Geschiebetransport und Forellenhabitate in Gebirgsflüssen der Schweiz : mögliche Auswirkungen der Klimaänderung

Autor(en): **Badoux, Alexandre / Peter, Armin / Rickenmann, Dieter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **106 (2014)**

Heft 3

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-939749

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Geschiebetransport und Forellenhabitate in Gebirgsflüssen der Schweiz: mögliche Auswirkungen der Klimaänderung

Alexandre Badoux, Armin Peter, Dieter Rickenmann, Julian Junker, Florian Heimann, Massimiliano Zappa, Jens M. Turowski

Zusammenfassung

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes «Nachhaltige Wassernutzung» (NFP61) wurden im Projekt «SEDRIVER» an der WSL und der EAWAG die Folgen des Klimawandels sowie veränderter Abflüsse auf den Geschiebetransport und mögliche Auswirkungen davon auf die Fischhabitate untersucht.

1. Einleitung

Für Salmoniden ist der Laichprozess ein äusserst wichtiger Teil des Lebenszyklus. Der genaue Zeitpunkt, die Verfügbarkeit passender Strömungs- und Sohlenverhältnisse in einem Gewässer sowie die Eingrabungstiefe der Fischeier beeinflussen die Erfolgsrate der Fortpflanzung auf verschiedene Weise (*Sear* und *DeVries*, 2008). Es ist daher notwendig und wichtig, möglichst umfangreiche Informationen zur Laichaktivität von Salmoniden an ihren Laichplätzen zu sammeln, um adäquate Massnahmen zur Erhaltung der Schweizer Fischpopulationen treffen zu können. Die Bachforelle *(Salmo trutta fario)* ist sowohl eine der verbreitetsten als auch ökonomisch wichtigsten Salmonidenart in der europäischen Alpenregion (*Burkhardt-Holm*, 2009). Zudem gilt sie für die Gebirgsgewässer als Indikatorart, da sie sehr sensibel auf Umwelteinflüsse reagiert. In der Schweiz ist sie gegenwärtig als gering gefährdet gelistet. Nichtsdestotrotz nahmen Fangraten der Bachforelle zwischen 1980 und 2000 um 60% ab. Als Ursache für diesen starken Rückgang werden unter anderem die Klimaerwärmung und die Verschlechterung der Lebensräume angegeben (*Burkhardt-Holm et al.*, 2002; *Burkhardt-Holm*, 2009).

In Schweizer Gebirgsflüssen hat die Klimaerwärmung verschiedene Einflüsse, welche die Population der Bachforellen direkt betreffen. Es ist unter anderem davon auszugehen, dass aufgrund der Klimaänderung die Winterabflüsse ansteigen werden. Dies kann auch auf die Häufigkeit von Hochwasserereignissen mit Geschiebetransport im Winterhalbjahr einen Einfluss haben (*KOHS*, 2007; *Jasper et al.*, 2004). Eine Zunahme der Hochwasserabflüsse und eine damit verbundene Zunahme der winterlichen Erosionstiefen in Gebirgsflüssen könnte wiederum die Laichplätze der Bachforellen gefährden (*Unfer et al.*, 2010). Des Weiteren haben auch anthropogene Einschränkungen der natürlichen Gerinnemorphologie (stark beeinflusste oder künstliche Flussstrecken) und die Veränderung des Abflussregimes durch Wasserkraftanlagen einen ungünstigen Einfluss auf die Fischpopulationen.

Für die schnelle Berechnung von Geschiebeverlagerungen in alpinen Einzugsgebieten wurde an der WSL das eindimensionale Geschiebetransportmodell *sedFlow* entwickelt (*Heimann et al.*, 2014). Mit diesem Simulationsprogramm wurden in einer Modelleichung Geschiebetransportberechnungen u.a. für die zwei Schweizer Gebirgsflüsse Kleine Emme und Brenno durchgeführt (*Rickenmann et al.*, 2014; (siehe Seite 187–199 in dieser Ausgabe). Diese Vorarbeiten dienen als Basis für die hier präsentierten Modellierungen von Zukunftsszenarien des Geschiebetransportes unter Berücksichtigung des Klimawandels.

Im vorliegenden Artikel werden zuerst Beobachtungen zur Laichaktivität der Bachforelle präsentiert, wobei ein Schwerpunkt auf der Eingrabungstiefe der Eier liegt. Diese Untersuchungen wurden in 20 voralpinen und alpinen Flussabschnitten

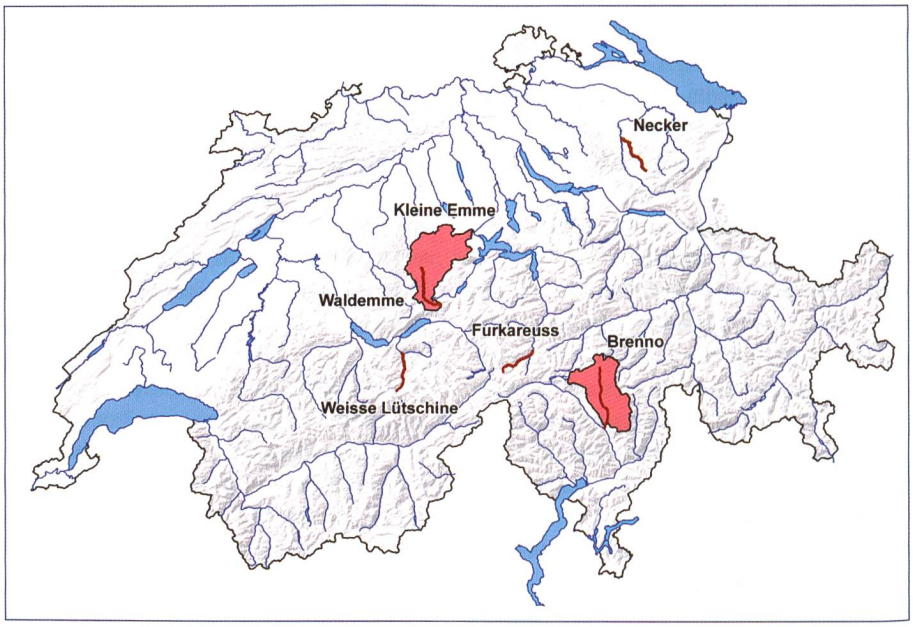

Bild 1. Lage der Untersuchungsgebiete der Kleinen Emme (Zentralschweiz) und des Brenno (Südschweiz), in denen der Sedimenttransport modelliert wurde. In Rot sind zudem die Gewässer angegeben, an denen die Aktivitäten auf den Laichgruben untersucht wurden. In den Voralpen sind dies die Waldemme und der Necker, in den Alpen die Reuss oberhalb Andermatt, die Weisse Lütschine und der Brenno. Die in den weiterführenden Untersuchungen von Polli (2012) verwendeten Fliessgewässer sind hier nicht eingezeichnet. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118).

durchgeführt, um eine möglichst breite Übersicht zu erreichen. Dann werden die Resultate der Geschiebetransportmodellierungen für die nahe (2021–2050) und ferne (2070–2099) Zukunft für die beiden Gebirgsflüsse Kleine Emme und Brenno vorgestellt. Dabei wird vor allem die maximale Erosionstiefe in den Wintermonaten (während der Laichperiode) analysiert. Schliesslich werden die möglichen Auswirkungen des Klimawandels im Zusammenhang mit dem Geschiebetransport auf die Laichaktivität von Bachforellen diskutiert. In diesem Text fassen wir die Ergebnisse von *Riedl* und *Peter* (2013), *Polli* (2012) und *Junker et al.* (subm.) für den deutschsprachigen Raum zusammen. Dabei erweitern wir die dortigen Analysen um Simulationsresultate aus dem Einzugsgebiet des Brenno.

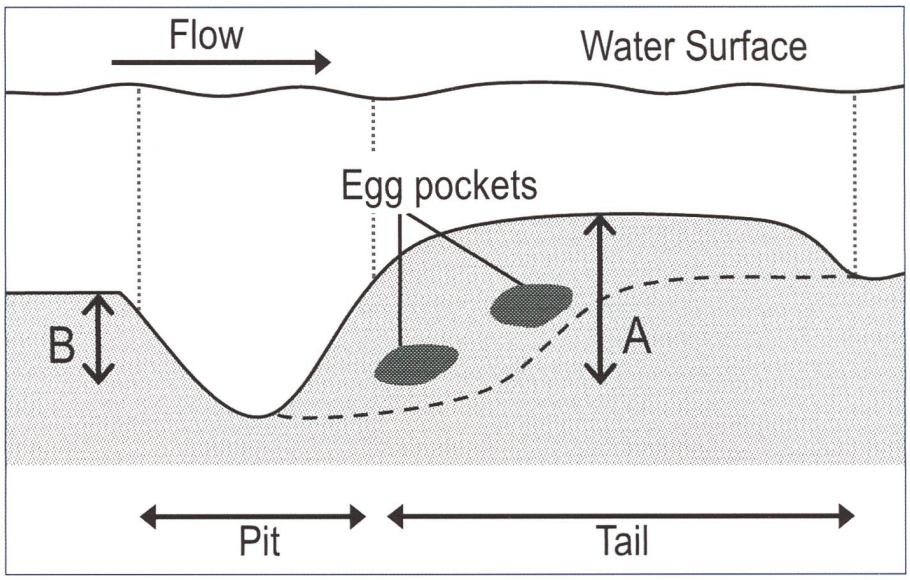

Bild 2. Längsschnitt einer Laichgrube mit zwei Eipaketen (aus Crisp, 2000); «Flow» = Fliessrichtung, «Water Surface» = Wasseroberfläche, «Egg pockets» = Eipakete, «Pit» = Grube, «Tail» = hinterer Teil der Laichgrube. Die Längen A und B kennzeichnen die Eingrabungstiefe, gemessen vom aufgeschütteten Kies bis zu den Eiern (A) sowie von der ursprünglichen Gewässersohle bis zu den Eiern (B).

