

New recommendations for the assessment of river bank erosion hazards

Eine neue Empfehlung zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion an Fließgewässern

Lukas Hunzinger, Dr.¹; Annette Bachmann²; Ralph Brändle³; Paul Dändliker⁴; David Jud⁵; Mario Kokschi⁶

ABSTRACT

An important prerequisite to protect settlements and lifelines from bank erosion effectively is a sound hazard assessment. This recommendation describes a step by step approach for such an assessment. In a first step basic scenarios are defined. The second step consists of a weak point analysis, in which the relevant load cases are identified. Load cases are: erosion of the toeslope, direct bank erosion and erosion of the slope crest. For each basic scenario the load parameters corresponding to the relevant load cases are determined as a function of discharge, bed load and estimated bed level changes and are compared to the resistance parameters of the bank. Bank erosion is assumed if the load parameters are larger than the resistance parameters. Finally, the dimension of the bank erosion is estimated. The erosion width may measure a multiple of the original channel width, depending whether changes in the channel pattern lead to large scale channel migration or whether bank erosion is triggered by local irregularities in the channel topography only.

ZUSAMMENFASSUNG

Eine wichtige Grundlage, um Siedlungen und Verkehrswege wirksam vor Ufererosion schützen zu können, ist eine qualitativ und quantitativ nachvollziehbare Gefahrenbeurteilung. Die vorliegende Empfehlung beschreibt die wichtigsten Schritte dazu. Nach der Definition von Grundszenarien werden im Rahmen der Schwachstellenanalyse die maßgeblichen Gefährdungsbilder für das Ufer identifiziert: Erosion am Böschungsfuß, direkter Strömungsangriff und Erosion an der Böschungsoberkante. Für alle zu untersuchenden Hochwasserszenarien werden für diese Gefährdungsbilder die Belastungsgrößen in Abhängigkeit von Abfluss, Geschiebetransport und Sohlenveränderung während eines Hochwassers bestimmt und dem Widerstand der Böschung gegenüber gestellt. Ist die Belastung größer als der Widerstand muss auf dem betreffenden Gewässerabschnitt mit Erosion gerechnet werden. Die Breite der Erosion kann ein mehrfaches der Gerinnebreite betragen. Sie hängt davon ab,

1 Flussbau AG SAH, Bern, SWITZERLAND, lukas.hunzinger@flussbau.ch

2 CSD Ingenieure AG, SWITZERLAND

3 Kanton St. Gallen, Naturgefahrenkommission, SWITZERLAND

4 Bundesamt für Umwelt BAFU, SWITZERLAND

5 Meier und Partner AG, SWITZERLAND

6 Kanton Luzern, vif, SWITZERLAND

ob übergeordnete morphologische Prozesse zu einer großräumigen Verlagerung des Gerinnes führen oder ob die Seitenerosion durch eine lokale Unregelmäßigkeit im Gerinnequerschnitt verursacht wird.

KEYWORDS

bank erosion; hazard analysis; weak point analysis

EINLEITUNG

Die Ufererosion ist ein Gefahrenprozess, der im Vergleich zur Überflutung weniger häufig und auf kleineren Flächen auftritt. Ihr Gefahrenpotenzial wurde bislang allerdings unterschätzt. Dies hat insbesondere das Hochwasserereignis im Jahr 2005 in der Schweiz und in den angrenzenden Ländern aufgezeigt, bei welchem durch den Abtrag von Uferböschungen viele Gebäude und Infrastrukturanlagen beschädigt oder zerstört wurden (Hilker et al., 2007). Eine wichtige Grundlage, um Siedlungen und Verkehrswege wirksam vor Ufererosion schützen zu können, ist eine qualitativ und quantitativ nachvollziehbare Gefahrenbeurteilung.

Zur Beurteilung des Prozesses Ufererosion gibt es bis heute keine allgemein anerkannten Methoden oder Berechnungsgrundlagen. Um diese Lücke zu schließen, haben die Fachleute Naturgefahren Schweiz (FAN) und die Kommission für Hochwasserschutz, Wasserbau und Gewässerpflege (KOHS) eine Empfehlung zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion erarbeiten lassen (FAN und KOHS 2015). Die Empfehlung richtet sich an Wasserbau- und Naturgefahrenfachleute aus Praxis und Verwaltung. Sie schlägt Vorgehensweisen vor, nach denen die Gefahr von Ufererosion Schritt für Schritt beurteilt werden soll. Die Wahl der geeigneten Berechnungsansätze, mit denen die maßgeblichen Größen in den einzelnen Bearbeitungsschritten bestimmt werden, ist hingegen dem Anwender überlassen.

