

Aufweitungen in erodierenden Flüssen

■ Patricia Requena, Gian Reto Bezzola, Hans-Erwin Minor

Zusammenfassung

Flussaufweitungen, die in erodierenden Flussstrecken realisiert werden, können die übergeordnete Erosion nicht oder nur begrenzt aufhalten. Darum müssen im Erosionsfall zuverlässige Prognosen über die morphologischen Auswirkungen einer Aufweitung möglich sein. Aus diesem Grund wurde diese Problemstellung an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) mit Hilfe hydraulischer Modellversuche und numerischer Simulationen untersucht. Im vorliegenden Artikel werden die Resultate dieser Untersuchungen präsentiert und diskutiert.

Summary

In eroding rivers, the local widening of the riverbed cannot, or only to a limited extent, stop the overall erosion. However, a reliable prediction of the morphological implications of riverbed widening must also be possible under such conditions. Therefore, the effect of local widening in eroding rivers is investigated at the Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) by means of hydraulic experiments and numerical simulations. In this paper the results from these investigations are described and discussed.

Résumé

Des élargissements dans des rivières en érosion ont un effet très limité sur la tendance d'abaissement globale rivière. Il faut donc des pronostics fiables pour juger les effets morphologiques des élargissements pour le cas d'un tronçon érosif. Ce problème est sujet d'études au laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques (VAW). Les résultats de ces études utilisant la modélisation physique ainsi que la modélisation numérique sont présentés et discutés dans cet article-ci.

1. Einleitung

An verschiedenen Flüssen der Schweiz wurden Aufweitungen bereits realisiert oder sind in Planung, wie z.B. an der Thur, der Emme, der Moesa, der Töss, der Rhone oder am Alpenrhein. Die Aufweitung einer Flussstrecke kann auf zwei Arten erfolgen. Entweder

wird die Aufweitung durch Abtrag des umliegenden Geländes künstlich herbeigeführt (Bild 1) oder erfolgt nach Entfernen des Uferschutzes auf natürliche Weise durch seitliche Erosion innerhalb der für den Fluss reservierten und gesicherten Pufferzone (Bild 2).

Die Verbreiterung eines Flussbetts führt zu einer Reduktion der Abflusstiefen und somit der Sohlenschubspannungen. Dadurch wird in dem aufgeweiteten Bereich die Sohlenerosion gebremst und es entstehen bei grossen Breiten Bänke, Furten und Kolke, die für diesen Flusstyp charakteristisch sind.

Bei der Realisierung einer Aufweitung sind neben den lokalen Veränderungen auch die entsprechenden Auswirkungen auf den übergeordneten Geschiebehaushalt und das Längenprofil zu berücksichtigen. Die lokalen Veränderungen wurden von Hunzinger (1998) anhand von Modellversuchen untersucht. Auf der Basis dieser Versuche wurde ein Dimensionierungsverfahren für Aufweitungen entwickelt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass sich die aufzuweitende Flussstrecke im Gleichgewichtszustand befindet. Dies bedeutet, dass im betrachteten Flussabschnitt weder markante Auflandungs- noch ausgeprägte Erosionstendenzen vorhanden sind.

In Rahmen einer an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) bearbeiteten Fallstudie wurden die morphologischen Auswirkungen einer Aufweitung in einer erodierenden Flussstrecke mit einem numerischen Modell untersucht (VAW, 2004). Diese Simulationen haben gezeigt, dass die Auswirkungen einer Aufweitung in einem erodierenden Fluss anders sein können als bei einer Aufweitung in einem Fluss, der sich im Gleichgewichtszustand befindet.

Mit dem Ziel, diese Unterschiede genauer zu untersuchen, wurden an der VAW im Rahmen einer Diplomarbeit hydraulische Modellversuche durchgeführt (Berchtold, 2005).

Im vorliegenden Artikel werden die Auswirkungen von Aufweitungen in erodierenden Flussstrecken dargestellt und mit den Verhältnissen in Gleichgewichtsstrecken verglichen. Zusätzlich werden die Resultate aus den neuen Versuchen präsentiert. Schliesslich folgen zum einen eine Diskussion über die neu erhaltenen Zusammenhänge und zum anderen ein Ausblick auf die verschiedenen Aspekte, welche bei der Ausführung einer Aufweitung berücksichtigt werden müssen.



Bild 1. Aufweitung an der Emme bei Utzenstorf (Dokumenta Natura, Bern, Oktober 2004).

2. Aufweitung bei einem Flussabschnitt im Gleichgewichtszustand

Im Falle der Realisierung einer Aufweitung strebt der Fluss, als dynamisches System, ein neues Gleichgewicht an, das den neuen Randbedingungen entspricht.

Hunzinger (1998) hat die Prozesse dazu anhand hydraulischer Versuche untersucht. Die Untersuchungen gelten primär für Flussstrecken, die sich im Gleichgewichtszustand befinden.

Nachfolgend werden die wichtigsten morphologischen Auswirkungen einer Aufweitung anhand eines Beispiels aus Hunzingers Versuchen beschrieben. Bild 3 zeigt die Sohlenentwicklung im Bereich einer Aufweitung. Ausgangslage für den Versuch war eine über die gesamte Modellstrecke ebene Sohle mit ausgeglichenem Längsgefälle. Dieses entsprach dem Gleichgewichtsgefälle des schmalen Gerinnes vor der Aufweitung (Bild 3, t₁). Nach erfolgter Verbreiterung wurde folgende Entwicklung beobachtet:

In der Aufweitung sind die Abflusstiefen aufgrund der grösseren Gerinnebreite kleiner als im ursprünglichen Gerinne. Dieses führt in der Aufweitung zu einer vergleichsweise verminderten Transportkapazität und somit zu Geschiebeablagerungen. Das Geschiebelagert sich – in Fließrichtung betrachtet – keilförmig in der Aufweitung ab. Mit der Zeit bildet sich im Bereich der Ablagerungen ein im Vergleich zur Ausgangssohle steileres Gefälle. Damit versucht der Fluss, den Verlust an Transportkapazität in der Aufweitung zu kompensieren (Bild 3).

Flussaufwärts der Aufweitung wird der Abfluss infolge der in der Aufweitung tieferen Wasserspiegelage zunächst beschleunigt, was zur Erosion der Sohle im Oberwasser führt (Bild 3, t₂). Aufgrund der wachsenden

Höhe der Ablagerungen in der Aufweitung wird die Sohle im Oberwasser später wieder angehoben (Bild 3, t_3 bis t_5).

Aufgrund der Ablagerungen in der Aufweitung resultiert ein Geschiebedefizit für die unterliegende Strecke, was zu Sohlenerosionen im Unterwasser führt (Bild 3, t_3). Wenn die Front der Ablagerung das untere Ende der Aufweitung erreicht (Bild 3, t_5), wird wieder in zunehmendem Mass Geschiebe durch die Aufweitung hindurchtransportiert. Dadurch beginnt sich die Sohle im Unterwasser wieder zu heben.

Im Endzustand (Bild 3, t_5) stellt sich ein neues Gleichgewicht ein. Im Unterwasser wird die Sohle praktisch wieder auf das Ausgangsniveau angehoben. In der Aufweitung wachsen die Ablagerungen nicht mehr weiter an. Infolge des steileren Längsgefälles auf den Ablagerungen ist die Transportkapazität im verbreiterten Abschnitt wieder so gross wie im ursprünglichen Zustand. Der Sohlenversatz am oberen Ende der Aufweitung führt ausserdem zu einer Anhebung der Sohle im Oberwasser (Bild 3, ΔZ_b).

3. Aufweitung bei einem Flussabschnitt im Erosionszustand

3.1 Simulationsrechnungen von Hunzinger

Hunzinger (1998) untersuchte in erster Linie Aufweitungen in Flüssen, die sich im Gleichgewichtszustand befinden. Dabei hatte er gezeigt, dass sich seine Versuchsresultate mit numerischen Simulationen (Programm MORMO, Hunziker 1995) nachvollziehen lassen. Für den Fall eines erodierenden Flusses wurden von ihm mit dem Programm MORMO weitere Simulationsrechnungen durchgeführt. Dabei hat er die Auswirkungen einer Aufweitung in einem erodierenden Fluss nicht systematisch untersucht, sondern anhand eines gerechneten Beispiels exemplarisch illustriert.

Für die Simulation im erodierenden Fluss verwendete Hunzinger die Gerinnegeometrie und den Abfluss aus einem seiner Versuche. Die im Versuch zugegebene Geschiebemenge wurde in der Simulation auf einen Viertel reduziert, um so einen Erosionszustand zu modellieren. Unter diesen Bedingungen wurden die Veränderungen der mittleren Sohle im Längsprofil berechnet. Zusätzlich berechnete Hunzinger die Sohlenentwicklung bei sonst gleichen Randbedingungen für den Fall ohne Aufweitung. Bild 4 zeigt die Resultate aus dieser Simulation.

Wird ein Abschnitt in einem erodierenden Fluss aufgeweitet, so wurden ähnliche Prozesse beobachtet wie bei einer Strecke

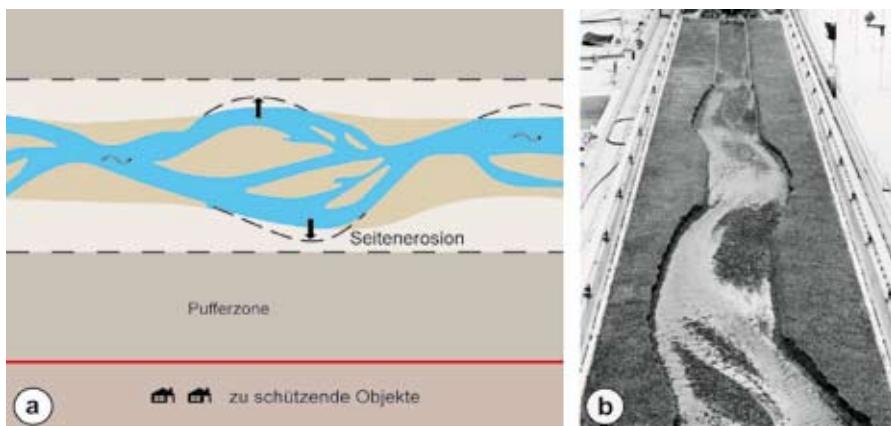


Bild 2. a) Eigendynamische Aufweitung durch Seitenerosion. Durch eine genügend breite Pufferzone kann – bei Kenntnis der Erosionsgeschwindigkeit – eine Gefährdung von Infrastrukturen vermieden werden. b) Aufweitung durch Seitenerosion (physikalisches Modell an der VAW).

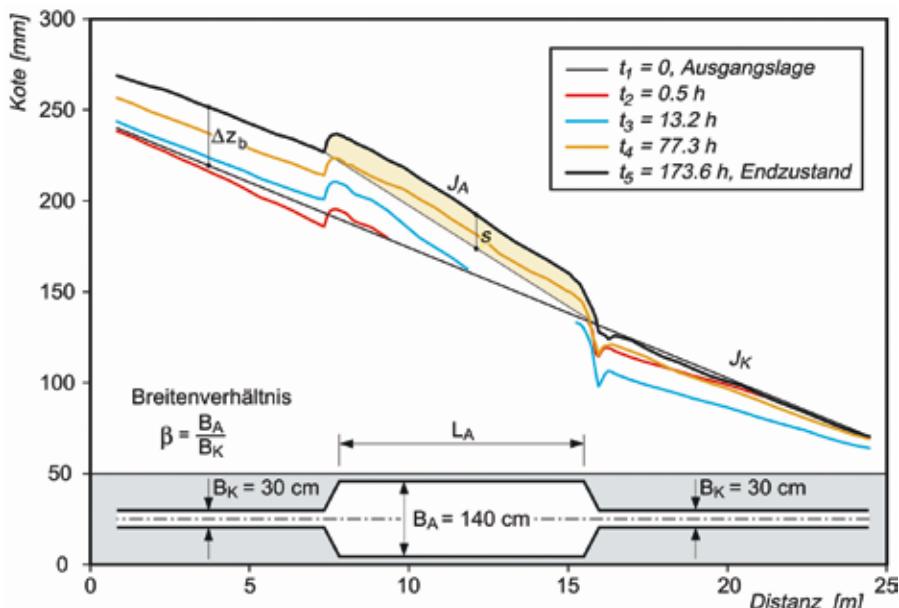


Bild 3. Entwicklung des Sohlenversatzes S bei der Aufweitung eines sich im Gleichgewichtszustand befindlichen Flusses, dargestellt am Beispiel eines Modellversuchs von Hunzinger (1998).

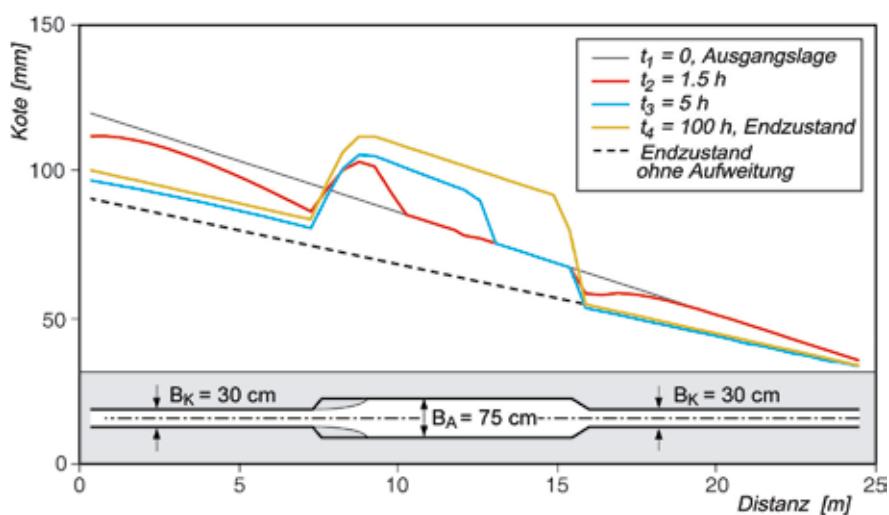


Bild 4. Mit dem Programm MORMO berechnete Sohlenlagen für einen sich im Erosionszustand befindenden Flussabschnitt mit und ohne Aufweitung. Gezeigt sind die Sohlenlagen zu verschiedenen Zeitpunkten mit Aufweitung (ausgezogene Linien) sowie der Endzustand ohne Aufweitung (gestrichelte Linie) (aus Hunzinger, 1998).

im Gleichgewichtszustand. Hunzinger (1998) stellte aber fest, dass die Aufweitung in diesem Fall die übergeordnete Sohlenerosion im Oberwasser nicht verhindern kann (Bild 4, t.). Im Erosionsfall bilden sich im Oberwasser der Aufweitung keine Ablagerungen.

Aber die mittlere Sohlenlage liegt dennoch höher als im Fall ohne Aufweitung. Das steilere Gefälle in der Aufweitung trägt somit dazu bei, dass sich oberhalb der Aufweitung die Sohle weniger stark eintieft, als dies ohne Aufweitung der Fall wäre.

3.2 Fallstudie Ticino

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden an der VAW die Auswirkungen einer Aufweitung am Fluss Ticino zwischen Bellinzona und der Mündung in den Lago Maggiore mit einem numerischen Modell untersucht (VAW, 2004). Die dabei erzielten Resultate zeigten bezüglich der morphologischen Auswirkungen der Aufweitung einige Unterschiede zu den Ergebnissen von Hunzinger. Nachfolgend werden die Resultate der Simulationen am Ticino vorgestellt und diskutiert.

Der Fluss Ticino weist seit Mitte des 20. Jahrhunderts eine markante Erosionstendenz auf. Diese hat in den letzten Jahrzehnten zu einer kontinuierlichen Eintiefung der Sohle sowie zu einer Zunahme der ökologischen Defizite geführt. Für die betrachtete Flussstrecke definiert der Lago Maggiore den Sohlenfixpunkt.

Aus einem Katalog von möglichen Massnahmen wurde unter anderem eine 1,9 km lange und 200 m breite Aufweitung des Ticino bei Cugnasco untersucht (Bild 5).

Anhand der von 1972 bis 2001 dokumentierten Entwicklung der Sohlenlage wurde das numerische Simulationsmodell Floris²⁰⁰⁰ (VAW, 2004) kalibriert und anschließend zur Prognose der weiteren Entwicklung für den Fall mit und ohne Massnahmen verwendet. Betrachtet wurde dabei ein Zeitraum von 30 Jahren. Nachfolgend werden die Resultate aus der Simulation für die Fälle

- ohne Massnahmen und
- mit einer durch Abtrag des umliegenden Geländes künstlich herbeigeführten Aufweitung bei Cugnasco näher betrachtet.

Aus der Analyse des heutigen Zustandes resultierten folgende Erkenntnisse:

- Heute ist die mittlere jährliche Geschiebezufuhr in dem betrachteten Flussabschnitt auf maximal rund 13000 t pro Jahr limitiert, was rund 15–20% der vorhandenen Geschiebetransportkapazität entspricht.
- Ohne Realisierung von Massnahmen und bei gleich bleibenden Randbedingungen wie in den letzten 30 Jahren wird die Erosion im oberen Teil der betrachteten

Flussstrecke weiter fortschreiten. Ohne bauliche Eingriffe dürfte dadurch die Böschungsstabilität nicht mehr gewährleistet sein.

Die Auswirkungen der 200 m breiten und 1,9 km langen Aufweitung auf die Sohlenentwicklung wurden für mittlere jährliche Geschiebezufuhren zwischen 2800 t und 13000 t simuliert. Dabei entspricht die kleinste Zufuhr in etwa der aktuellen mittleren jährlichen Geschiebezufuhr, während die 13000 t einen oberen Grenzwert darstellen, der aufgrund der Gefällsverhältnisse im Ticino flussaufwärts von Bellinzona noch möglich ist.

Die Resultate der Berechnungen, in Bild 6 dargestellt, zeigen, dass sich in der untersuchten Aufweitung durch Ablagerungen eine markante Anhebung der mittleren Sohlenlage ergibt (ausgezogene Linien in Bild 6). Flussabwärts macht sich das Geschiebedefizit aufgrund des Rückhalts in der Aufweitung durch lokale Sohleneintiefungen

bemerkbar. Aufgrund der auf der ganzen Flussstrecke vorhandenen Erosionstendenz wird die Sohle im Unterwasser nicht wieder auf das Ausgangsniveau angehoben.

Im Oberwasser kann die Aufweitung – wie bereits von Hunzinger (1998) beobachtet – die übergeordnete Sohlenerosion nicht verhindern. Im betrachteten Fall tieft sich die Sohle – vor allem bei kleiner Geschiebezufuhr – sogar noch etwas stärker ein als im Fall ohne Aufweitung. Die Beobachtungen von Hunzinger, wonach die Sohle auch im Fall einer übergeordneten Erosionstendenz im Oberwasser der Aufweitung höher liegt als im Fall ohne Aufweitung, bestätigen sich demnach am Ticino nicht. Die Resultate der Simulationen am Ticino zeigen, dass in einem erodierenden Fluss die vorhandene Erosionstendenz oberhalb der Aufweitung sogar noch verstärkt werden kann. Diese unterschiedlichen Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

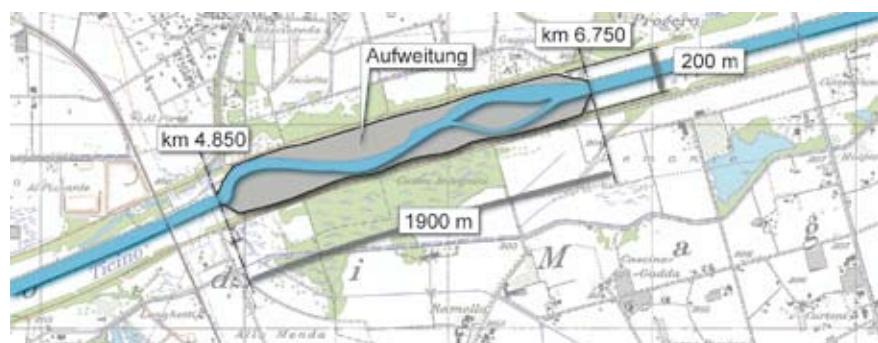


Bild 5. Untersuchte Aufweitung bei Cugnasco. PK25: 2001 Bundesamt für Landestopografie (DV 1366.2).

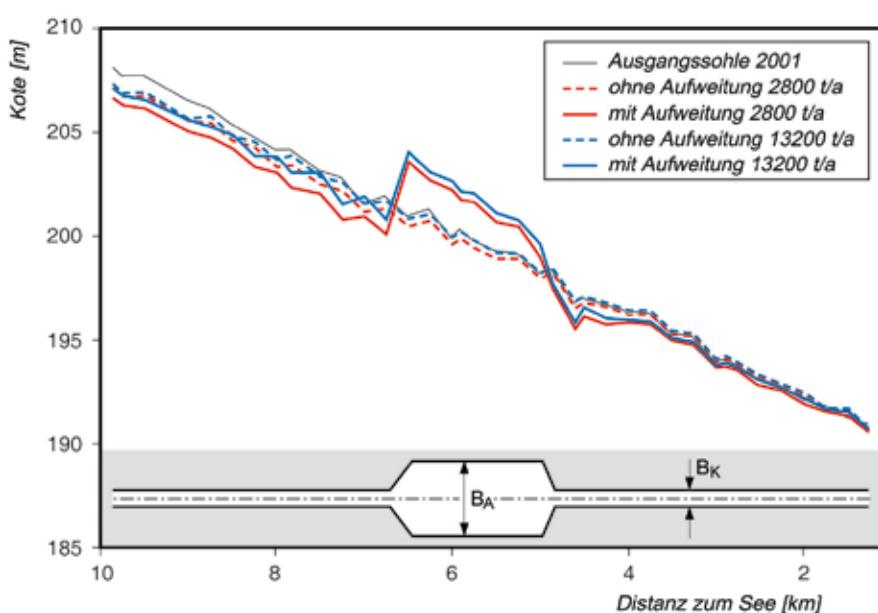


Bild 6. Für das Jahr 2031 prognostizierte Sohlenlagen für die Variante einer Aufweitung im Vergleich zum Referenzfall ohne Massnahmen. Simulationsergebnisse für Geschiebezufuhren von 2800 und 13.000 t/a (VAW, 2004).

3.3 Widersprüchliche Resultate?

Sowohl Hunzingers Berechnungen als auch die Simulationen für den Ticino zeigen, dass mit einer Aufweitung eine übergeordnete Erosionstendenz nicht gestoppt werden kann. Die Erosionstendenz kann durch die Aufweitung sowohl gehemmt als auch verstärkt werden. Eine Reihe von Parametern ist für dieses Verhalten verantwortlich. Weil eine Verschärfung der Erosionstendenz durch die Aufweitung nicht erwünscht ist, müssen auch im Erosionsfall zuverlässige Prognosen über die Auswirkungen einer Aufweitung gemacht werden können.

In Bild 7 sind die Verhältnisse im flussaufwärts liegenden Ende einer Aufweitung gezeigt. Der Versatz ΔH entspricht der Sohlenhöhe zwischen der höchsten Sohlenlage in der Aufweitung (Versatzhochpunkt) und der tiefsten Sohlenlage flussaufwärts der Aufweitung (Versattiefpunkt). Der Versattiefpunkt wirkt als «Fixpunkt» für die Bewegung der Sohle flussaufwärts der Aufweitung. Die Lage dieses «Fixpunkts» bestimmt also, wie stark sich die Sohle flussaufwärts der Aufweitung eingraben kann.

Die Lage des Versattiefpunkts wird durch die auftretenden Prozesse in der Aufweitung sowie durch die Randbedingungen im Unterwasser beeinflusst. Daher sind die Parameter, die die Versatzhöhe ΔH sowie die Lage des Versatzhochpunkts beeinflussen, auch für die Höhenlage des Versattiefpunkts verantwortlich (Bild 7).

Mit den Annahmen eines konstanten Abflusses und einer konstanten Geschiebezufuhr (stationäre Randbedingungen) wird die Lage des Versattiefpunktes von folgenden Parametern beeinflusst:

1. Breitenverhältnis $\beta = B_A / B_K$ zwischen dem aufgeweiteten und dem nicht aufgeweiteten Profil, welches das Ausmass des Sohlenversatzes ΔH direkt beeinflusst (Hunzinger, 1998).
2. Geschiebezufuhr G_b , deren Einfluss auf die Versatzhöhe ΔH im Rahmen weiterer Untersuchungen an der VAW festgestellt wurde (Berchtold, 2004).
3. Länge der Aufweitung L_A , die direkt für die Höhenlage des Versatzhochpunktes verantwortlich ist.
4. Entfernung der Aufweitung zum flussabwärts gelegenen Sohlenfixpunkt, da sich die vorhandene Erosionstendenz im Unterwasser weiter flussaufwärts auswirkt.

Alle diese Parameter beeinflussen direkt oder indirekt die morphologische Entwicklung im Oberwasser. Bei den bisher zitierten Beispielen (Hunzingers Versuche und Fallstudie Ticino) waren diese Parameter verschieden. Daher werden ihre Einflüsse auf die Sohlenentwicklung im Oberwasser der Auf-

weitung in den nächsten Abschnitten einzeln behandelt. Die Betrachtung erfolgt dabei für stationäre Randbedingungen.

4. Einfluss des Breitenverhältnisses

Der Einfluss des Breitenverhältnisses β auf die Versatzhöhe ΔH wurde schon von Hunzinger (1998) beschrieben. Die Versatzhöhe ist ein hydraulisches Phänomen, das sich in erster Linie aufgrund der durch die Aufweitung verursachten Energiehöhendifferenz bildet. Für gegebenen Abfluss, Gefälle und Sohlenraufigkeit nimmt die Energiehöhendifferenz zwischen Kanal und Aufweitung und somit die Versatzhöhe ΔH mit dem Breitenverhältnis β zu. Für den Fall erodierender Flussstrecken bedeutet dies, dass im Endzustand mit zunehmendem Breitenverhältnis β die Versatzhöhe grösser und somit die Sohlenerosion flussaufwärts intensiver sein wird. Dieses deckt sich mit den Resultaten der Simulationen für den Ticino.

Im Rahmen der Fallstudie Ticino wurde eine 200 m breite Aufweitung modelliert. Dies entspricht einem Breitenverhältnis von $\beta = B_A / B_K = 4$. Um den Einfluss von β zu untersuchen, wurde die gleiche Simulation mit einer Geschiebezufuhr von 2800 t/a für eine schmalere Aufweitung mit einer Breite von $B_A = 100$ m wiederholt. Diese schmale Aufweitung entspricht einem Breitenverhältnis von $\beta = B_A / B_K = 2$. In Bild 8 wird die Sohlenentwicklung nach 30 Jahren für die beiden Simulationen verglichen. Die Sohlenentwicklung für den Fall ohne Aufweitung und bei gleicher Geschiebezufuhr ist zusätzlich gezeigt (gestrichelte Linie in Bild 8).

Der Sohlenversatz ΔH war bei einem Breitenverhältnis von $\beta = 4$ fast doppelt so gross wie für den Fall $\beta = 2$. Trotz des höheren Versatzhochpunkts liegt bei dem grösseren Breitenverhältnis der Versattiefpunkt tiefer als im Fall kleinerer Breitenverhältnisse, was zu stärkeren Erosionen im Oberwasser führt

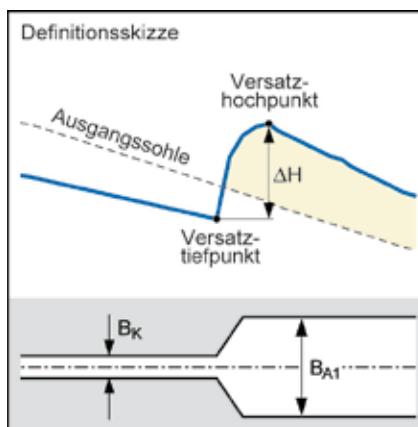


Bild 7. Definitionsskizze der Versatzhöhe ΔH .

(Bild 8). Werden beide Beispiele mit dem Fall ohne Aufweitung verglichen, stellt man fest, dass die schmalere Aufweitung ($\beta = 2$) kaum einen übergeordneten Einfluss, weder positiv – im Sinne einer Hemmung der Erosion – noch negativ hat. Hingegen werden bei der breiteren Aufweitung ($\beta = 4$) die Erosionen im Oberwasser sowie im Unterwasser gegenüber dem Fall ohne Aufweitung verstärkt.

Dieses Beispiel zeigt, dass eine grosse Aufweitungsbreite unter bestimmten Bedingungen die Erosionstendenz im Oberwasser verstärken kann. Dadurch lassen sich die Unterschiede zwischen den Simulationen von Hunzinger und der Fallstudie Ticino teilweise erklären. Das Breitenverhältnis β im Fall der am Ticino untersuchten Aufweitung ist doppelt so gross wie im Beispiel von Hunzinger.

Aufweitungen mit grossen Breitenverhältnissen können sich – insbesondere in erodierenden Flüssen – kontraproduktiv auswirken, indem die Erosion flussaufwärts der Aufweitung verstärkt wird. Soll eine Aufweitung in einer erodierenden Flussstrecke realisiert werden, muss den nachteiligen Auswirkungen der Aufweitung mit geeigneten Massnahmen begegnet werden. Möglichkeiten zur Verhinderung beziehungsweise zur Reduktion dieser negativen Auswirkungen werden im Abschnitt 9 aufgeführt.

5. Einfluss der Geschiebezufuhr

5.1 Resultate aus der Fallstudie Ticino

Die Simulationsergebnisse am Ticino haben gezeigt, dass die Geschiebezufuhr die Versatzhöhe ΔH und somit die Lage des Versattiefpunktes beeinflussen kann.

Im Bild 6 ist ersichtlich, wie die mittlere Sohle flussaufwärts der Aufweitung bei kleinerem Geschiebeeintrag deutlich tiefer liegt als bei grösserer Geschiebezufuhr. Beide Simulationen wurden für ein Breitenverhältnis von $\beta = 4$ und jeweils dieselbe Abflussganglinie durchgeführt. Dieses bedeutet, dass die Unterschiede allein auf die verschiedenen Geschiebezufuhren zurückzuführen sind.

Dieses verdeutlicht, dass die vorhandene Erosionstendenz bei einem grossen Geschiebedefizit durch die Realisierung einer Aufweitung noch verschärft werden kann.

Das Geschiebedefizit am Ticino ist deutlich grösser als in dem von Hunzinger behandelten Beispiel (Bild 4). Dieses ist ein weiterer Grund für die verstärkte Erosion im Oberwasser der am Ticino betrachteten Aufweitung. Während die Zufuhr in dem

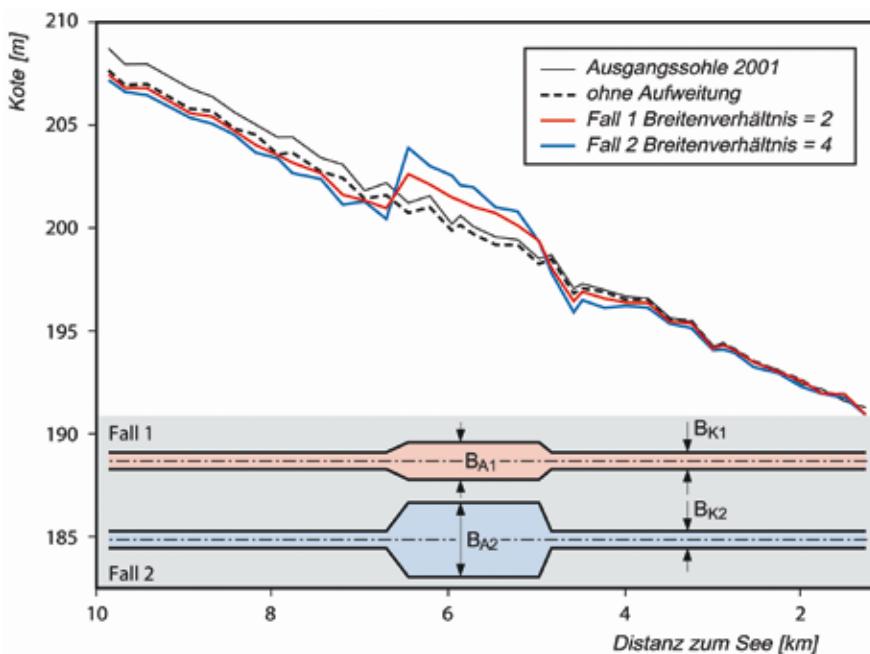


Bild 8. Für das Jahr 2031 prognostizierte Sohlenlage für die Variante einer Aufweitung im Vergleich zum Referenzfall ohne Aufweitung. Simulationsergebnisse für Breitenverhältnisse von 2 und 4.

von Hunzinger simulierten Beispiel 25% der Transportkapazität war, entspricht die im Fall des Ticinos simulierte Geschiebezufluss nur gerade etwa 5–15% der Transportkapazität.

5.2 Hydraulische Versuche

Im Rahmen einer an der VAW bearbeiteten Diplomarbeit (Berchtold, 2005) wurden hydraulische Modellversuche durchgeführt, mit dem Ziel, weitere Erkenntnisse über den Einfluss der Geschiebezufluss auf die Sohlenentwicklung und die Morphologie in einer Aufweitung zu gewinnen.

Die hydraulischen Modellversuche wurden an einer 10 m langen Rinne bei konstantem Abfluss und konstanter Sedimentzugabe durchgeführt. Dabei wurde ein 4 m langes und 0,5 m breites kanalisiertes Gerinne mit einem daran anschliessenden 6 m langen und 1,5 m breiten Abschnitt modelliert. Dieser entspricht dem oberen Teil einer Aufweitung (Bild 9).

Die Versuche wurden für eine Kornverteilung des Sohlenmaterials durchgeführt, die der Kornverteilung des Geschiebes im Ticino entspricht (Massstab 1:100). Das Breitenverhältnis wurde $\beta = 3$ gewählt und ist in allen Versuchen gleich. Für zwei Kombinationen von Abfluss und Gefälle wurden jeweils vier Versuche durchgeführt, bei denen die Geschiebezufluss zwischen 0 und 4 g/s variiert wurde. Dabei entspricht die Geschiebezufluss von 4 g/s in etwa der Geschiebetransportkapazität des betrachteten kanalisierten Gerinnes. Der Abfluss wurde während eines Versuchs konstant gehalten. Im Versuch bildete sich ein Sohlenversatz,

der anwuchs, bis sich in der Aufweitung ein neuer Gleichgewichtszustand ausbildete. Nachdem sich in der ganzen Rinne ein stabiler Zustand eingestellt hatte, wurde der Versuch beendet.

Bei jedem Versuch wurden die Sohle regelmässig mit einem Laserdistanzmesser vermessen und die mittlere Sohlenlage und das Längsprofil bestimmt. Dadurch konnte bei jedem Versuch der sich bildende Sohlenversatz ΔH bestimmt werden.

Die Resultate der Diplomarbeit in Bild 10 zeigen, dass der Sohlenversatz ΔH mit abnehmender Geschiebezufluss G_b zunimmt. Wird die Versatzhöhe ΔH mit der kritischen Abflusstiefe h_{crit} normiert, so ist ein Vergleich der bei unterschiedlichen Abflüssen durchgeföhrten Versuche möglich. Dazu wird der Geschiebeeintrag G_b mit dem Grenzabfluss Q_0 bei Transportbeginn sowie der Feststoffdichte ρ normiert. In dieser dimensionslosen Darstellung lässt sich für das untersuchte Breitenverhältnis und das gegebene Sohlenmaterial eine lineare Abhängigkeit der Versatzhöhe vom Geschiebeeintrag erkennen.

Damit wurden die Simulationen der Fallstudie Ticino bestätigt, bei denen eine Abhängigkeit mit gleichem Trend festgestellt wurde: Ein grosses Geschiebedefizit kann den Erosionstrend flussaufwärts der Aufweitung deutlich verschärfen.

Für die Randbedingungen der hydraulischen Modellversuche wurde als Näherung für die Versatzhöhe ΔH der Sohlenversatz S (Bild 3) nach Hunzinger (1998) berechnet. Dieser Ansatz gilt für Flüsse im Gleichgewicht. In Bild 10 wurden die zugehörigen Werte in Form einer Bandbreite zusätzlich aufgetragen. Der Sohlenversatz nach Hunzinger hängt dabei nicht von der Geschiebezufluss G_b ab.

Aus Bild 10 ist ersichtlich, dass die gemessenen Versatzhöhen in den Versuchen mit grosser Geschiebezufluss (4 g/s) relativ gut mit den nach Hunzinger (1998) berechneten Versatzhöhen übereinstimmen. Diese Geschiebezufluss entspricht in etwa der Geschiebetransportkapazität des betrachteten Gerinnes.

Aus diesen Resultaten kann geschlossen werden, dass in erodierenden Flüssen der Ansatz von Hunzinger einen unteren Grenzwert für die Höhe des Sohlenversatzes gibt. Mit zunehmendem Geschiebedefizit wird der Sohlenversatz grösser und erreicht bei fehlender Zufuhr ein Maximum, welches rund 20% grösser ist als beim Gleichgewichtszustand. Unter Berücksichtigung dieser Resultate ergibt sich für den am oberen Ende einer Aufweitung resultierenden Sohlenversatz ΔH folgende Beziehung:

$$\Delta H = S_{HUNZINGER} \quad G_b < G_{TC}$$

$$\Delta H = S_{HUNZINGER} + f \left(1 - \frac{G_b}{G_{TC}} \right) \quad G_b \geq G_{TC}$$

wobei G_{TC} die Geschiebetransportkapazität in g/s bezeichnet.

Diese Resultate wurden auf der Basis einer begrenzten Anzahl von Versuchen erhalten. Um den festgestellten Trend zu bestätigen, sollen weitere Versuche mit unterschiedlichen Breitenverhältnissen, Aufweitungslängen und Kornzusammensetzungen durchgeföhrten werden.

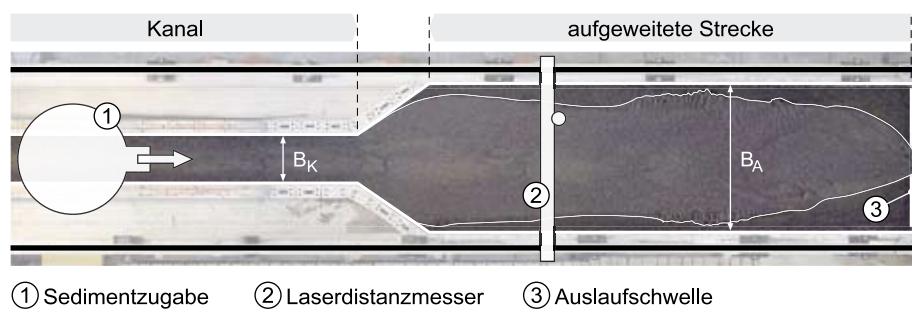


Bild 9. Versuchsanlage an der VAW.

6. Länge der Aufweitung

Der Einfluss der ausgewählten Aufweitungslänge L_A wird am Beispiel einer numerischen Simulation beschrieben. Hierzu wurden zwei Aufweitungen mit gleicher Breite, aber mit unterschiedlicher Länge L_{A1} und L_{A2} modelliert (Bild 11). Die übrigen Parameter sind in beiden Fällen identisch. Die Simulationen wurden unter stationären Randbedingungen durchgeführt.

Für eine gegebene Aufweitungslänge L_A erreicht der Versatzhochpunkt eine bestimmte Höhe in Bezug zur Ausgangssohle. Je länger die Aufweitung ist, desto weiter flussaufwärts und desto höher wird der Versatzhochpunkt liegen (Bild 11, Fall 2). Die Versatzhöhe H bleibt in beiden Fällen gleich gross.

Dies führt dazu, dass flussaufwärts einer langen Aufweitung die Sohle höher liegt als jene bei einer kürzeren Aufweitung.

7. Lage des übergeordneten Sohlenfixpunkts

Die Lage des flussabwärts liegenden Sohlenfixpunkts spielt eine bedeutende Rolle bei der Entwicklung der Sohlenlage in und oberhalb der Aufweitung. Dieser Einfluss ist anhand der in Bild 12 gezeigten Prinzipskizze illustriert. Darin sind die Auswirkungen zweier Aufweitungen auf die Sohlenlage gezeigt. Die Aufweitungen weisen die gleichen Dimensionen auf, sind aber in unterschiedlicher Distanz L_{U1} bzw. L_{U2} zum übergeordneten Fixpunkt angeordnet.

Im Fall 1 liegt die Aufweitung nahe zum Sohlenfixpunkt. Dadurch wirkt sich der übergeordnete Erosionszustand flussaufwärts weniger ausgeprägt aus. Die Ablagerungen in der Aufweitung liegen relativ hoch über der Ausgangssohle, und die Erosionen im Oberwasser sind weniger markant. Liegt die Aufweitung weiter vom Sohlenfixpunkt entfernt (Bild 12, Fall 2), so reduziert sich dadurch die «sohlenstabilisierende» Wirkung der Aufweitung. Aufgrund der grösseren Distanz zum Fixpunkt tieft sich die Sohle im Unterwasser der Aufweitung stärker ein. Dadurch finden die morphologischen Prozesse auf «einem tieferen Niveau» statt. In Bezug zur Ausgangssohle sind die Ablagerungen in der Aufweitung nicht mehr so relevant und die Erosionstendenz flussaufwärts wird nicht gebremst.

8. Folgerungen

Aufgrund der hier beschriebenen Untersuchungen lässt sich folgern, dass Flussaufweitungen, die in erodierenden Flussstrecken realisiert werden, die übergeordnete Erosionstendenz nicht oder nur begrenzt aufhalten können. In der Aufweitung selbst

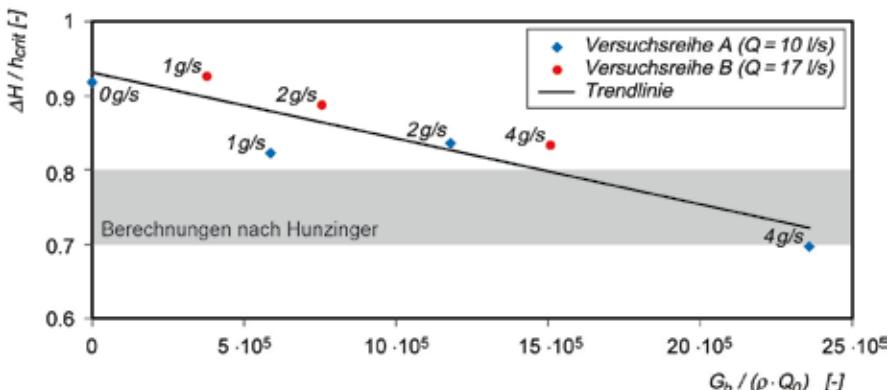


Bild 10. Dimensionslose Versatzhöhe H/h_{crit} in Abhängigkeit der dimensionslosen Geschiebezuflussrate $G_b / (\rho \cdot Q_0)$. Die Daten lassen sich durch eine lineare Funktion beschreiben. Die graue Bandbreite entspricht der mit dem Ansatz von Hunzinger berechneten Versatzhöhe (Daten aus Berchtold, 2004).

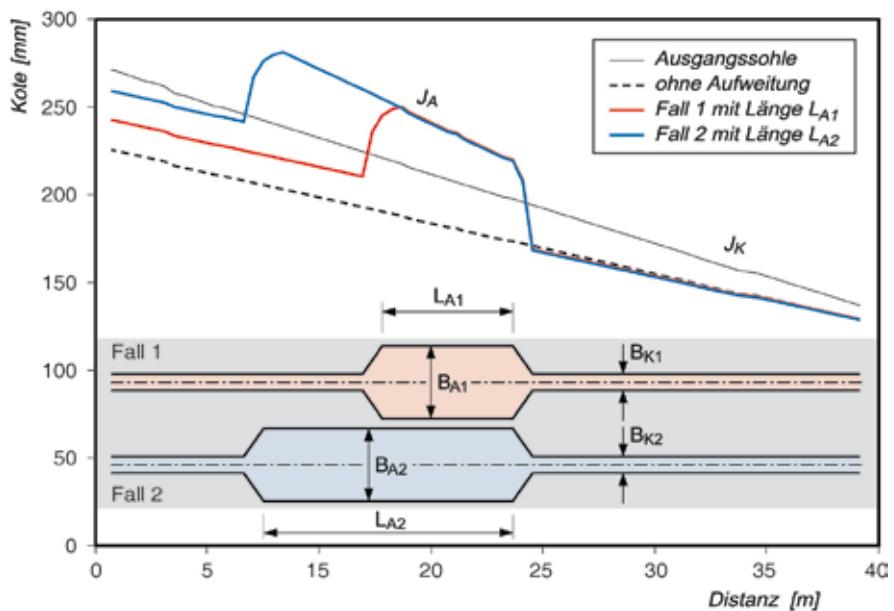


Bild 11. Simulationsergebnisse für zwei Aufweitungen mit unterschiedlichen Aufweitungslängen.

resultieren zwar Ablagerungen, aber die vorhandene Erosionstendenz wird sich sowohl flussabwärts wie auch flussaufwärts der Aufweitung auswirken.

Eine Reihe von Parametern ist für dieses Verhalten verantwortlich. In diesem Artikel wurde unter der Annahme stationärer Randbedingungen der Einfluss der verschiedenen Parameter, welche die übergeordnete Sohlenlage beeinflussen, einzeln beschrieben. In Bild 13 sind die verschiedenen Einflüsse zusammenfassend dargestellt:

- Wegen des auf der ganzen Flussstrecke bestehenden Erosionszustands tieft sich die Sohle unterhalb der Aufweitung im Vergleich zur Ausgangssohle ein (① in Bild 13). Das Ausmass dieser Eintiefung hängt wesentlich vom Grenzgefälle J_K , der Geschiebezufluss G_b und der Distanz des Aufweitungsendes zum übergeordneten Fixpunkt ab.
- Die Höhe des Versatzes ΔH am oberen Ende der Aufweitung hängt wesentlich vom Breitenverhältnis β sowie von der Geschiebezufluss G_b ab.
- Alle oben genannten Parameter bestimmen in der Summe die Lage des Versatzhochpunkts am oberen Ende der Aufweitung (④ in Bild 13).

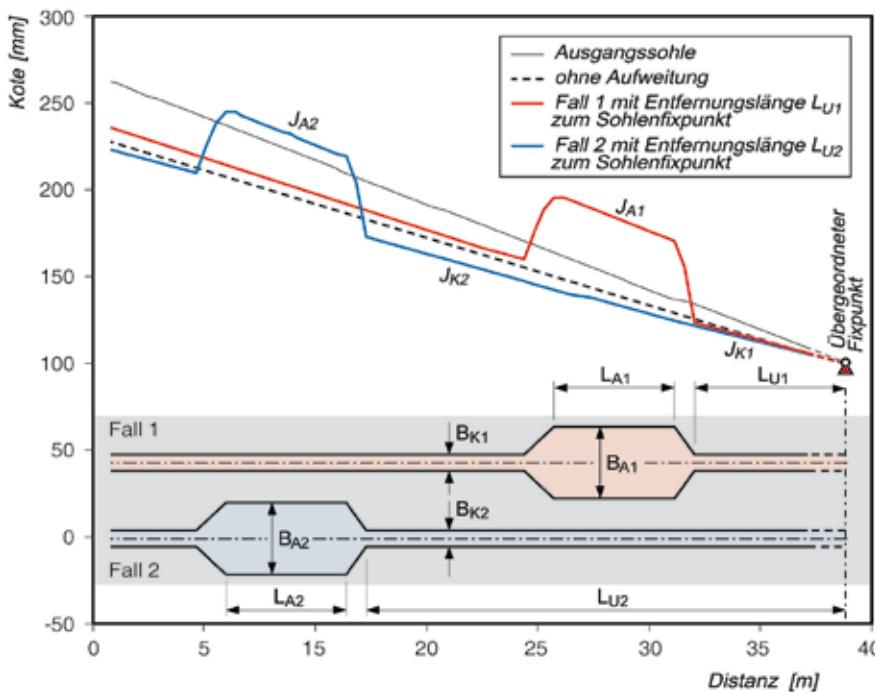


Bild 12. Sohlenlage für zwei Aufweitungen, die unterschiedlich weit entfernt vom übergeordneten Fixpunkt angeordnet sind.

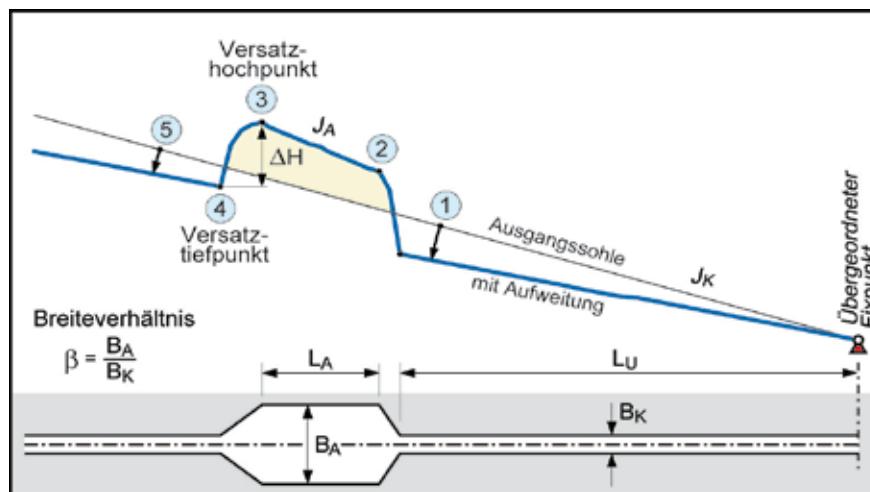


Bild 13. Zusammenfassung der Einflüsse der verschiedenen Parameter, welche die übergeordnete Sohlenlage beeinflussen.

- Die Sohlenerosion im Oberwasser der Aufweitung wird rotationsförmig um diesen Versatztiefpunkt stattfinden (5) in Bild 13).

Die komplexen Zusammenhänge, welche letztlich die Sohlenentwicklung bestimmen, lassen sich am ehesten mit Hilfe numerischer Simulationen untersuchen. Dieses Berechnungsmittel bietet die Möglichkeit, vielseitige Berechnungen an einem für das zu untersuchende Beispiel angepassten Modell mit relativ geringem Aufwand durchzuführen.

9. Konsequenzen für die Praxis

Bei Aufweitungen, die in einer erodierenden Flussstrecke realisiert werden, besteht die

Möglichkeit, dass die vorhandene Erosionstendenz im Oberwasser durch die Aufweitung verstärkt wird. Allerdings kann den negativen Auswirkungen durch geeignete begleitende Massnahmen begegnet werden.

a) Unterhalb der Aufweitung:

- Die Erosion kann durch flächenhafte Sohenschutzmaßnahmen verhindert werden.
- Der Geschieberückhalt in der Aufweitung kann reduziert oder ganz vermieden werden, wenn die Hebung der Sohle in der Aufweitung bei der Realisierung durch Einbringen geeigneten Materials vorweggenommen wird.

b) Oberhalb der Aufweitung:

- Durch Einbringen von Material kann am oberen Ende der Aufweitung bereits frühzeitig eine möglichst hohe Sohlenlage realisiert werden. Dadurch wird eine Absenkung des Wasserspiegels gegen die Aufweitung hin vermieden und so der Erosion in der oben liegenden Strecke entgegengewirkt.
- Um einen zu grossen Versatz ΔH zu vermeiden, bietet sich auch eine Verbreiterung des Gerinnes in Etappen als Möglichkeit an. Durch sukzessive Vergrösserung der Breite bleibt dem Fluss Zeit, um sich den jeweils neuen Breitenverhältnissen anzupassen. Somit wird sich der Sohlenversatz kleiner ausbilden und die Erosionen im Oberwasser werden weniger ausgeprägt ausfallen.
- Die Aufweitung kann – als Alternative zu einer Etappierung – durch selbständige Erosion erfolgen, indem die Ufersicherungen entfernt werden. Somit kann sich der Fluss durch Seitenerosion aufweiten, und ihm bleibt auch genügend Zeit, um sich der neuen Breite anzupassen.

Literatur

- Berchtold, T. (2005): Übergeordnete Auswirkungen von Flussaufweitungen – Experimentelle Untersuchungen. Diplomarbeit WS04/05, Professur für Wasserbau, ETH, Zürich (unveröffentlicht).
- Hunzinger, L. (1998): Flussaufweitungen – Morphologie, Geschiebehaushalt und Grundsätze zur Bemessung. Mitteilung Nr. 159 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zürich, 206 p.
- Hunziker, R.-P. (1995): Fraktionsweiser Geschiebetransport. Mitteilung Nr. 138 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zürich, 209 p.
- VAW (2004): Machbarkeitsstudie zur Renaturierung des Ticino und seiner Mündung. Bericht VAW 4186, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zürich (unveröffentlicht).

Anschrift der Verfasser

Dipl. Bauing. Patricia Requena Méndez (requena@vaw.baug.ethz.ch); Dr.-Ing. Gian Reto Bezzola (bezzola@vaw.baug.ethz.ch); Prof. Dr. Hans-Erwin Minor (minor@vaw.baug.ethz.ch), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum, Gloriastrasse 37–39, CH-8092 Zürich.