2. Untersuchungen zu Laichtiefen von Forellen

2.1 Untersuchungsgebiete und Feldaufnahmen

Ein wichtiges Ziel der Untersuchungen ist es, die Reproduktionsperiode und die Habitatsansprüche der Bachforellen in schweizerischen Gewässern zu kennen. Aus diesem Grunde wurden voralpine und alpine Gewässer während der Reproduktionsphase untersucht. Zudem sollte die Habitatsnutzung der laichenden Bachforellen aufgenommen werden. Als einer der wichtigsten Parameter zur Fortpflanzung der Bachforelle wurde untersucht, wie tief die Weibchen ihre Eier in die Kiessohle eingraben. Dies ist im Rahmen der Klimaveränderung und der damit verbundenen möglichen zunehmenden Geschiebebewegungen im Winter eine zentrale Frage.

Die Dauer der Reproduktionsperiode (Aktivitäten auf den Laichgruben) wurde an den voralpinen Flüssen Waldemme (Kt. LU) und Necker (Kt. SG) sowie an den alpinen Gewässern Reuss oberhalb Andermatt (Kt. UR), Weisse Lütschine (Kt. BE) sowie am Brenno (Kt. TI) untersucht (*Bild 1*; vgl. auch *Riedl* und *Peter,* 2013). Insgesamt wurde die Laichaktivität in 217 Laichgruben beobachtet.

Die Studie zur Habitatsbenützung sowie zu den Eingrabungstiefen wurde ebenfalls an diesen Flüssen durchgeführt, mit Ausnahme der Waldemme und des Neckers. In Rahmen weiterer Untersuchungen (*Polli*, 2012) beobachteten wir die Habitatsbenützung und die Eingrabungstiefen in sieben zusätzlichen voralpinen/alpinen Fliessgewässern: Luthern (Kt. LU), Wigger (Kt. LU), Waldemme (Kt. LU), Rickenbach (Kt. SG), Thur (Kt. SG), Vorderrhein (Kt. GR) und Inn (Kt. GR). Zusätzlich wurden noch drei Gewässer im Kanton Tessin studiert: Laveggio, Vedeggio und Ticino.

Bild 3. Bachforellenlaichgrube in der Enziwigger LU mit einem Bachforellenpaar. Die Laichgrube ist auch ohne Fische gut erkennbar an der elliptischen Form und dem hellen Kies.

Für die Habitatsbenützung wurden bei den Laichgruben die Fliessgeschwindigkeiten, die Wassertiefen sowie die Substratzusammensetzung gemessen. Mindestens 15 verschiedene Laichgruben wurden pro Gewässer ausgesucht, um auch die Variabilität der Eingrabungstiefen der Eier zu bestimmen. Das Ausgraben der Eier erfolgte im hinteren Teil der Laichgrube mit einer Schaufel oder von Hand. Um dabei abdriftende Eier zu sammeln, wurde am unteren Ende der Laichgrube ein feinmaschiges Netz (Maschenweite 1 mm) aufgespannt. Es wurden zwei unterschiedliche Tiefen der abgelegten Eier bestimmt. Eingrabungstiefe A ist die Tiefe gemessen vom aufgeschütteten Kies bis zu den Eiern, Eingrabungstiefe B ist die Tiefe gemessen ab der Gewässersohle (vor dem Anlegen der Laichgrube) bis zu den Eiern *(Bild 2)*. Laichgruben sind als helle ellipsenähnliche Flächen erkennbar. Der tiefste Punkt ist die Grube; der vom Weibchen aufgeschüttete Kies zeigt sich als deutliche Erhebung (Kieshügel). Die Eier liegen in mehreren Paketen (2–4) im aufgeschütteten Kies vergraben. Die *Bilder 2* und *3* zeigen Laichgruben von Bachforellen.

2.2 Resultate

Die Laichperiode der Bachforelle begann am 25. Oktober und dauerte maximal bis am 11. Januar (*Riedl* und *Peter*, 2013). In den untersuchten Gewässern dauerte die Laichaktivität zwischen 28 und 72 Tagen (Mittelwert 45 Tage). Die Fische benutzten Wassertiefen zwischen 5 und 50 cm

bei Fliessgeschwindigkeiten (bodennah) zwischen 5 und 70 cm/s. Die verwendeten Substratgrössen lagen zwischen 2 und 128 mm. *Polli* (2012) untersuchte zur Beschreibung der Habitatsbenützung 172 Laichgruben und kam zu sehr ähnlichen Werten. *Bild 4* zeigt die Habitatsbenützung der Bachforellen für den Parameter Wassertiefe.

Für die Eingrabungstiefe B beobachteten *Riedl* und *Peter* (2013) einen mittleren Wert von 3.8 cm. *Polli* (2012) fand eine etwas höhere mittlere Eingrabungstiefe B von 5.2 cm. Die mittlere Eingrabungstiefe A betrug 5.8 cm (*Riedl* und *Peter* 2013) respektive 10.1 cm (*Polli* 2012).

2.3 Vergleich mit anderen Studien

Unsere Studie ergab für die Habitatsnutzung der Bachforellen sehr ähnliche Werte, wie sie in anderen Gewässern weltweit beobachtet wurden. Die laichenden Bachforellen bevorzugen Wassertiefen zwischen 10 und 20 cm, Fliessgeschwindgkeiten (bodennah) von 30 bis 40 cm/s und Substrate mit Korngrössen von 16 bis 32 mm.

Die von uns beobachteten Eingrabungstiefen der Eier (mittlere Tiefen B von 3.8 respektive 5.2 cm) sind jedoch deutlich geringer als alle bisher in der Literatur publizierten Daten. Frühere Studien dokumentierten Eingrabungstiefen der Eier von zirka 10–20 cm. In der Literatur gibt es aber keine Studie, die vergleichbar viele Laichgruben untersuchte. Wir analysierten total 297 Laichgruben (*Riedl* und *Peter*, 2013 sowie *Polli*, 2012). Bisher publizierte Studien bezogen sich meist auf wenige Laichgruben (einige Dutzend), der Maximalwert liegt bei 75 Laichgruben. Zudem beziehen sich die meisten Studien auf Flachlandgewässer, während wir vor allem voralpine und alpine Gewässer untersuchten. Die von uns festgestellten geringen Eingrabungstiefen der Eier bedeuten ein Risiko beim Auftreten von Hochwassern während der gesamten Inkubationszeit der Eier (Oktober bis zirka April/Mai). Diese Information ist für die Diskussion klimatischer Veränderungen und der damit verbundenen höheren Abflüsse im Winter und einer zunehmenden Häufigkeit des Geschiebetransports sehr wichtig.

3. Geschiebetransportmodellierung für Klimaszenarien

Für die Modellierung des Geschiebetransportes und der Gerinnemorphodynamik haben wir das Modell *sedFlow* verwendet (*Heimann et al.*, 2014). Dieses wurde an der WSL im Rahmen des NFP61-Projektes «SEDRIVER» speziell für Berechnungen in Gebirgsflüssen entwickelt und enthält die folgenden grundlegenden Elemente: (i) Berücksichtigung neuer Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransportes in steilen Gerinnen mit Makrorauigkeit, (ii) Berechnung von fraktionsweisem Transport; (iii) schnelle Berechnungszeiten zur Modellierung ganzer Einzugsgebiete und zur Szenarienanalyse mit automatisierten Simulationsberechnungen vieler Varianten. Die eindimensionalen Berechnungen des Abflusses und Geschiebetransportes mit *sedFlow* basieren auf einem mittleren Rechteckprofil, welches die gemessenen Querprofile annähert. Eine Übersicht über das Simulationsprogramm *sedFlow* ist in *Rickenmann et al.* (2014) gegeben, eine detailliertere Beschreibung haben *Heimann et al.* (2014) gegeben.

3.1 Untersuchungsgebiete und Geschiebetransportsimulation für Eichperiode

3.1.1 Kleine Emme

Die Kleine Emme liegt in der Zentralschweiz und entwässert das Entlebuch und das Mariental *(Bild 1)*. An der BAFU-Abflussmessstation Emmen (im Januar 2013 als Ersatz für die Station Littau, Reussbühl, in Betrieb genommen) umfasst das Einzugsgebiet eine Fläche von 478 km^2. Eine weitere Abflussmessstation befindet sich am Standort Werthenstein-Chappelboden. Das Einzugsgebiet weist eine mittlere Höhe von 1050 m ü.M. auf und ist nicht vergletschert. Die Kleine Emme hat einen weitgehend natürlichen Abfluss. Weitere Details zum Untersuchungsgebiet sind in *Rickenmann et al.* (2014) gegeben.

