

facts & figures

Version 1.0 | 15.11.2022

Beaver Dam Analogs

Klimaresilienz und Biodiversität für unsere Bäche



Impressum

Auftragsnummer	
Auftraggeber	
Datum	15.11.2022
Version	1.0
Vorversionen	-
Autor(en)	Niels Werdenberg (niels.werdenberg@emchberger.ch), Andreas Widmer (andreas.widmer@emchberger.ch)
Freigabe	Andreas Widmer (andreas.widmer@emchberger.ch)
Verteiler	Homepage Emch+Berger AG Bern/Downloads
Datei	https://emchberger-my.sharepoint.com/personal/andreas_widmer_emchberger_ch/Documents/Wasserbau/BDA/DA Vortrag WA21/221115_BDA_Faktenblatt.docx
Seitenanzahl	31
Copyright	© Emch+Berger AG Bern

Inhalt

Zusammenfassung	ii
1 Die Problematik – Trockenheit, Fischsterben, Gewässerzustand und Biodiversitätsverlust	1
1.1 Klimawandel und Fischsterben.....	1
1.2 Grosse Bedeutung der kleinen Gerinne	1
1.3 Eingetiepte Bäche – ein drängendes Problem.....	2
1.4 Verlust von Gewässerlebensräumen und Biodiversität	3
2 Mögliche Abhilfe – Erkenntnisse zu Biberdämmen und BDAs.....	4
2.1 Natürliche Biberdämme	4
2.2 Beaver Dam Analogs.....	4
2.2.1 Planung von BDAs.....	5
2.2.2 Erstellung von BDAs	5
2.2.3 Schweizer Pilotprojekte (Stand Oktober 2022)	8
2.2.4 Wirkungskontrollen	8
2.2.5 Mit BDAs nutzbare Synergien	11
2.2.6 Lebensdauer, Gewässerunterhalt, Verfall.....	11
3 Weiterführende Informationen	12
3.1 Planungsgrundsätze für BDAs.....	12
3.2 Stand des Wissens zur Fischgängigkeit	14
3.2.1 Biberdämme und BDAs wirken nicht als Wanderhindernisse	14
3.2.2 Allfällige Wanderschwernisse sind nicht von Dauer	14
3.2.3 Fazit: Nutzen überwiegt bei Weitem.....	14
3.3 Erstellungskosten BDAs	15
3.3.1 Planung und Bauleitung.....	15
3.3.2 Maschinelle Erstellung mit Baufirma	15
3.3.3 Händischer Einbau mit Freiwilligenarbeit	15
4 Grundlagen, Literatur	16
Anhang A Fotos Pilotprojekte	A-1
A.1 BDAs am Schlossbach Rümligen BE.....	A-1
A.2 BDAs am Rossg Grabenbach, Neuenegg BE.....	A-4
A.3 BDAs an der Wyna, Oberkulm AG.....	A-5
A.4 BDAs am Gilebächli / Thurauen, Neunforn TG	A-7
Anhang B Normalien Pfahlgestützte BDA	B-1
Anhang C Fachartikel der Arbeitsgruppe BDA (Aqua&Gas, April 2022).....	C-2

Zusammenfassung

Bäche lassen sich mit künstlichen Biberdämmen (Beaver Dam Analogs, BDAs) kosteneffizient revitalisieren und gleichzeitig optimal an den Klimawandel anpassen.

Im Unterschied zu natürlichen Biberdämmen können BDAs in Lage und Höhe exakt geplant werden, sodass keine Konflikte mit anstehenden Nutzungen entstehen. Zudem können sie auch dort eingesetzt werden, wo Biber aufgrund von Hindernissen nicht hinkommen.

Wirkung von BDAs:

- Die naturnahen Einbauten werben aquatische Bereiche deutlich auf und **fördern die Entstehung wertvoller wechselfeuchter Lebensräume**. Davon profitiert eine grosse Bandbreite an seltenen Arten, u.a. diverse Fische, Wasserinsekten, Sumpfpflanzen, Amphibien, Reptilien, Vögel und Fledermäuse.
- Wie ihr natürliches Vorbild verzögern künstliche Biberdämme den Wasserabfluss (dezentraler Wasserrückhalt), entschärfen dadurch Abflussspitzen, steigern die Versickerung (Grundwasseranreicherung) und **machen die Gewässer widerstandsfähiger gegenüber den Klimaextremen Trockenheit und Starkniederschlag**.

Da die Schweiz das gesteckte Revitalisierungsziel von 50 km pro Jahr bisher deutlich verfehlt hat, sind künftig kostengünstigere Methoden und eigendynamische Gewässer gefragt [vgl. BAFU, 2021]. Genau hier bieten BDAs eine gute und rasch umsetzbare Lösung für viele Bäche.



Abbildung 1: BDA-Kaskade (6 Stück) in Rümligen, Gemeinde Rüeggisberg BE

1 Die Problematik – Trockenheit, Fischsterben, Gewässerzustand und Biodiversitätsverlust

1.1 Klimawandel und Fischsterben

Wie bereits in den Jahren 2003 und 2018 führte die extreme Trockenheit und Hitze des Sommers 2022 europaweit zu extrem tiefen Wasserständen und lethalen Wassertemperaturen in vielen Oberflächengewässern. Der Schweizerische Fischerei-Verband vermeldete im August 2022 ein **historisches Fischsterben**: Besonders stark betroffen vom Fischsterben sind die kältebedürftigen Arten, insbesondere Forellen und Äschen. Unter Druck geraten aber auch zunehmend Nasen, Barben, Groppen, Elritzen und Schmerlen. Der Schweizerische Fischerei-Verband befürchtet, dass noch mehr Arten verschwinden könnten. Bereits heute sind drei Viertel aller einheimischen Fischarten gefährdet, vom Aussterben bedroht oder bereits ausgestorben (SFV, 2022).

Der Sommer 2022 hat erneut grosse Betroffenheit und landesweit Fischrettungsaktionen ausgelöst. Doch kurzfristige **Notmassnahmen** wie z.B. das maschinelle Ausheben von Tiefwasserzonen sind reine Symptombekämpfung und bringen keine längerfristigen Lösungen; Notabfischungen bzw. das Umsiedeln von Fischen in andere Gewässerabschnitte können sogar kontraproduktiv sein (Zunahme Dichtestress, Verbreitung von Krankheiten). Deshalb ist es zentral, neben kurzfristigen Fischrettungsaktionen an den betroffenen Gewässern auch mittel- und langfristig wirksame Verbesserungen zu schaffen, bzw. die Ursachen zu bekämpfen (siehe auch *AquaPlus 2022*), denn aufgrund der Klimaerwärmung ist davon auszugehen, dass extreme Trockenphasen künftig weit häufiger auftreten.



Abbildung 2: Tote Forelle und Elritzen im ausgetrockneten Bach (Schweiz, Sommer 2022. Bild © SFV).

1.2 Grosse Bedeutung der kleinen Gerinne

Rund 75% unserer Fliessgewässerstrecken bestehen aus kleinen Bächen mit einer Sohlenbreite kleiner als 2 m. Aufgrund der eher kleinen Einzugsgebiete sind sie vielfach besonders anfällig für Klimaveränderung, insbesondere im Hinblick auf eine stärkere Saisonalität bei Niederschlägen und die künftig häufigeren Trockenphasen. Viele dieser Bäche liegen ausserhalb der Siedlungsgebiete und können zusammen mit ihren Gewässerräumen als wertvolle Lebensadern und Korridore der heimischen Fauna und Flora dienen. Angesichts der laufenden Klima- und Biodiversitätskrise bedürfen sie jetzt verstärkt unserer Aufmerksamkeit. Aufgrund ihrer geringen Sohlenbreite lässt sich

die Klimaresilienz an kleinen Bächen recht einfach verbessern, indem mit naturnahen Massnahmen der Abfluss im Gerinne verzögert wird.

1.3 Eingetieftete Bäche – ein drängendes Problem

Die zunehmende Trockenheit ist nicht nur durch Niederschlagsarmut, sondern in wesentlichem Masse durch die **anthropogene Veränderung der Gewässer** begründet, die als unnatürlich eingetieftete «Vorfluter» seit langer Zeit vom Umland abgekoppelt sind (Verlust von Wasserretentionsfläche) und sämtliche Niederschläge sehr rasch abführen (Verlust von Grundwasserneubildung), siehe *Minnig et al. 2022*.

Einst waren natürliche Sohlenstabilisatoren überaus häufig in unseren Bächen, z.B. als Biberdämme und Totholzkomplexe, sie wirkten als temporäre Fixpunkte und hielten Wasser und Geschiebe zurück. Durch den Verlust dieser natürlichen Infrastruktur wie auch durch einschneidende Gewässerkorrekturen in den letzten 150 Jahren, haben sich fast alle Schweizer Bäche unnatürlich eingetieft. Einmal eingetieft, nimmt die Erosionstendenz zu (erhöhte Abflusskonzentration), weshalb sich viele Gerinne bis auf den anstehenden Felsen absenken. Eingetieftete Gerinne wurden bis anhin kaum als Problem wahrgenommen, da sie auf den ersten Blick «vorteilhaft» erscheinen (nur selten Überschwemmungen, kaum Vernässungen).



Abbildung 3: Problemfelder und Prozesse eingetiefter Bachsohlen (© Emch+Berger AG Bern).

Angesichts der Klimaerwärmung wirken eingetieftete Gerinne nun aber zunehmend wie Brandbeschleuniger: Einerseits führen tiefe Sohlenlagen zur Absenkung der Grundwasserspiegel, und fehlende Überflutungen verringern die Grundwasserneubildung. Dies stellt angesichts der zunehmenden Häufigkeit extremer Hitze- und Trockenphasen eine massive zusätzliche Gefährdung unserer Trinkwasserversorgung dar. Andererseits konzentrieren eingetieftete Gerinne den Wasserabfluss, wodurch in Phasen mit Starkniederschlägen gegenüber flächigen Überflutungen das Zerstörungspotenzial für Unterlieger (teilweise wesentlich) erhöht.

Auch werden deutlich grössere Mengen des im Kulturland erodierten Bodens weggespült (Verlust regionaler Bodenfruchtbarkeit und Eutrophierung nachfolgender Gewässer bzw. des Meeres - vor allem im Mündungsbereich), wodurch sich das Wasserrückhaltevermögen der Böden weiter verringert und die Anfälligkeit für Dürren verschärft wird (*Minnig et al. 2022*).

Das Zusammenwirken von Erwärmung und Wassermangel wiederum führt zu dramatischen Veränderungen in den Ökosystemen. Dies gefährdet nicht nur die Vielfalt der Fische und Krebse, sondern die gesamte einheimische Biodiversität im und am Wasser.

Wenn die selbstverstärkenden Prozesse Abflusskonzentration, Eintiefung, Bodenverlust und Entwässerung in den Einzugsgebieten nicht umgekehrt werden, können sie zusammen mit den Folgen der Klimaerwärmung zur Austrocknung (*aridification*) der Landschaft führen. Eine Austrocknung der Landschaft kann zur ernsthaften Schädigung von Boden und Vegetation, zu empfindlichen Ernteverlusten und Trinkwassermangel und letztlich zur Wüstenbildung (*desertification*) führen (Lal, 2010). Abbildung 3 zeigt die wesentlichen Zusammenhänge schematisch auf.

Wie aktuelle Metastudien zeigen, kann der Teufelskreis der Austrocknung durch den Einbau naturnaher Infrastrukturen in Bachgerinne (darunter auch Biberdämme und BDAs) gestoppt und sogar in völlig ausgetrockneten Gebieten wieder umgekehrt werden (siehe Norman *et al.* 2022).



Abbildung 4: Stark eingetieftes Bachbett mit den negativen Auswirkungen fehlende Ausuferung, hohe Abflusskonzentration, stete Entwässerung und mangelnde Rehydrierung. (Bild © T. Polli).

1.4 Verlust von Gewässerlebensräumen und Biodiversität

Die anthropogenen Eingriffe an Gewässern haben die artenreichen, gewässertypischen Lebensräume wie Auen, Feuchtgebiete und Moore innerhalb der letzten rund 200 Jahre fast komplett verschwinden lassen. Mit dem Verlust der einst häufigen Lebensräume ist eine grosse Anzahl daran angepasster Tier- und Pflanzenarten stark unter Druck geraten (Minnig *et al.* 2022).

Entsprechend ist heute der Anteil an bedrohten Lebensräumen und Arten in den Gewässern und Feuchtgebieten besonders hoch. Über ein Fünftel der vom Aussterben bedrohten oder in der Schweiz ausgestorbenen Arten sind an Gewässer gebunden, ein weiteres Fünftel an Ufer und Feuchtgebiete. 60% der Wasserpflanzen gelten als bedroht – **das ist mit Abstand der höchste Wert aller ökologischen Pflanzengruppen**. Und nur rund ein Viertel der Fische und Rundmäuler gelten als «nicht gefährdet», neun Arten sind ausgestorben, fünf Arten haben den Status «vom Aussterben bedroht» (BAFU, 2017).