DER PROZESS DER SEITENEROSION

Unter Seitenerosion versteht man den lateralen Abtrag des Böschungsmaterials und die daraus resultierende Verbreiterung eines Gerinnes. Die Erosion wird durch die Strömung verursacht, die wirkenden Kräfte werden mit der Schleppspannung beschrieben. Damit es zu einer Erosion kommt, muss die angreifende Schleppspannung größer sein als die Grenzschleppspannung der Böschung. Diese hängt unter anderem von der Art des Ufermaterials (Korngröße, Kohäsion, etc.), dem Bewuchs (Beck 2006, Requena 2008) sowie einer allfälligen Uferverbauung ab (Romang 2008).

In der Literatur wird zwischen primärer und sekundärer Seitenerosion unterschieden. Gemäß Anderson et al. (1975) bewirkt die primäre Seitenerosion eine Verbreiterung des Gerinnes auf der gesamten Länge, ohne dass sich die Lage und die Form des Gerinnes verändern. Bei der sekundären Seitenerosion hingegen verlagert und verformt sich das Gerinne aufgrund von Querströmungen. Abhängig von Flussbettbreite, Korngrößen, Gerinneneigung und Sedimen-

teintrag bilden sich Mäander oder ein verzweigtes Gerinne. Ahmari und da Silva (2011) haben Kriterien definiert, um das Auftreten verschiedener Gerinneformen voneinander abzugrenzen.

Im vorliegenden Artikel wird die Seitenerosion als Gefahrenprozess verstanden, welcher außerhalb des Gerinnes beobachtet wird. Er wird deshalb als Ufererosion bezeichnet.

DAS GENERELLE VORGEHEN ZUR BEURTEILUNG DER EROSIONSGEFAHR

Das generelle Vorgehen zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion ist in die drei Phasen Definition von Grundszenarien, Schwachstellenanalyse und Wirkungsanalyse unterteilt (Abbildung 1). Mit den Grundszenarien werden Abflussmengen, Sedimenteintrag und Schwemmholaufkommen bei möglichen Hochwasserereignissen festgelegt. In der Schwachstellenanalyse wird die Frage beantwortet, ob es auf dem untersuchten Gewässerabschnitt überhaupt zu einer Ufererosion kommen kann und in der Wirkungsanalyse wird das Ausmaß der Erosion bestimmt. Die Schwachstellen- und die Wirkungsanalyse werden für jeden untersuchten Gewässerabschnitt und für jedes Grundszenario einzeln durchlaufen.

DIE SCHWACHSTELLENANALYSE

Bei der Schwachstellenanalyse werden auf der Grundlage der aktuellen Morphologie und möglicher Veränderungen während eines Hochwassers verschiedene Gefährdungsbilder untersucht: a) Erosion am Böschungsfuß, b) direkter Strömungsangriff und c) Erosion an der Böschungsoberkante (Abbildung 2).

Mit der Beschreibung der aktuellen Morphologie und der Prognose von morphologischen Veränderungen während eines Hochwasserereignisses können für einen Gerinneabschnitt die maßgeblichen und die weniger wahrscheinlichen Gefährdungsbilder identifiziert werden. So muss zum Beispiel das Gefährdungsbild Erosion am Böschungsfuß sicherlich berücksichtigt werden, wenn während eines Hochwasserereignisses Sohlenerosion erwartet wird. Werden hingegen Geschiebeablagerungen im Gerinne erwartet, ist das Gefährdungsbild Erosion an der Böschungsoberkante wahrscheinlicher. Der direkte Strömungsangriff muss am Prallhang und in geraden Fließstrecken berücksichtigt werden, nicht aber am Gleitufer von Flusskrümmungen. Ein nicht zu unterschätzender Aspekt der Morphologie sind Unregelmäßigkeiten im Abflussquerschnitt wie zum Beispiel Einbauten (Buhnen, Schwellen) oder Abflusshindernisse im Querschnitt (Bäume, Wurzelstöcke). Diese können Erosionsprozesse initiieren, wenn sie zu einer Strömungskonzentration am Ufer oder zur Bildung von Kolken führen. Für die als maßgeblich betrachteten Gefährdungsbilder werden die Belastungsgrößen in Abhängigkeit von Abfluss, Geschiebetransport und Sohlenveränderung während eines Hochwassers bestimmt. Je nach Gefährdungsbild ist die Schleppspannung oder die Kolkentiefe die entscheidende Belastungsgröße. In vielen Fällen müssen die Belastungsgrößen gutachterlich und qualitativ bestimmt werden. In Gewässern in denen die hydraulischen Verhältnisse bei Hochwasser mit ausreichender Genauigkeit vorhergesagt werden können, sollen die