Die untersuchte Simulationsstrecke ist 19.4 km lang und reicht von Doppleschwand bis zum Zufluss des Renggbach (vgl. *Rickenmann et al.*, 2014). Das Gerinnegefälle beträgt entlang der obersten 2 km der Strecke 0.5 bis 3.5% bzw. 0.5 bis 1.5% unterhalb der Mündung der Fontanne bis nach Littau. Im unteren flacheren Bereich ist die Kleine Emme weitgehend kanalisiert und mit zahlreichen Sohlschwellen versehen. Das mittlere Gefälle der gesamten Untersuchungsstrecke beträgt 0.9%. Die wichtigsten Wasser- und Geschiebezubringer sind die Fontanne und der Rümlig. Im oberen Bereich der simulierten Flussstrecke befinden sich mehrere Felsabschnitte. Die aufgenommenen Kornverteilungen in der Kleinen Emme basieren auf Linienzahlanalysen von *Burkhard* (2012) und der WSL und werden von *Rickenmann et al.* (2014) beschrieben. Sie variieren entlang der Simulationsstrecke stark. Das Geschiebetransportmodell *sedFlow* wurde für die Kleine Emme mit Hilfe von beobachteten Sohlenverände-

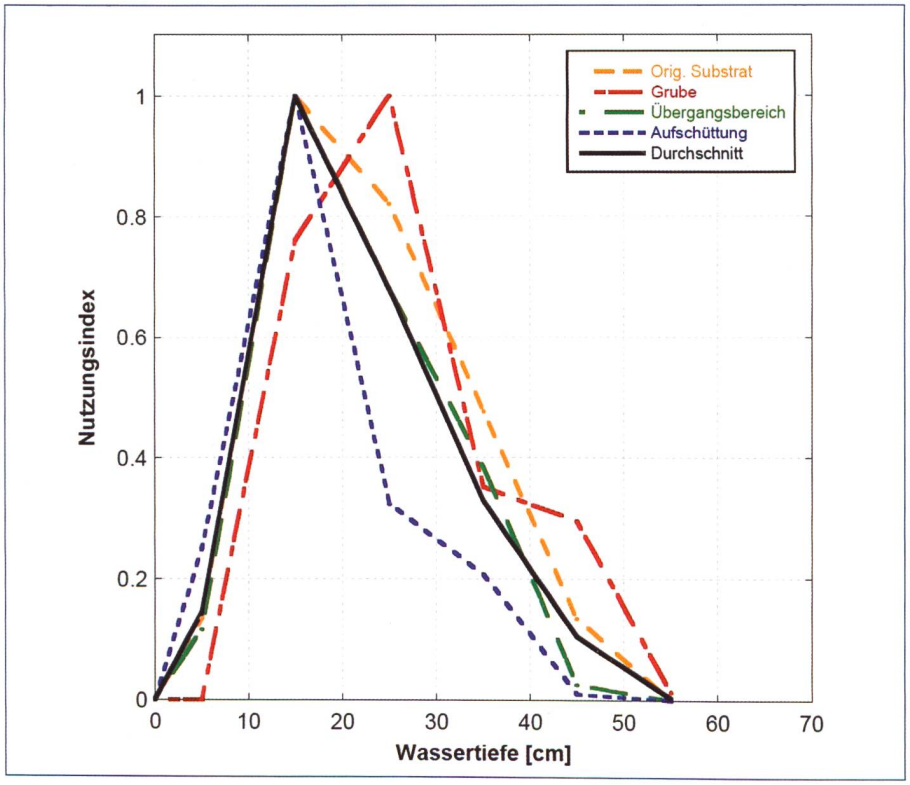

Bild 4. Benutzung der Wassertiefen durch die laichenden Bachforellen. Es wurden 172 Laichgruben untersucht. Ein Nutzungsindex von 1 wird der Tiefe zugewiesen, die am häufigsten genutzt wird. Ein Nutzungsindex von 0 bedeutet keine Nutzung. Grafik aus Polli (2012).

rungen (terrestrisch vermessene Querprofile im September 2000 und November 2005) und des Geschiebefrachtdiagramms für diese Periode geeicht (*Rickenmann et al.*, 2014). In der Eichperiode von 2000 bis 2005 hatte die Seitenerosion in der Kleinen Emme eine grosse Bedeutung für den Geschiebetransport. Dies ist weitgehend auf das grosse und schadenreiche Hochwasserereignis vom August 2005 zurückzuführen (z.B. *Hunzinger* und *Durrer*, 2008). Basierend auf den Querprofildaten, den Geschiebestudien (Flussbau, 2009a; 2009b) sowie der Ereignisanalyse zum Hochwasser 2005 (*Bezzola* und *Hegg*, 2007) wurde der Austrag der Kleinen Emme in die Reuss (mit Ausbaggerungen) auf ungefähr 140 000 m^3 geschätzt. Der Geschiebeeintrag in die Simulationsstrecke ergibt sich dann aus der Geschiebebilanz zu etwa 25 000 m^3. Der Geschiebeeintrag durch die drei bedeutendsten Seitenzubringer war relativ gering, v.a. im Vergleich zur Seitenerosion. Die Prozesse Erosion und Ablagerung traten über die gesamte Simulationsstrecke verteilt auf, mit (mittleren) Sohlenänderungen im Bereich von +/- 0.5 m. Die Modellparameter der Bestvariante für die Eichperiode sind in *Rickenmann et al.* (2014) beschrieben und wurden für die hier durchgeführten Zukunftsmodellierungen übernommen.

Die für die Geschiebetransportberechnungen notwendigen hydrologischen Daten für den Zeitraum 2000 bis 2005 stammen (i) von den Abflussmessstationen Littau und Werthenstein und (ii) von hydrologischen Simulationen mit dem Niederschlagsabfluss Modell PREVAH (*Viviroli et al., 2007*) für den Seitenzubringer Font anne. Details zur Datenaufbereitung und zu den Abflusssimulationen werden von *Rickenmann et al.* (2014) und bei WSL (2013) gegeben.

3.1.2 Brenno

Der Brenno entwässert das Bleniotal im Kanton Tessin und mündet bei Biasca in den Ticino *(Bild 1)*. Bei der BAFU-Abflussmessstation Loderio (einige Kilometer vor der Mündung) hat das Einzugsgebiet eine Fläche von 397 km^2. Dieses weist eine mittlere Höhe von 1820 m ü.M. auf und ist leicht vergletschert (gut 1%). Das Abflussregime des Brenno ist wesentlich durch die Wasserkraftnutzung beeinflusst. Über bedeutende Teile des Einzugsgebietes wird Wasser gefasst und ausserhalb des Gebietes in den Ticino geleitet. Weitere Details zum Untersuchungsgebiet werden von *Rickenmann et al.* (2014) gegeben.

Der im Projekt modellierte Abschnitt des Brenno erstreckt sich von Olivone bis zur Mündung in den Ticino und weist eine Länge von 23 km auf. Das mittlere Gefälle der Simulationsstrecke beträgt 2.4% und variiert lokal zwischen 15% und 0.3‰. Der Brenno verfügt über ein weitgehend natürliches Bett und ist kaum kanalisiert. Geschiebe wird von verschiedenen seitlichen Wildbächen geliefert (z.B. Ri di Soi, Riale Riascio, Lesgiüna und Crenone). Mit Ausnahme der Lesgiüna können sich in diesen Wildbächen Murgänge ereignen, welche grobes Material bis in die Mündungsbereiche liefern. Für geomorphologisch homogene Abschnitte des Brenno wurden mehrere Linienzahlanalysen aufgenommen und daraus eine repräsentative Kornverteilung der Deckschicht und der Unterschicht ermittelt. Des Weiteren wurden auch in einigen Zuflüssen Kornverteilungen bestimmt. Die Verteilungen entlang der Simulationsstrecke variieren beträchtlich (*Rickenmann et al.*, 2014).

Auch für den Brenno eichten wir das Transportmodell *sedFlow* anhand von beobachteten Sohlenveränderungen (terrestrisch vermessene Querprofile im April 1999 und Juni/Juli 2009) und des Geschiebefrachtdiagramms für diese Periode (*Rickenmann et al.*, 2014). Die grössten Veränderungen während der rund zehnjährigen Eichperiode traten bei der Mündung des Ri di Soi auf (Murgang vom September 1999), mit Ablagerungen von bis zu 4 m. Für den Brenno wurde der Geschiebeaustrag in den Ticino durch Transportberechnungen mit dem Modell *sedFlow* abgeschätzt und beträgt rund 70 000 m^3 (*WSL*, 2013). Die Einträge der Seitenzubringer wurden anhand von bestehenden Studien (*Flussbau*, 2003; 2003/2005; *Stricker*, 2010) bestimmt und belaufen sich auf insgesamt ca. 330 000 m^3. Zudem wurden Materialentnahmen während der Eichperiode von 1999 bis 2009 gemäss Aufzeichnungen in der SOLID-Datenbank des BAFU berücksichtigt (gut 50 000 m^3). Der Geschiebeeintrag am oberen Modellende bei Olivone in die Simulationsstrecke ergibt sich aus der Geschiebebilanz und beträgt rund 35 000 m^3. Die Prozesse Erosion und Ablagerung traten über die gesamte Simulationsstrecke verteilt auf. Ohne Berücksichtigung der massiven Seiteneinträge durch Murgänge betrugen die (mittleren) Sohlenänderungen in einigen Gerinneabschnitten bis zu +/- 1 m. Die Modellparameter der Bestvariante für die Eichperiode werden von *Rickenmann et al.* (2014) beschrieben und wurden für die hier durchgeführten Zukunftsmodellierungen übernommen.

Für die Bereitstellung der zur Geschiebemodellierung notwendigen hydrologischen Daten wurde das Modell PREVAH (*Viviroli et al.* 2007) eingesetzt. Das gesamte Einzugsgebiet des Brenno wurde in Teileinzugsgebiete aufgeteilt, um an verschiedenen Stellen (Zuflüsse von Seitenzubringer) entlang des Gerinnes eine Ganglinie für die Jahre 1999 bis 2009 zu berechnen. Allerdings muss im Einzugsgebiet des Brenno der Tatsache Rechnung getragen werden, dass dessen Abflussverhalten infolge der Wasserkraftanlagen der Blenio Kraftwerke AG seit dem Beginn der 1960er-Jahre beträchtlich beeinflusst ist. Bei den PREVAH-Simulationen konnten Fassungen und Reservoire nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurden die Simulationsresultate nachträglich korrigiert. Mittels dieser angepassten Daten wurde der gemessene Abfluss in Loderio auf die Teileinzugsgebiete herunterskaliert (vgl. auch *Rickenmann et al.* 2014).