2 Mögliche Abhilfe - Erkenntnisse zu Biberdämmen und BDAs

2.1 Natürliche Biberdämme

Wie uns Naturbeispiele weltweit vor Augen führen, beugen Biberdammreviere durch ihre Abflussverzögerung und damit einhergehende Prozesse (Einstau, Förderung hyporheischer Austausch, Grundwasseranreicherung) sowohl einer weiteren Eintiefung und Austrocknung der Gerinne wie auch lethalen Wassertemperaturanstiegen vor, wodurch diese Gewässer und deren Biozönosen eine viel höhere **Klimaresilienz** aufweisen (u.a. *Bird et al. 2011*, weitere Literaturangaben in *Goldfarb, Flores 2018*).

Neben der Klimaresilienz **steigern Biberdämme** aber auch **die Biodiversität** nachweislich, indem sie die Entstehung gewässertypischer Lebensräume wie wechselfeuchte Übergangszonen und Feuchtgebiete wieder ermöglichen, sie bieten so äusserst wertvolle dynamische Lebensräume für eine Vielfalt an Pflanzen, Insekten, Amphibien, Fischen, Vögeln und Kleinsäugetieren wie z.B. Fledermäuse (u.a. *Sommer et al. 2019*, weitere Literaturangaben in *Minnig et al. 2022*).

2.2 Beaver Dam Analogs

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse zu natürlichen Biberdämmen wurden vor einiger Zeit **künstliche Biberdämme** entwickelt, die es ermöglichen, Gewässer unabhängig von der Besiedlungsdynamik der Biber aufzuwerten und klimaresilienter zu machen.

Die in den USA mittlerweile gut erforschten **Beaver Dam Analogs (BDAs)** werden seit Kurzem auch in der Schweiz eingesetzt (z.B. *Emch+Berger, 2021*) und verfügen über grosses Potenzial, um hierzulande als zusätzliches Instrument zur Aufwertung und Redynamisierung von Bächen, Feuchtgebieten und Auensystemen sowie explizit zur Steigerung deren Klimaresilienz und Biodiversität eingesetzt zu werden (siehe z.B. *Pollock et al. 2015, Goldfarb 2018, Wade et al. 2020, Pearce et al. 2021, Norman et al. 2022*).



Abbildung 5: Visualisierung Prozesse, Dynamik und Habitatvielfalt im Bereich des BDA bzw. bachaufwärts davon.
(© Emch+Berger AG Bern).

Bestehend aus Pfahlreihen und Weidengeflecht, welches mit Bachsubstrat abgedichtet wird, bringen die biberdammähnlichen Holzeinbauten das Bachwasser in die Fläche. Wie ihr natürliches Vorbild verzögern sie den Wasserabfluss (dezentraler Wasserrückhalt) und können so Starkniederschläge entschärfen, die Versickerung steigern (Grundwasseranreicherung), und die Gewässer widerstandsfähiger gegenüber dem Klimawandel machen. Sie schaffen eine Vielzahl von neuen, dynamischen Habitaten für Flora und Fauna, s. Abbildung 6.



Abbildung 6: Visualisierung Prozesse, Dynamik und Habitatvielfalt im Bereich flussabwärts eines BDA, bzw. zwischen zwei BDA-Stufen. Aufgrund der Gehölze ist auf dem Bild nur rund eine Hälfte der BDA-Struktur sichtbar (links im Hintergrund). (© Emch+Berger AG Bern).

2.2.1 Planung von BDAs

BDAs können z.B. im Rahmen von Revitalisierungsprojekten oder auch als Massnahme im Gewässerunterhalt geplant und realisiert werden. Analog natürlichen Biberdammrevieren sind stets mehrere BDAs seriell zu planen (BDA-Kaskade). In der dicht besiedelten Schweiz sind mögliche Anwendungen von BDA stets standortspezifisch zu analysieren und deren Machbarkeit zu prüfen. Potenzielle Standorte liegen v. a. ausserhalb der Bauzonen: in Naturschutzgebieten, extensiv genutztem Landwirtschaftsgebiet und im Wald.

Es wird empfohlen, die in Kap. 3.1 aufgeführten **Planungsgrundsätze für BDAs** zu berücksichtigen (insb. Topografie, Rückstau effekt, Hochwasserschutz, Einleitungen, Nutzungsinteressen).

2.2.2 Erstellung von BDAs

BDAs sind relativ einfach (low-tech) und kostengünstig erstellbar. Die naturnahen Strukturen bestehen aus in der Bachsohle / Uferzone verankerten Pfahlreihen und einem Weidengeflecht, welches mit Bachsubstrat (optional zusätzlich mit Streu) abgedichtet wird.

BDAs können leicht **von Hand oder, wo sinnvoll, auch mit Einsatz von Baumaschinen** erstellt werden, siehe Abbildung 9 und Abbildung 10. Die rein händische Umsetzung bietet insbesondere grosses Potenzial für Aufwertungsaktionen durch Fischerei- oder Pachtvereine (z.B. «Fischer schaffen Lebensraum»). Wenn BDAs zusammen mit einer Baufirma erstellt werden (durch Maschineneinsatz ist sehr rascher Baufortschritt möglich), empfiehlt sich zu Beginn die Erstellung und Begutachtung von Musterabschnitten.

Die Weidenäste für das Flechtwerk können oft vor Ort gewonnen werden, ebenso das Material für die Abdichtung (Aushub, Schlamm etc.). Die Pfähle werden i.d.R. zugeliefert. Robinienpfähle weisen eine sehr hohe Lebensdauer auf. Alternativ können auch Edelkastanienpfähle empfohlen werden.

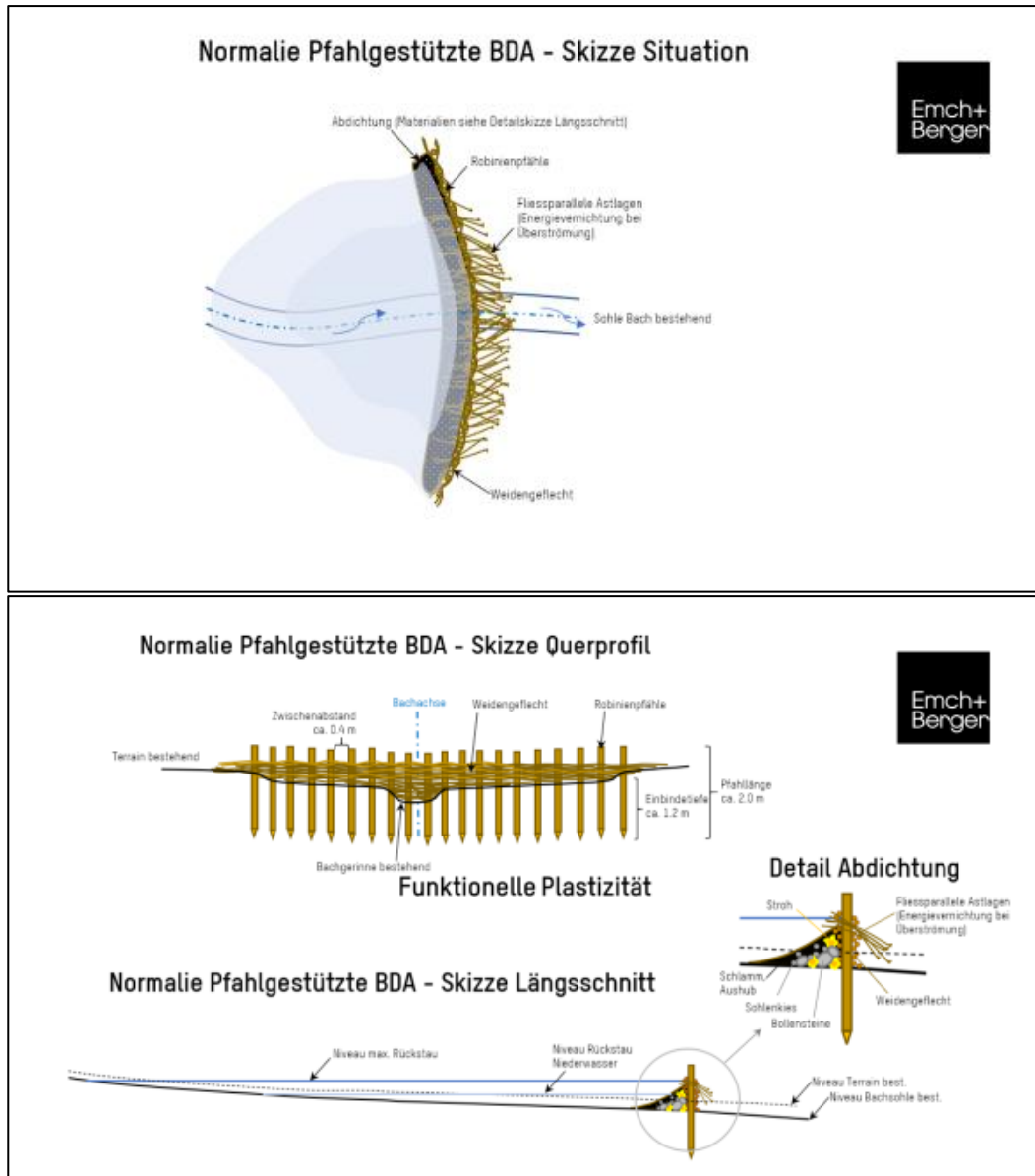


Abbildung 7: Normalie für Pfahlgestützte BDA (s. auch Anhang), die Abmessungen sind projektspezifisch anzupassen.



Abbildung 8: BDA-Erstellung in Handarbeit mit Unterstützung durch tragbare Pfahlramme im Kanton Bern.



Abbildung 9: BDA-Erstellung in Handarbeit mit Unterstützung durch tragbare Pfahlramme im Kanton Thurgau.



Abbildung 10: BDA-Erstellung mit Bagger (Aushub, Pfählen, Erstellen Abdichtung) und Handarbeit (Flechten).

2.2.3 Schweizer Pilotprojekte (Stand Oktober 2022)

Im Kanton Bern wurde Anfang Juli 2022 sechs grössere BDAs in einem Pilotprojekt am Schlossbach in Rümligen BE eingebaut (Emch+Berger, 2022). Kleinere Projekte/Teststrecken wurden zudem am Gilebächli in Neunforn (Projekt Kanton TG, 2021), am Rossgrabenbach in Neuenegg BE (privates Projekt der Arbeitsgruppe BDA, 2022), und an der Wyna in Oberkulm AG (Projekt Fischerei Kanton Aargau, August 2022) umgesetzt. Fotos der genannten Projekte sind im Anhang zu sehen. Weitere Projekte sind derzeit in der Planung.

2.2.4 Wirkungskontrollen

Die in den USA entwickelten BDAs stellen hierzulande ein neues Instrument zur Gewässerrevitalisierung dar. Es wird daher sehr empfohlen, BDA-Projekte mit entsprechenden Wirkungskontrollen zu flankieren, z.B. um die Entwicklung der Lebensräume zu dokumentieren und um die Wirkung auf projektspezifische Fokusarten (aquatisch, semiaquatisch, terrestrisch) gezielt zu untersuchen. Auch Untersuchungen zum Thema Fischgängigkeit / Durchwanderbarkeit können von Interesse sein (vgl. Kap. 3.2). Grundsätzlich sind für Wirkungskontrollen bei BDAs sehr ähnliche

Fragestellungen von Interesse, wie sie auch in ökologischen und hydrogeologischen Untersuchungen an natürlichen Biberdammrevieren untersucht werden (u.a. auch aktuelle Programme des BAFU und der Eawag/WSL).

Die Wirkung der BDAs am **Rossgrubenbach** in Neuenegg, einem bisher nur sehr spärlich wasserführenden Bach, wird laufend mittels einer Timelapse Kamera dokumentiert (Abbildung 11).

