

# Flussaufweitungen: Möglichkeiten und Grenzen

■ Lukas Hunzinger

## Zusammenfassung

Seit rund 12 Jahren werden in der Schweiz Flussaufweitungen geplant und ausgeführt. Mit ihrer Hilfe soll die Sohle eines Flusses stabilisiert und das Fließgewässer aufgewertet werden. In der Aufweitung soll sich ein dynamisches, verzweigtes Gerinne entwickeln.

Die Erfahrungen der vergangenen Jahre lehren uns, unter welchen Voraussetzungen diese Zielsetzungen erfolgreich umgesetzt werden können. Das Ausmass der morphologischen Prozesse wie Bank- und Kolkbildung, Geschiebeablagerung und Veränderung des Längengefälles hängen einerseits von den Abmessungen der Aufweitung (Länge und Breite) und andererseits von den übergeordneten naturräumlichen Randbedingungen ab. Die Hochwasserhydrologie und die Geschiebelieferung aus dem Einzugsgebiet prägen massgeblich die Entwicklung in der Aufweitung. Wird beim Bau einer Aufweitung kiesiges Aushubmaterial abtransportiert, wird das Ziel einer Sohlenstabilisierung unterlaufen.

Wie alle Wasserbauten sollten auch Flussaufweitungen auf ihr Verhalten bei Überlast geprüft werden. Wegen des ungleichförmigen Abflusses sind die Ufer in Aufweitungen besonders hohen hydraulischen Belastungen ausgesetzt und müssen entsprechend gesichert werden. Die grössten Belastungen treten mit wenigen Ausnahmen nicht bei den höchsten Abflüssen auf. Die Aufweitungen reagieren sehr elastisch auf die Belastung durch hohe Abflüsse oder durch hohen Geschiebeeintrag.

## Résumé

Depuis environ douze ans des élargissements de rivières ont été projetés et réalisés en Suisse avec pour objectifs la stabilisation du lit de la rivière et l'amélioration écologique du cours d'eau. Le but de ces élargissements aux endroits propices est le développement d'une morphologie dynamique et diversifiée.

Les expériences des années passées nous montrent dans quelles conditions ces objectifs peuvent être réalisés avec succès. L'importance des processus morphologiques, soit la formation de bancs de gravier et des affouillements, les dépôts de gravier et le changement de la pente longitudinale dépendent d'une part de la dimension de l'élargissement (longueur et largeur) et de l'autre des conditions prioritaires du cadre naturel. L'hydrologie des crues et l'apport du charriage provenant du bassin versant dominant le développement morphologique de la rivière. La pratique d'évacuer le gravier lors d'un élargissement de rivière agit contre l'objectif de stabilisation du lit.

Comme pour toute œuvre hydraulique le fonctionnement d'un élargissement lors d'une surcharge doit être vérifié. Vu l'écoulement non uniforme, les berges des tronçons élargis sont exposées à des charges hydrauliques particulièrement élevées et doivent être renforcées en conséquence. A quelques exceptions près, les plus grandes charges ne surviennent pas lors de débit maximal. Les élargissements réagissent d'une manière très élastique aux crues et au charriage.

das Bemessungsereignis, nicht plötzlich versagen und damit zu einer neuen Gefahrenquelle werden (BWG, 2001). Es wird ein möglichst elastisches Verhalten des Bauwerkes angestrebt: Die gegebenenfalls auftretenden Schäden am Bauwerk sollen mit der einwirkenden Last möglichst linear verlaufen (Minor, 2004). Diese Anforderungen, welche im Sinne eines modernen Umganges mit Naturgefahren an Schutzbauwerke gestellt werden, gelten natürlich auch für Massnahmen, welche nicht oder nicht nur zum Schutz vor Hochwassern konzipiert werden. Auch Renaturierungsmassnahmen wie zum Beispiel Flussaufweitungen sollten unter diesen Aspekten betrachtet werden. Allerdings ist für solche Massnahmen nicht a priori klar, was als Schaden oder gar als Versagen zu bezeichnen ist.

Im Tragwerkbau wird das Versagen eines Bauwerkes mit dem «Erschöpfen des Tragwiderstandes» (SIA, 2003) definiert. Auf eine Flussaufweitung übertragen heisst das, dass das Bauwerk versagt, wenn seine Abflusskapazität erschöpft ist oder wenn die Stabilität der Ufer nicht mehr gewährleistet ist.

Eine andere Art des Versagens besteht darin, dass ein Objekt den ihm zugeordneten Zweck nicht mehr erfüllt, d.h. es nicht mehr gebrauchstauglich ist. Diese Versagensart setzt voraus, dass die Ziele der flussbaulichen Massnahme definiert sind.

Der vorliegende Artikel fasst die in den vergangenen 12 Jahren mit Flussaufweitungen gewonnenen Erfahrungen zusammen. Er geht der Frage nach, ob die bisher realisierten Aufweitungen die an sie gestellten Erwartungen erfüllt haben, wie eine Überlast definiert werden kann und wann man vom Versagen einer Aufweitung sprechen muss.

Im ersten Teil des Artikels wird der Schwerpunkt auf die morphologischen Prozesse und ihre quantitative Analyse gelegt. Im zweiten Teil wird anhand von Beispielen das Verhalten von Aufweitungen in Bezug auf die jeweilige Zielsetzung diskutiert. Die Ausführungen beziehen sich auf die Verhältnisse von Kies führenden Flüssen im alpinen und voralpinen Raum. Für eine Übertragung auf Tieflandflüsse müssen die unterschiedlichen morphologischen Charakteristika berücksichtigt werden.