3.2 Simulationen des Geschiebetransportes für die Zukunft

3.2.1 Hydrologische Modellrechnungen mit PREVAH

Die Daten für die hydrologischen Zukunftsszenarien basieren auf den Resultaten des Projektes CC-Hydro, welche in *Bernhard et al.* (2013) und BAFU (2012) ausführlich beschrieben sind. Die Modellierungen in CC-Hydro wurden mit dem Niederschlagsabfluss Modell PREVAH (*Viviroli et al.* 2007) ausgeführt. Mit dem Modell konnte der Einfluss der Klimaerwärmung auf das Abflussregime bedeutender Schweizer Flüsse abgeschätzt werden. Hydrologische Berechnungen wurden dabei für die nahe (2021–2050) und die ferne (2070–2099) Zukunft realisiert, wobei die Klima-Impaktszenarien von *Bosshard et al.* (2011) zur Anwendung kamen. Für beide Zukunftsperioden wurden insgesamt zehn verschiedene Klimaketten des Emissionsszenarios A1B aus dem ENSEMBLES-Projekt (*van der Linden* und *Mitchell*, 2009) berücksichtigt. Die Simulationen im Rahmen von CC-Hydro wurden an 70 Abflussmessstationen des BAFU überprüft. Darunter fallen auch die Stationen Littau der Kleinen Emme und Loderio des Brenno *(Bild 5)*. Geeicht wurde das Modellsystem anhand der gemessenen Abflussdaten der Periode 1980 bis 2009. Die zur Berechnung der Zukunftsszenarien verwendeten meteorologischen Inputdaten haben eine zeitliche Auflösung von einem Tag.

Gemäss den PREVAH-Modellie-

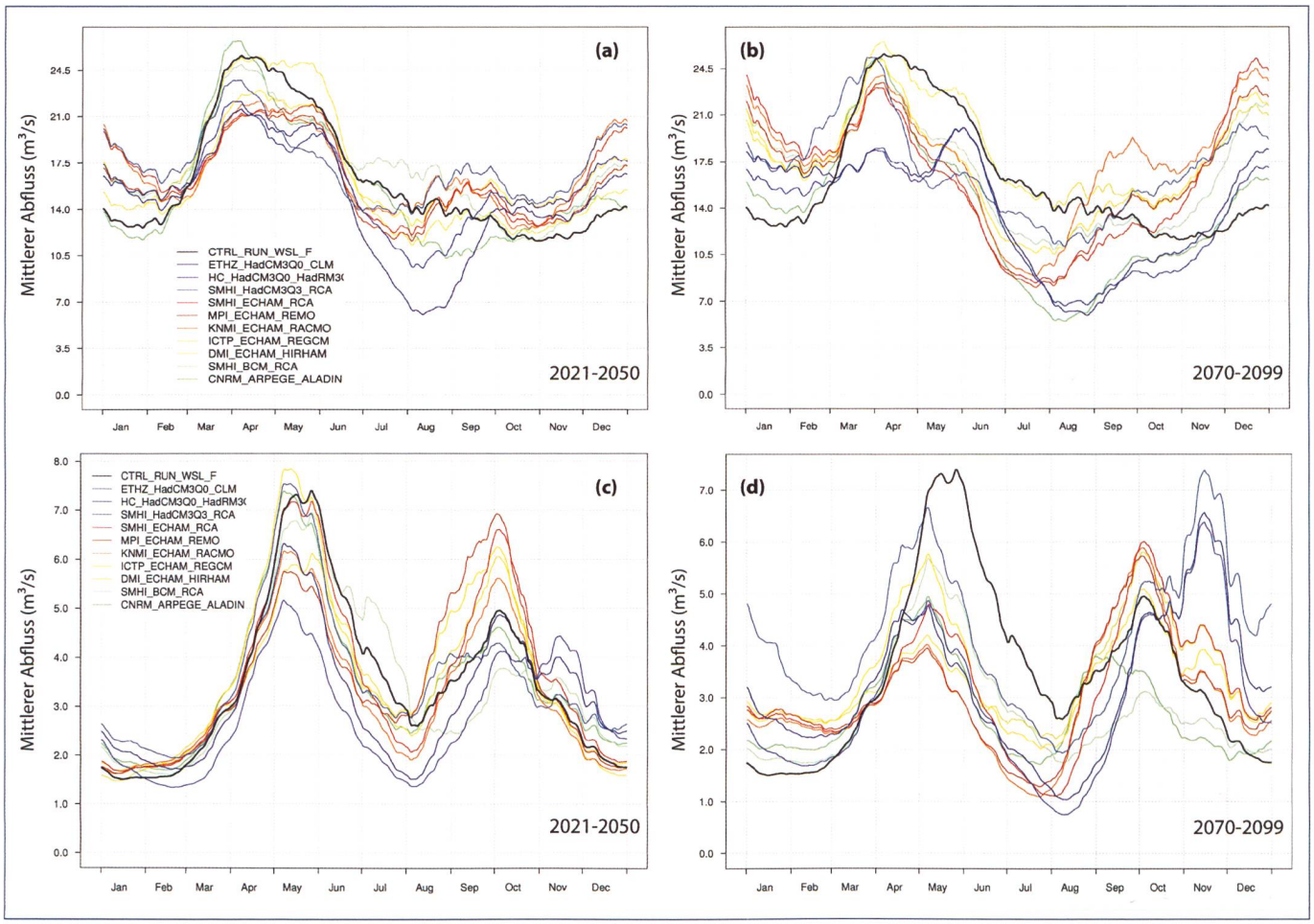

Bild 5. Szenarien des mittleren Abflusses für die Kleine Emme in Emmen (obere Grafiken a und b) und den Brenno in Loderio (untere Grafiken c und d). Die Jahresganglinie der Referenzperiode ist jeweils in Schwarz angegeben. Farbig dargestellt sind Realisationen für zwei Zukunftsperioden (jeweils links: 2021–2050; jeweils rechts: 2070–2099). Dargestellt ist das gleitende Mittel über eine Dauer von 30 Tagen.

rungen kommt die Schneeschmelze aktuell (d.h. in der Eich- oder Kontrollperiode) für 11.5% des Jahresabflusses der Kleinen Emme auf. Die mittlere jährliche Abflussganglinie weist von Mitte März bis Mitte Juni ein deutliches Maximum auf, welches stark von der Schmelze beeinflusst wird (schwarze Linie in *Bild 5a* und *b*). Die für die nahe Zukunftsperiode (2021–2050) erhaltenen Resultate deuten auf eine klare Zunahme der mittleren Abflüsse im Winterhalbjahr hin *(Bild 5a)*. Diese Tatsache ist sowohl auf die erwartete Zunahme der Niederschlagsmenge im Winter als auch auf die geringere Speicherung des Niederschlages in Form von Schnee infolge des Anstiegs der durchschnittlichen Temperatur zurückzuführen. Das mittlere saisonale Abflussmaximum im Frühjahr fällt gemäss Simulationen in der nahen Zukunft weniger hoch aus. Das bedeutet, dass in der Kleinen Emme mit einer etwas ausgeglicheneren, weniger saisonalen Jahresganglinie gerechnet werden kann. Die Mehrzahl der Szenarien sagen im Sommer von Mitte Juni bis Mitte August niedrigere Abflüsse vorher als in der Kontrollperiode. Im Mittel aller zehn Zukunftsszenarien sind keine massgeblichen Veränderungen in der hydrologischen Jahresbilanz des Einzugsgebietes der Kleinen Emme zu erwarten. Allerdings ist mit einem leichten Rückgang des Anteils der Schneeschmelze am Gesamtabfluss auf 8% zu rechnen. In der fernen Zukunftsperiode (2070–2099) werden die Frühlings- und Sommerabflüsse weiter abnehmen *(Bild 5b)*. Und aufgrund der Zunahme von Winterniederschlägen in flüssiger Form und dem damit verbundenen Rückgang der Schneedeckenakkumulation ist im voralpinen Einzugsgebiet der Kleinen Emme eine Modifikation des Abflussregimes zu erwarten. In der fernen Zukunft werden die Abflüsse möglicherweise im Winter ihre Höchstwerte erreichen und im Sommer lange Niedrigwasserperioden auftreten.

Gemäss den Simulationen mit PREVAH trägt die Schneeschmelze in der Kontrollperiode 45% zum Jahresabfluss des Brenno bei. Die mittlere jährliche Abflussganglinie weist bisher zwei Perioden mit hohen Abflüssen auf (schwarze Ganglinie in *Bild 5c* und *d*): eine erste Phase von Mitte April bis Ende Juni bildet ein deutliches Jahresmaximum und ist hauptsächlich auf die Schneeschmelze zurückzuführen. Ein zweites Maxima tritt im Herbst von September bis Oktober auf und widerspiegelt das typische Niederschlagsregime des Tessins. Die für die nahe Zukunftsperiode (2021–2050) erhaltenen Simulationsresultate weisen auf eine Zunahme der mittleren Winterabflüsse von Anfang November bis Ende Februar hin *(Bild 5c)*. Auch beim Brenno ist dies auf die prognostizierte generelle Zunahme der Winterniederschläge in Kombination mit der Abnahme des Anteils der Niederschläge in Form von Schnee (Temperaturzunahme) zurückzuführen. Das mittlere Abflussmaximum im Mai wird in der nahen Zukunft eher tiefer ausfallen; das Schneeschmelzdefizit gegenüber der Kontrollperiode führt allgemein zu geringeren Abflüssen von Mai bis Juli. Ob das zweite mittlere Jahresmaxima im Herbst vorerst zu- oder abnimmt, ist nicht eindeutig erkennbar. Die hydrologische Bilanz des Einzugsgebietes des Brenno wird sich gemäss Zukunftsszenarien 2021–2050 (Mittelwert) kaum ändern.

Wie in der Kleinen Emme ist jedoch mit einem Rückgang des Anteils der Schneeschmelze am Gesamtabfluss zu rechnen (auf 37%). In der fernen Zukunftsperiode (2070–2099) werden die Winterabflüsse im Brenno weiter deutlich zunehmen (gewisse Prognoseresultate geben hohe Spitzenwerte im November an, *Bild 5d*). Demgegenüber werden die von der Schneeschmelze beeinflussten Abflüsse im Frühling und Frühsommer gegen Ende des 21. Jahrhunderts noch stärker als zuvor abnehmen. Gemäss Simulationen wird dann der Anteil der Schneeschmelze am Gesamtabfluss nur noch 30% betragen.