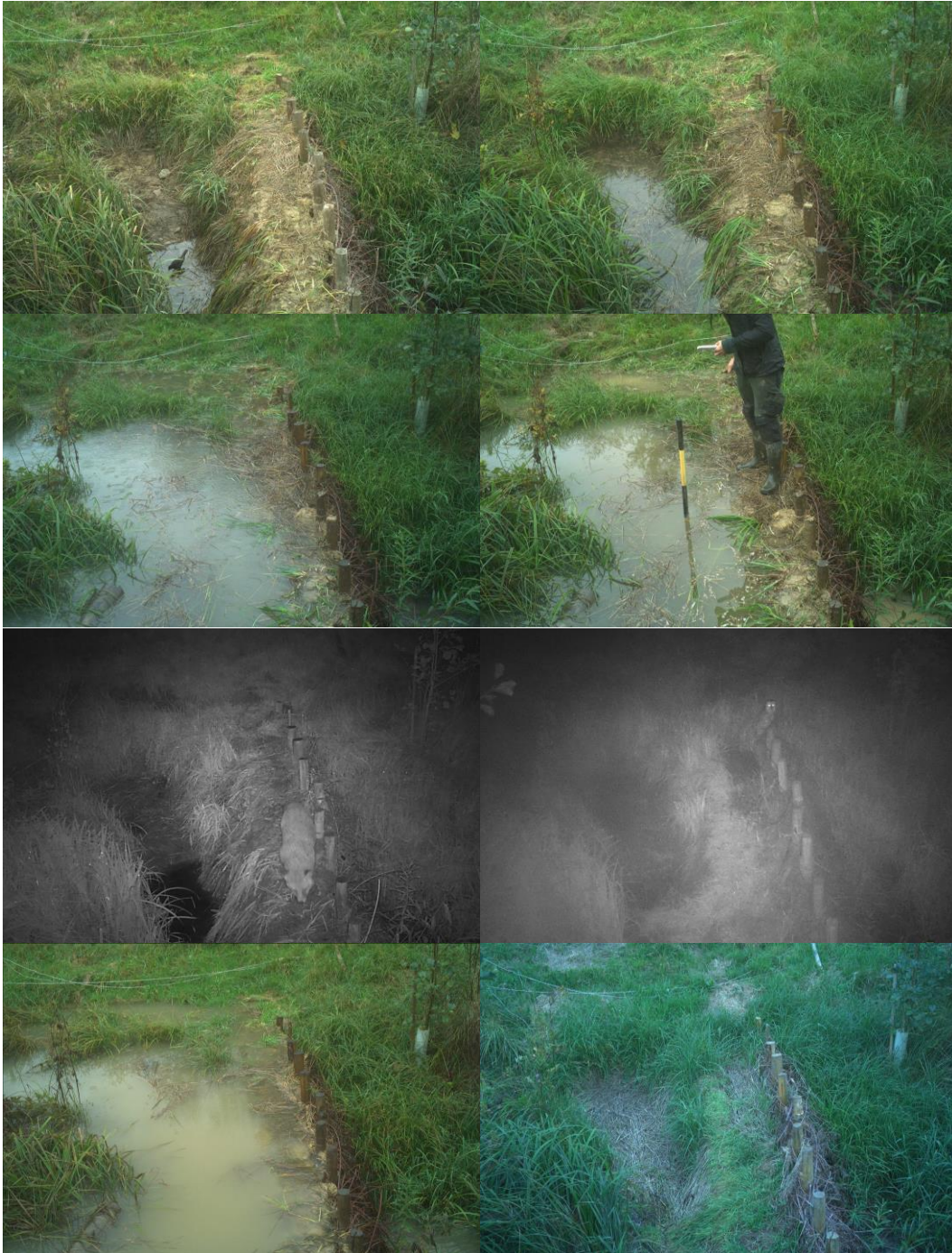


Abbildung 11: Ausschnitt aus Zeitraffer Video des BDA-Projekts am Rossgrubenbach. Nachts dient die Struktur auch mal als Passage für den Fuchs bzw. als Ansitz für eine Eule.

Das BDA-Pilotprojekt am **Schlossbach** in Rümligen wird mit einem mehrjährigen ökologischen Monitoring begleitet.

Die Entwicklung des Bachs und der Feuchtwiese wird ebenfalls laufend mittels Foto-Zeitreihen dokumentiert (Abbildung 12).



Abbildung 12: Ausschnitt aus Zeitraffer Video des BDA-Projekts am Schlossbach, vor während und nach Bau.

2.2.5 Mit BDAs nutzbare Synergien

Die Umsetzung von BDAs an kleinen Bächen zur Steigerung der Klimaresilienz und Förderung der Biodiversität weist grosse Synergien auf mit vielen bereits laufenden oder geplanten Programmen wie z.B. mit der Revitalisierungsplanung, der Biodiversitätsförderung, der Umsetzung der ökologischen Infrastruktur, der Klimaanpassung von Landschaften oder mit Fischschutzmassnahmen bei Trockenextremen und Hitzeereignissen.

2.2.6 Lebensdauer, Gewässerunterhalt, Verfall

BDAs lassen sich im Rahmen des Gewässerunterhalts sowohl erstellen wie auch periodisch kontrollieren und wo erforderlich unterhalten/erneuern. Sie gelten generell als unterhaltsarm. Wo sich BDAs und Gewässerraum eigendynamisch entwickeln dürfen, ist in den ersten Jahren kein Unterhalt der Strukturen erforderlich.

Die Lebensdauer einzelner BDAs beträgt i. d. R. < 10 Jahre (betrifft Flechtwerk) bis maximal 30 Jahre (betrifft Pfähle, abhängig von der Holzqualität). Erfahrungsgemäss können Nachbesserungen beim Flechtwerk nach etwa 5 Jahren sinnvoll sein. Allfällige Erweiterungen der Struktur mit zusätzlichen Pfählen und Flechtwerk (zur Steigerung der Rückhaltewirkung, zur Diversifizierung oder Lenkung der Strömung oder zur weiteren Anhebung der Sohle) können jederzeit durchgeführt werden.

Sollten Biber im Perimeter bereits umgesetzter BDAs aktiv werden, können die Strukturen von den Tieren übernommen und fortan «unterhalten» werden. Wir empfehlen die Situation dann zu evaluieren, um allfälligen Konflikten vorzubeugen.

Auch im Falle eines Versagens verhält sich ein BDA wie sein natürliches Vorbild: Wenn BDA-Strukturen durch den Wasserdruck oder Unterspülung brechen oder kippen, wird die Struktur (analog einem brechenden Biberdamm) umströmt statt verfrachtet und kann so weiterhin als naturnahe Gewässerstruktur wirken. Der Verbund aus Flechtwerk und Geschwemmsel verhindert das Ablösen und Abschwemmen grösserer Teile, weshalb nicht mit einem erhöhten Verkläusungsrisiko zu rechnen ist (gutmütiges Versagen).

Solange das Gesamtsystem im Perimeter wirkt (Wasserrückhalt, häufige Wasseraustritte in Uferzone, Sohlenanhebung), sind einzelne zerfallende oder umströmte Strukturen ohnehin kein Schaden, sondern tragen zur ökologisch wertvollen Heterogenität und Dynamik bei – ein zyklischer Prozess wie er auch in natürlichen Biberdammrevieren auftritt.



Abbildung 13: Nach einem Hochwasser gekippter BDA an der Wyna in Oberkulm, AG. Die Struktur hat sich verformt, ist aber nach wie vor in einem Stück. Es wurden keine Teile abgeschwemmt. Ursache des Kippens war die unzureichende Verankerungstiefe der Pfähle.

3 Weiterführende Informationen

3.1 Planungsgrundsätze für BDAs

In der dicht besiedelten Schweiz sind mögliche Anwendungen von BDAs stets standortspezifisch zu analysieren und deren Machbarkeit zu prüfen. Potenzielle Standorte liegen vor allem ausserhalb der Bauzonen: in Naturschutzgebieten, in extensiv genutztem Landwirtschaftsgebiet und im Wald. Obwohl die Strukturen mit lokalem Material und ohne grosse Maschinen erstellt werden können, sind sie stets fachgerecht zu planen, zu bewilligen, umzusetzen und ggf. zu unterhalten.

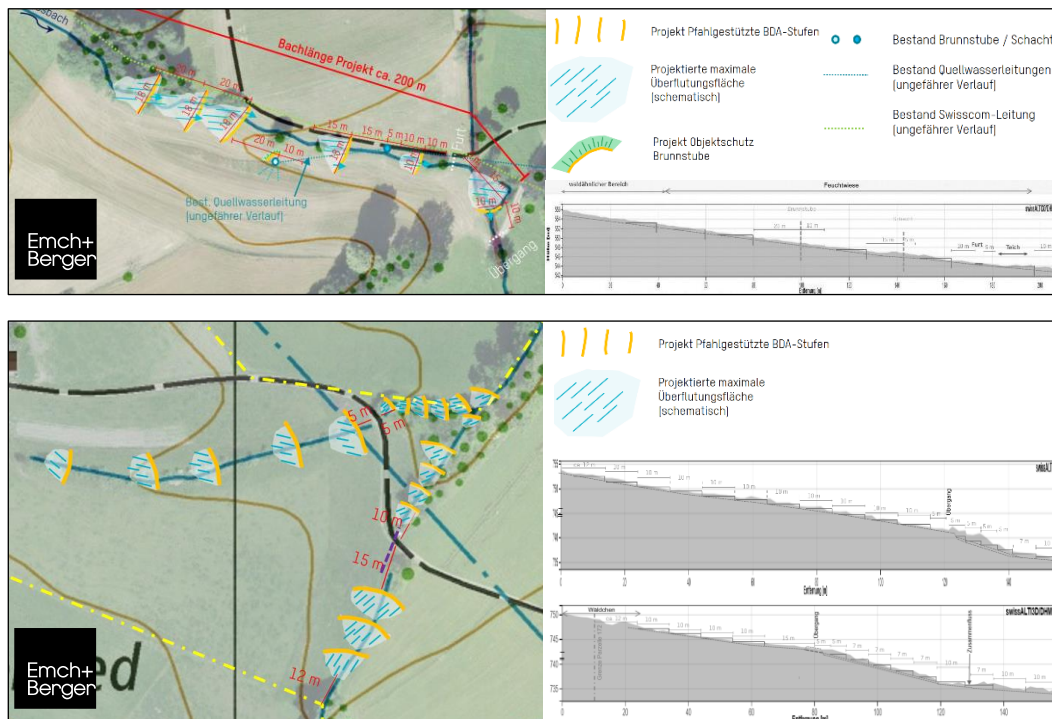


Abbildung 14: Für die BDA-Planung können je nach Anforderungen einfache Projektskizzen ausreichend sein.

Es wird empfohlen, folgende **Planungsgrundsätze für BDA-Projekte** (u.a. Minnig et al. 2022) zu berücksichtigen:

- Frühzeitiger Einbezug der Fischereibehörde (u.a. Thematik in Kapitel 3.2).
- Gemeinsame Ortsschau mit Betroffenen bereits in Konzeptphase.
- Der Einbau der Pfähle (Höhe über Sohle, Verankerungstiefe, Belegungsdichte etc.) sowie die Kolkbildung unterstrom sind fallspezifisch zu bemessen bzw. zu beurteilen. Da BDA analog dem natürlichen Vorbild stets seriell angeordnet werden, kann die Höhe der einzelnen BDA relativ gering sein. Die Kolkentiefe kann weiter mittels flussparalleler Astlagen unterwasserseitig reduziert werden (overflow mattress).
- Im Gesamtsystem dürfen weder durch die Strukturen und den Rückstau noch durch die projektierte Sohlenanhebung Hochwasserschutzdefizite geschaffen werden.
- Weil mit BDAs Wasseraustritte häufiger sind und ggf. lokale Uferanrisse auftreten können, sind angrenzende Nutzungen einzubeziehen (Standortwahl, BDA-Höhe, Fließwege). Vorteilhaft sind daher Gewässerräume mit Biodiversitätsbreite sowie Lagen, wo diese Prozesse durch die Topografie begrenzt sind oder sie auf angrenzenden Flächen keinen Schaden anrichten. Auch eine Nutzungsanpassung kann zielführend sein (z. B. Nassreisanbau, Jacot et al. 2021).
- Mit pfahlgestützten BDAs wird i.d.R. eine gute Planbarkeit der Effekte in Bezug auf angrenzende Nutzungen erreicht (Steuerung Höhe und Breite Einstau, Lenkung Wasserführung bei Überströmen), siehe z.B. Abbildung 15.
- Die Einhaltung eines Mindestabstands zu Bachquerungen ist empfohlen.

