water insects serve as subsidies of methylmercury and beneficial fatty acids for riparian predators across an agricultural gradient. Environmental Science & Technology 55: 5868–5877.
Twining, C.W., Shipley, J.R., Winkler, D.W. (2018). Aquatic insects rich in omega-3 fatty acids drive breeding success in a widespread bird. Ecology Letters 21: 1812–1820.
Visser, M.E., Holleman, L.J.M., Gienapp, P. (2006). Shifts in caterpillar biomass phenology due to climate change and its impact on the breeding biology of an insectivorous bird. Oecologia 147: 164–172.
Wagner, D.L., Grames, E.M., Forister, M.L., Berenbaum, M.R., Stopak, D. (2021). Insect decline in the Anthropocene: death by a thousand cuts. Proceedings of the National Academy of Sciences 118: e2023989118.
Walters, D.M., Jardine, T.D., Cade, B.S., Kidd, K.A., Muir, D.C.G., Leipzig-Scott, P. (2016). Trophic magnification of organic chemicals: a global synthesis. Environmental Science & Technology 50: 4650–4658.
Walters, D.M., Wesner, J.S., Zuellig, R.E., Kowalski, D.A., Kondratieff, M.C. (2018). Holy flux: spatial and temporal variation in massive pulses of emerging insect biomass from western U.S. rivers. Ecology 99: 238–240.
Weber, C., Åberg, U., Buijse, A.D., Hughes, F.M.R., McKie, B.G., Piégay, H. et al. (2017). Goals and principles for programmatic river restoration monitoring and evaluation: collaborative learning across multiple projects. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water 2017: e1257.
Winkler, D.W., Billerman, S.M., Lovette, I.J. (2015). Bird families of the world: an invitation to the spectacular diversity of birds. Lynx Edicions.
Winkler, D.W., Luo, M.K., Rakhimberdiev, E. (2013). Temperature effects on food supply and chick mortality in tree swallows (Tachycineta bicolor). Oecologia 173: 129–138.

Autorinnen und Autoren:
Cornelia W. Twining, Eawag: Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, Seestr. 79, CH-6047 Kastanienbaum
Christine Weber, Eawag: Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, Seestr. 79, CH-6047 Kastanienbaum
Carmen Kowarik, Eawag: Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, Überlandstr. 133, CH-8600 Dübendorf
Martin M. Gossner, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstr. 111, CH-8903 Birmensdorf
Catherine H. Graham, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstr. 111, CH-8903 Birmensdorf
Blake Matthews, Eawag: Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, Seestr. 79, CH-6047 Kastanienbaum
J. Ryan Shipley, Eawag: Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, Seestr. 79, CH-6047 Kastanienbaum