## 1. Einleitung

Viele Flüsse des Voralpenraumes und des schweizerischen Mittellandes leiden unter einer anhaltenden Tendenz zur Sohleneintiefung. Diese versuchte man traditionellerweise mit dem Bau von Schwellen und Rampen einzudämmen. Die Abstürze bilden aber oftmals ein für Fische unüberwindbares Hindernis und untermauern das monotone Erscheinungsbild kanalisierter Gewässer. Als Alternative dazu werden in der Schweiz seit

rund 12 Jahren Flussaufweitungen geplant und ausgeführt. Mit ihrer Hilfe sollen die Sohle eines Flusses stabilisiert und das Fließgewässer dadurch aufgewertet werden, dass sich in der Aufweitung ein dynamisches, verzweigtes Gerinne entwickelt (Bild 1) und neue Lebensräume für Pflanzen und Tiere entstehen (Bilder 2 und 3).

Wasserbauliche Massnahmen müssen so konzipiert sein, dass sie im Überlastfall, d.h. bei einer Belastung, die grösser ist als





**Bild 1. Bankbildung in der lokalen Flussaufweitung der Emme bei Utzenstorf («Birne Emme»).**



**Bild 2. Der Flussregenpfeifer brütet auf Kiesbänken (Foto: Ruedi Aeschlimann, Uetendorf).**

## 2. Morphologische Prozesse

### 2.1 Kurze und lange Aufweitungen

Die Aufweitung eines kanalisiertes Flusses löst verschiedene morphologische Prozesse aus, welche sich teils auf einen räumlich begrenzten Bereich beschränken, teils Auswirkungen auf das übergeordnete Flusssystem haben. Anhand von Modellversuchen konnten die Prozesse quantifiziert und daraus Bemessungsregeln für Aufweitungen hergeleitet werden (Hunzinger, 1998). Die nachfolgenden Ausführungen stützen sich im Wesentlichen auf diese Arbeit. Zum besseren Verständnis sind die Prozesse in Bild 4 schematisch dargestellt.

Je nach Länge der Aufweitung sind die Prozesse unterschiedlich stark ausgeprägt. Es soll deshalb an dieser Stelle zwischen einer kurzen und einer langen Aufweitung unterschieden werden. Eine Aufweitung wird als lang bezeichnet, wenn gilt

$$L_A \geq 2 L_w + L_v \quad (1)$$

wobei  $L_A$  die gesamte Länge der Aufweitung bezeichnet,  $L_w$  die Länge des Rückstrombereiches bei der Erweiterung (siehe Kapitel 2.3) und  $L_v$  die Länge der Verengung.

### 2.2 Bank- und Kolkbildung (Ziffer 1 in Bild 4)

Der augenfälligste morphologische Prozess in einer Flussaufweitung ist die Bildung von Kiesbänken. In einem schmalen, kanalisiertem und gestrecktem Gewässer ist die Sohle eben. In einem breiten Gewässer teilt sich der Flusslauf in mehrere Teilgerinne auf. Es entstehen Bänke, die sich bei Hochwasser verlagern können. Die Gerinneform ist im Wesentlichen eine Funktion der Breite  $B$ , der Abflusstiefe  $h$  und des charakteristischen Korndurchmessers  $d$ .

In der Literatur wurden verschiedene

Kriterien aufgestellt, nach welchen das Auftreten der einen oder anderen Gerinneform vorhergesagt werden kann. Als Faustregel für die Flüsse im schweizerischen Alpen- und Voralpengebiet kann angenommen werden, dass sich bei einem Verhältnis

$$B / h > \approx 30 \quad (2)$$

Bänke bilden können und dass sich das Gerinne bei einem Verhältnis

$$B / h > \approx 50 \quad (3)$$

verzweigt. Für  $h$  muss je nach Gewässertyp die Abflusstiefe von Abflüssen zwischen  $Q_0$  und  $HQ_2$  eingesetzt werden.  $Q_0$  bezeichnet den Abfluss bei Transportbeginn und  $HQ_2$  einen Hochwasserabfluss, der im Durchschnitt alle zwei Jahre einmal erreicht oder überschritten wird.

In einem Gerinne mit Bänken ist das Ufer stärker belastet als in einem Gerinne mit ebener Sohle und mit gleichförmigen Strömungsverhältnissen. Die Reflexion von Querströmungen an der Berandung und der Zusammenfluss von Teilgerinnen führen zu ausgeprägten Kolken. Ein Ansatz zur Berechnung der Kolkiefen wurde von Zarn (1997) vorgeschlagen.

$$t_{\max} = -6,07 h e^{-\frac{17,6}{W}} \quad (4)$$

$$t_{5\%} = -4,64 h e^{-\frac{15,8}{W}} \quad (5)$$

$$W = \frac{B}{h} \left( \frac{h}{d} \right)^{-0,3} \quad (6)$$

Darin bezeichnet  $t_{\max}$  die maximalen Kolkiefen und  $t_{5\%}$  die Kolkiefe, die von lediglich 5% der Kolke überschritten wird. Die Bemessung von Ufersicherungen kann man häufig auf diesen zweiten Wert abstützen. Wird ein Ufer



**Bild 3. Das Rosmarin-Weidenröschen (*Epilodium dodonaei*) ist als Pionierpflanze auf offene Kiesflächen spezialisiert (Foto: Jürg Stöcklin, Bot. Inst. Uni Basel).**

mit Buhnen gesichert, überlagern sich die morphologischen Kolke mit den Kolken an den Buhnenköpfen. Modellversuche haben ergeben, dass die Kolkiefen in diesem Fall 1,3 bis 1,5 Mal grösser sind als mit den Gleichungen 4 bis 6 berechnet.

### 2.3 Allmähliche Erweiterung (Ziffer 2 in Bild 4)

Die oben beschriebenen Strukturen treten erst nach einer gewissen Übergangsstrecke ab dem oberen Ende der Aufweitung auf. Bei der Erweiterung breitet sich die Strömung trompetenförmig aus und erreicht nach einer Länge  $L_w$  die Uferlinie der Aufweitung. Ab einer Entfernung  $2 L_w$  ist die Morphologie nicht mehr vom Übergang beeinflusst.