Grundszenarien

Abfluss Q
Geschiebezufuhr G
Holzzufuhr H

Schwachstellenanalyse

Bekannte Erosionsstellen

Morphologie
- aktuell
- Veränderungen bei Hochwasser

Gefährdungsbilder
a) Erosion am Böschungsfuß
b) Direkter Strömungsangriff
c) Erosion an der Böschungsoberkante

Belastungsgrößen
- Schleppspannungen
- Kolk-tiefen

Erosionswiderstand
- Uferbeschaffenheit
- Bauhöhe, Baulänge, Fundation
- Zustand
- Grenzbelastung

Fazit:
Seitenerosion möglich?

nein → Beurteilung Ufererosion für das Szenario abgeschlossen

Wirkungsanalyse

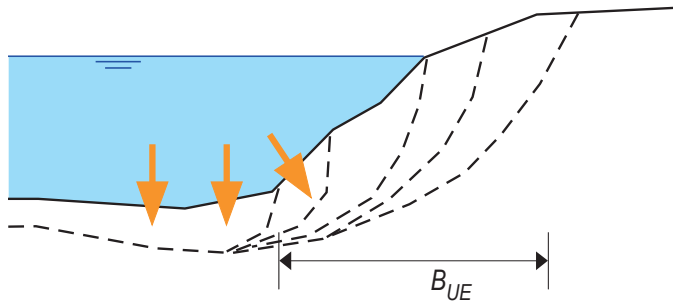
Ausdehnung und Intensität
- Flächige Ausdehnung
- Intensität

Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit

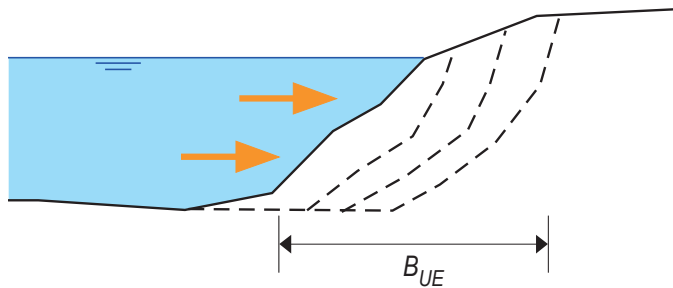
Folgeprozesse untersuchen

Abbildung 1: Flussdiagramm zum generelles Vorgehen zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion.

a) *Erosion am Böschungsfuß*



b) *Direkter Strömungsangriff*



c) *Erosion an der Böschungsoberkante*

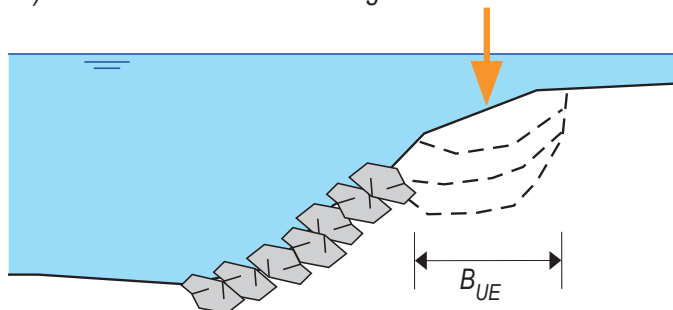


Abbildung 2: Gefährdungsbilder bei der Beurteilung der Gefahr von Ufererosion. B_{UE} bezeichnet die Erosionsbreite. Die Pfeile symbolisieren die maßgebliche Belastung.

Belastungsgrößen jedoch berechnet werden. Für die Berechnung von Kolk-tiefen sind aus der Literatur verschiedene Ansätze bekannt, z.B. von Tschopp und Bisaz (1972) bei Überfällen, von Peter (1986) oder Kikkawa et al. (1976) bei Flusskrümmungen und von Zarn (1997) in Gerinnen mit Bänken. Die maßgebliche Belastungsgröße beim direkten Strömungsangriff (Abbildung 2b) und bei der Erosion an der Böschungskante (Abbildung 2c) ist die Schleppspannung auf der Böschung bzw. dem darüber liegenden Terrain.

Die Belastungsgrößen werden dem Erosionswiderstand des Ufers gegenüber gestellt. Um den Widerstand zu bestimmen, müssen die Beschaffenheit und der Zustand des Ufers bzw. des umliegenden Terrains erfasst werden. Zu den Parametern, welche den Widerstand beeinflussen, zählen die Art des Ufers (Fels oder Lockermaterial, verbaut oder nicht verbaut), seine Kornzusammensetzung (Kies, Feinsedimente; kohäsiv oder nicht), sein Bewuchs (flachgründig, tiefgründig), seine Neigung und gegebenenfalls die Foundationstiefe von Verbauungen. In vielen Fällen ist auch hier eine gutachterliche und qualitative Beurteilung notwendig. Insbesondere die Foundationstiefe einer bestehenden Uferverbauung ist nur selten bekannt oder kann nur mit verhältnismäßig großem Aufwand ermittelt werden. Bei Uferverbauungen mit Blockwürfen lässt sich der Erosionswiderstand z.B. mit dem Ansatz von Stevens und Simons (1971) bestimmen. Für ingenieurbio-logische Verbauungen sind Grenzwerte der Schleppspannung zum Beispiel bei Pasche (2000) zu finden.

Zum Schluss der Schwachstellenanalyse wird aufgrund der in den vorangehenden Schritten gewonnenen Erkenntnisse entschieden, ob an einer bestimmten Stelle des Gewässers Ufererosion anzunehmen ist oder nicht.

DIE WIRKUNGSANALYSE

Im Rahmen der Wirkungsanalyse wird das Ausmaß der möglichen Erosion festgelegt. Es wird durch die Erosionsbreite, Erosionshöhe und Erosionslänge beschrieben (Abbildung 3). Die Erosionslänge L_{UE} wird entlang der ursprünglichen Uferlinie gemessen. Als Erosionsbreite B_{UE} wird die maximale Ausdehnung der Erosionsnische senkrecht zur Fließrichtung betrachtet. Die Erosionshöhe h_{UE} bezeichnet den Höhenunterschied zwischen der ursprünglichen Gewässersohle und der Anrisskante. Die Erosionshöhe wird verwendet, um die Intensität des Gefahrenprozesses zu beschreiben.

Die Erfahrungen aus dem Hochwasser 2005 und aus jüngeren Hochwasserereignissen lehren, dass die Erosionsbreite ein Mehrfaches der ursprünglichen Gerinnebreite aufweisen kann (Hunzinger und Durrer 2008, Krapesch et al. 2011, Bachmann 2012,). Verändert sich die Morphologie eines Gewässers großräumig, d.h. bilden sich neue Mäander oder Gerinneverzweigungen, haben Ufererosionen eine größere Ausdehnung als wenn sie durch eine lokale Unregelmäßigkeit im Abflussquerschnitt verursacht werden.

Werden die Ergebnisse der Beurteilung für eine Risikoanalyse verwendet, wird der Ufererosion eine räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit zugewiesen, welche zwischen 0.1 (in geraden Gerinnen) und 1.0 (in Außenkurven eines Mäanderbogens) liegt. Schließlich darf man nicht vergessen, dass durch die Erosion eines Ufers Folgeprozesse ausgelöst werden

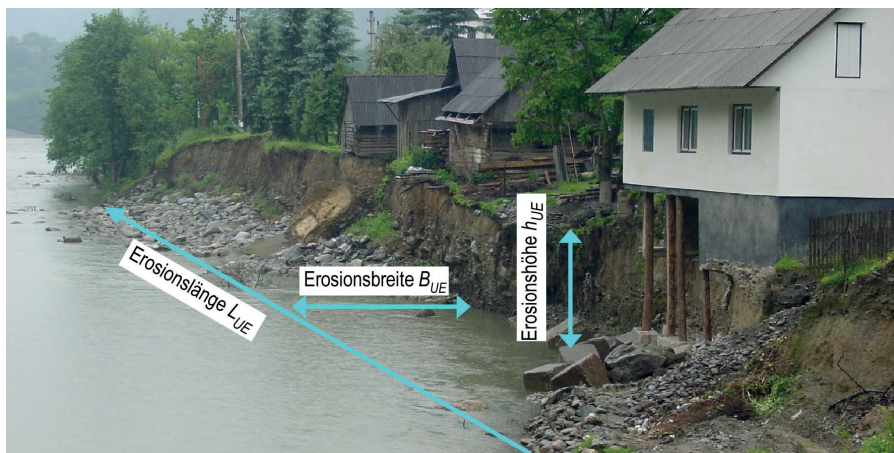


Abbildung 3: Bezeichnungen für das Ausmaß der Erosion. Beispiel an der Theiss, Ukraine. Foto: Flussbau AG SAH, 2001.

können, wie z.B. eine Hanginstabilität. Als letzter Schritt der Beurteilung müssen deshalb mögliche Folgeprozesse identifiziert werden.

EIN ANWENDUNGSBEISPIEL

Das folgende Anwendungsbeispiel soll die oben erwähnte Empfehlung zum Vorgehen veranschaulichen. Es werden Erosionsprozesse bei einem 300-jährlichen Hochwasserereignis am Ticino bei Chiggiona, einem Gebirgsfluss in der Südschweiz, untersucht. Das Flussbett ist im



Abbildung 4: Blocksatz am Ticino bei Chiggiona. Foto: Flussbau AG SAH, 2012.

untersuchten Abschnitt zwischen 40 m und 80 m breit und verzweigt. Das Längengefälle beträgt 1.7 %. Das Ufer ist mit einem intakten Blocksatz gesichert (Abbildung 4).

Das betrachtete Grundszenario hat eine Abflussspitze von 610 m³/s und es werden rund 60'000 m³ Geschiebe zugeführt. Der Transport von Schwemmh Holz ist in diesem Beispiel für die Beurteilung der Ufererosion ohne Bedeutung.

Die Schwachstellenanalyse zeigt, dass die Gefährdungsbilder Erosion am Böschungsfuß (Abbildung 2a) und direkter Strömungsangriff (Abbildung 2b) näher untersucht werden müssen: Für das 300-jährliche Ereignis ist mit großräumigen Ablagerungen auf der Sohle zu rechnen und das Gerinne wird sich stärker verzweigen. Die möglichen Kolke werden mit dem Ansatz von Zarn (1997) berechnet. Sie sind tiefer, als das Ufer fundiert ist. Für das Gefährdungsbild direkter Strömungsangriff wird die Schleppspannung auf der Böschung berechnet. Sie berücksichtigt eine Strömungskonzentration an der Kurvenaußenseite. Die Grenzschleppspannung wird nach Stevens und Simons (1971) bestimmt. Sie ist dank des hohen Blockgewichtes höher als die Belastung (Tabelle 1). Das Gefährdungsbild Erosion an der Böschungsoberkante ist wenig wahrscheinlich, weil auf dem Abschnitt bei Hochwasser keine Ausuferungen erwartet werden. Das Fazit der Schwachstellenanalyse lautet: durch Erosion am Böschungsfuß kann bei einem 300-jährlichen Hochwasserereignis das Ufer erodieren (Tabelle 1).

Tabelle 1: Schwachstellenanalyse für das Anwendungsbeispiel Ticino bei Chiggogna: Gefährdungsbilder, Belastung, Widerstand und Fazit.

Gefährdungsbild	Belastung	Widerstand	Fazit
Erosion am Böschungsfuß	Kolktiefe $t = -2.5$ m	Fundationstiefe -1.5 m	Seitenerosion möglich
Direkter Strömungsangriff	$\tau = 370$ N/m ²	Blocksatz, 45° geneigt, Blockgewicht 4 t $\tau_{crit} = 390$ N/m ²	Keine Seitenerosion
Erosion an der Böschungsoberkante	keine	–	Keine Seitenerosion

Im Rahmen der Wirkungsanalyse wird postuliert, dass bei einem 300-jährlichen Ereignis das Gewässer die gesamte Talebene beansprucht, weil das Terrain hinter dem Blocksatz aus leicht erodierbaren alluvialen Schottern aufgebaut ist. Die Erosion kann auf der gesamten Länge des betrachteten Abschnittes auftreten. Die Erosionshöhe entspricht der Böschungshöhe und misst zwischen 2.5 m bis 3 m. Die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit wird zu 0.25 gesetzt, d.h. es wird angenommen, dass sich wegen der Verzweigung lokale Prallhangsituationen und Abschnitte ohne Ufererosion abwechseln. Auf dem untersuchten Abschnitt werden keine Folgeprozesse der Erosion erwartet.

Zum Vergleich: Auf einem Abschnitt 5 km oberstrom des Untersuchungsabschnittes wurden während des Hochwassers von 1987 mit einer Abflussspitze um 450 m³/s Seitenerosionsprozesse mit einer Erosionsbreite von 10 - 20 m beobachtet (Ufficio dei corsi d'acqua, 1987). Auf dem betreffenden Abschnitt war das Gerinne aber nicht verzweigt.

FAZIT

Die Belastung durch ein Hochwasser und der Erosionswiderstand einer Uferböschung lassen sich nicht immer oder nur mit grossem Aufwand quantitativ erfassen. Oftmals ist man auf eine gutachterliche Schätzung angewiesen. Die Beurteilung der Gefahr der Seitenerosion erfordert deshalb grosse Erfahrung des Gutachters. Wie jede andere Gefahrenbeurteilung ist auch die Beurteilung der Ufererosion mit Unsicherheiten verbunden. Unsicherheiten können insbesondere im Rahmen der Schwachstellenanalyse bei der Bestimmung von Belastungsgrössen und bei der Bestimmung des Erosionswiderstandes auftreten. Aus den Unsicherheiten resultiert eine Unschärfe im Ergebnis der Beurteilung. Ein Mittel, um diese Unschärfe zu erkennen und möglicherweise zu vermindern, ist die Anwendung verschiedener Methoden bei der Bearbeitung der einzelnen Schritte. In manchen Fällen kann die Unschärfe in der Beurteilung vermindert werden, indem Unsicherheiten in den Grundlagen, insbesondere jene zur Beschaffenheit des Ufers, durch detaillierte Abklärungen beseitigt werden. Dabei gilt es aber, die Balance zwischen dem erforderlichen Mehraufwand und der Verbesserung der Aussagekraft zu wahren.

DANK

Die Erarbeitung der Empfehlung wurde durch das Bundesamt für Umwelt (Schweiz) finanziert. Eine erweiterte Arbeitsgruppe aus Mitgliedern von FAN und KOHS hat die Erarbeitung der Empfehlung fachlich begleitet. Ihnen gilt der besondere Dank der Autorenschaft.

LITERATUR

- Ahmari H. & da Silva A.M.F. (2011). Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 49, No. 6: 718-727.
- Anderson A.G., Parker G. & Wood A. (1975). The flow and stability characteristics of alluvial river channels. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory. Rep. No. 161
- Bachmann A. (2012). Ausmass und Auftreten von Seitenerosionen bei Hochwasserereignissen. Geographisches Institut der Universität Bern, Bern.
- Beck J.R. (2006). Streambank erosion hazard mapping: concepts, methodology and application on the Venoge river (Switzerland). Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne.
- Hilker N., Aller D. & Hegg C. (2007): Schäden. in Bezzola G. R. & Hegg C. (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt- Wissen Nr. 0707. 215 S.

- FAN & KOHS (2015). Empfehlung zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion an Fließgewässern. www.fan-info.ch bzw. www.swv.ch.
- Hunzinger L. & Durrer S. (2008): Seitenerosion. in Bezzola G.R. & Hegg C. (Ed.) 2008. Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825: 429 S.
- Kikkawa H., Ikeda S. & Kitagawa A. (1976). Flow and Bed Topography in Curved Open Channels. Proc. ASCE, J. of Hydr. Div. 102(HY9): 1327-1342.
- Krapesch G., Hauer C. & Habersack H. (2011). Scale orientated analysis of river width changes due to extreme flood hazards. Natural Hazards and Earth System Sciences 11: 2137-2147.
- Pasche E. (2000). Wasserbau. Skript zur Vorlesung, Technische Universität Hamburg.
- Peter W. (1986). Kurvenkolk - Untersuchung über die Sohlensausbildung in Flusskrümmungen. Mitteilung Nr. 85 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- Requena R. (2008). Seitenerosion in kiesführenden Flüssen – Prozessverständnis und quantitative Beschreibung. Mitteilung Nr. 210 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- Romang H. (Ed.) 2008: Wirkung von Schutzmassnahmen. Teil F Flüsse. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 289 S.
- Stevens M.A. & Simons D.B. (1971). Stability Analysis for Coarse Granular Material on Slopes. River Mechanics, Shen H.W. (ed.), Fort Collins, Colorado, 17-1: 17-27.
- Tschopp J. & Bisaz E. (1972). Profundidad de erosión al pie de un vertedero para la aplicación de corrección de arroyos en quebradas empinadas (Erosion depth at weir toe for the application of river corrections at steep canyons). 5. Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Lima, PE.
- Ufficio dei corsi d'acqua (1987). Alluvione Agosto 1987 Leventina + Bedretto, Fotografie. Repubblica e Cantone Ticino, Ufficio dei corsi d'acqua. Unveröffentlicht.
- Zarn B. (1997). Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 154 S.