3.2.2 Simulationsresultate Geschiebetransport für die nahe und ferne Zukunft

Wie in Abschnitt 3.1 erklärt, wurde das Modell *sedFlow* in beiden Flussgebieten anhand der registrieren Sohlenveränderungen und des Geschiebefrachtdiagramms für eine Periode von fünf (Kleine Emme) und zehn Jahren (Brenno) geeicht. Die Güte der Modellresultate wurde evaluiert, indem die simulierten akkumulierten Geschiebetransportfrachten mit den aus den Sohlenveränderungen abgeleiteten Werten entlang der Untersuchungsstrecke verglichen wurden. Für die Kleine Emme resultierte dabei ein hoher Nash-Sutcliffe-Gütewert von 0.95. Am Brenno wurde in der Simulation eine durchgeführte Kiesentnahme als anthropogener Eingriff nicht berücksichtigt. Das führte dort zu einer geringeren Güte von 0.73. Dieser Wert ist jedoch für grosse Teile der Simulationsstrecke nicht repräsentativ, an denen die Modellierung gut mit den Beobachtungen übereinstimmt. Den Parametersatz der Modelleichung verwendeten wir sowohl für die Simulation der Kontrollperiode (1980–2009) als auch für die Zukunftssimulationen (2021–2050 und 2070–2099), wobei wir jeweils immer von denselben Anfangsbedingungen ausgingen und nur den Abfluss variierten. Jeder Modelllauf wurde am 16. April eines Simulationsjahres gestartet und endete am 15. April des Folgejahres.

In unserer Untersuchung konzentrierten wir uns auf (i) die maximale Erosionstiefe während der Inkubationszeit, (ii) den Zeitpunkt des Erreichens des tiefsten Standes der Gerinnesohle innerhalb des Winterhalbjahres und (iii) die Bettstabilität in Abhängigkeit vom Sohlengefälle. Die simulierten Variablen (i) und (ii) wurden für jeden Gerinneabschnitt (*Rickenmann et al.*, 2014) entlang der Simulationsstrecke während eines bestimmten Winters gespeichert. Dieses Vorgehen wurde für die 30 Jahre der Kontrollperiode sowie für die 30 Jahre der nahen und fernen Zukunftsperiode – jeweils für alle zehn verschiedenen Klimaszenarien – wiederholt.

Die Erosionstiefe (i) ermittelten wir wie folgt: Die minimale simulierte Gerinnebetthöhe zwischen dem 20. Dezember und dem 15. April (Inkubationszeit) wurde von der simulierten Gerinnebetthöhe am 20. Dezember subtrahiert. Der Zeitpunkt (ii) wurde für die Periode vom 15. Oktober bis zum 15. April (entspricht hier einem Winterhalbjahr) jedes simulierten Jahres festgelegt. Für die Bettstabilität (iii) galt die Sohle eines Gerinneabschnittes für diejenigen Jahre als stabil, wenn die maximale Erosionstiefe während der Inkubationszeit den Grenzwert von 5 cm nicht überschritt. Dieser Grenzwert entspricht der mittleren Eingrabungstiefe B der Eier der Bachforelle in Gebirgsflüssen der Schweiz (vgl. Abschnitt 2 sowie *Polli*, 2012).

Um den Einfluss der Klimaänderung auf den Auftretenszeitpunkt der minimalen Gerinnehöhe und auf die maximale Erosionstiefe zu analysieren, wurden sowohl räumliche wie auch zeitliche Quantile berechnet. Innerhalb eines simulierten Jahres wurde für alle Gerinneabschnitte die maximale Erosionstiefe berechnet und dann jene Tiefe bestimmt, für die nur ein Viertel aller Gerinneabschnitte einen höheren Wert aufweisen (räumliches 75. Perzentil), somit wird jedem Jahr eine repräsentative Erosionstiefe zugeordnet. Von diesen Werten wurden dann zeitliche Perzentile, bezogen auf die simulierten Jahre ermittelt.

Für die nahe Zukunft lässt sich sowohl in der Kleinen Emme als auch im Brenno nur eine leichte Zunahme der Erosionstiefen beobachten. Deutlicher ist die Zunahme für die ferne Zukunft, wo sie meist über die Spannbreite der unterschiedlichen hydrologisch-klimatischen Szena-

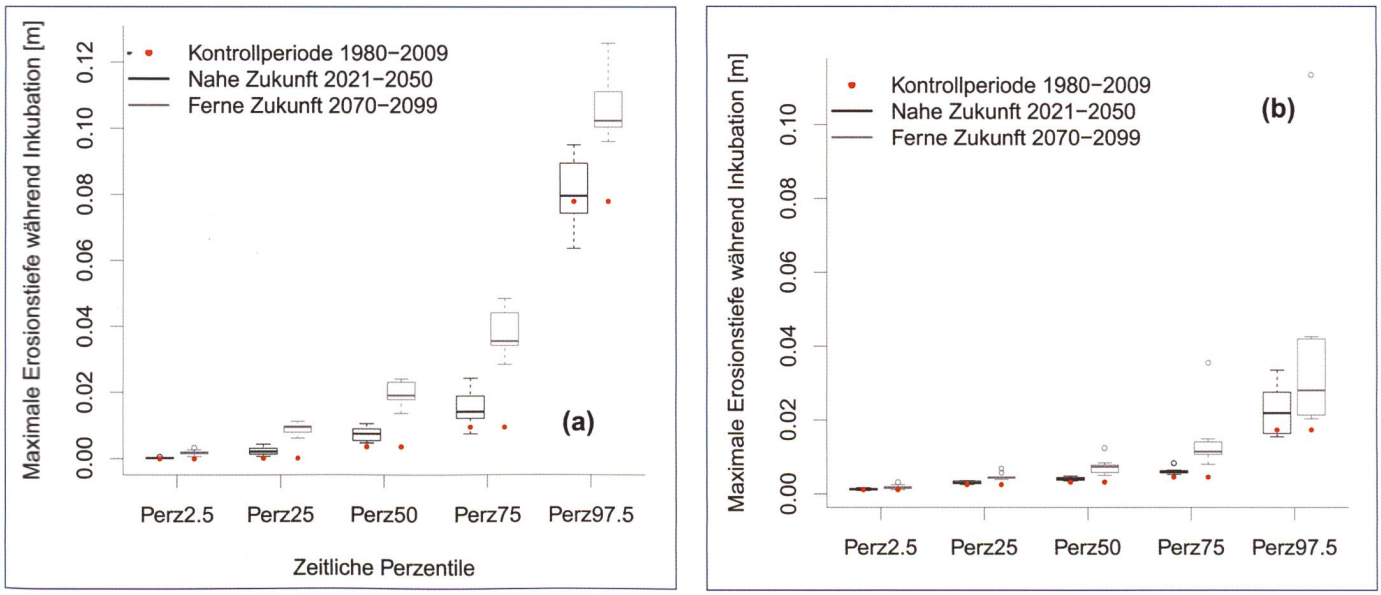

Bild 6. Maximale Erosionstiefe während der Inkubationszeit vom 20. Dezember bis zum 15. April (räumliches 75. Perzentil) in der Kleinen Emme (a) und im Brenno (b). Die Boxplots widerspiegeln die Variabilität der Erosionstiefe über die verschiedenen hydrologischen/klimatologischen Szenarien (jeweils links, dunkelgrau, für die nahe Zukunft sowie rechts, hellgrau, für die ferne Zukunft). Die roten Punkte zeigen die Simulationsresultate der Kontrollperiode. Der Wert des 75. Perzentils trennt jenes Viertel der Gerinneabschnitte mit grösseren Erosionstiefen von den drei Vierteln der Abschnitte mit kleineren Erosionstiefen. Auf der Abszisse sind die zeitlichen Perzentile der maximalen Erosionstiefen dargestellt. Das heisst, die Boxplots mit tiefen Perzentilwerten repräsentieren Jahre mit wenig Wintererosion, die Boxplots mit hohen Perzentilwerten repräsentieren Jahre mit intensiverer Wintererosion.

rien hinaus reicht *(Bild 6)*. Diese Muster lassen sich für alle zeitlichen Perzentile beobachten. Das bedeutet, dass die beschriebenen Zunahmen der Erosionstiefe sowohl in erosionsarmen als auch in erosionsreichen Wintern vorkommen. Ebenso lassen sich für andere räumliche Perzentile, d.h. für andere Gerinneabschnitte, vergleichbare Muster beobachten.

Im Vergleich ist die Wintererosion in der Kleinen Emme grösser als im Brenno. Für die Kontrollperiode fällt dies vor allem bei den hohen zeitlichen Perzentile deutlich aus. Dies ist weitgehend auf das alpinere Abflussregime aufgrund der höheren mittleren Gebietshöhe im Brenno zurückzuführen. Von Ende Dezember bis Mitte April traten bisher im Einzugsgebiet des Brenno nur sehr wenige Abflussereignisse auf, welche überhaupt Geschiebetransport verursachten. Die zu erwartende Zunahme der maximalen winterlichen Erosionstiefe scheint zudem in der Kleinen Emme stärker ausgeprägt zu sein als im Brenno.

Von Dezember bis Februar, d.h. in der Zeit, in der der Forellennachwuchs besonders verletzlich ist, tritt der Zeitpunkt der tiefsten Sohlenlage für die Kleine Emme in den Zukunftssimulationen tendenziell später ein als in der Kontrollperiode *(Bild 7)*. Das bedeutet, dass die Erosion während des Winters generell länger anhält. Dieser Trend ist in der fernen Zukunft bei allen Klimaszenarien deutlich ausgeprägt, während in der nahen Zukunft die Ausprägung des Effektes je nach Klimaszenario schwankt. Im Brenno zeigt sich für die nahe Zukunftsperiode kaum eine Änderung. In der fernen Zukunft tritt der Zeitpunkt der tiefsten Sohlenlage in einigen Klimaszenarien später auf, als dies in der Kontrollperiode der Fall ist. Generell ist das Bild im Fall der fernen Zukunft im Brenno komplexer als in der Kleinen Emme.