Die Länge  $L_w$  ist von praktischer Bedeutung, weil man davon ausgehen kann, dass in diesem Bereich die Ufer nur minimal beansprucht werden und daher nicht geschützt werden müssen. Aus den Modellversuchen lässt sich eine Beziehung für  $L_w$  in Abhängigkeit der Breiten  $B_A$  in der Aufweitung und  $B_K$  im kanalisiertem Gerinne herleiten. Mit Gleichung 7 wird die für die Bemessung eines Uferschutzes zu berücksichtigende minimale Länge  $L_{wDim}$  berechnet.



$$L_{w Dim} = \frac{B_A - B_K}{2} [1 - 2,8 \ln(1 - F)] \quad (7)$$

$$F = 0,21 e^{\frac{7,1}{\frac{B_A}{B_K} + 3,5}} \quad (8)$$

## 2.4 Kolk bei der Verengung (Ziffer 3 in Bild 4)

Am unteren Ende einer Aufweitung muss die Strömung in das engere Gerinne zurückgeführt werden. Häufig fließen dabei zwei oder drei Teilgerinne zusammen. Die dabei entstehenden Sekundärströmungen verursachen lokal einen tiefen Kolk. Dieser ist umso tiefer, je grösser das Verhältnis der beiden Flussbettbreiten, der Verengungswinkel oder der Abfluss sind. Die Tiefe des Kolkes kann mit den Gleichungen 9 und 10 abgeschätzt werden. Seine Länge entspricht etwa 3 bis 5 Mal der Breite des Unterwassers.

$$t_{v Dim} = h_k - h_A (2,70 K_\delta \ln \omega + 1) \quad (9)$$

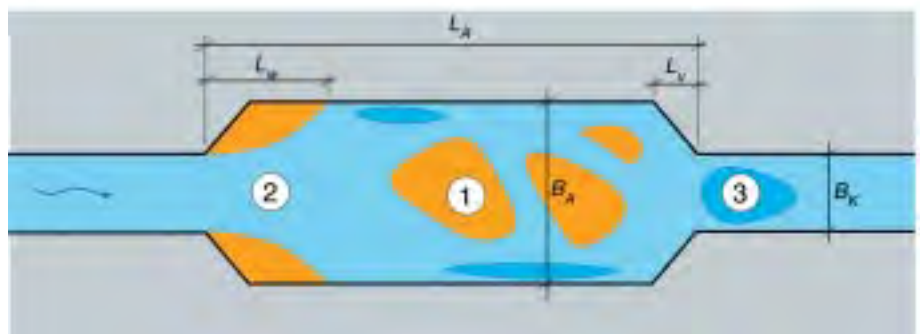
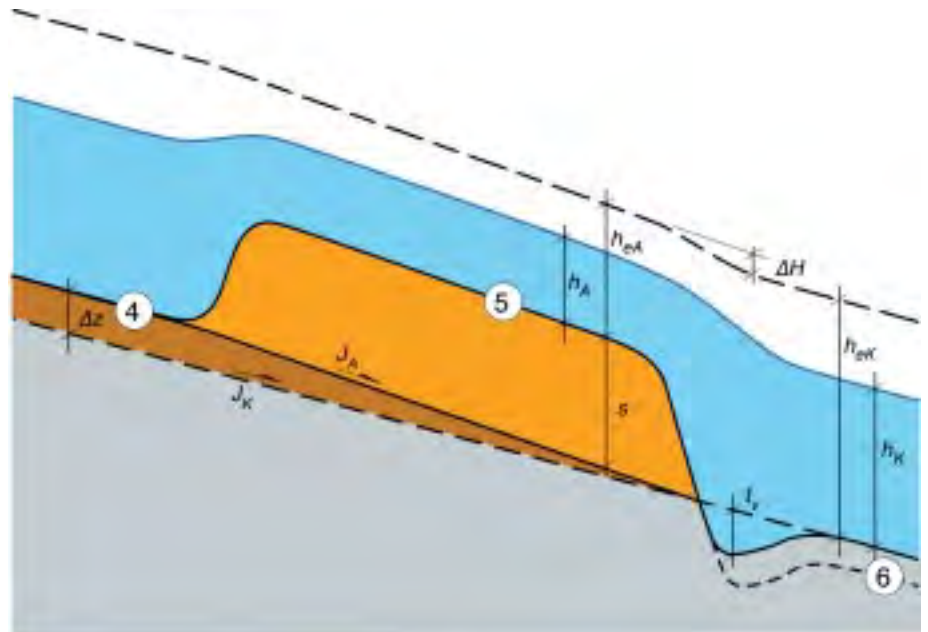
$$\omega = \left( \frac{B_A}{B_K} \right)^{0,36} \left( \frac{h_A}{h_K} \right)^{-1,78} \quad (10)$$

Darin sind  $h_A$  die Abflusstiefe in der Aufweitung und  $h_K$  diejenige im Unterwasser.  $K_\delta$  ist ein Korrekturfaktor, welcher den Verengungswinkel berücksichtigt. Es ist  $K_\delta = 1$  bei einer Verengung von  $45^\circ$  und mehr und  $K_\delta = 0,7$  bei einer Verengung von  $25^\circ$ .

## 2.5 Neues Gleichgewichtsgefälle (Ziffer 4 in Bild 4)

Die Geschiebetransportkapazität in einem Fluss ist in hohem Masse von der Breite des Flussbettes abhängig (Bild 5). Sie hat ein Maximum bei der so genannten «optimalen Breite». Je breiter der Fluss wird, desto geringer ist die Abflusstiefe und damit die für den Geschiebetransport massgebende Schleppspannung. Als Folge davon nimmt die Transportkapazität mit zunehmender Breite ab. Umgekehrt verhält sich das Gleichgewichtsgefälle in Funktion der Breite, wenn der Geschiebeeintrag in einen Flussabschnitt als gegeben betrachtet wird. An der Stelle mit maximaler Transportkapazität (bei der «optimalen Breite») ist das Gleichgewichtsgefälle am kleinsten und wird mit zunehmender Flussbettbreite grösser.