- Mögliche Rückstaueffekte in Drainagen sind zu berücksichtigen, ggf. sind flankierende Massnahmen wie Sammelleitungen sinnvoll (Angst 2014, Emch+Berger 2020)
- Lokale Anhebungen des Grundwasserspiegels durch BDA sind zu berücksichtigen, spezifische Schutzziele sind einzuhalten.
- Zu klären ist, woher das Material für die Sohlenufandung kommt: Je nach Bestockungsgrad und Uferbeschaffenheit ist nach Einbau z. B. durch Ausbildung seitlicher Läufe mit lokaler Seitenerosion im Gewässerraum zu rechnen. Wo kaum Seitenerosion möglich ist, sind Art und Umfang des Feststofftransports von oberhalb des Abschnitts für die Sohlenanhebung ausschlaggebend. Während dieses Prozesses kann im Unterlauf ein temporäres Geschiebedefizit entstehen.
- In Bächen mit nur geringer Wasserführung sind BDA eher dicht auszuführen, um den gewünschten Wasserrückhalt zu ermöglichen.
- Bewilligung und Realisierung erfolgen z. B. im Rahmen einer Revitalisierung oder im Gewässerunterhalt.
- Empfohlen ist, die Entwicklung periodisch zu beurteilen. BDA sind unterhaltsarm, aber weitere Eingriffe sind evtl. zielführend, beispielsweise eine seitliche Ergänzung mit weiteren Pfählen, Nachbesserungen beim Flechtwerk, die Kontrolle allfälliger Seitenerosion in Zwischenphasen sowie die Lenkung des Oberflächenabflusses. Die Lebensdauer einzelner BDA beträgt i. d. R. < 10 Jahre. Solange das Gesamtsystem aber wirkt (Wasserrückhalt, Sohlenanhebung), bringen diese zerfallenden und umströmten Strukturen ökologisch wertvolle Dynamik.
- Wo Biber bereits aktiv sind oder mit einer Besiedlung zu rechnen ist, sollte eine bibergerechte Planung angestrebt werden, um allfällige Konflikte vorzubeugen (Angst 2014).

Pfahlgestützte BDA - Funktionelle Plastizität

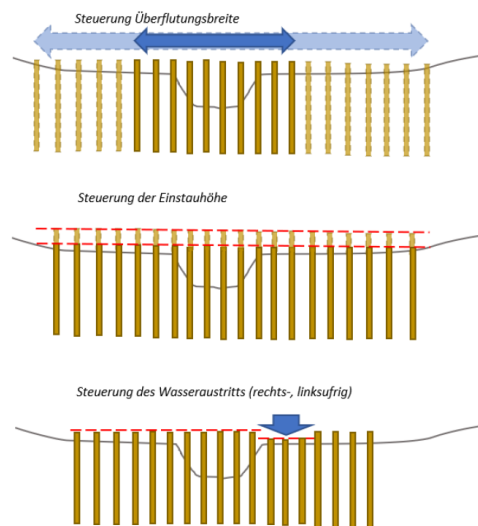


Abbildung 15: Möglichkeiten zur Steuerung des Einstaus (Höhe, Breite) und zur Lenkung des Hauptabflusses.

3.2 Stand des Wissens zur Fischgängigkeit

Bei wasserbaulichen Bauwerken wie Schwellen stellt sich folgerichtig stets die Frage nach deren Fischgängigkeit. Diskutiert wird diese auch im Zusammenhang mit natürlichen Biberdämmen im Zuge der Rückkehr des Bibers in sein ehemaliges (und nun stark anthropogen verändertes) Verbreitungsgebiet sowie in der Folge auch bei künstlichen Biberdämmen bzw. BDAs.

3.2.1 Biberdämme und BDAs wirken nicht als Wanderhindernisse

Biberdämme sind immanent lückenhafte und dynamischen Strukturen. Die heimischen (Fisch-)arten sind seit Jahrmillionen an diese Strukturen wie auch an damit verbundene Effekte auf die Durchgängigkeit angepasst (sehr lange Co-Evolution, *Goldfarb, Flores 2018*).

Wie Studien aus den USA nachweisen (z.B. *Bouwes, N. et al. 2016, Lokteff, R. et al. 2013*) können Salmoniden Biberdämme und auch BDAs auf- wie abwärts passieren. Grundsätzlich nutzen die Fische dafür drei Wege:

- a. bei Lücken durschwimmen
- b. bei Mittel-/Hochwasser drüber schwimmen
- c. seitlich umschwimmen, sobald sich an den Rändern des Damms Läufe bzw. kleine Umgehungsgerinne gebildet haben

Insgesamt dürften Biberdämme wie auch BDAs somit allenfalls als *temporäre Wandererschwer-nisse* wirken, nicht aber als *Hindernisse*. Folglich können negative Auswirkungen auf Populationsdynamik oder -genetik heimischer Fischarten praktisch ausgeschlossen werden.

3.2.2 Allfällige Wandererschwer-nisse sind nicht von Dauer

Die Lebensdauer holziger Strukturen ist viel geringer als die technischer Querbauwerke, weshalb auch allfällige temporäre Wandererschwer-nisse über die Zeit verschwinden:

- BDAs – wie auch verlassene Biberdämme – verlieren ihre dämmende Wirkung mit der Zeit aufgrund der Holzersetzung im wechselfeuchten Bereich sowie der konstanten Dynamik (Freispuhlen von Lücken, Erosion von Ufersubstrat bis zum Umfliessen der Struktur). Diese Prozesse lösen wiederum wertvolle Dynamik im Gewässer aus und stellen letztlich die Durchlässigkeit des Ausgangszustands wieder her.
- Wesentlich für einstauende Wirkung eines BDAs ist die Lebensdauer des Weidengeflechts (< 10 Jahre). Die Pfähle sind langlebiger (max. 30 Jahre). Wo BDAs unterhalten oder vom Biber übernommen und von ihm laufend erneuert werden, verlängert sich die Lebensdauer wie bei natürlichen Biberdämmen entsprechend.

3.2.3 Fazit: Nutzen überwiegt bei Weitem

Für eine pragmatische Abwägung in Bezug auf den Einsatz von BDAs in Schweizer Bächen dürften folgende Punkte entscheidend sein:

1. Derzeit fehlen in Europa noch Studien zur Durchlässigkeit künstlicher Biberdämme. Die Forschungsergebnisse aus den USA zur Durchlässigkeit wie auch zur positiven Wirkung von BDAs auf die Fischfauna (insb. auch Salmoniden) durch eine deutliche Steigerung der Habitatqualität dürfte sich aber in den wesentlichen Punkten auf die europäischen Verhältnisse übertragen lassen.
2. Der mit BDAs erreichbare Nutzen punkto aquatischer Habitatqualität, Wasserführung, Wassertiefe und -temperatur dürften eine mögliche temporäre Wandererschwer-nis bei Weitem überwiegen – dies trifft insbesondere zu, wo es sich um Bäche mit sehr tiefen Niederwasserabflüssen oder gar um austrocknende Bäche handelt (in Zukunft möglicherweise sehr viele).
3. Gemäss Studien ist es möglich, mit BDAs und funktional ähnlichen «leaky dams» an Bächen und Rinnsalen, die nur noch temporär wasserführend sind, über die Zeit wieder eine ganzjährige Wasserführung und damit potenziellen Lebensraum für Fische zu schaffen bzw. zurückgewinnen zu können (Umkehr der Austrocknung, z.B. *Norman et al. 2022*). Insofern ist es also sinnvoll, BDAs bereits jetzt auch an Bächen umzusetzen, die *nicht* als Fischgewässer gelten (und wo sich die Frage zur Fischgängigkeit erübrigt).



Abbildung 16: Überlebenskampf einer Forelle im aufgeheizten Flachwasser (Bild © SFV).

Wir empfehlen die Thematik bei Projektstart jeweils mit den zuständigen Fachstellen und Fachpersonen zu besprechen, insbesondere bei besonders wertvollen Fischgewässern.

3.3 Erstellungskosten BDAs

3.3.1 Planung und Bauleitung

Die Planungskosten für ein BDA-Projekt sind je nach Bewilligungsverfahren und Projektumfang unterschiedlich. Je nach Projektstandort und Umfang kann zumindest ein niederschwelliges Bewilligungsverfahren notwendig sein.

Bei einer Umsetzung im Rahmen des Gewässerunterhalts sind generell sehr kostengünstige Planungen möglich.

3.3.2 Maschinelle Erstellung mit Baufirma

Die Kosten für Material und Arbeiten (abhängig von der Grösse der einzelnen BDA-Strukturen) liegen grob zwischen CHF 1'500.- und 4'500.- pro Struktur.

3.3.3 Händischer Einbau mit Freiwilligenarbeit

Die Materialkosten (abhängig von der Grösse der einzelnen BDA-Strukturen) liegen grob zwischen CHF 150.- und 500.- pro Struktur. Idealerweise verteilt sich die Arbeitslast auf mehrere HelferInnen aus Vereinen oder sonstigen Freiwilligeneinsätzen.

4 Grundlagen, Literatur

BAFU (Hrsg.) (2021): Renaturierung der Schweizer Gewässer. Stand Umsetzung Revitalisierungen 2011-2019. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

Medienmitteilung SFV vom 12.08.2022: SFV-FSP Schweizerischer Fischerei-Verband: In+der+Schweiz+ist+ein+grosstes+Fischsterben+im+Gang!

AquaPlus (2022): Fischschutzmassnahmen bei Hitzeereignissen. Arbeitshilfe. Pilotprojekt F.13 im Rahmen des Pilotprogrammes zur Anpassung an den Klimawandel.

Minnig, S., Werdenberg, N., Polli, T., Egloff, N., Widmer, A., Vonlanthen, P., Angst, C. (2022); Revitalisieren mit "Beaver Dam Analogs" in der Schweiz - Der Natur abgeschaut - innovative und kostengünstige Methoden zur Stärkung unserer Fliessgewässer. Aqua & Gas.

Emch+Berger (2021): Ökologische Aufwertung Schlossbach Rümligen. Förderung Feuchtstandorte und Auendynamik mit künstlichen Biberdämmen, Beilage zur Unterhaltsanzeige. Emch+Berger AG Bern, Dezember 2021

Emch+Berger (2022): Ökologische Aufwertung Schlossbach Rümligen. Förderung Feuchtstandorte und Auendynamik mit künstlichen Biberdämmen, Ausführungsprojekt Emch+Berger AG Bern, April 2022

Emch+Berger (2022): Bauleiterbericht Ökologische Aufwertung Schlossbach Rümligen. Emch+Berger AG Bern, September 2022

LaI, R., 2010. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. Bioscience 60, 708-721. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8>.

Norman, L. et al. (2022): Natural infrastructure in dryland streams (NIDS) can establish regenerative wetland sinks that reverse desertification and strengthen climate resilience. Science of The Total Environment. 849. 157738. 10.1016/j.scitotenv.2022.157738.

BAFU (Hrsg.) 2017: Biodiversität in der Schweiz: Zustand und Entwicklung. Ergebnisse des Überwachungssystems im Bereich Biodiversität, Stand 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1630: 60 S.

Sommer, R. et al. (2019): Der Einfluss des Bibers auf die Artenvielfalt. NATURSCHUTZ und Landschaftsplanung 51 (03)

Bird, B. et al. (2011): Beaver and Climate Change Adaption in North America. A Simple, Cost-Effective Strategy. Wild Earth Guardians, Grand Canyon Trust, The Lands Council

Goldfarb, B.; Flores, D. L. (2018): Eager: the surprising, secret life of beavers and why they matter. White River Junction, Vermont : Chelsea Green Publishing

Goldfarb, B. (2018) : Beavers, Rebooted: Artifical beaver dams are a hot restoration strategy, but the pojects aren't always welcome. Science 360(6393)

Pollock, M. et al. (2015) : The Beaver Restoration Guidebook: Working with Beaver to Restore Streams, Wetlands, and Floodplains. Version 1.0. Portland, Oreogon: United States Fish and Wildlife Service

Wade, J. et al. (2020) : Beaver dam analogues drive heterogeneous groundwater-surface water interactions. Hydrological Processes

Pearce, C. et al. (2021) : Impact of beaver dam analogues on hydrology in à semi-arid floodplain. Hydrological Processes

Jacot, K. et al. (2021): Nassreisanbau in der Schweiz: Produktion mit Artenförderung kombinieren. Inside Natur + Landschaft

Emch+Berger (2020): Sammelleitung Orpundbach – Dokumentation Bibermassnahmen

Angst, C. (2014). Biber als Partner bei Gewässerrevitalisierungen. Anleitungen für die Praxis. Umwelt-Wissen Nr. 1417. Bundesamt für Umwelt, Bern: 16 S.

*Bouwes, N. et al. (2016): Ecosystem experiment reveals benefits of natural and simulated beaver dams to a threatened population of steelhead [*Oncorhynchus mykiss*]. Nature. Scientific Reports 6 :28581.*

Lokteff, R. et al. (2013) : Do Beaver Dams Impede the Movement of Trout? Transactions of the American Fisheries Society.