Der Anteil stabiler Flussabschnitte (das heisst jener Abschnitte mit einer maximalen winterlichen Erosionstiefe von weniger als 5 cm) nimmt in den Zukunftssimulationen der Kleinen Emme ab *(Bild 8a)*. Generell sind Abschnitte mit einem geringen Gefälle stabiler als jene mit einem steileren Gefälle. In der nahen Zukunft nimmt zudem der Anteil stabiler Profile mit steigendem Gefälle im Vergleich zur Kontrollperiode stärker ab *(Bild 8a)*. Die gleiche Entwicklung ist auch in der fernen Zukunft im Vergleich zur nahen Zukunft zu beobachten. Auch für den Brenno nimmt der Anteil stabiler Flussabschnitte in den Zukunftssimulationen ab *(Bild 8b)*. Allerdings zeigen die Simulationen für den Brenno nur eine sehr geringe Abnahme stabiler Flussabschnitte. Der etwas komplexere Zusammenhang zwischen Stabilität und Gerinnegefälle (als in der Kleinen Emme) könnte damit zusammenhängen, dass die maximalen Abflüsse im Bereich der kritischen Abflüsse für Transportbeginn liegen.

3.3 Vergleich zwischen Kleiner Emme und Brenno

Die Simulationsresultate zum aktuellen und zukünftigen Geschiebetransport in der Kleinen Emme und im Brenno haben bezüglich (i) maximaler Erosionstiefe *(Bild 6)*, (ii) dem Auftretenszeitpunkt der maximalen Erosionstiefe *(Bild 7)* und (iii) der Beziehung zwischen Gerinnestabilität und -neigung *(Bild 8)* gewisse Unterschiede ergeben. Diese sind auf Verschiedenheiten in der Hydrologie und der Geomorphologie der beiden Untersuchungsgebiete zurückzuführen.

Was das Abflussgeschehen angeht, sagen die Modellketten in keinem der beiden Gebiete Abflussrückgänge im Winter voraus, sondern es wird weitgehend von erhöhten Winterabflüssen ausgegangen. Im Brenno haben wir in den Winterhalbjahren der nahen Zukunft weniger Auswirkungen des Klimawandels zu erwarten als in der Kleinen Emme. Vermutlich spielen hier die Wasserkraftpuffer eine wichtige Rolle. Im Brenno beeinflussen die Schneeakkumulation und -schmelze das zukünftige Abflussverhalten stark. Einzelne Klimamodelle sagen höhere Wintertemperaturen voraus, was die winterlichen Abflussspitzen infolge von Regenfällen im November auftreten lässt. Andere Modelle hingegen prognostizieren im November auch in der fernen Zukunft Schneeakkumulation, verbunden mit einer früheren Jahresabflussspitze im September/Oktober. Das Gesamtbild der Abflussprognosen für die ferne Zukunft ist im Brenno deutlich komplexer als in der Kleinen Emme. Anders als beim Brenno wird die Abflussveränderung in der Kleinen Emme primär durch Niederschlagsänderungen und weniger durch Temperaturänderungen beeinflusst. Im Einzugsgebiet der

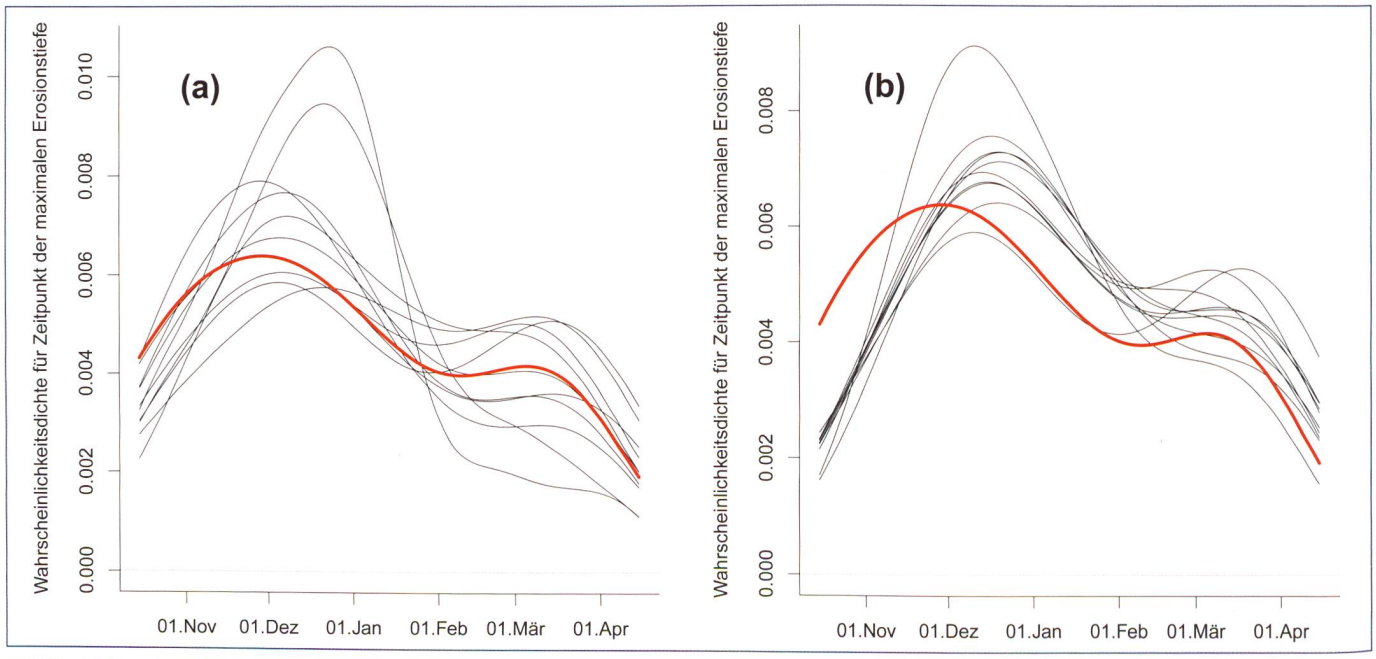

Bild 7. Wahrscheinlichkeitsdichte des Auftretenszeitpunktes der maximalen Erosionstiefe in der Kleinen Emme für die nahe (a) und ferne (b) Zukunft während des Winterhalbjahres (15. Oktober bis zum 15. April). Die rote Linie zeigt die Simulationsresultate der Kontrollperiode. Die schwarzen Linien stellen die verschiedenen hydrologischen/klimatologischen Szenarien dar.

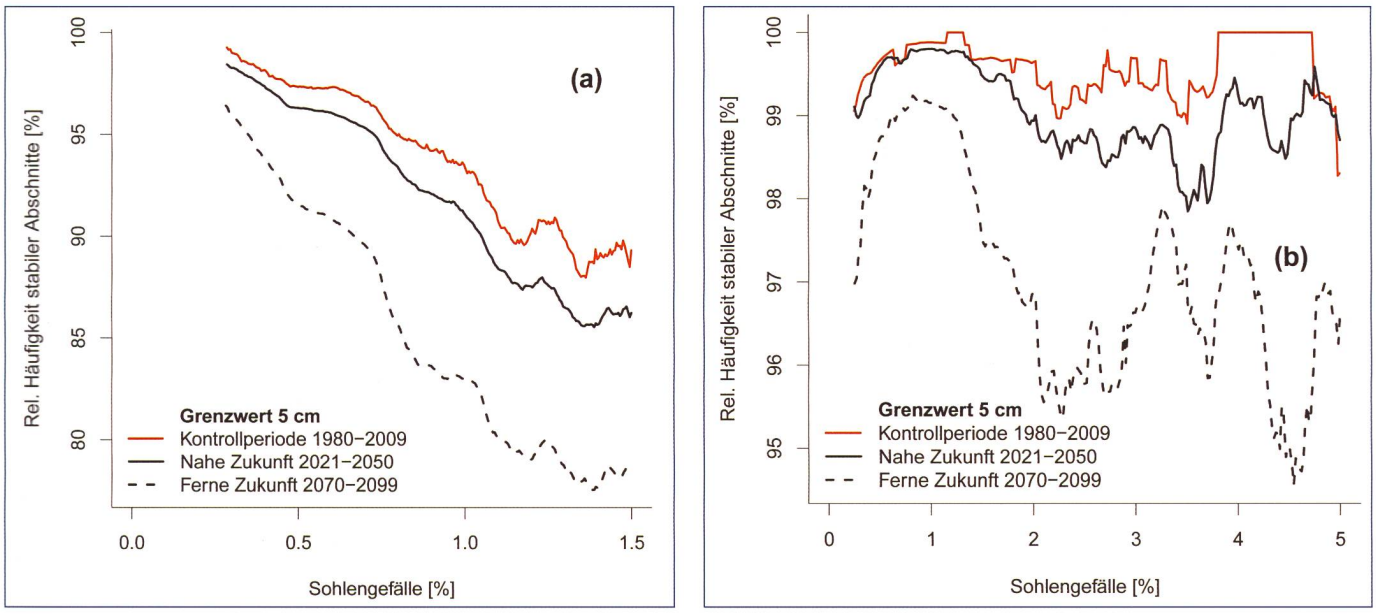

Bild 8. Gleitendes Mittel der relativen Häufigkeit stabiler Flussabschnitte in Abhängigkeit des Sohlengefälles in der Kleinen Emme (a) und im Brenno (b). Die räumliche Verteilung von Erosion wird hier als Funktion des Gerinnegefälles dargestellt. Dabei kommt ein gleitendes Gefällsfenster ΔS = 0.5% zum Einsatz. Das heisst, für ein gegebenes Gefälle S werden alle Flussabschnitte mit einem Gefälle im Bereich S +/- 0.25% betrachtet. Innerhalb dieser Flussabschnitte wird der relative Anteil jener Profile ermittelt, bei denen die maximale Erosionstiefe während der Inkubationszeit (20. Dezember bis zum 15. April) einen Grenzwert von 5 cm nicht überschreitet. Diese relative Häufigkeit stabiler Flussabschnitte ist in der Ordinate dargestellt, während die Abszisse die jeweilige Mitte des gleitenden Gefällsfensters zeigt.