Die meisten kanalisierten und begräbten Flüsse der Schweiz haben eine Breite nahe der «optimalen Breite». Werden sie aufgeweitet, vergrössert sich ihr Gleichgewichtsgefälle. Aufgrund der aktuellen Raumnutzung ist in der Schweiz eine Verbreiterung oft auf das 3- bis maximal 5-fache der ursprünglichen Breite beschränkt. Damit wäre eine Zunahme des Gefälles um einen Faktor



**Bild 4. Schematische Darstellung der morphologischen Prozesse in einer lokalen Aufweitung und Bezeichnung der Abmessungen.**

1,3 bis 1,6 möglich. Mit einer genügend langen Flussaufweitung kann die Sohle im Oberwasser um den Betrag

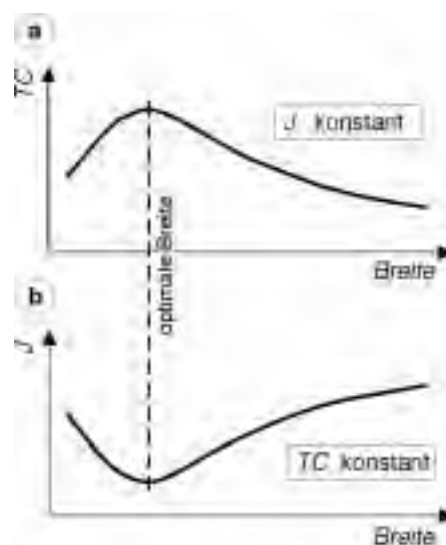
$$\Delta z = \left( L_A - L_w - \frac{L_v}{2} \right) (J_A - J_K) + \Delta H \quad (11)$$

angehoben werden.  $J_A$  und  $J_K$  bezeichnen das Gefälle in der Aufweitung bzw. im ursprünglichen kanalisiertem Gerinne und  $\Delta H$  die Energieverluste bei den Querschnittsänderungen. Der erste Term in Gleichung 11 kann als die wirksame Länge der Aufweitung bezeichnet werden.

## 2.6 Lokale Sohlenhebung (Ziffer 5 in Bild 4)

Aus Kontinuitätsgründen und aus Gründen der Energieerhaltung ist die Sohle in der Aufweitung gegenüber der Sohle in den oben und unten anschliessenden Flussabschnitten vertikal versetzt. Diese lokale Sohlenhebung  $s$ , manchmal auch als «Hügel» bezeichnet, ist in erster Linie ein hydraulisches Phänomen. Ihr Ausmass lässt sich aus einem Vergleich der Energiehöhen  $h_e$  im kanalisiertem und im aufgeweiteten Abschnitt bestimmen:

$$s = h_{eK} - h_{eA} + \Delta H \quad (12)$$



**Bild 5. Transportkapazität (a) und Gleichgewichtsgefälle (b) in Abhängigkeit der Breite. Bei (a) sind Abfluss und Gefälle konstant, bei (b) Abfluss und Geschiebeeintrag.**

Für eine erste grobe Annäherung können die Energieverluste  $\Delta H$  bei den Querschnittsveränderungen vernachlässigt werden. Die Höhe des Versatzes ist eine Funktion des Abflusses. In der Regel können Abflüsse zwischen  $Q_0$  und  $HQ_2$  eingesetzt werden. Erfahrungsgemäss wird der vertikale Versatz je nach Grösse des Gewässers zwischen 0,6 m und 1,2 m hoch.

Mit der lokalen Sohlenhebung wird der Niederwasserspiegel in einer Aufweitung gegenüber dem Zustand im kanalisiertem Gerinne angehoben. Dabei wird auch ein mit dem Oberflächenwasser korrespondierender Grundwasserspiegel erhöht. Bei Hochwasserabflüssen, die grösser sind als der versatzbildende Abfluss, liegt der Wasserspiegel in der Aufweitung tiefer, weil der Fließquerschnitt wesentlich grösser ist als zuvor (Bild 6). Am oberen Ende einer langen Aufweitung kann dieser Gewinn an Freibordhöhe allerdings durch die Sohlenhebung  $\Delta z$  (Gleichung 11) wieder zunichte gemacht werden.

## 2.7 Sohlenerosion im Unterwasser (Ziffer 6 in Bild 4)

Die Ablagerung von Geschiebe in der Aufweitung führt zu einem Geschiebedefizit im Unterwasser. Dieses kann dort eine Sohlenerosion auslösen oder eine bestehende Tendenz zur Erosion beschleunigen. Ist die Aufweitung kurz und das dort gespeicherte Volumen im Verhältnis zur jährlichen Geschiebezufuhr gering, ist der Einfluss klein. Ist die Aufweitung jedoch lang und entspricht das abgelagerte Volumen einem Mehrfachen der jährlichen Geschiebezufuhr, kann die Erosion im Unterwasser die mit der Aufweitung angestrebte Sohlenhebung im Oberwasser verunmöglichen (Bild 7).

## 3. Lastfälle

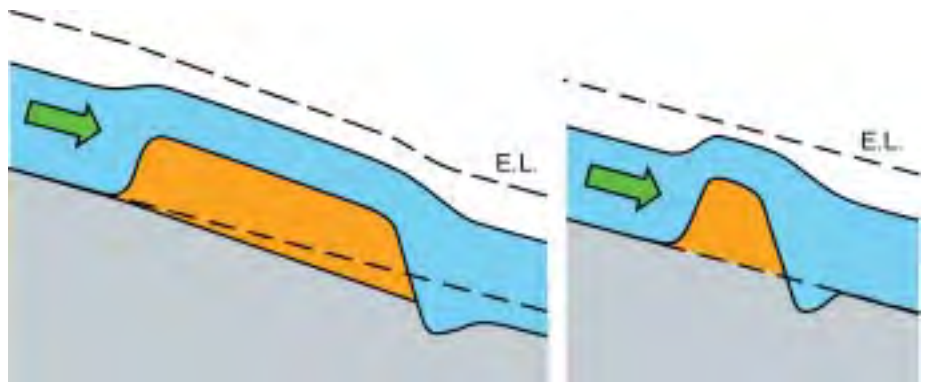
Das Verhalten einer Aufweitung bei hohen Belastungen wird anhand von vier möglichen Lastfällen diskutiert:

*Hoher Abfluss und Abflusskapazität:*

Wie die Ausführungen im Kapitel 2.6 zeigen, liegt der Wasserspiegel bei Hochwasser in



**Bild 6. Wasserspiegellagen bei Niederwasser und Hochwasser in einem kanalisiertem Gerinne und in einer Aufweitung.**



**Bild 7. Geschiebedefizit und Sohlenerosion im Unterwasser durch die Ablagerung von Geschiebe in der langen Aufweitung (links). Kein Einfluss auf die Sohlenlage im Unterwasser durch eine kurze Aufweitung (rechts).**

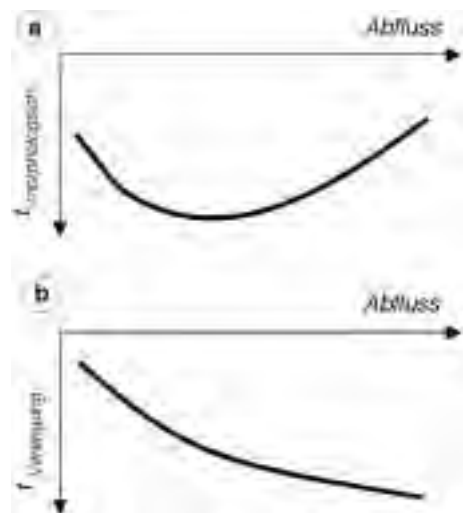
einem aufgeweiteten Querschnitt trotz lokaler Sohlenhebung tiefer als in einem engen Gerinne. Zudem sind die Fließgeschwindigkeiten geringer. Die Aufweitung reduziert also die Überflutungsgefahr. Ist die Abflusskapazität in der Aufweitung erschöpft, kommt es, wie in jedem anderen offenen Gerinne auch, zu Ausuferungen.

*Hoher Abfluss und Uferstabilität:* Die Ufer bei der Verengung werden durch einen hohen Abfluss am stärksten beansprucht, sei es durch direkten Strömungsangriff oder sei es durch Kolkbildung. Ist das Abschlussbauwerk den Belastungen nicht gewachsen, ist an dieser Stelle mit erhöhter Ufererosion zu rechnen. Die Ufer im eigentlichen aufgeweiteten Flussabschnitt werden durch Querströmungen und Kolke belastet. Die maximale Belastung tritt aber nicht beim höchsten Abfluss auf, weil bei den grössten Abflüssen die Bankstrukturen und damit die Querströmungen weniger stark ausgeprägt sind (Bild 8).

In der Aufweitung der Thur im zürcherischen Altikon zum Beispiel wird das Flussbett von sandigen und siltigen Sedimenten des Vorlandes begrenzt. Dieses Material hat einen sehr geringen Erosionswiderstand. Die grössten Erosionsraten wurden dort bei Nieder- und Mittelwasserabflüssen beobachtet und nicht etwa bei Hochwasser (Bild 9).

*Hoher Geschiebeeintrag:* Die Sohle in einer Aufweitung bildet einen Geschiebespeicher mit grosser Kapazität. Ein Übermass an Geschiebe wird tendenziell abgelagert und mit Verzögerung an den Unterlauf weitergegeben. Eine Aufweitung kann somit Belastungsspitzen dämpfen. Unter Umständen verursacht die Ablagerung in der Aufweitung vorübergehend eine Sohlenhebung im Oberwasser.

*Geringer Geschiebeeintrag:* Bei zeitlich begrenztem Geschiebemangel kann der Fluss das in der Sohle der Aufweitung gespeicherte Geschiebe aufnehmen und damit das Unterwasser beliefern. Die Aufweitung hat



**Bild 8. Kolkiefen in Abhängigkeit des Abflusses. a) Morphologischer Kolk  $t_{morph}$  im verzweigten Abschnitt, b) Kolk  $t_v$  bei der Verengung.**

wiederum eine dämpfende Wirkung. Die Auswirkungen von chronischem Geschiebemangel werden in den nächsten Kapiteln diskutiert.

## 4. Ziele von Flussaufweitungen

Die in der Schweiz bisher realisierten Aufweitungen verfolgen jeweils eine oder mehrere der nachfolgend aufgeführten Zielsetzungen:

*Sohlenstabilisierung:* Mit dem grösseren Gleichgewichtsgefälle in der Aufweitung soll auf einem örtlich beschränkten Flussabschnitt eine grössere Höhendifferenz überwunden werden. Damit sollen die Sohle stabilisiert und der Bau von Schwellen und Rampen vermieden werden.

*Bankbildung:* In einer Flussaufweitung soll sich ein verzweigtes Gerinne bilden. Damit soll die morphologische Dynamik des Gewässers erhöht werden.

*Uferdynamik:* Die Ufer sollen durch die Verlagerung von Teilgerinnen periodisch erodiert werden, wodurch neue Standorte für Pioniervegetationen entstehen.



**Lebensräume:** Mit der reich strukturierten Strömung in einer Flussaufweitung sollen verschiedene aquatische Habitate entstehen. Die Kiesbänke und die erodierten Uferpartien sollen Standorte von Pioniervegetationen oder Brutplätze für spezialisierte Vogelarten bilden.

**Erholungsraum:** Der Fluss soll dem Menschen wieder zugänglich gemacht werden. An die Stelle von steilen, verbauten oder überwachsenen Böschungen treten natürliche Ufer. Die offenen Kiesflächen und die seichten Stellen im Fluss sollen zum Verweilen und zum Baden einladen.

**Geschiebebewirtschaftung:** In Flussaufweitungen lagert sich Geschiebe konzentriert ab. Diese Stellen können zur Geschiebebewirtschaftung und zur Kiesgewinnung eingerichtet werden.