Anhang A Fotos Pilotprojekte

A.1 BDAs am Schlossbach Rümligen BE





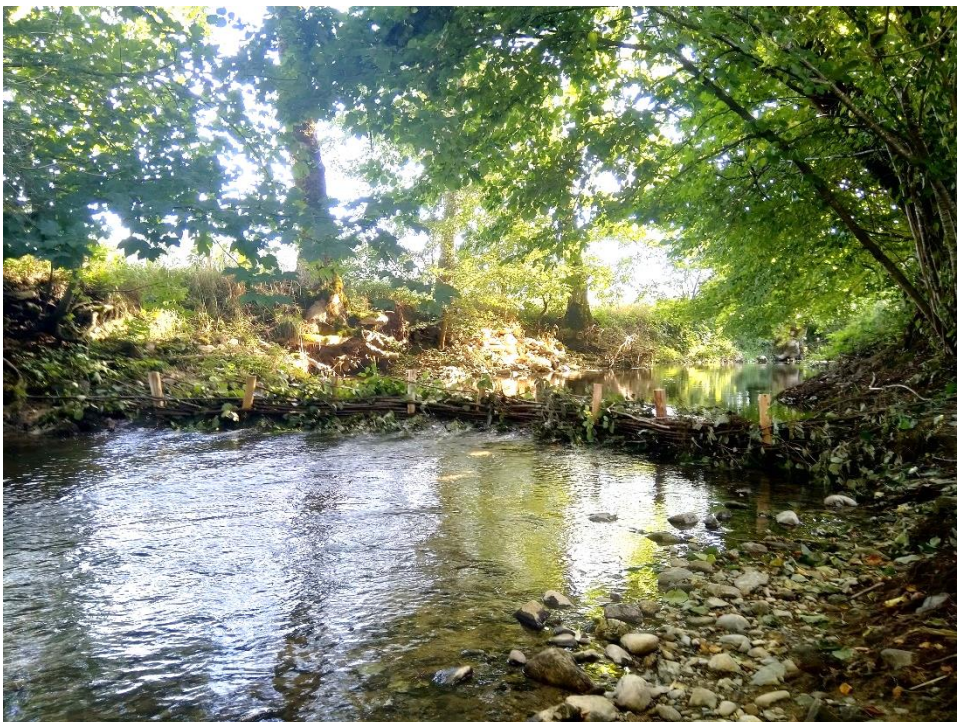


A.2 BDAs am Rossgrabenbach, Neuenegg BE



A.3 BDAs an der Wyna, Oberkulm AG





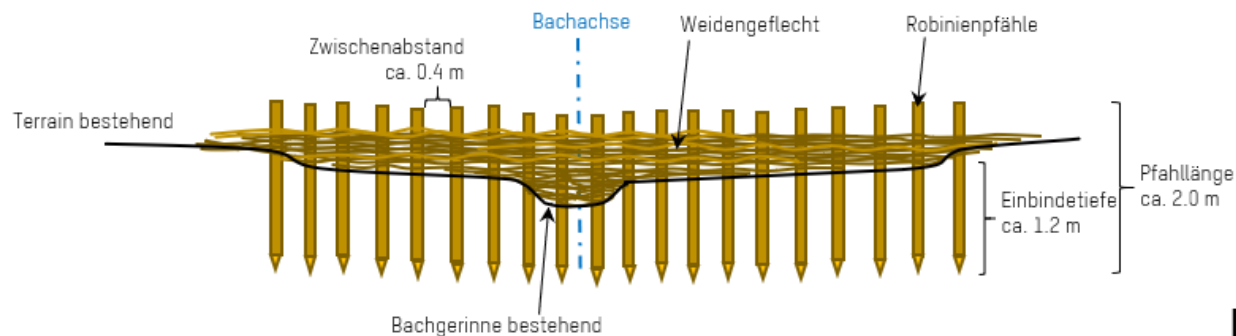
A.4 BDAs am Gilebächli / Thuraunen, Neunforn TG



Anhang B Normalien Pfahlgestützte BDA

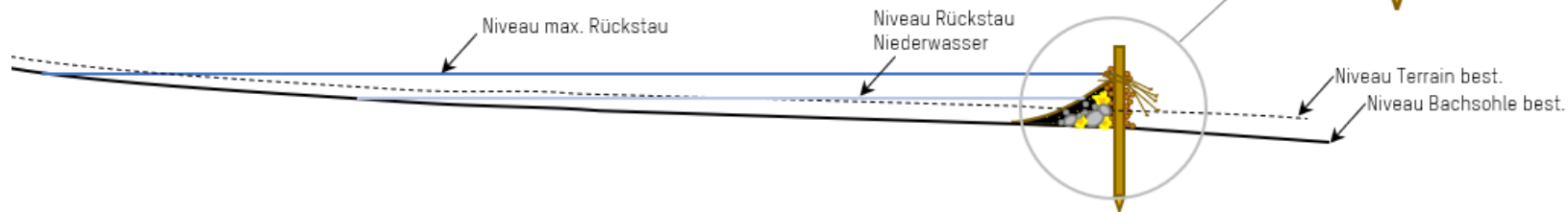
Normalie Pfahlgestützte BDA - Skizze Querprofil

Emch+
Berger

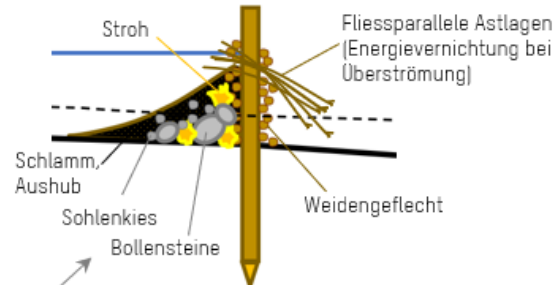


Funktionelle Plastizität

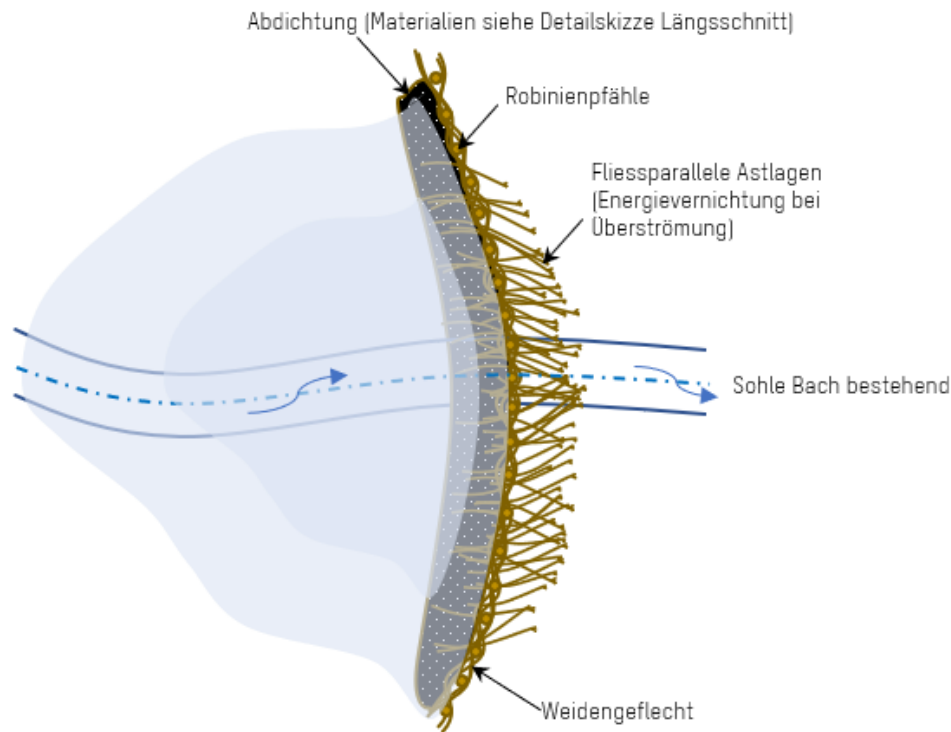
Normalie Pfahlgestützte BDA - Skizze Längsschnitt



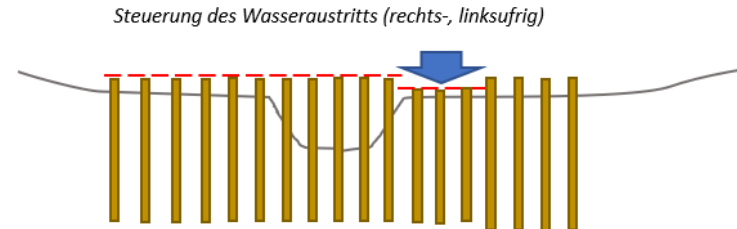
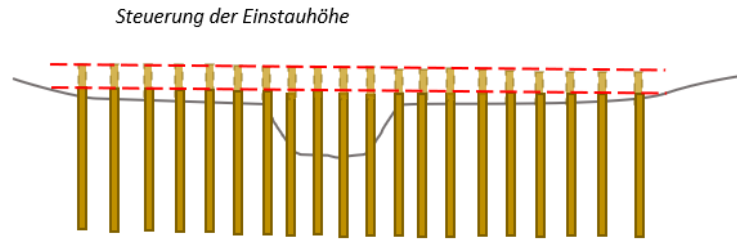
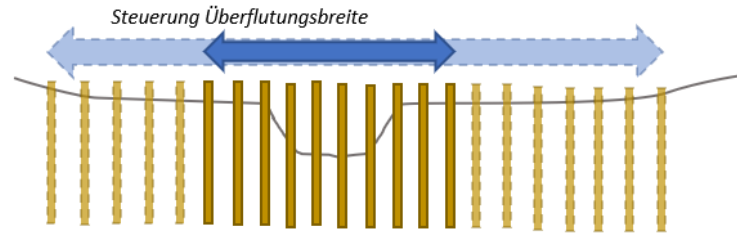
Detail Abdichtung



Normalie Pfahlgestützte BDA - Skizze Situation



Pfahlgestützte BDA - Funktionelle Plastizität



Anhang C Fachartikel der Arbeitsgruppe BDA (Aqua&Gas, April 2022)



DER NATUR ABGESCHAUT: «BEAVER DAM ANALOGS»

INNOVATIVE UND KOSTENGÜNSTIGE REVITALISIERUNGSMETHODE FÜR NATÜRLICHERE FLIESSGEWÄSSER

Bei fast allen mittelländischen Fließgewässern liegt die Sohle unnatürlich weit unter dem umgebenden Terrain. Dieser menschengemachte flächendeckende Zustand unterbindet natürliche Funktionen wie die Entwicklung artenreicher Lebensräume und die Pufferung des Wasserhaushalts, was sich zunehmend kritisch auf Natur und Gesellschaft auswirkt. Mit Initialstrukturen, die natürlichen Biberdämmen ähneln, können diese Funktionen wiederhergestellt werden.

Silvan Minnig, Genossenschaft Umweltbildner.ch

Niels Werdenberg; Andreas Widmer, Emch+Berger AG Bern*

Timon Polli, Polli Natur und Dienste

Nicole Egloff; Pascal Vonlanthen, Aquabios Sàrl

Christof Angst, Biberfachstelle / info fauna

RÉSUMÉ

INSPIRÉ DE LA NATURE: «BEAVER DAM ANALOGS» – MÉTHODE DE REVITALISATION DES COURS D'EAU NATURELS

La grosse différence de niveau entre le lit de nos cours d'eau et le terrain interdisent des interactions importantes entre les cours d'eau et leurs rives – au détriment des espaces de vie qui en sont tributaires (zones alluviales, zones humides, marais, etc.) et d'un régime des eaux naturellement régulé. Les lits creusés étant depuis près de 200 ans la «norme», ce déficit anthropique est rarement reconnu, et peu inversé, même en cas de revitalisations. Face au réchauffement climatique et à la disparition des espèces, cette omission devrait avoir de vastes conséquences. Comme le montre la recherche actuelle, les ruisseaux creusés ayant des aménagements similaires aux barrages de castors peuvent être sauvés de l'immersion. Il est presque possible de restaurer des rives immergées et des espaces de vie typiques des zones alluviales sensibles de notre biodiversité. L'augmentation de la rétention d'eau amortit en outre le microclimat, la quantité d'eau et sa température. Les structures initiales, économiques, ont le même effet que leur modèle naturel, mais peuvent être planifiées et sont indépendantes de la présence du castor. Cela permet de revaloriser les cours d'eau rapidement et de manière ciblée.

EINLEITUNG

Eingetiepte Gewässer treten nur bei seltenen Ereignissen über die Ufer. Dadurch können sie ihre natürlichen ökologischen und hydrologischen Funktionen aber nur sehr eingeschränkt wahrnehmen. Es fehlen überstaute Uferbereiche, wechselfeuchte Übergangszonen und ein flurnaher Grundwasserstand – wichtige Voraussetzungen funktionaler Gewässerlebensräume mit ihrem Artenreichtum (Fig. 1). Zudem senken eingetiepte Gewässer den Grundwasserspiegel, verringern die Grundwasserneubildung und können dadurch Grundwasserreserven gefährden.

Da es auf den ersten Blick vorteilhaft erscheint, dass eingetiepte Gerinne selten über die Ufer treten, wurden bisher kaum Massnahmen zur Wiederherstellung naturnaher Sohlenlagen umgesetzt. Demgegenüber stellt das Gewässerschutzgesetz, GschG, jedoch klar, dass der gesamte Gewässerraum – nicht nur das Gerinne – dem Schutz vor Hochwasser und der Gewährleistung der ökologischen Funktionen dient. Diese Dienste können eingetiepte Gewässer aber kaum erfüllen, eben weil sie nur selten über die Ufer treten.

* Kontakt: niels.werdenberg@emchberger.ch



Fig. 1 Beispiel eines eingetieften Gewässers. Mit BDA könnten eigendynamische Prozesse initiiert werden (vgl. Stadium A in Fig. 2). Dadurch könnte der Bach kostengünstig revitalisiert werden. (©S. Minnig)

Biberdämme würden natürliche Abhilfe schaffen (Fig. 2): Die Dammreviere heben die Gewässersohlen an, wirken sich positiv auf Hydrologie und Temperaturregime aus und bieten äusserst wertvolle dynamische Lebensräume für eine Vielfalt an Pflanzen, Insekten, Amphibien, Fischen, Vögeln und Kleinsäugetieren (u.a. Fledermäuse) [1–7]. Doch Biber werden längst nicht alle eingetieften Gewässer wiederbesiedeln können. Denn fragmentierte Gewässer erreichen sie nur schlecht, stark verbauten Gewässern fehlt es an Raum, und in solchen ohne Gehölz sind Nahrung und Baumaterial knapp. Es liegt also an uns Menschen, dem Naturbeispiel zu folgen und weitere Gewässer mit analogen künstlichen Biberdämmen, sogenannten «Beaver Dam Analogs» (BDA) aufzuwerten und krisentauglich zu machen (Fig. 2).

Gemäss Bundesamt für Umwelt BAFU wird das gesteckte Ziel von 50 km Revitalisierungen pro Jahr mit den derzeitigen Instrumenten nicht erreicht. Deshalb sind nun kostengünstigere Methoden und eigendynamische Gewässer gefragt [8]. Genau hier können

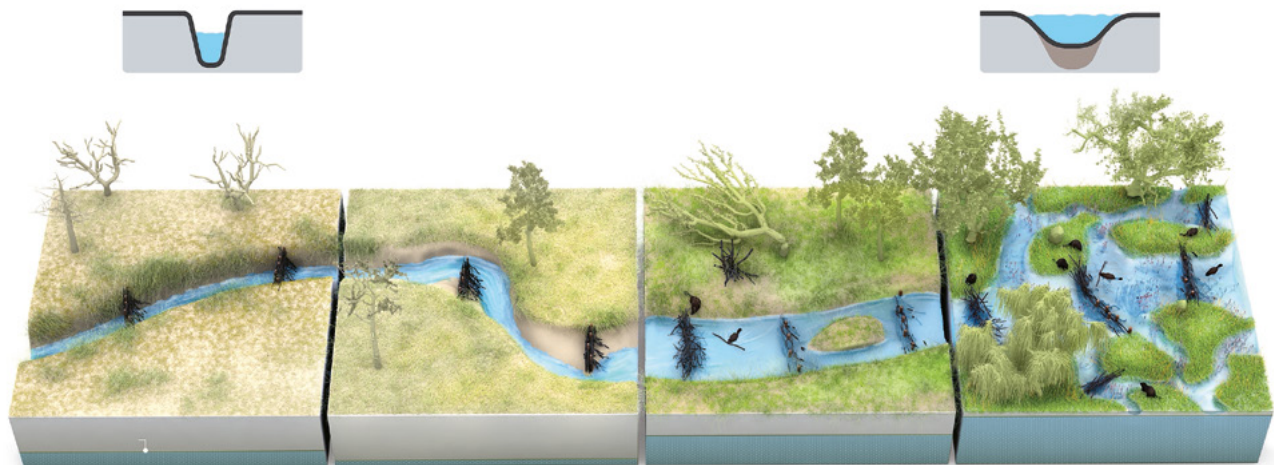
naturnahe, biberdammartige Initialstrukturen ansetzen.

EINGETIEFTE GEWÄSSER

URSACHEN

Eingetiefte Gewässer sind ein weltweites, v.a. von Menschen verursachtes Problem [9–11]. Insbesondere im Flachland sind viele Schweizer Fliessgewässer davon betroffen (Fig. 1). Folgende Ursachen beschleunigten um 1900 das Problem:

- Mit der Ausrottung des Bibers [12] und der Intensivierung der Waldnutzung [13] verschwanden Biberdämme und Totholzverkläuerungen als natürliche Sohlenstabilisatoren [14].
- Im Zuge der Gewässerkorrekturen wurden viele Gewässer aktiv abgesenkt, um die durch Kanalisierung gewonnenen Nutzflächen vor Überflutung zu schützen [15].
- Weitere Eingriffe, u.a. zur Wasserkraftnutzung, führten vielerorts zu einer gestörten Geschiebezufuhr, einem weiteren zentralen Treiber der Sohlenerosion (Fig. 1).



STADIUM A

In einem eingetieften Bach werden mehrere BDA als Initialbauten eingesetzt (im Bild sind jeweils nur zwei gezeigt). Die seriell eingebauten BDA helfen, die eigendynamische Entwicklung anzukurbeln. Im ersten Stadium, dem Stadium A, heben die kleinen durchlässigen Querbauten den Wasserpegel und den Grundwasserspiegel leicht an.

STADIUM B

Die BDA verändern den Abfluss, wodurch der Bach lokal das Ufersubstrat mobilisieren kann und sich das Gerinne lokal verbreitert. Das Substrat wird von den nachfolgenden BDA zurückgehalten, wobei sich die Sohle anhebt. Die Geschiebeumlagerung bringt wertvolle Gewässerdynamik. Da die BDA jetzt seitlich umflossen werden, fällt der Einstauwirkung weg und der Grundwasserspiegel senkt sich wieder etwas ab.

STADIUM C

Die initialen BDA werden von Bibern angenommen und teils an das breitere Gerinne angepasst. BDA können auch baulich ergänzt werden. Die Gewässersohle wird laufend angehoben, die Wasserspiegelbreite weiter vergrössert und Dynamik sowie Heterogenität von Gewässersohle und Uferbereich nehmen zu. Im breiteren Gerinne wird die Strömung verlangsamt. Der Grundwasserspiegel wird deutlich angehoben.

STADIUM D

Die Dynamik führt zur Bildung von Umgehungsgerinnen. Zusammen mit weiterem Totholzeintrag bringt dies das Gewässer auf die Fläche, schafft komplexe, auenähnliche Lebensräume und hebt den Grundwasserspiegel auf ein naturnahes Niveau. Die neue Gewässerlandschaft wirkt sich insb. positiv auf die Fischfauna, den Wasserrückhalt und die Klimaresilienz der Landschaft aus.

Fig. 2 Schematische Gewässerentwicklung unter dem Einfluss von Beaver Dam Analogs (BDA) aus [42]. Im abgebildeten Szenario unterstützen zugewanderte Biber die letzten Entwicklungsschritte des Gewässers hin zur naturnahen Gewässerlandschaft (Stadien C und D).



Fig. 3a Untersuchungen zeigen, dass Fische aller Altersstadien von der vielfältigen Wirkung der Biberdämme profitieren (insbesondere in den Stadien C und D, Fig. 2). BDA können diese Funktion potenzieren und mehr Fischlebensraum schaffen. (©T. Polli)



Fig. 3b Biber gestalten naturnahe Gewässer; Menschen planen sie mit BDA. So können die positiven Effekte von Biber-Dammrevieren für Gewässerrevitalisierung und Sohlenanhebung genutzt werden – unabhängig von der Besiedlungsdynamik der Biber. (©S. Minnig)

DEFIZITE UND HANDLUNGSBEDARF

Neben der Zerstörung gewässersäumender Lebensräume durch die Kultivierung (Verlust von 90% der Feuchtgebiete [16]) verschärfen eingetiefte Sohlen das Problem. Diese führen zur morphologischen Verarmung der Gerinne, Abkopplung noch vorhandener Auenrelikte und zum Verlust grosser Teile der aquatischen, terrestrischen und amphibischen Biodiversität [9, 17].

Das Erbe eingetiefter Gerinne ist auch in Bezug auf den Klimawandel [18] problematisch: Einerseits verursachen tiefe bzw. erodierende Sohlenlagen eine Absenkung der Grundwasserspiegel, und fehlende Überflutungen verringern die Grundwasserneubildung. Dies stellt angesichts der zunehmenden Häufigkeit extremer Hitze- und Trockenphasen eine massive zusätzliche Gefährdung unserer Trinkwasserversorgung dar. Andererseits konzentrieren eingetiefte Gerinne den Wasserabfluss, wodurch in Phasen mit Starkniederschlägen gegenüber flächigen Überflutungen wesentlich mehr Zerstörungspotenzial für Unterlieger entsteht. Auch werden deutlich grössere Mengen des im Kulturland erodierten Bodens weggespült (Verlust regionaler Bodenfruchtbarkeit und Eutrophierung nachfolgender Gewässer bzw. des Meeres), während sich das Wasserrückhaltevermögen der Böden weiter verringert [19]. Das Zusammenwirken von Erwärmung und Wassermangel wiederum führt zu dramatischen Veränderungen in den Ökosystemen. Dies gefährdet nicht nur die Vielfalt der Fische und Krebse [20], sondern die gesamte einheimische Biodiversität im und am Wasser.



Fig. 4 Biberdammähnliche Effekte (Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit, Sohlenanhebung, Wasserrückhalt usw.) entstehen wie im obigen Bild gezeigt auch durch natürliche Totholzansammlungen (vgl. Stadium C, Fig. 2). (©T. Polli)

DIE NATÜRLICHE REFERENZ

Biber haben unsere Gewässer mit ihren Fäll-, Grab- und Stauaktivitäten über mehrere Millionen Jahre gestaltet – besonders die rege Dammbauaktivität mit rund zehn Dämmen pro Fließgewässerkilometer der einst häufigen Nagetiere hat sich nachweislich in Geologie und Landschaft niedergeschlagen [21]. Gewässertypische Artengemeinschaften sind an diesen Gestaltungstrieb angepasst, so auch die heimischen Fischarten. Mit dem Eintrag von Totholz, der Entstehung von Umgehungsgerinnen und der Anlage von langsam fließenden Staureichen bieten sich in Dammrevieren vielfältige dynamische Fischlebensräume (Fig. 3a und b). Davon profitieren sowohl Jungfische (in Form von Verstecken und strömungs-

beruhigten Bereichen im Biberteich, bei Ausstiegen und beim Wintervorrat) wie auch adulte Fische (durch Deckungsangebot, Rückzugsgebiete/Temperaturrefugien in Biberteichen sowie Kolken und Furten unterhalb der Dämme) [1, 22]. In Studien aus den USA wurde zudem nachgewiesen, dass Fische Biberdämme überwinden können [1, 23]. Ein Dammrevier bleibt dabei stets dynamisch: Wenn einzelne Dämme versagen, werden sie vom Biber wieder hergestellt oder anderswo neu errichtet. Gewässermorphologie, Wasserhaushalt und Biodiversität profitieren entsprechend stark von einer Wiederbesiedlung des Bibers [7, 10, 21, 24–28]. Zudem helfen Biberdammreviere nachweislich, Hochwasserspitzen zu dämpfen [29], sogar in Bergbächen [30]. Die positiven Effekte der Biberaktivität werden aktuell in einem



Fig. 5a Durch Biberdämme werden Flächen im Gewässerraum überstaut. Dies führt zu ökologisch hochwertigen, heterogenen und dynamischen Lebensräumen und erhöht die Grundwasserneubildung (vgl. Stadium D, Fig. 2). Bei Hochwasser werden weitere Flächen geflutet, was hilft, Hochwasserspitzen zu brechen. Diese Effekte stellen sich auch durch BDA mit der Zeit automatisch ein.

(©T. Polli)



Fig. 5b Wird der Uferbereich überstaut, führt dies zur Vergrößerung der Wasserspiegelbreite. Selbst kleinere Gewässer können so ökologisch und hydrologisch wertvolle weicherartige Abschnitte ausbilden (vgl. Stadium D, Fig. 2). Im Unterschied zur Biberaktivität sind bei der Umsetzung von BDA Lage und Ausdehnung dieser Abschnitte planbar, wodurch Infrastrukturen und gewässernahe Nutzungen optimal berücksichtigt werden können. (©S. Minnig)

grossen Forschungsprojekt des BAFU und der Eawag/WSL untersucht [6].

Natürliche Fliessgewässer bergen auch ohne Biber grosse Mengen an Totholz (Fig. 4). Beispiele aus Nordamerika zeigen, dass ein natürliches Totholzregime Gewässermorphologie und Ökologie entscheidend prägt [14]. Zentral sind die bei uns längst fehlenden, grossen «Schlüsselhölzer», die auch vom Hochwasser nicht mobilisiert werden können. An ihnen verfängt sich laufend weiteres Schwemmholz, wodurch grosse, lagestabile Totholzansammlungen entstehen. In Flüssen bilden sich so riesige Totholzinseln, stabile Nebenarme und bewaldete Inseln [14, 31]. In Bächen bilden sich v. a. Verklausungen aus, die Biberdämmen nicht unähnlich sind. Der grosse ökomorphologische Nutzen lagestabiler Totholzstrukturen ist gut dokumentiert und findet in Revitalisierungen zunehmend Beachtung [32–34].

In Natura wirken Biberdämme und Totholzstrukturen somit recht ähnlich. Sie verlangsamen Abfluss und Geschiebetransport deutlich, halten Nährstoffe und Sedimente zurück und fördern relativ hohe Sohlenlagen. Durch Einstau und Überstauung kolmationsfreier Bereiche verstärken sie ausserdem das Einsickern ins Grundwasser und die Wasserreinigung wesentlich [26, 29, 31, 35–39] (Fig. 5a und b). Sie ermöglichen einen starken hyporheischen Austausch (Grund- und Oberflächenwasser) und schaffen eine hohe Konnektivität

zwischen Fliessgewässer und Umgebung, wodurch Wasserdargebot und -temperatur gepuffert werden bei gleichzeitig hoher Verfügbarkeit und Diversität von Lebensräumen [24]. Biber- und Totholzeffekte dürften sich nicht nur addieren, sondern multiplizieren. Denn einerseits erhöht der Biber den Eintrag an Schlüsselhölzern, indem er grosse Bäume fällt oder diese im Einstaubereich neuer Dämme absterben. Andererseits teilen grosse Totholzstrukturen breite Talflüsse vermehrt in kleinere Nebenarme auf, welche wiederum schmal genug sind, um vom Biber gestaut zu werden. Natürlicherweise würden Bäche

und Flüsse daher kaum ein einzelnes Hauptgerinne ausbilden, sondern wären eine vielschichtig und multidirektional durchflossene Gewässerlandschaft, die eine enorme Habitat- und Artenvielfalt aufweist [40]. Sie sind gegen natürliche Extreme wie Trockenheit, Hochwasser und auch Waldbrände widerstandsfähiger [39].

REVITALISIEREN MIT «BEAVER DAM ANALOGS»

Um eingetiefte Gewässer zu revitalisieren und wichtige Ökosystemleistungen zurückzuholen, muss die Sohle wieder an-



Fig. 6 BDA kurz nach der Erstellung, mit Wasserpegelanstieg um rund 10–15 cm. Der Pegelanstieg bewirkt einen Anstieg des Grundwassers (vgl. Stadium A, Fig. 2). Seriell eingebaut, kann der Wasserrückhalt selbst in kleinen Bächen stark vergrössert werden. (©S. Minnig)



Fig. 7a Das dynamische Abflussverhalten in Biberdambereichen fördert die lokale Mobilisierung von Ufersubstrat, das sich hinter dem nachfolgenden Damm abgelagert und die Hebung der Gewässersohle bewirkt. Dieser Effekt kann auch durch BDA erreicht werden (vgl. Stadium B, Fig. 2). (©S. Minnig)



Fig. 7b Sechs Monate später: Ein Hochwasser spülte den Damm teilweise weg. Die darauffolgende Ufererosion liefert das notwendige Substrat für die Sohlenanhebung im Unterlauf. Mit BDA können diese Uferanrisse in Lage und Ausdehnung gesteuert werden (vgl. Stadium B, Fig. 2 und Kap. «Planungsgrundsätze»). (©T. Polli)

gehoben und der Gewässerraum häufiger überschwemmt werden können. So können die eingetieften Gewässer klimatauglich gemacht werden. Dafür sollten die Effekte von Biberdämmen und Totholz genutzt und analoge Strukturen als Biomimikry verwendet werden (Fig. 6). An Gewässern mit Sohlenbreiten >10 m können sog. *Engineered Log Jams* (ELJ) eingesetzt werden, welche die Totholzprozesse natürlicher Flüsse wieder in Gang bringen [35]. In der Schweiz werden ELJ bereits erfolgreich eingesetzt. Eine Planungshilfe wurde hierzu vom Kanton Bern veröffentlicht [34].

Doch es gilt, vor allem kleinere Gewässer aus der Versenkung zu holen, denn diese machen mehr als 70% der Schweizer Flie遥strecken aus [41]. Dafür eignen sich Initialstrukturen wie *Beaver Dam Analogs* (BDA). Diese künstlichen Biberdämme sind in Nordamerika schon gut untersucht und relativ weit verbreitet [1, 10, 42], in Europa derzeit aber noch kaum bekannt. Sie sind kostengünstig und einfach zu erstellen – entscheidende Faktoren für die Umsetzung. BDA bestehen i.d.R. aus relativ niedrigen, seriell eingebauten Pfahlreihen, die mit Weidenflechtwerk, Schlamm und Steinen abgedichtet werden [10, 42, 43].

Durch dynamische Prozesse (Fig. 7a und b) und den Rückhalt von Wasser und Feststoffen stellt sich eine Sohlenauflandung ein, die mit der Zeit eine Entwicklung des eingetieften Gewässers zurück zur autotypischen Morphologie ermöglicht. Sind Biber in der Nachbarschaft bereits aktiv, können sie diese Initialbauten übernehmen und aus-

bauen, was die ökologischen Effekte vervielfältigt und die Lebensdauer der Strukturen erhöht [42].

Wie Studien zeigen, erhöhen BDA mit oder ohne Biber die Konnektivität von Gerinne und umgebendem Terrain (Fig. 8), indem die Sohle angehoben wird. Weiter erhöhen sie Abfluss- und Grundwasserspiegel und puffern den Wasserhaushalt im Jahresgang [44, 45]. Von BDA können aquatische und semiaquatische Arten in hohem Masse profitieren, z.B. bedrohte Amphibienarten sowie Salmoniden [1, 2]. BDA schwächen Hitzespitzen ab, schaffen überlebenswichtige Kaltwasserpools [22] und können so Hilfe für den Erhalt von stark unter

Druck geratenen Fischarten leisten. Als kostengünstiges, planbares Instrument können BDA helfen, die Biodiversitäts- und Revitalisierungsziele von Bund und Kantonen effektiv zu erreichen.

PLANUNGSGRUNDSÄTZE

In der dicht besiedelten Schweiz sind mögliche Anwendungen von BDA stets standortspezifisch zu analysieren und deren Machbarkeit zu prüfen. Potenzielle Standorte liegen v.a. ausserhalb der Bauzonen: in Naturschutzgebieten, extensiv genutztem Landwirtschaftsgebiet und im Wald. Obwohl die Strukturen mit lokalem Material und ohne grosse Maschinen er-



Fig. 8 Biberdämme heben die Gewässersohle oberhalb des Damms durch Ablagerungen stark an. Im Bild sind die abgelagerten Sedimente gut sichtbar. Dieser Effekt kann auch durch BDA erreicht werden (vgl. dazu Stadium C, Fig. 1). (©T. Polli)

stellt werden können, sind sie stets fachgerecht zu planen, zu bewilligen, umzusetzen und ggf. zu unterhalten:

- Der Einbau der Pfähle (Höhe über Sohle, Verankerungstiefe, Belegungsdichte etc.) sowie die Kolkbildung unterstrom sind fallspezifisch zu bemessen bzw. zu beurteilen. Da BDA analog dem natürlichen Vorbild stets seriell angeordnet werden, kann die Höhe der einzelnen BDA relativ gering sein. Die Kolkentiefe kann weiter mittels flussparalleler Astlagen unterwasserseitig reduziert werden (*overflow mattress*).
- Im Gesamtsystem dürfen weder durch die Strukturen und den Rückstau noch durch die projektierte Sohlenanhebung Hochwasserschutzdefizite geschaffen werden.
- Da mit BDA Wasseraustritte häufiger sind und lokale Uferanrisse auftreten können, sind angrenzende Nutzungen einzubeziehen (Standortwahl, BDA-Höhe, Fliesswege). Vorteilhaft sind daher Gewässerräume mit Biodiversitätsbreite sowie Lagen, wo diese Prozesse durch die Topografie begrenzt sind oder sie auf angrenzenden Flächen keinen Schaden anrichten. Auch eine Nutzungsanpassung kann zielführend sein (z.B. Nassreisanbau) [46].
- Mögliche Rückstaueffekte in Drainagen sind zu berücksichtigen, ggf. sind flankierende Massnahmen wie Sammelleitungen sinnvoll [47, 48].
- Lokale Anhebungen des Grundwasserspiegels durch BDA sind zu berücksichtigen, spezifische Schutzziele sind einzuhalten.
- Zu klären ist, woher das Material für die Sohlenauflandung kommt: Je nach Bestockungsgrad und Uferbeschaffenheit ist nach Einbau z.B. durch Ausbildung seitlicher Läufe mit lokaler Seitenerosion im Gewässerraum zu rechnen. Wo kaum Seitenerosion möglich ist, sind Art und Umfang des Feststofftransports von oberhalb des Abschnitts für die Sohlenanhebung ausschlaggebend. Während dieses Prozesses kann im Unterlauf ein temporäres Geschiebedefizit entstehen.
- In Bächen mit nur geringer Wasserführung sind BDA relativ dicht auszuführen, um den gewünschten Wasserrückhalt zu ermöglichen.
- Bewilligung und Realisierung erfolgen z.B. im Rahmen einer Revitalisierung oder im Gewässerunterhalt.
- Empfohlen ist, die Entwicklung perio-



Fig. 9a Der Bau von BDA erfordert i. d. R. nur einfache Werkzeuge und Baumaterialien. Üblicherweise wird zuerst ein Grundgerüst aus Holzpfählen erstellt. Lage, Höhe, Breite und Verankerung der BDA sind auf die Projektanforderungen abzustimmen (vgl. Kap. «Planungsgrundsätze»).

(©S. Minnig)

disch zu beurteilen. BDA sind unterhaltsarm, aber weitere Eingriffe sind evtl. zielführend, beispielsweise eine seitliche Ergänzung mit weiteren Pfählen, Nachbesserungen beim Flechtwerk, die Kontrolle allfälliger Seitenerosion in Zwischenphasen sowie die Lenkung des Oberflächenabflusses. Die Lebensdauer einzelner BDA beträgt i. d. R. < 10 Jahre. Solange das Gesamtsystem aber wirkt (Wasserrückhalt, Sohlenanhebung), bringen diese zerfallenden und umströmten Strukturen ökologisch wertvolle Dynamik.

- Wo Biber bereits aktiv sind oder mit einer Besiedlung zu rechnen ist, sollte eine bibergerechte Planung angestrebt werden, um allfällige Konflikte vorzubeugen [47].

POTENZIAL UND PILOTPROJEKTE IN DER SCHWEIZ

Nach Einschätzung der Autorenschaft ist das Potenzial für BDA in fast allen biogeografischen Regionen der Schweiz sehr gross. Mögliche Anwendungsgebiete sind:

Ausserhalb Bauzonen

Entlang der Bäche (70% der Fließstrecke des schweizerischen Flussnetzwerks) sind BDA zur Schaffung wertvoller auenähnlicher Lebensräume einsetzbar, sowohl über lange Strecken wie auch als

häufige Trittsteine. Dadurch würde die Vernetzung von Artenpools gefördert und die ökologische Infrastruktur gestärkt. Je nach Standortbedingungen bietet der bestehende Gewässerraum hierfür das nötige Aktionsfeld. Im Wald kann eine fallspezifische Interessenabwägung nötig sein.

Auengebiete

Zwei Drittel der insgesamt 326 Auengebiete von nationaler Bedeutung sind in einem ungenügenden Zustand [49]. BDA in Giessenläufen und Auenbächen regenerieren degradierte Auenrelikte, sie erhalten und fördern deren Artenvielfalt.

Moore

Viele Hochmoore befinden sich in einem entwässerten Zustand und setzen kontinuierlich CO₂ frei [50]. BDA sind zur Wiedervernässung von Mooren einsetzbar und fördern damit den Klima-, Arten- und Moorschutz.

Biber und Klima

BDA können auch verwendet werden, um Biber gezielt «anzulocken», damit sie die Gewässer anschliessend dynamisch formen. Das Potenzial für Klimaschutz und Klimaanpassung ist in allen genannten Anwendungen gegeben, wo möglichst viele BDA über eine längere Strecke als Gesamtsystem wirken. Dadurch



Fig. 9b Die Abdichtung der BDA wird meist mit lokal vorhandenem Material wie Ästen, Steinen und Bachsubstrat ausgeführt. Wie beim natürlichen Vorbild sind BDA stets seriell einzubauen. Sind die einfachen Initialstrukturen einmal eingebaut, verändern sie die Gewässerdynamik, schaffen wertvolle Habitate und ermöglichen über die Zeit eine naturnahe Gewässerentwicklung hin zu autotypischen Lebensräumen.

(©D. Tinner)

werden autotypische Ökosystemleistungen wie Grundwasserbildung, Wasserreinigung, Nährstoffrückhalt, Rückhalt von Treibhausgasen und Hochwasserretention [51, 52] aktiviert. Ein lokal gut gepufferter Wasserhaushalt kann in künftigen Trockenextremen darüber entscheiden, ob wir lokale Fischpopulationen oder auch Ernten halten oder verlieren.

In der Schweiz wurden bisher BDA-Pilotprojekte in einem Gewässer im Kanton Thurgau (Fig. 6, 9a und b) und in einem im Kanton Bern umgesetzt. An einem weiteren Bach im Kanton Bern steht die Realisierung kurz bevor. Weitere Projekte sind aktuell schweizweit in Planung.

AUSBLICK UND EMPFEHLUNG

Die Reintegration von Biber und Totholz bzw. deren Biomimikry (BDA, ELJ) in unsere Gewässer bietet grosse Chancen für Auenlebensräume und gewässertypische Biozönosen. Sowohl Biber- als auch Nachahmungsbauten sind nach Auffassung der Autorenschaft ein Schlüssel zur Erreichung der Klimaanpassung unserer Gewässer und der Qualitätsziele

für die ökologische Infrastruktur.

Bestehende Biberdammreviere führen vor Augen, welche enormen Effekte damit zu erreichen sind. Um die gesteckten Revitalisierungsziele zu erreichen und die Folgen der Klima- und Biodiversitätskrise abzuschwächen, sollte nun bei weiteren eingetieften Gewässern selbst Hand angelegt werden. Mit BDA stehen dafür vielversprechende und kostengünstige Massnahmen zur Verfügung. Für deren Umsetzung braucht es fallspezifische Planungen, um potenzielle Risiken zu berücksichtigen und Schäden zu vermeiden. Um hierzulande Erfahrungen zu sammeln und die Akzeptanz dieser Massnahmen zu erhöhen, bieten sich v. a. Auenprojekte und räumlich grosszügige Revitalisierungen an. Im Landwirtschaftsgebiet werden hingegen flankierende Massnahmen nötig sein, um eine Vernässung wertvollen Kulturlands zu verhindern – zumindest so lange Drainagen aus Sicht Landwirtschaft noch zielführend sind – was sich mit dem Klimawandel mittelfristig ändern dürfte.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bouwes, N. et al. (2016): Ecosystem experiment reveals benefits of natural and simulated beaver

dams to a threatened population of steelhead (*Oncorhynchus mykiss*). *Nature. Scientific Reports* 6:28581

- [2] Campbell-Palmer, R. et al. (2020): A review of the influence of beaver *Castor fiber* on amphibian assemblages in the floodplains of European temperate streams and rivers. *Herpetological Journal*, Volume 30, <https://doi.org/10.33256/hj30.3.135146>, pp. 135-146
- [3] Hafner, A. (2018): Amphibien- und Libellenaufnahmen 2018 am Bibersee Marthalen. Heruntergeladen am 11. Januar 2022: www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/naturschutz/naturschutzgebiete/auenlandschaft-thurmuendung/erfolgskontrollen/ek_amphibien_libellen_2018.pdf
- [4] Messlinger, U. (2011): Monitoring von Biberrevieren in Westmittelfranken. Bund Naturschutz in Bayern e. V. Heruntergeladen am 11. Januar 2022: https://www.bund-naturschutz.de/fileadmin/Interner_Bereich/Schlussbericht_Monitoring_Biber_Mfr_2018.pdf
- [5] Nummi, N. et al. (2011): Bats benefit from beavers: a facilitative link between aquatic and terrestrial food web. *Biodivers Conserv* (2011) 20:851–859
- [6] Robinson, C.; Bryner, A. (2021): Auch Bäche in landwirtschaftlichen Gebieten profitieren vom Biber. Von News-Plattform vom 9. Februar 2021: <https://www.eawag.ch/de/news-agenda/news-plattform/news/auch-baeche-in-landwirtschaftlichen->

- gebieten-profitieren-vom-biber/
- [7] Sommer, R. et al. (2019): Der Einfluss des Bibers auf die Artenvielfalt. NATURSCHUTZ und Landschaftsplanung 51 (03)
- [8] BAFU (Hrsg.) (2021): Renaturierung der Schweizer Gewässer. Stand Umsetzung Revitalisierungen 2011-2019. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern
- [9] Montgomery, D. (2007): *Dirt: The Erosion of Civilizations*. University of California Press
- [10] Pollock, M. et al. (2014): Using Beaver dams to Restore Incised Ecosystems. *BioScience*
- [11] Wang, S. et al. (1997): *Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision: Stabilization, Rehabilitation and Restoration*. University of Mississippi
- [12] Stocker, G. (1985): Biber (*Castor fiber*) in der Schweiz. Probleme der Wiedereinbürgerung aus biologischer und ökologischer Sicht. Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf, S. 149
- [13] Della Casa, P. et al. (2015): Wald, in: *Historisches Lexikon der Schweiz (HLS)*, Version vom 29.04.2015. Abgerufen am 2.8.2021.: <https://hls-dhs-dss.ch/de/articles/007849/2015-04-29/>
- [14] Polvi, L.; Wohl, E. (2013): Biotic Drivers of Stream Planform: Implications for Understanding the Past and Restoring the Future. *BioScience*
- [15] Vischer, D. (2006): Gewässerkorrekturen, in: *Historisches Lexikon der Schweiz (HLS)*, Version vom 11.12.2006. Abgerufen am 31.7.2021.: <https://hls-dhs-dss.ch/de/articles/007850/2006-12-11>
- [16] Ewald, K. C.; Klaus, G. (2009): *Die entwässerte Landschaft in: Die ausgewechselte Landschaft*. Bern: Haupt Verlag
- [17] Shields, F. et al. (2009): The stream channel incision syndrome and water quality. *Ecological Engineering*
- [18] BAFU (Hrsg.) (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer: Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101: 134 S.
- [19] Dembinski, M.; Werder, U. (Hrsg.) (1997): *Renaturierung von Fließgewässern und Auen*. VSÖ Publikationen, Band 2. Hamburg: ad fontes verlag
- [20] Aeschlimann, A. (2021): Trockenheit, Hitze und Niedrigwasser: Klimaanpassungsmassnahmen für kälteliebende Fischarten, Bern
- [21] Goldfarb, B.; Flores, D. L. (2018): *Eager: the surprising, secret life of beavers and why they matter*. White River Junction, Vermont: Chelsea Green Publishing
- [22] Weber, N. et al. (2017): Alteration of stream temperature by natural and artificial beaver dams. *Plos One*
- [23] Lokteff, R. et al. (2013): Do Beaver Dams Impede the Movement of Trout? *Transactions of the American Fisheries Society*
- [24] Bird, B. et al. (2011): *Beaver and Climate Change*
- Adaption in North America. A Simple, Cost-Effective Strategy. Wild Earth Guardians, Grand Canyon Trust, The Lands Council
- [25] Derek, G. (2021): *Bringing back the beaver: the story of one man's quest to rewind Britain's waterways*. White River Junction, Vermont: Chelsea Green Publishing
- [26] Larsen, A. et al. (2021): Dam builders and their works: Beaver influences on the structure and function of river corridor hydrology, geomorphology, biogeochemistry and ecosystems. *Earth-Science Reviews* 218 103623
- [27] Pollock, M. et al. (2003): *Hydrologic and Geomorphic Effects of Beaver Dams and Their Influence on Fishes*. American Fisheries Society Symposium.
- [28] Puttock, A. et al. (2016): Eurasian beaver activity increases water storage, attenuates flow and mitigates diffuse pollution from intensively-managed grasslands. *Science of the Total Environment*
- [29] Zahner, V. (2018): Einfluss des Bibers auf den Wasserhaushalt. Schweizer Fachtagung Biber, Frauenfeld. Heruntergeladen am 11. Januar 2022: www.unine.ch/files/live/sites/cscf/files/shared/documents/castor/deutsch/Tagungen/2018_Fachtagung%20Biber/Vortrag%20V._2018_Fachtagung%20Biber%20Frauenfeld.pdf
- [30] Nyssen, J. et al. (2011): Effect of beaver dams on the hydrology of small mountain streams: Example from the Chevril in the Ourthe Orientale basin, Ardennes, Belgium. *Journal of Hydrology*
- [31] Collins, B. D. et al. (2012): The floodplain large-wood cycle hypothesis: A mechanism for the physical and biotic structuring of temperate forested alluvial valleys in the North Pacific coastal ecoregion. *Geomorphology* (139-140 (2012) 460–470)
- [32] Meyer, L. et al. (2018): Revitalisierung bissiger Gewässer mit Schlüsselholzern - Beispiel Scherlibach BE. *Ingenieurbiologie* 2/18
- [33] Werdenberg, N.; Widmer, A. (2018): Stammzellenkur für die Alte Aare – ein Totholz-Grossprojekt im Mittelland. *Ingenieurbiologie* 2/18
- [34] Widmer, A. et al. (2019): *Planungshilfe Engineered Log Jam*. Renaturierungsfonds der Kantons Bern (Hrsg.)
- [35] Abbe, T. et al. (2018): *Engineered Log Jams: Recent Developments in Their Design and Placement, with examples from the Pacific Northwest, U.S.A.* In Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier
- [36] Covino, T.; Wohl, E. (2017): Beaver-mediated lateral hydrologic connectivity, fluvial carbon and nutrient flux, and aquatic ecosystem metabolism. *Water Resources Research*
- [37] Larsen, A.; Larsen, J. (2018): *VerDAMMte Bäche: Wie Biber Gewässer beeinflussen*. Schweizer Fachtagung Biber, Frauenfeld. Heruntergeladen am 11. Januar 2022: https://www.unine.ch/files/live/sites/cscf/files/shared/documents/castor/deutsch/Tagungen/2018_Fachtagung%20Biber/03_VerDAMMte%20B%C3%A4che_Anne-gret%20Larsen.pdf
- [38] Wohl, E. et al. (2019): Natural Wood Regime In Rivers. *BioScience*, Volume 69, Issue 4, April 2019, Pages 259–273, <https://doi.org/10.1093/biosci/biz013>
- [39] Wohl, E. et al. (2019): Managing for large wood and beaver dams in stream corridors. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain
- [40] Burchsted, D. et al. (2010): *The River Discontinuum: Applying Beaver Modifications to Baseline Conditions for Restoration of Forested Headwaters*. Center for Integrative Geosciences. 1
- [41] Peter, A.; Schölzel, N. (2018): Die Bedeutung kleiner Fließgewässer für unsere Fische. *Aqua & Gas* 7/8
- [42] Goldfarb, B. (2018): Beavers, Rebooted: Artificial beaver dams are a hot restoration strategy, but the projects aren't always welcome. *Science* 360(6393)
- [43] Pollock, M. et al. (2015): *The Beaver Restoration Guidebook: Working with Beaver to Restore Streams, Wetlands, and Floodplains*. Version 1.0. Portland, Oregon: United States Fish and Wildlife Service
- [44] Wade, J. et al. (2020): Beaver dam analogues drive heterogeneous groundwater-surface water interactions. *Hydrological Processes*
- [45] Pearce, C. et al. (2021): Impact of beaver dam analogues on hydrology in a semi-arid floodplain. *Hydrological Processes*
- [46] Jacot, K. et al. (2021): Nassreisenbau in der Schweiz: Produktion mit Artenförderung kombinieren. *Inside Natur + Landschaft*
- [47] Angst, C. (2014). Biber als Partner bei Gewässerrevitalisierungen. *Anleitungen für die Praxis*. Umwelt-Wissen Nr. 1417. Bundesamt für Umwelt, Bern: 16 S.
- [48] Werdenberg, N.; Widmer, A. (2020): *Sammelleitung Orpundbach – Dokumentation Bibermassnahmen*
- [49] Bonnard, L.; Lussi, S. (2021): Auen erhalten und aufwerten – echte Herausforderung für Fachleute Natur und Landschaft. *Inside Natur + Landschaft*
- [50] Siegrist, M. (2021): Klimaschutz durch die Renaturierung von Hochmooren. *Inside Natur + Landschaft*
- [51] Mehl, D. et al. (2013): Analyse und Bewertung von Ökosystemfunktionen und -leistungen großer Flussauen. *KW Korrespondenz*
- [52] Scholz, M. et al. (2012): Ökosystemfunktionen in Flussauen. Analyse und Bewertung von Hochwasserretention Nährstoffrückhalt, Treibhausgas-Senken-/Quellenfunktion und Habitatfunktion. *Schriften. Naturschutz und biologische Vielfalt*