Kleinen Emme bringen die Zuflüsse weniger Sediment in das Hauptgerinne als im Brenno. Entlang der Untersuchungsstrecke ist die Gerinnebreite der Kleinen Emme homogener, die Gerinnegefälle sind kleiner und über die Untersuchungsstrecke hinweg gleichförmiger. Die Kornverteilungen sind generell feiner und besser sortiert als im Brenno. Im Tessiner Einzugsgebiet spielen die Sedimenteinträge aus den Zubringern eine wichtige Rolle und können sowohl in Form von Murgängen als auch in Form von fluvialem Transport erfolgen. Im Brenno ist eine naturnahe Ausprägung des Gerinnes zu beobachten, was eine heterogene Gerinnebreite mit sich bringt. Zudem liegen gröbere Korngrössen vor (besonders deutlich bei den Zusammenflüssen des Brenno mit Wildbächen, die Murgänge produzieren) und die Kornverteilungen sind grundsätzlich schlechter sortiert. Somit sind die geomorphologische Situation und ihr Einfluss auf den Geschiebetransport im Falle des Brenno insgesamt heterogener und komplexer als im Falle der Kleinen Emme.

4. Mögliche Auswirkungen des Klimawandels

4.1 Mögliche Auswirkungen der simulierten zukünftigen Änderungen des Geschiebetransportes auf das Forellenhabitat

In der vorliegenden Studie untersuchten wir den Effekt des Klimawandels auf die Laichaktivität und die frühe Entwicklungsphase der juvenilen Bachforelle. Wir verglichen aktuelle Abflusscharakteristika (Kontrollperiode 1980–2009) mit den prognostizierten Abflussbedingungen für die nahe (2021–2050) und ferne (2070–2099) Zukunft. Unsere Resultate weisen für verschiedene Phasen des Reproduktionszyklus sowie für verschiedene Skalen im Gerinne auf qualitativ unterschiedliche Auswirkungen hin. Während die Trends in den Szenarien für die nahe Zukunft noch gering ausfallen, sind sie für die ferne Zukunft stark ausgeprägt.

(i) Negativer Einfluss des Klimawandels auf grosser Skala: Unsere Resultate legen auf grosser Skala einen negativen Einfluss der Folgen des Klimawandels auf das Forellenhabitat nahe. Die prognostizierte Zunahme in Anzahl und Ausmass der Winterhochwasser führt gemäss nachgeschaltetem Sedimenttransportmodell spätestens in der fernen Zukunft zu einer Zunahme der maximalen Erosionstiefe in den untersuchten Gebirgsflüssen während der Inkubationszeit der Bachforellen. Zudem prognostiziert das Modell, dass der Zeitpunkt der maximalen Erosionstiefe (während eines Winters) in Zukunft tendenziell später auftreten wird. Erosion dürfte demnach in Gebirgsflüssen während eines längeren Zeitraumes auftreten als in der Kontrollperiode. Diese Punkte werden sich auf die natürliche Reproduktion der Fische negativ auswirken. Die Untersuchungen in alpinen Gebirgsflüssen ergaben für die Eingrabungstiefe der Bachforelleneier einen mittleren Wert von lediglich 3.8 cm (*Riedl* und *Peter,* 2013) bzw. 5.2 cm (*Polli,* 2012), wenn das Niveau der Sohle vor dem Anlegen der Laichgrube als Referenz verwendet wird (Eingrabungstiefe B). Es wird vor allem in der fernen Zukunft öfter vorkommen, dass während der Winterperiode Erosionstiefen erreicht werden, welche die in der vorliegenden Studie erstmalig belegte geringe mittlere Eingrabungstiefe überschreiten, und dass die Laichgruben entsprechend im Verlaufe der Inkubationszeit abgetragen werden. Die stabilen Bereiche im Gerinne, in denen Laichaktivität möglich ist, dürften in der Zukunft abnehmen.

(ii) Andererseits könnte der Klimawandel auf kleinerer Skala und im Sommerhalbjahr einen positiven Einfluss auf die Population der Bachforelle haben. Für mehrere Abschnitte der Kleinen Emme ist aufgrund der vorhergesagten tieferen Niedrigwasserabflüsse im Sommer mit einer Diversifizierung der Fischhabitate mit mehr seichten Zonen (Flachwasser-Habitate) im Gerinne zu rechnen (*Junker et al.*, subm.). Eine Zunahme dieser Bereiche wirkt sich positiv auf Jungfische aus, die diese Habitate bevorzugen. Gemäss *Goode et al.* (2013) und *Hauer et al.* (2012) hängt die frühe Entwicklungsphase der Bachforellen stark von der Gerinne-

morphologie und dem Abflussregime ab. Ein möglichst breites Flussbett puffert die Fliessenergie während Hochwassern ab und unter Niederwasserbedingungen steigt die Vielfalt der Lebensräume an. Diese Zusammenhänge gelten nur für natürliche Gewässer und nicht für stark anthropogen beeinflusste bzw. kanalisierte Gerinneabschnitte.

4.2 Bewertung der Resultate im Hinblick auf weitere Einflussfaktoren

Neben den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Problemen, mit denen die Bachforellen aufgrund des Klimawandels konfrontiert sind, haben Veränderungen in der Gerinnemorphologie – wie z.B. stark anthropogen geprägte oder gänzlich künstliche Flussabschnitte – und die Beeinflussung des Abflussregimes durch Wasserkraftwerke eine nachteilige Auswirkung auf die bestehenden Fischpopulationen. Die Bachforelle bevorzugt Lebensräume in naturnahen Gerinnen, die eine möglichst variable Breite und geeignete Strömungsverhältnisse aufweisen. Angesichts der erwarteten Veränderungen im Geschiebetransport voralpiner und alpiner Flüsse ist es in Zukunft für die Erhaltung der Fischpopulationen unerlässlich, verbaute Strecken zum Beispiel mittels Aufweitungen zu revitalisieren und neue, unangemessene Verbauungen zu verhindern. Zudem ist die Wiederherstellung der Konnektivität der seitlichen Zuflüsse anzustreben und langfristig aufrechtzuerhalten. Dies könnte der Bachforelle Zugang zu zusätzlichen potenziellen Laichplätzen und Refugien für die Wintermonate verschaffen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der berücksichtigt werden muss, ist die Wassertemperatur. Es wird erwartet, dass diese aufgrund des Klimawandels ansteigen wird. In diesem Fall wären die Bachforellenpopulationen gezwungen, sich in höher gelegene (und somit kältere) Gerinneabschnitte zu verschieben. Es wird wichtig sein, offene Fragen in Bezug auf die Wassertemperatur in zukünftigen Forschungsansätzen zu untersuchen.

Seit den 1980er-Jahren geht der Fang von Bachforellen deutlich zurück. In schweizerischen Gewässern werden heute im Vergleich zur Zeit vor 1980 nur noch zirka 30% der damaligen Forellenfänge erreicht. Für die Äschen ist die Situation vergleichbar. Um das Problem der Bachforellen in unseren Gewässern zu erforschen, wurde das Projekt «Fischnetz» ins Leben gerufen. Eine nationale und regionale Übersicht über den Fangrückgang sowie Abklärungen zur Fischgesundheit wurden vorgenommen und die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Forellenpopulationen analysiert. Die ausführlichen Untersuchungen ergaben, dass der Fangrückgang durch mehrere Faktoren bedingt ist und mögliche Ursachen für jedes einzelne Fliessgewässer getrennt zu betrachten sind (*Fischnetz*, 2004). Der Fangrückgang wurde jedoch in vielen Fällen auf die generell schlechte Situation der Lebensräume sowie auf die Fischkrankheit PKD zurückgeführt. Oft bieten die Lebensräume nicht genügend Habitate. Laichgebiete, Ruhe- und Schutzzonen für die verschiedenen Lebensstadien der Forellen sind nicht mehr in ausreichendem Ausmass vorhanden oder sie sind schlecht miteinander vernetzt. Schlechte Lebensraumqualität hängt mit der Morphologie, aber auch mit der Wasserqualität zusammen. In Gebirgsbächen kann allerdings meist von einer guten Wasserqualität ausgegangen werden. Negative Auswirkungen für die Fische bestehen jedoch auch wegen der Wasserkraftnutzung (Restwasser, Schwall-Sunk, bauliche Barrieren). Die Studien von Fischnetz belegen den starken Druck auf die Fliessgewässer. Mögliche Auswirkungen der Klimaveränderung sind auch in diesem Kontext zu beurteilen. Ebenso müssen diese klimatischen Veränderungen für das künftige Gewässermanagement und die Flussrevitalisierungen berücksichtigt werden. Hier können Habitatsmodellierungen helfen, Auswirkungen auf Bachforellen frühzeitig zu erkennen und sie im Kontext mit anderen Beeinträchtigungen einzuordnen.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In einer umfassenden Studie wurde die Laichtiefe von Bachforellen in der Kiessohle von voralpinen und alpinen Flüssen der Schweiz untersucht (*Riedl* und *Peter*, 2013; *Polli*, 2012). Pro Gewässer wählten die Autoren dabei jeweils mindestens 15 verschiedene Laichgruben aus, um die Eingrabungstiefe der Fischeier zu bestimmen. Die Studie zeigte erstaunliche Resultate auf: Die durchschnittliche Eingrabungstiefe (von der Gewässersohle aus bestimmt, vor dem Anlegen der Grube) lag bei 3.8 cm (*Riedl* und *Peter*, 2013) bzw. 5.2 cm (*Polli*, 2012). Diese Werte sind deutlich geringer als die bisher in der Fachliteratur publizierten Laichtiefen, welche im Bereich von ca. 10 bis 20 cm liegen. Die in Schweizer Gebirgsflüssen festgestellten Eingrabungstiefen könnten ein offensichtliches Risiko für die Reproduktion der Bachforelle darstellen, falls zukünftig Winterhochwasser während der Inkubationszeit der Fischeier vermehrt und intensiver auftreten sollten.