**Bild 9. Ufererosion in leicht erodierbaren Feinsedimentablagerungen und Sicherung mit Buhnen. Aufweitung der Thur bei Altikon (Kanton Zürich).**

## 5. Erfolgskontrolle gemessen an den Zielen

### 5.1 Sohlenstabilisierung

Bei der Aufweitung der Emme bei Utzensdorf («Birne Emme») wurde das Flussbett von 30 m auf 65–85 m aufgeweitet (Zarn & Hunzinger, 1996). Die Aufweitung wurde in zwei Etappen realisiert. Nach dem Bau der ersten Etappe mit einer Länge von 200 m konnte die Aufweitung nur als kurze Aufweitung bezeichnet werden. Seit dem Bau der zweiten Etappe (im Winter 1998/99) misst die Aufweitung 400 m und kann als lange Aufweitung betrachtet werden (Bild 10).

Die Sohlenaufnahmen zeigen ein maximales Gefälle in der Aufweitung von 4,1‰ (1999). Das ist nur wenig mehr als das ursprüngliche Gefälle von 3,8‰ (1990). Aus den Sohlenaufnahmen lässt sich darum auch nicht eindeutig nachweisen, dass die Aufweitung stabilisierend auf die Sohle wirkt. Die Sohle liegt im Oberwasser der Aufweitung zwar rund 8 cm höher als noch 1990, Sohlendifferenzen derselben Grössenordnung sind aber auch im Unterwasser festzustellen.

Berücksichtigt man aber, dass die Emme einem allgemeinen Erosionstrend unterliegt und dass für den betreffenden Abschnitt eine Sohlenerosion prognostiziert wurde (VAW, 1987), ist die Bilanz dennoch positiv.

Im vertikalen Versatz der Aufweitung sind rund 24 000 m<sup>3</sup> Geschiebe gespeichert. Das entspricht ungefähr einer mittleren jährlichen Geschiebefracht der Emme. Wäre dieses Volumen beim Bau der Aufweitung vollständig abgeführt worden, hätte das im Unterwasser ein Geschiebedefizit ausgelöst. Zu seinem Ausgleich wäre die Sohle auf eine Länge von 2 km um durchschnittlich 40 cm erodiert. Beim Bau von Aufweitungen wird

das bei der Verbreiterung gewonnene Material also mit Vorteil nicht abgeführt, sondern im Fluss belassen.

### 5.2 Bankbildung

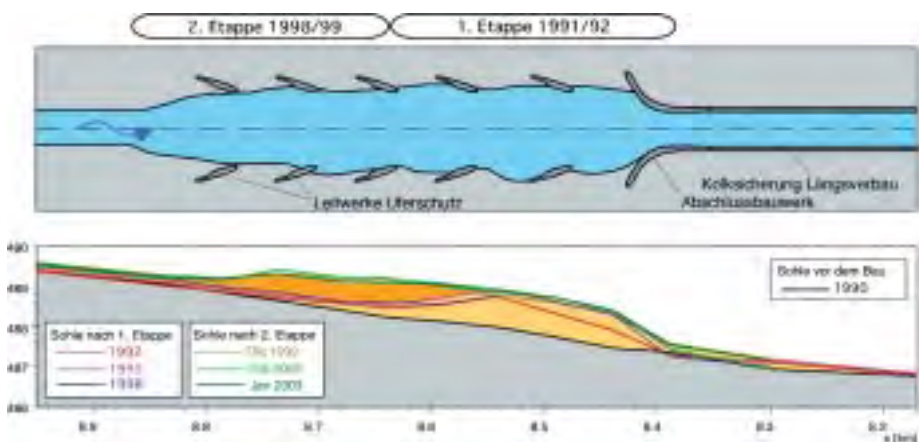
Für die Bildung eines dynamischen, verzweigten Gerinnes müssen drei Voraussetzungen erfüllt sein:

- (1) Die Aufweitung muss genügend breit sein, damit bei den massgebenden Abflüssen die genannten Bedingungen für das Verhältnis  $B/h$  erfüllt sind (Gleichung 3).
- (2) Die Aufweitung muss genügend lang sein, damit sich die Strömung auf die ganze Breite der Aufweitung ausdehnen und sich die für diese Breite charakteristische Gerinneform ausbilden kann. Die Gleichung 1 muss erfüllt sein.
- (3) Die Sohle darf nicht einem starken Erosionstrend unterliegen.

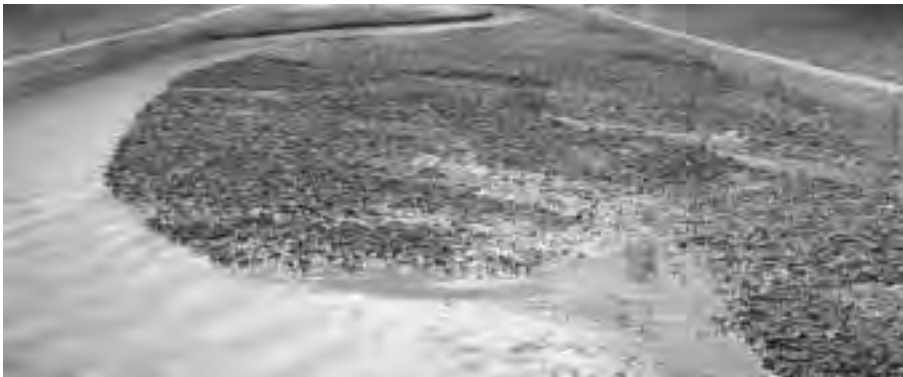
Vor allem die letzte Bedingung kann in vielen Fällen nicht erfüllt werden. In der Anfangsphase nach dem Bau herrscht in der Aufweitung noch eine Ablagerungstendenz (Bildung des vertikalen Versatzes), und der Fluss ist durch zahlreiche kleine, flache und dynamische Teilgerinne geprägt. Ist die Bil-

dung des Versatzes abgeschlossen, geht der aufgeweitete Abschnitt in einen weniger dynamischen Gleichgewichtszustand über. Wo Aufweitungen gebaut werden, um einen bestehenden Erosionstrend zu stabilisieren, herrscht ein generelles Geschiebedefizit. Somit fehlt das Geschiebe aus dem Oberlauf, um in der Aufweitung die Sohle über eine längere Zeit stabil zu halten. Früher oder später unterliegt die Sohle auch in der Aufweitung einem Erosionstrend.

Bei Erosion hat ein verzweigter Fluss weniger aktive Teilgerinne als im Gleichgewicht. Im Extremfall ist der Abfluss auf ein einziges, tief eingeschnittenes Gerinne konzentriert (Bilder 11 und 12). Für den Geschiebetransport ist nicht mehr die gesamte zur Verfügung stehende Flussbettbreite massgebend. Entsprechend der Darstellung in Bild 5b reduziert sich damit das Längengefälle in der Aufweitung. Je länger die Tendenz zur Eintiefung besteht, desto grösser muss ein späteres Hochwasser sein, um den Trend wieder in eine Auflandung umzukehren. Die Frage, wie viel Erosion ein verzweigtes Gerinne erträgt, um seine Dynamik nicht zu verlieren, wird zurzeit an der Versuchsanstalt für



**Bild 10. Situation und Längensprofil der Aufweitung «Birne Emme».**



**Bild 11. Verzweigtes Gerinne im hydraulischen Labor: Ausgeprägtes Verzweigungsmuster in einem Gerinne mit Ablagerungstendenz (oben) und eingetieftes Einzelgerinne bei anhaltender Erosionstendenz (unten) (Foto: VAW-ETHZ).**



**Bild 12. Eintieftes Einzelgerinne in einem ursprünglich verzweigten Flussabschnitt in der Melezza (Kanton Tessin).**



**Bild 13. Aufweitung Felsberg am Alpenrhein kurz nach dem Bau und fünf Jahre später. Das Gerinne soll sich durch Seitenerosion selbständig verbreitern können (Foto: Tiefbauamt des Kantons Graubünden).**

Wasserbau der ETH Zürich untersucht (Marti, in Vorb.).

### 5.3 Uferdynamik

Anstatt das Gerinne maschinell aufzuweiten, kann die Verbreiterung des Flussbettes auch dem Fluss selber überlassen werden. Damit wird überdies das Problem eines allfälligen Geschiebedefizites durch die Entnahme von kiesigem Material umgangen.

Dieser Ansatz wurde beim Bau der Aufweitung Felsberg am Alpenrhein angewandt. Es wurde lediglich ein rückwärtiger Graben ausgehoben, welcher es erlaubte, die Leitwerke zur Ufersicherung zu erstellen. Der weitaus grösste Teil des anstehenden Materials wurde der selbständigen Erosion überlassen. Seit dem Bau der Aufweitung 1996 hat sich das Bild der Aufweitung noch nicht stark verändert (Bild 13). Im geraden, kanalisiertem Gerinne werden die Ufer nicht sehr stark beansprucht, und der Erosionswiderstand der Ufer ist wegen des anstehenden grobkörnigen Materials relativ hoch. Trotzdem darf diese Bauart nicht als Misserfolg betrachtet werden. Zurzeit sind die noch bewachsenen Inseln ein wertvolles Rückzugsgebiet für Brutvögel, und früher oder später werden Hochwasser das Gerinne umgestalten.

Die bei Aufweitungen wie der «Birne Emme» eingebrachten Leitwerke zum Uferschutz – sie sind in einem sehr flachen Winkel zur Hauptströmungsrichtung angeordnet (Bild 10) – wirken fast wie ein geschlossener Längsverbau und lassen nur wenig Uferdynamik zu. In dieser Hinsicht haben sich senkrecht zur Hauptströmungsrichtung angeordneten Bühnen besser bewährt.

Die Uferdynamik hat dort ihre Grenzen, wo das dahinter liegende Land vor Erosion geschützt werden soll. Langfristig können Uferanrisse nur dort immer wieder neu entstehen, wo sich in einem sehr breiten Gerinne auch grössere Kiesbänke mit Vegetation entwickeln können, die dann ohne Gefahr für das Umland wieder erodiert werden.

### 5.4 Lebensräume

Die Erfolgskontrolle an verschiedenen Flussaufweitungen zeigt, dass die Aufweitungen vor allem die Wiederherstellung von Pionierlebensräumen ermöglichen (Weichholzgebüsche, auentypische Pflanzenarten) und dass sie die Habitatdiversität entlang von Flussläufen erhöhen (Rohde, 2004). Für die aquatischen Habitate ist dabei von Bedeutung, dass die Fliessgeschwindigkeiten örtlich variieren. In einer Aufweitung gibt es auch bei Hochwasser Zonen mit geringer Fliessgeschwindigkeit, in welchen junge und strömungsschwache Fische vor Abdrift geschützt sind. Nach Rey & Ortlepp (1997)



dürfte dies ein wichtiger Grund dafür sein, dass in den Aufweitungen der Thur viele Jungfische gezählt werden konnten.

Kiesbänke können sich aber auch negativ auswirken, wenn dadurch Hohlräume und Unterstände entlang des Ufers, die vor allem von grösseren Fischen belegt werden, bei niedriger Wasserführung vom fließenden Wasser abgetrennt werden.

### 5.5 Erholungsraum

Die Vielzahl von Spaziergängern, Badenden und Grillfreunden, die an sonnigen Tagen auf Kiesbänken und am Ufer anzutreffen sind, sprechen für den Wert von Flussaufweitungen als Erholungsgebiet. Die intensive Erholungsnutzung steht im Konflikt mit den Verbesserungen der Habitatsbedingungen für die Fauna. Dieser Konflikt kann am besten dadurch gelöst werden, dass die Zahl der naturnahen Abschnitte an Fließgewässern laufend erhöht wird.

### 5.6 Geschiebemanagement

Die Nutzung der Kiesvorräte steht im Widerspruch zur Zielsetzung, die Sohle zu stabilisieren. Vielfach wird der Bau der Aufweitung durch den Verkauf des Aushubes finanziert. Die Entnahme von Kies aus einem Flusssystem, welches unter einem Geschiebedefizit leidet, muss allerdings sehr kritisch hinterfragt werden. Wird eine Flussaufweitung auch als Hochwasserschutzmassnahme (d.h. Massnahmen zum Schutz vor Sohlenerosion) verstanden, müssten auch die entsprechenden finanziellen Mittel dafür bereitgestellt werden können.

## 6. Schlussfolgerung

Die morphologischen Prozesse in einer Aufweitung sind bekannt und können in den meisten Fällen auch quantifiziert werden. Das Verhalten von verzweigten Gerinnen unter Erosionstendenz wird zurzeit noch erforscht.

In Aufweitungen sind vor allem die Ufer einer hohen hydraulischen Belastung ausgesetzt, währenddem hohe Abflüsse punkto Abflusskapazität selten eine Gefährdung darstellen. Bei der Verengung treten die höchsten Belastungen beim grössten Abfluss auf, im übrigen Uferbereich jedoch meistens bei kleineren und mittleren Hochwassern. Generell reagiert eine Aufweitung dämpfend auf eine Last von Abfluss und Geschiebe. Auch wenn einzelne Elemente der Ufersicherung ihren Tragwiderstand verlieren, funktioniert das System Flussaufweitung weiterhin. Es kann als hochgradig elastisches Bauwerk bezeichnet werden. Einen eigentlichen Überlastfall gibt es nicht.

Die bisher realisierten Flussaufweitungen können die an sie gesetzten Ziele

nicht immer erfüllen. Für einen spürbaren Effekt zur Sohlenstabilisierung und für eine längerfristige morphologische Dynamik muss eine Aufweitung genügend lang sein und der Geschiebeeintrag darf nicht zu gering sein. Unter den aktuellen raumplanerischen Verhältnissen in der Schweiz ist der Bau von langen Aufweitungen (wie zum Beispiel diejenige an der Thur in den Kantonen Thurgau und Zürich bei Niederneunforn) eher die Ausnahme denn die Regel. Aufgrund von Schutzbauten in die potenziell aufzuweitenden Flüsse gering.

Die bisherigen Untersuchungen zeichnen ein positives Bild von der Wirkung von Flussaufweitung in Bezug auf die Schaffung von Lebensräumen und von Erholungsräumen für die Menschen.

Die an und für sich erstrebenswerte Dynamik des Ufers muss dort eingeschränkt werden, wo andere Schutzinteressen tangiert werden. Es wird in Zukunft vermehrt diskutiert werden müssen, wie viel Schutz der Mensch braucht und wie viel Gerinnekraft dem Fluss zugestanden werden kann.

Ein bisher in der Praxis zu wenig beachteter Umstand ist der Geschieberückhalt in Aufweitungen, aus welchen das Abbaumaterial maschinell entfernt wird. Nach Ansicht des Autors ist es unerlässlich, möglichst alles Geschiebe zur Beschickung des Unterwassers in einer Aufweitung zu belassen.

Der Erfolg von Gerinneaufweitungen misst sich an den Erwartungen, die an sie gestellt werden. Unter Umständen sind die Erwartungen nicht den naturräumlichen Gegebenheiten angepasst. Orientiert man sich bei der Planung an der ursprünglichen, unbeeinflussten Morphologie der Flüsse aus der Zeit vor den grossen Korrekturbauten, geht oft vergessen, dass sich seither die Hochwasserhydrologie und das Geschiebeaufkommen stark verändert haben und dass sich unter den heutigen Voraussetzungen vielleicht eine andere Gerinneform einstellt. Trotzdem können flussbauliche und ökologische Zielsetzungen erreicht werden, wenn einige Grundsätze beachtet werden:

- wenn dem Fluss, wo immer möglich, viel Raum gegeben wird,
- wenn Aufweitungen möglichst lange und zusammenhängend gebaut werden,
- wenn die Uferdynamik toleriert wird,
- wenn der Kies im Fluss belassen wird.

Damit es am Bauwerk Flussaufweitung auch bei hoher Belastung zu keinen unerwarteten Schäden kommt, muss die Bemessung, insbesondere diejenige der Ufersicherung, den morphologischen Prozessen Rechnung tragen.

## Literatur

BWG (2001): Hochwasserschutz an Fließgewässern. Bundesamt für Wasser und Geologie, Biel/Bienne, 73 p.

Hunzinger L. (1998): Flussaufweitungen – Morphologie, Geschiebehaushalt und Grundsätze zur Bemessung. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, 159, Zürich, 206 p.

Marti C. (in Vorb.): Morphological dynamics of braided rivers. Diss. ETH, Zürich.

Minor H.-E. (2004): Zur Überlastbarkeit von Hochwasserschutzbauten. wasser energie luft, 96 (5/6), 153–157.

Rey P. & Ortlepp J. (1997): Der neue Lebensraum der Thurfische. HYDRA, Konstanz.

Rohde S. (2004): River Restoration: Potential and limitations to re-establish riparian landscapes. Assessment & Planning. Diss. ETH 15496, Zürich, 127 p.

SIA (2003): Grundlagen der Projektierung von Tragwerken. SN 505260. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.

VAW (1987): Emme 2050. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, unveröffentlicht, 909, Band 2, Zürich.

Zarn B. (1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, 154, Zürich, 242 p.

Zarn B. & Hunzinger L. (1996): Erfahrungen mit Flussaufweitungen – Das Beispiel Birne Emme. Massnahmen zur naturnahen Gewässerstabilisierung. DVWK-Schriften 118, Bonn, 278–294.

Anschrift des Verfassers

Dr. Lukas Hunzinger, Schälchli, Abegg + Hunzinger, dipl. Ing. ETH/SIA, Fluss- und Wasserbau, Schwarztorstasse 7, CH-3007 Bern, E-Mail: sah.be@flussbau.ch