Das eindimensionale Geschiebetransport-Simulationsprogramm *sedFlow* wurde in einer vorangegangenen Studie (*Rickenmann et al.*, 2014) für die beiden Gebirgsflüsse Kleine Emme und Brenno erfolgreich geeicht und validiert. Basierend auf diesen Arbeiten konnten Geschiebetransportprognosen für die nahe (2021–2050) und die ferne (2070–2099) Zukunft realisiert werden, wobei für die Bereitstellung der hydrologischen Eingangsdaten auf etablierte Klima-Impaktszenarien zurückgegriffen wurde. Von besonderem Interesse ist dabei die Untersuchung der maximalen Erosionstiefe in den Wintermonaten (während der Laichperiode und Inkubationszeit). Unsere Simulationen für die Kleine Emme und den Brenno zeigen eine Zunahme der Erosionstiefe in der nahen Zukunft auf; diese Zunahme fällt in der fernen Zukunft sogar noch deutlicher aus. Zudem liegen sowohl für den Brenno wie auch für die Kleine Emme Hinweise vor, dass der Zeitpunkt der maximalen Wintererosion zukünftig später auftreten wird. Am stärksten ausgeprägt ist dieser Trend für die ferne Zukunft an der Kleinen Emme.

Es ist generell schwierig vorherzusagen, wie erfolgreich sich Bachforellen an die aufgrund der Klimaerwärmung auftretenden Veränderungen in ihren Lebensräumen anpassen werden. Denn der Klimawandel beeinflusst verschiedene, in Wechselbeziehung stehende Habitats-Parameter auf unterschiedlichen Skalen. Es zeichnet sich allerdings deutlich ab, dass sich der Klimawandel negativ auf die Laichaktivität von Bachforellen in Gebirgsflüssen auswirken wird. Spätestens in der fernen Zukunft führen die gemäss Klimamodellen öfters und stärker auftretenden Winterhochwasser zu einer Intensivierung der Erosion der Gerinnesohle. In Zukunft wird die Wintererosion regelmässig maximale Werte erreichen, die die Tiefen der Laichgruben überschreiten und diese wegspülen. Demgegenüber ist allerdings auf einer kleineren Skala auch ein positiver Einfluss des Klimawandels zu erwarten. Weil gemäss den Modellresultaten vermehrt mit tieferen Niedrigwasserabflüssen im Sommerhalbjahr zu rechnen ist, könnte dann eine Zunahme von Flachwasser-Habitaten erfolgen. Diese Zunahme von Niederwasserbedingungen in Gebirgsflüssen würde sich für im Frühjahr geschlüpfte Jungfische günstig aus-

wirken. Diese Zusammenhänge konnten für gewisse Abschnitte der Kleinen Emme gezeigt werden und gelten nur für natürliche Gewässer (*Junker et al.*, subm.). Es wird für die Erhaltung der Bachforelle entscheidend sein, dass anthropogen stark beeinflusste Strecken revitalisiert werden, der Hochwasserschutz in Zukunft naturnaher in Fliessgewässer eingreift und die Konnektivität zu seitlichen Zuflüssen verbessert wird.

Danksagung

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des NFP61-Projektes «SEDRIVER» (Schweizerische Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung SNF grant no. 4061-125975/1/2) durchgeführt. Wir danken *Claudia Bieler* und *Martin Böckli* für ihre Unterstützung bei der Entwicklung und Anwendung von *sedFlow*. Wir bedanken uns zudem bei den Fischereiverwaltungen der Kantone Bern, Luzern, Graubünden, St. Gallen, Tessin und Uri für die Unterstützung und das Verständnis für die durchgeführten Experimente.

Literatur

Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro), Umwelt-Wissen Nr. 1217, Bundesamt für Umwelt, Bern, 76 S.

Bernhard, L., Pflugshaupt, C., Kotlaski, S., Zappa, M. (2013): Auswirkungen der CH2011-Klimaszenarien auf die Wasserresourcen – eine Abschätzung für die Schweiz. Beiträge zum Tag der Hydrologie, 4. bis 6. April 2013. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 32.13, 95–102.

Bezzola, G.R., Hegg, C. (Eds.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung, Umwelt-Wissen Nr. 0707, Bundesamt für Umwelt BAFU & Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern, Switzerland, 215 S.

Bosshard, T., Kotlarski, S., Even, T., Schär, C. (2011): Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. Hydrology and Earth System Sciences, 15, 2777–2788.

Burkhard, L. (2012): Simulation des Geschiebetransportes in Gebirgsflüssen während Hochwasserereignissen am Beispiel der Kleinen Emme (LU). Masterarbeit an der Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich und der Eidg. Forschungsanstalt WSL Birmensdorf, 36 S.

Burkhardt-Holm, P. (2009): Klimawandel und Bachforellenrückgang – gibt es einen Zusammenhang? Resultate aus der Schweiz. Umweltwissenschaften und Schadstoff- Forschung, 21: 177–185.

Burkhardt-Holm, P., Peter, A., Segner, H. (2002): Decline of fish catch in Switzerland Project Fishnet: a balance between analysis and synthesis. Aquatic Sciences, 64: 36–54.

Crisp, D.T. (2000): Trout and salmon. Fishing News Books, Oxford, 212 S.

Fischnetz (2004): Dem Fischrückgang auf der Spur. Schlussbericht des Projekts Netzwerk Fischrückgang Schweiz – «Fischnetz», 178 S.

Flussbau (2003): Geschiebetransport im Brenno. Einfluss der Murgangablagerung aus dem Ri di Soi. Flussbau AG, unveröffentlichter Bericht, im Auftrag des Kantons Tessin, Divisione delle costruzione.

Flussbau (2003/2005): Revitalisierung von Auenökosystemen (Risanamento dei Ecosistemi Alluvionali) – Fachbericht Morphologie und Geschiebe. Flussbau AG, unveröffentlichter Bericht, im Auftrag des Kantons Tessin, Dipartimento del Territorio.

Flussbau (2009a): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Sohlenveränderungen und Geschiebefrachten. Flussbau AG, unveröffentlichter Bericht, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Bern.

Flussbau (2009b): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Seitenerosion. Flussbau AG, unveröffentlichter Bericht, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Bern.

Goode, J.R., Buffington, J.M., Tonina, D., Isaak, D.J., Thurow, R.F., Wenger, S., Nagel, D., Luce, C., Tetzlaff, D., Soulsby, C. (2013) Potential effects of climate change on streambed scour and risks to salmonid survival in snow-dominated mountain basins. Hydrologic Processes, 27(5): 750–765.

Hauer, C., Unfer, G., Holzmann, H., Schmutz, S., Habersack, H. (2012): The impact of discharge change on physical instream habitats and its response to river morphology. Climate Change, 116(3-4): 827–850.

Heimann, F.U.M., Rickenmann, D., Turowski, J.M. (2014): sedFlow – An efficient tool for simulating bedload dynamics in mountain streams. Earth Surface Dynamics Discussion, 2: 733–772, doi: 10.5194/esurfd-2-733-2014.

Hunzinger, L., Durrer, S. (2008): Seitenerosion, in: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen, herausgegeben von Bezzola, G.R. und Hegg, C., Umwelt-Wissen, Nr. 0825, Bundesamt für Umwelt BAFU & Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern, Switzerland, S. 125–136.

Jasper, K., Calanca, P., Gyalistras, D., Fuhrer, J. (2004): Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. Climate Reseach, 26(2): 113–129.

Junker, J., Heimann, F.U.M., Hauer, C., Turowski, J.M., Rickenmann, D., Zappa, M., Peter, A. (submitted): Assessing the impact of climate change on brown trout (Salmo trutta fario) recruitment. Submitted for publication in Hydrobiologia.

KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz – Ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS). «Wasser Energie Luft» 99(1): 55–60.

Polli, F. (2012): Charakterisierung der Laichgrubenareale und der Eingrabungstiefe der Eier bei Bachforellen (Salmo trutta fario). Masterarbeit am Departement für Umweltsystemwissenschaften, ETH Zürich und der EAWAG, 62 S.

Rickenmann, D., Heimann, F.U.M., Böckli, M. Turowski, J.M., Bieler, C., Badoux, A. (2014): Geschiebetransport-Simulationen mit sedFlow in zwei Gebirgsflüssen der Schweiz. «Wasser Energie Luft», 106: 187–199.

Riedl, C., Peter, A. (2013). Timing of brown trout spawning in Alpine rivers with special consideration of egg burial depth. Ecology of Freshwater Fish, 22: 384–397.

Sear, D.A., DeVries, P. (2008): Salmonid spawning habitat in rivers: physical controls, biological responses, and approaches to remediation. Bethesda, USA: American Fisheries Society.

Stricker, B. (2010): Murgänge im Torrente Riascio (TI): Ereignisanalyse, Auslösefaktoren und Simulation von Ereignissen mit RAMMS. Masterarbeit an der Universität Zürich und der Eidg. Forschungsanstalt WSL Birmensdorf, 104 S.

Unfer, G., Hauer, C., Lautsch, E. (2010): The influence of hydrology on the recruitment of brown trout in an Alpine river, the Ybbs River, Austria. Ecology of Freshwater Fish, 20: 438–448.

van der Linden, P., Mitchell, J. (2009): ENSEMBLES: climate change and its impacts: summary of research and results from the ENSEMBLES project Met Office Hadley Centre.

Viviroli D., Gurtz J., Zappa M. (2007): The Hydrological Modelling System PREVAH. Geographica Bernensia, Berne, University of Berne.

Anschrift der Verfasser

Alexandre Badoux[1], Armin Peter[2], Dieter Rickenmann[1], Julian Junker[2], Florian Heimann[1], Massimiliano Zappa[1], Jens M. Turowski[3,1]

[1] Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

[2] EAWAG: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs, Seestrasse 79, CH-6047 Kastanienbaum

[3] Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam.