

Fachleute Naturgefahren Schweiz FAN Kommission für Hochwasserschutz KOHS des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes

Empfehlung zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion an Fließgewässern

Arbeitsgruppe Ufererosion:
Lukas Hunzinger (Flussbau AG SAH)
Annette Bachmann (CSD Ingénieurs SA)
Ralph Brändle (Sektion Naturgefahren Kanton St. Gallen)
Paul Dändliker (Abteilung Gefahrenprävention BAFU)
David Jud (Meier und Partner AG)
Mario Kokschi (Verkehr und Infrastruktur Kanton Luzern)

Version	Datum	Sachbearbeitung	Freigabe	Verteiler
V1.0	27.04.14	Lukas Hunzinger		
V1.1	03.07.14	Annette Bachmann		
V1.2	13.07.14	Lukas Hunzinger		
V1.3	15.08.14	Lukas Hunzinger		
V1.4	04.09.14	Lukas Hunzinger		Projektausschuss
V1.5	31.10.14	Lukas Hunzinger		Erweiterte Arbeitsgruppe
V2.0	02.02.15	Lukas Hunzinger		
V2.1	19.02.15	Lukas Hunzinger		
V2.2	05.03.15	Lukas Hunzinger Annette Bachmann		Vernehmlassung FAN und KOHS
V3.0	30.04.15	Lukas Hunzinger		Vorabdruck KOHS-Tagung Interlaken vom 05.05.15
V3.1	04.08.15	Lukas Hunzinger Annette Bachmann David Jud		Schlussversion
V3.2	05.10.15	Lukas Hunzinger		zur Veröffentlichung

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	3
2	LITERATURÜBERSICHT	5
2.1	Seitenerosionsprozesse	5
2.2	Morphologische Prozesse	6
2.3	Widerstand der Böschung	7
3	METHODEN DER GEFAHRENBEURTEILUNG UND IHRE ANWENDUNG IN DER SCHWEIZ	9
3.1	Empfehlungen 1997 – Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten	9
3.2	Vorgaben in den Pflichtenheften der Kantone	10
3.3	Methoden der Gefahrenbeurteilung	10
4	DIE EMPFEHLUNG ZUM VORGEHEN	13
4.1	Einleitung	13
4.2	Begriffe	13
4.3	Abgrenzung des Systems	15
4.4	Generelles Vorgehen	16
4.5	Grundszenarien	18
4.6	Schwachstellenanalyse	18
4.6.1	Bekannte Erosionsstellen	18
4.6.2	Morphologie	18
4.6.3	Gefährdungsbilder	21
4.6.4	Belastungsgrössen	24
4.6.5	Uferbeschaffenheit und Erosionswiderstand	25
4.6.6	Fazit der Schwachstellenanalyse	26
4.7	Wirkungsanalyse	28
4.7.1	Ausdehnung und Intensität	28
4.7.2	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit	30
4.8	Dokumentation	31
5	HINWEISE ZUR ANWENDUNG	33
5.1	Checkliste für Feldaufnahmen	33

5.2	Umgang mit Unsicherheiten in der Beurteilung	33
6	QUELLEN	35
6.1	Prozess	35
6.2	Gefahrenbeurteilung	37
6.3	Sonstige Literatur	38
7	SYMBOLE	39
ANHANG A	CHECKLISTEN	
ANHANG B	ANWENDUNGSBEISPIELE WEISSE LÜTSCHINE UND TICINO	

1 EINLEITUNG

Die Ufererosion ist flächenmässig ein Gefahrenprozess von untergeordneter Bedeutung. Ihr Gefahrenpotential wurde bislang allerdings unterschätzt. Dies hat insbesondere das Hochwasserereignis im Jahr 2005 in der Schweiz aufgezeigt, bei welchem durch den Abtrag von Uferböschungen viele Gebäude und Infrastrukturanlagen beschädigt oder zerstört wurden. Eine wichtige Grundlage für den Schutz von Siedlungen und Verkehrswegen vor Ufererosion 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) die vorliegende Empfehlung erarbeiten lassen. Sie soll als Leitfaden für die Erarbeitung von Gefahrengrundlagen dienen und dazu beitragen, dass die Gefahrenbeurteilungen des Prozesses Ufererosion vereinheitlicht werden und sie so besser nachvollzogen und verglichen werden können. Sie ist für Wasserbau- und Naturgefahrenfachleute aus Praxis und Verwaltung bestimmt und baut auf der Empfehlung des Bundes (Loat und Petrascheck 1997) auf. Sie schlägt Vorgehensweisen vor, nach denen die Gefahr von Ufererosion beurteilt werden soll. Die Wahl eines geeigneten quantitativen Ansatzes zur Bestimmung des Ausmasses von Ufererosion ist hingegen dem Anwender überlassen.

Die Kenntnis von möglichen Erosionsprozessen kann auch bei der Festlegung des Gewässerraumes von Bedeutung sein. Das hier vorgestellte Vorgehen kann auch verwendet werden, um Grundlagen für die Festlegung des Gewässerraumes zu erarbeiten.

Die Empfehlung wurde in einer Arbeitsgruppe mit Vertretern von Bund, Kantonen und der Privatwirtschaft erarbeitet und in der FAN und KOHS in die Vernehmlassung gegeben.

Die Arbeitsgruppe dankt allen, die mit ihren Diskussionsbeiträgen an der Empfehlung mitgewirkt haben und dankt dem Bundesamt für Umwelt für die Finanzierung des Projektes.

2 LITERATURÜBERSICHT

2.1 Seitenerosionsprozesse

Zum Gefahrenprozess Ufererosion und wie dieser im Rahmen der Gefahrenbeurteilung berücksichtigt werden soll, gibt es nur wenig Literatur. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt der Fokus auf den Prozess und seine Auswirkungen gelegt.

In Anderson et al. (1975) wird die **primäre Seitenerosion** als eine natürliche Verbreiterung eines ursprünglich schmalen Profils bezeichnet. Das so aufgeweitete Gerinne weist allerdings noch einen gestreckten Verlauf mit ebener Sohle auf. Das Gerinne wird auf der gesamten Länge verbreitert und erreicht einen vorläufig stabilen Zustand.

Durch die Erosion des Böschungsfusses wird das darüber liegende Terrain destabilisiert und es kann eine **Uferrutschung** ausgelöst werden (siehe Abbildung 2, links). Dieses Phänomen hängt häufig mit einer Tiefenerosion des Flussbettes zusammen. Diese Art der Seitenerosion kann weit ausgreifen und je nach topographischen und geologischen Bedingungen oberflächlich bis tiefgründig sein (Loat und Petrascheck 1997). Die Unterschneidung der Böschung, welche zu gravitationsinduzierten Massenbewegungen führt, wird häufig auch als **Böschungsbruch** bezeichnet (Beck 2006, Requena 2008).

Über die Ursachen und auslösenden Momente, welche zur Seitenerosion führen, ist im Vergleich zu anderen Gefahrenprozessen relativ wenig bekannt (Hunzinger und Durrer 2008). Häufig sind verschiedene Parameter oder eine Kombination für die Erosionsprozesse verantwortlich (Krapesch et al. 2011).

Die direkte Strömungserosion wird durch die **Schleppspannung $[N/m^2]$** bestimmt und durch die Strömung verursacht. Diese Kräfte wirken vorwiegend am Böschungsfuss, was zur Destabilisierung des darüber liegenden Böschungsbereiches führt (Requena 2008). Damit es zu einer Erosion kommt, muss die angreifende Schleppspannung grösser als die Grenzscheppspannung der Böschung sein (Beck 2006, Requena 2008). Magilligan (1992) definiert in seiner Arbeit einen minimalen Grenzwert für die Schleppspannung. Ein Wert von $100 N/m^2$ müsse überschritten werden, damit es an einem Gewässer überhaupt zu morphologischen Veränderungen im Gerinne kommen kann. Julian und Torres (2006) meinen, dass bei mässig kohäsiven Ufern die überschüssige Schleppspannung (die Schleppspannung über dem Grenzwert für den Erosionsbeginn) während der Abflussspitze eines Ereignisses entscheidend für die Seitenerosion ist. Bei wenig kohäsiven Ufern sei die Variabilität der überschüssigen Schleppspannung, also die Abfolge von Perioden mit höherer und geringerer Schleppspannung, der zuverlässigste Parameter, um Seitenerosion vorherzusagen.

In verschiedenen Studien wird anstelle der Schleppspannung der hydraulische Parameter der **Strömungsleistung $[W/m]$** verwendet (Krapesch et al. 2011, Hunzinger und Durrer 2008, Magilligan 1992, Hickin und Nanson 1984). Die Strömungsleistung ist durch ähnliche hydraulische Parameter bestimmt wie die Schleppspannung.

Eine weitere entscheidende Grösse für die Seitenerosion ist die **Dauer der Strömungsbelastung** (Hunzinger und Durrer 2008, Julian und Torres 2006). Es kann davon ausgegangen werden, dass eine längere Ereignisdauer den Seitenerosionsprozess begünstigt.

Um den Prozess der Seitenerosion beschreiben zu können, werden in den verschiedenen Studien noch weitere hydraulische Parameter untersucht. Am häufigsten werden unterschiedliche Kennwerte des

Abflusses (Abflussspitze, Ganglinie, Volumen, spezifischer Abfluss, etc.) als beschreibende Variable vorgeschlagen (Hasegawa 2013, Henshaw et al. 2012, Hooke 1979).

2.2 Morphologische Prozesse

In Anderson et al. (1975) werden Prozesse als **sekundäre Erosion** bezeichnet, welche das Gerinne verlagern, im Grundriss verformen und die Bildung von mäandrierenden und verzweigten Strukturen initiieren. Der Übergang von einer (nach primärer Erosion) ebenen zu einer strukturierten Sohle verursacht Querströmungen, welche die Böschung angreifen (sekundäre Erosion). Welche Gerinneformen sich dabei einstellen, ist abhängig vom Ausgangsgefälle und der Querschnittsform nach der primären Seitenerosion. Die Bildung von morphologischen Strukturen hängt im Wesentlichen vom **Geschiebe-eintrag** ab und wird somit von Prozessen im Einzugsgebiet (Sedimentvorkommen, Abfluss, etc.) beeinflusst (Beck 2006, Requena 2008).

Flussmorphologische Ansätze definieren die Gerinneform eines Gewässers. Dabei werden nach Leopold und Wolman (1957) folgende gängige Gerinneformen unterschieden: **gerade**, **mäandrierend** und **verzweigt**. In der Arbeit von Ahmari und da Silva (2011) wurden Kriterien festgelegt, um den Übergang der verschiedenen Gerinneformen abgrenzen zu können (siehe Abbildung 1). Als Abgrenzungskriterien werden das Verhältnis von der Flussbettbreite B zur Abflusstiefe h und von der Abflusstiefe zum mittleren Korndurchmesser d_m verwendet. Die Gerinneformen werden stark von der Abflussmenge beeinflusst, weshalb das Erscheinungsbild eines Flusses bei Hochwasser anders sein kann als bei Niedrigwasser. Bei einem erhöhten Abfluss während eines Hochwassers kann das Verhältnis b/h beispielsweise soweit abnehmen, dass ein bislang verzweigtes Gewässer die Bedingungen für alternierende Bänke aufweist (Requena 2008).

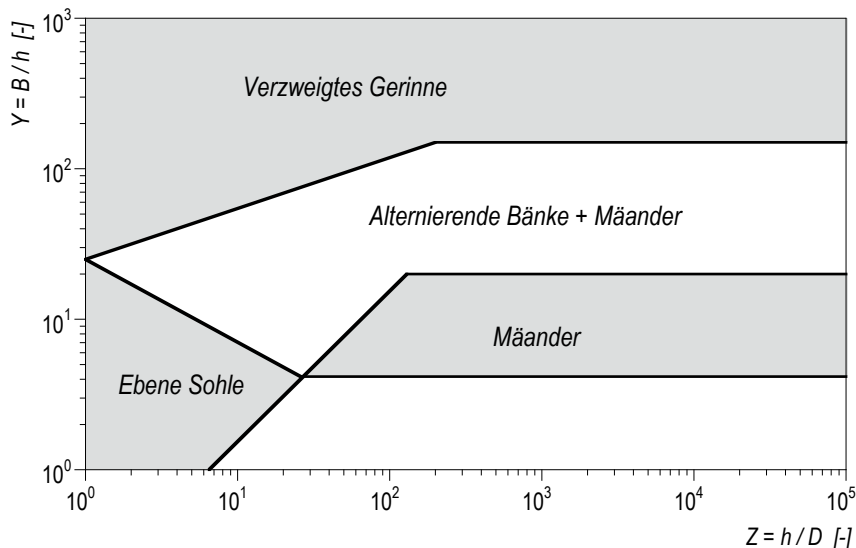


Abbildung 1: Abgrenzung der Gerinneform in Abhängigkeit von Gerinnebreite, Abflusstiefe und Korndurchmesser vereinfachte Darstellung nach Ahmari und da Silva (2011).

Ansätze gemäss der **Regime-Theorie** versuchen die **Gleichgewichtsbreite** zu bestimmen, bei welcher ein Gerinne bei gegebenem Abfluss stabil bleibt (Hafner et al. 2004, Schmutz 2003). Bei diesem Prozess ist allerdings anzumerken, dass er eine andere zeitliche Dimension hat als der direkte Strömungsangriff. Eine solche Gleichgewichtsbreite stellt sich nicht nach einem sehr grossen Hochwasserereignis ein, sondern bei wiederkehrenden Ereignissen mit Wiederkehrdauern von 2-5 Jahren (näherungsweise bettbildender Abfluss in Gerinnen mit unbefestigten Ufern) (Bezzola 2014).

Verschiedene Studien untersuchen die Seitenerosion im Rahmen dieser morphologischen Prozesse. Diese Arbeiten befassen sich mit der Vorhersage der Migration von Mäanderbogen (Dongdong et al. 2010, Hasegawa 2013, Hickin und Nanson 1984), der maximalen Gewässerbreite (Eaton 2006, Hafner et al. 2004, Hafner 2008, Jäggi et al. 2011, Jud 2009, Schmutz 2003) und mit der Bestimmung der sich einstellenden morphologischen Form (Ahmari und da Silva 2011, Nagata et al. 2000, Requena 2008).

2.3 Widerstand der Böschung

Ab welcher Strömungskraft das Ufer erodiert wird, hängt von der Art des Ufermaterials ab (Korngrösse, Kohäsion, etc.). **Kohäsive Ufer** weisen wegen der elektrochemischen Bindungskräfte zwischen den Bodenpartikeln einen hohen Widerstand auf. Diese Böschungstypen bedingen deshalb eine grosse Belastung, um erodiert zu werden (Beck 2006, Requena 2008, Schmutz 2003). Bei kohäsionslosen Ufern bedeuten zunehmende **Korngrössen** einen höheren Widerstand. Die grossen Komponenten werden häufig nicht wegtransportiert, weshalb der Böschungsfuss mit der Zeit von einer **Pflästerungsschicht** geschützt wird (Requena 2008).

Die Widerstandskräfte der Böschung hängen zudem von deren **Feuchtegehalt** ab (Amiri-Tokaldany 2003, Beck 2006, Julian und Torres 2006). Entscheidend sind hierbei die meteorologische Vorgeschichte und der daraus resultierende Wassergehalt im Boden. In gesättigten Böden kann das rasche Absinken des Wasserstandes eine Böschung destabilisieren.

Die Auswirkung der **Vegetation** auf die Widerstandskraft einer Böschung wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Einerseits wird davon ausgegangen, dass Gehölze mit tiefem Wurzelwerk den Boden stabilisieren und somit die Seitenerosion eindämmen (Beck 2006, Requena 2008, Schmutz 2003). Feine wie auch grobe Wurzeln halten dabei das Lockermaterial zusammen und vermindern die Strömung im Böschungsbereich. Zudem hemmt das Wurzelwerk die Wirbelbildung (Beck 2006). Andererseits können Pflanzen mit einem flachen Wurzelwerk unterspült werden und ins Gerinne stürzen (Beck 2006, Oplatka 1998). Dieses Phänomen kann die Seitenerosion zusätzlich verschärfen. Gemäss Oplatka (1998) ist der Stabilisierungseffekt durch den Bewuchs abhängig von der Korngrösse des Ufermaterials.

Ob ein Gerinne mit einer **Uferverbauung** befestigt ist, spielt eine entscheidende Rolle für das Auftreten von Seitenerosion (Hunzinger und Durrer 2008, Loat und Petrascheck 1997). Wie alle baulichen Schutzmassnahmen müssen auch Uferverbauungen periodisch auf ihre Tauglichkeit überprüft werden (Romang 2008). Sind die wasserbaulichen Massnahmen nicht intakt und ungenügend unterhalten, ist ihre Funktionstüchtigkeit nicht mehr garantiert. Es entstehen Schwachstellen, an welchen die Uferverbauungen bei Hochwasserereignissen beschädigt oder zerstört werden können (Loat und Petrascheck 1997).

3 METHODEN DER GEFAHRENBEURTEILUNG UND IHRE ANWENDUNG IN DER SCHWEIZ

3.1 Empfehlungen 1997 – Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten

In der Empfehlung des Bundes von 1997 (Loat und Petrascheck 1997) werden zwei Arten von Erosionsprozessen bezeichnet: die Uferrutschung, welche durch eine Erosion am Böschungsfuss ausgelöst wird und die Verlagerung des Flussbettes (siehe Abbildung 2). Die Uferrutschung wirkt vor allem in Wildbächen und Gebirgsflüssen. In flacherem Gelände sind insbesondere exponierte Stellen wie Prallhänge, Engstellen oder Hindernisse im Abflussbereich für die Ufererosion verantwortlich. Als die für die Ufererosion massgeblichen Kräfte werden einerseits das strömende Wasser und andererseits der Widerstand der Uferböschung bezeichnet.

Als Mass für die Intensität des Prozesses wird die Mächtigkeit der Abtragung (gemessen senkrecht zur Böschungsoberfläche (d), siehe Abbildung 2) bezeichnet. Die Intensität wird in drei Stufen mit den Grenzen gemäss Tabelle 1 ausgeschieden. Bei Stellen, die durch Gerinneverlagerung gefährdet sind, ist im Weiteren die Intensität der Überflutung an der erodierten Stellen abzuschätzen.

Tabelle 1: Intensitätsstufen der Ufererosion gemäss Bundesempfehlung (Petrascheck und Loat 1997)

Intensität	Mächtigkeit der Abtragung (d)
Schwach	$d < 0.5 \text{ m}$
Mittel	$0.5 \text{ m} < d < 2 \text{ m}$
Stark	$d > 2 \text{ m}$

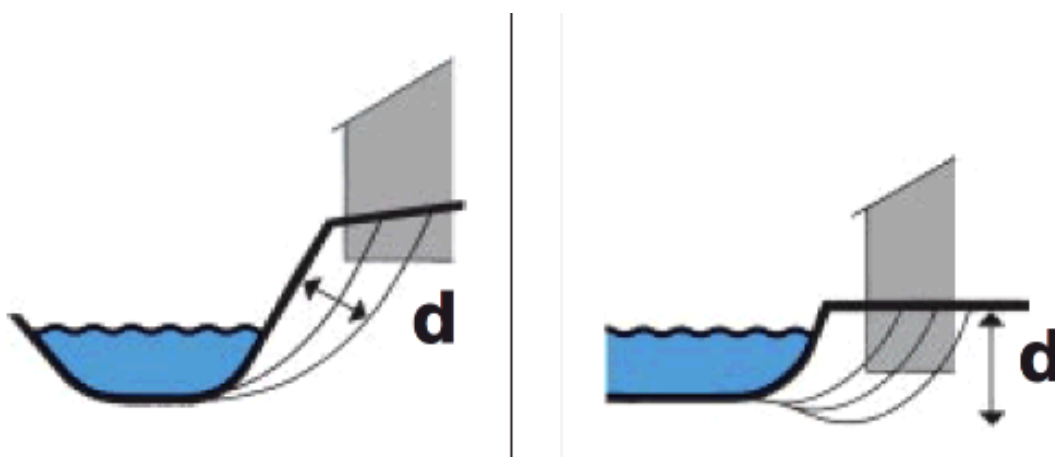


Abbildung 2: Unterscheidung zwischen Uferrutschung (links) und Verlagerung des Flussbettes (rechts).
Quelle: Loat und Petrascheck 1997, S. 8

3.2 Vorgaben in den Pflichtenheften der Kantone

In der Tabelle 2 ist eine Auswahl von kantonalen Pflichtenheften aufgelistet. Es ist hier anzufügen, dass der Prozess Ufererosion nicht in jedem Kanton Bestandteil der Gefahrenbeurteilung ist.

Tabelle 2: Auswahl von kantonalen Pflichtenheften, welche den Prozess Ufererosion geregelt haben. Stand Ende 2013.

Kanton	Angaben im Pflichtenheft:
AG	Gutachterliche Ausscheidung der Ufererosion ohne Quantifizierung mittels Feldbegehungen. Berücksichtigung vergangener/aktueller Erosionsstellen, exponierter Ufer, Verbauungen, etc.
BE	Ufererosion wird im Pflichtenheft erwähnt, aber es wird kein bestimmtes Vorgehen definiert.
BL	Ufererosion wird als Hinweisprozess berücksichtigt und gutachterlich im Feld beurteilt. Berücksichtigung aktueller Erosionsstellen, exponierter Ufer, Verbauungen, etc.
GR	Detaillierte Definition getrennt für Wildbäche, Gebirgsbäche und Talflüsse mit verschiedenen Verbauungstypen.
SH	Beurteilung der Ufererosion mittels Feldbegehung. Kontrolle des Zustands der Uferverbauung und Berücksichtigung der Morphologie. Intensität ist immer stark und das Gefahrengebiet somit rot.
SO	Beurteilung der Ufererosion mittels Feldbegehung. Kontrolle des Zustands der Uferverbauung und Berücksichtigung der Morphologie. Intensität ist immer stark und das Gefahrengebiet somit rot.
SG	Die Wegleitung Naturgefahrenanalyse 2003 stützt sich auf die Empfehlung von Loat und Petrascheck (1997), überlässt die Wahl der Methodik aber dem Auftragnehmer.
ZH	Ufererosion wird in sämtlichen Gefahrenkarten nur als Hinweis behandelt.

3.3 Methoden der Gefahrenbeurteilung

Von der Arbeitsgruppe wurden verschiedene Büros angesprochen, welche das Thema Ufererosion im Rahmen der Gefahrenkartierung behandelt haben. Die Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über sämtliche in der Arbeitsgruppe bearbeiteten Methoden zur Beurteilung der Ufererosion. Detaillierte Beschreibungen der Methoden sowie eine Evaluation durch die Arbeitsgruppe sind in FAN-KOHS Arbeitsgruppe Ufererosion (2014) enthalten.

Tabelle 3: Übersicht der untersuchten Methoden

Name der Methode	Jahr der ersten Anwendung	Kurzbeschreibung der Methode
Methode Niederer + Pozzi Umwelt AG Kantone Aargau und Schaffhausen	2007	Gutachterliche Beurteilung für jede Jährlichkeit Bekannte Erosionsstellen Anzeichen latenter Ufererosion sichtbar Strömungsexponierte Ufer an Prallhängen ohne Erosionsschutz werden berücksichtigt Erosion mit Liniensignatur dargestellt.
Methode Ingenieure Bart AG Kanton St. Gallen, Teilgebiete 2-9	2011	Max. Ufererosionsbreiten abhängig von Einzugsgebietsgrößen Intensitäten mittels GIS und 2D-Modellierung hergeleitet in Funktion der Schleppspannung Ufersicherung wird pauschal berücksichtigt
Methode Gefahrenkommission Kanton Graubünden	2002	Gutachterliche Beurteilung Abhängig vom Gewässertyp Berücksichtigung des Verbauungstyps Expertenmeinung
Methode Kanton Solothurn	2002	Begehung aller Gerinne im Feld Beurteilung der Uferbeschaffenheit und der Verbauung Berücksichtigung der Uferexposition immer starke Intensität (erhebliche Gefährdung)
Methode Flussbau AG SAH Fildrich im Kanton Bern, Birse im Kanton Jura	2009	Gefahrenstellen werden aufgrund einer Feldbegehung ausgeschieden Kriterien: Flussmorphologie, Abflusskapazität, Zustand der Ufersicherung Erkenntnisse aus Ereignisanalyse 2005 werden angewendet
Methode Hunziker, Zarn & Partner AG Kleine Emme im Kanton Luzern	2010	Gefahrenbeurteilung baut auf Erfahrungswerten aus dem HW05 auf Berücksichtigung des Verbauungszustands Unterschiedliche Erosionsbreite je nach geraden Abschnitten oder Prallhängen
Methode ATB SA Basse Allaine im Kanton Jura	2011	Gefahrenbeurteilung nur bei bedrohten Schutzgütern Ausscheiden Erosionsstreifen je nach Gewässermorphologie Berücksichtigung Uferbeschaffenheit, Exposition und Erosionspotential Beurteilung anhand von Modellresultaten (1D/2D)
Methode Stucky SA Basse-Areuse im Kanton Neuenburg	2009	Berechnung der Transportkapazität, um maximale Gerinnebreite festzulegen Variieren des Gefälles und der Korngrösse je nach Szenario Feldbegehung, um Uferbeschaffenheit, Verbauung, etc. aufzunehmen.
Methode Stucky SA Baye de Clarens im Kanton Waadt	2007	Gegenüberstellung der Schleppspannung mit der kritischen Schleppspannung des Ufers, um Erosionsbreite zu bestimmen Beurteilung des Böschungsmaterials für Böschungsneigung Berücksichtigung der Uferverbauung und deren Zustand
Methode Marty Ingenieure AG Malbunerbach, FL	2007	Bestimmung von Baulinien (Endzustand nach sehr seltenen Ereignissen) Anwendung von Geschiebetransportberechnungen Bestimmung der Tiefenerosion Verwendung von Baugrunduntersuchungen

4 DIE EMPFEHLUNG ZUM VORGEHEN

4.1 Einleitung

Die in diesem Kapitel vorgestellte Methode vereint bewährte Elemente aus den bisher angewandten Vorgehensweisen mit neu erarbeiteten Ansätzen.

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Begriffe definiert, wird ein generelles Vorgehen aufgezeigt und werden die einzelnen Arbeitsschritte der Gefahrenbeurteilung beschrieben. Je nachdem, ob die Gefahr von Ufererosion auf Stufe eines Gefahrenhinweises, einer Gefahrenkarte oder eines Einzelgutachtens beurteilt wird, werden für die einzelnen Arbeitsschritte Methoden mit unterschiedlicher Bearbeitungstiefe vorgeschlagen.

Für die Bearbeitung von Gefahrenkarten wird neben einem standardmässigen Vorgehen auch ein erweitertes Vorgehen vorgeschlagen. Dieses soll bei komplexen Verhältnissen angewandt werden, wenn das standardmässige Vorgehen nicht ausreicht, um die Anforderungen an das Produkt Gefahrenkarte zu erfüllen. Für das erweiterte Vorgehen ist eine bessere Datengrundlage (z.B. Geometrie des Gerinnes und von Uferschutzbauten) notwendig als für eine standardmässige Beurteilung. Es ist Sache des Auftraggebers einer Gefahrenkarte zu definieren, welches Vorgehen dem Einzelfall angemessen ist.

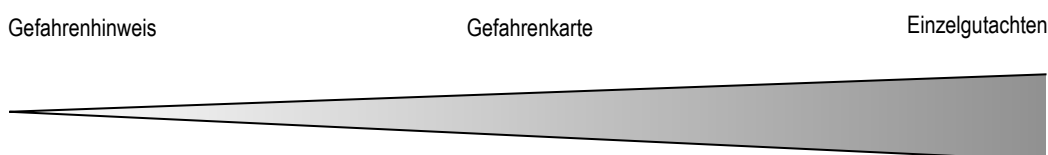


Abbildung 3: Bearbeitungstiefe in Abhängigkeit der Art des Gefahrengutachtens.

4.2 Begriffe

Seitenerosion

Die Seitenerosion ist ein Gerinneprozess, welcher durch die Erosion/den Abtrag von Böschungsmaterial zu einer Verbreiterung oder Verlagerung des Gerinnes führt. Die Seitenerosion kann verschiedene Ursachen haben (vgl. Kap. 4.6.3).

Ufererosion

Die Ufererosion ist als Gefahrenprozess zu verstehen, welcher ausserhalb des Gerinnes beobachtet wird. Der Prozess stellt eine potenzielle Gefahr für Menschen/Tiere, Gebäude oder Infrastrukturanlagen dar. Physikalisch gesehen ist die Ufererosion identisch mit der Seitenerosion.

Böschung

Geneigte Begrenzung des Gerinnes.

Ufer

Seitliche Begrenzung des Gerinnes. Es kann durch Gerinneprozesse potenziell verändert werden.

Andere Definitionen des Ufers berücksichtigen die aktuelle Nutzung oder die ökologische Qualität und Funktion der Flächen, welche das Gerinne begrenzen. Diese Definitionen werden hier nicht weiter verwendet.

Erosionsausmass

Das Ausmass der Erosion wird durch die Erosionsbreite, Erosionshöhe und Erosionslänge beschrieben (Abbildung 4). Die Erosionslänge L_{UE} wird entlang der ursprünglichen Uferlinie gemessen. Als Erosionsbreite B_{UE} wird die maximale Ausdehnung der Erosionsnische senkrecht zur Flussachse betrachtet. Die Erosionshöhe h_{UE} bezeichnet den Höhenunterschied zwischen der ursprünglichen Gewässersohle und der Anrisskante (siehe auch Kapitel 4.6.3).

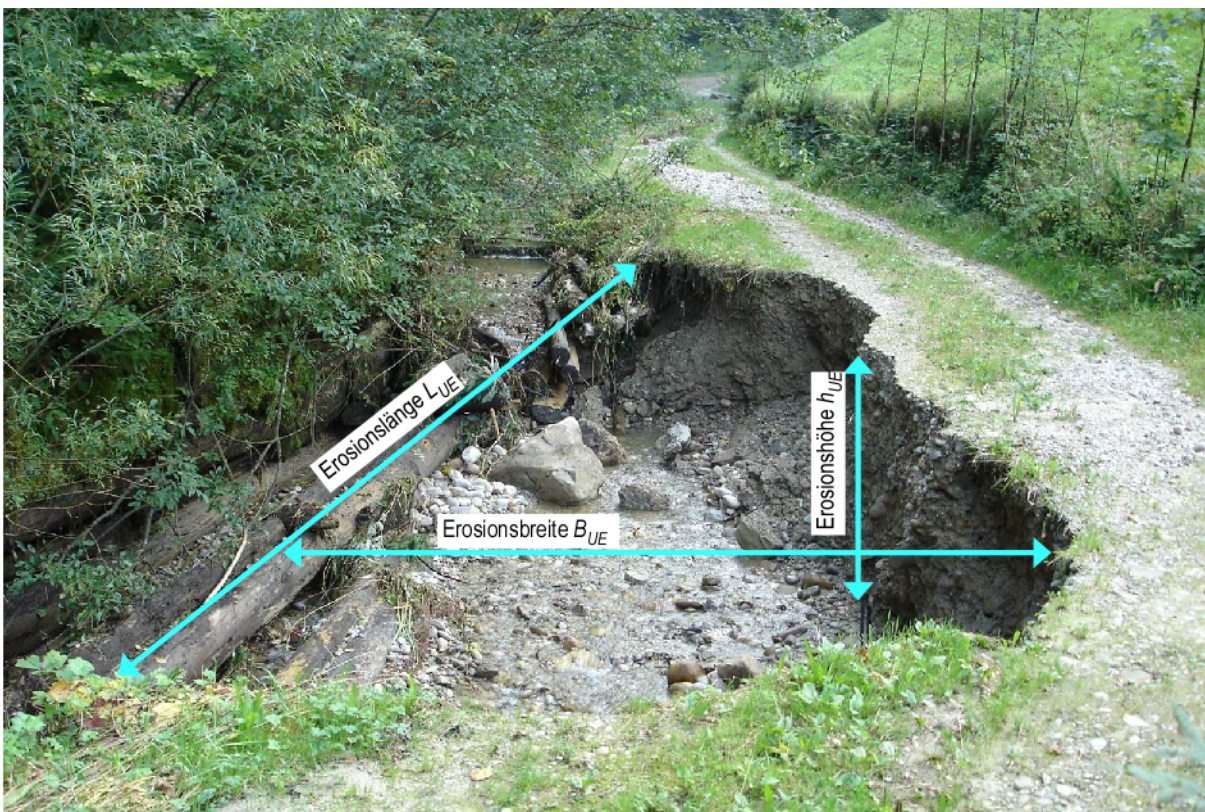


Abbildung 4: Bezeichnungen für das Ausmass der Erosion. Foto: KAWA 2005

4.3 Abgrenzung des Systems

Betrachtete Gewässer

Mit der vorliegenden Empfehlung wird ein Vorgehen beschrieben, um die Gefahr von Ufererosionsprozessen in Flüssen und Bächen unabhängig ihrer Grösse oder ihrem Gefälle zu beurteilen. Die in Kap. 4.6.4 vorgeschlagenen Ansätze zur Quantifizierung von Belastungsgrößen sind in der Regel für Gewässer mit moderatem Gefälle und fluvialen Geschiebetransport erarbeitet worden und können nicht immer auf steile, murfähige Wildbäche übertragen werden. Nichtsdestotrotz kann die Gefahr von Ufererosion in steilen Gewässern mit Hilfe der vorliegenden Empfehlung analog beurteilt werden. Je nach Prozessart (Geschiebe führendes Hochwasser oder Murgang) sind andere Gefährdungsbilder relevant (siehe dazu auch Kapitel 4.6.3).

Abgrenzung zur Rinnenbildung

In Überflutungsgebieten können bei hoher hydraulischer Belastung Rinnen erodieren. Diese Art der Rinnenbildung abseits von Gerinnen ist nicht Gegenstand der vorliegenden Methodenempfehlung. Ungeachtet dessen, müssen diese Prozesse bei Gefahrenbeurteilungen berücksichtigt werden.

Abgrenzung zum Dambruch

Der Bruch eines Hochwasserschutzdammes kann verschiedene Ursachen haben: Überströmen, innere Erosion, Böschungsinstabilität, hydraulischer Grundbruch, etc. Auch die Erosion des Dammfusses durch Seitenerosion kann zu einem Dambruch führen. Die Schwachstellen an einem Dammfuss können grundsätzlich nach dem hier vorgestellten Vorgehen beurteilt werden. Der Dambruch als Folge eines solchen Erosionsprozesses wird in dieser Methodenempfehlung aber nicht behandelt.

Abgrenzung zur Hangrutschung

Die Erosion am Böschungsfuss kann dazu führen, dass der darüber liegende Hang nachrutscht. Der Rutschprozess und die Seitenerosion sind für die Gefahrenbeurteilung zu unterscheiden und müssen getrennt evaluiert werden:

- Die Seitenerosion ist ein Gerinneprozess, welcher durch den direkten Abtrag des Böschungsfusses oder der Böschung durch das Wasser verursacht wird.
- Die Hangrutschung ist eine Massenbewegung, welche durch das geotechnische Versagen eines Hanges verursacht wird.

Allerdings beeinflussen sich die beiden Prozesse gegenseitig. Einerseits wird bei der Erosion am Böschungsfuss die Böschung übersteil, so dass der darüber liegende Hang instabil wird. Andererseits wird durch eine Hangrutschung relativ viel Material im Gerinne abgelagert, welches den Böschungsfuss temporär vor Erosion schützt (Abbildung 5).

Häufig unterscheiden sich die Prozesse auch in der zeitlichen Abfolge. Die Seitenerosion ist an den Strömungsangriff des Wassers gekoppelt und tritt während eines Hochwasserereignisses auf. Die

Hangrutschung kann auch nach dem Hochwasserereignis auftreten, wenn sich durch das Nachrutschen der Böschung wieder eine natürliche Böschungsneigung einstellt.

Die vorliegende Methodenempfehlung bezieht sich lediglich auf die Seitenerosion, welche während eines Hochwassers durch den erhöhten Abfluss verursacht wird. Um die Hangrutschung zu beurteilen, sei auf die einschlägigen Methoden verwiesen. Werden beide Prozesse durch unterschiedliche Fachleute untersucht, muss sichergestellt sein, dass sich die Fachleute über ihre jeweiligen Beurteilungen austauschen.



Abbildung 5: Abgrenzung von Seitenerosion und Hangrutschung. Beispiel Schwarze Lütschine in Grindelwald. Foto Nils Hählen.

4.4 Generelles Vorgehen

Das generelle Vorgehen zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion lehnt sich an die Praxis der Gefahrenbeurteilung in der Schweiz an und ist in die drei Phasen Grundszenarien, Schwachstellenanalyse und Wirkungsanalyse unterteilt (Abbildung 6). Im Rahmen der Schwachstellenanalyse werden aufgrund der Morphologie des Gewässers die massgebenden Gefährdungsbilder definiert und für diese die Belastungsgrössen und der Widerstand des Ufers beurteilt. Wichtige Hinweise zu möglichen Erosionsprozessen liefert die Analyse bekannter Erosionsstellen. Die Raumskala der untersuchten Prozesse wird mit jedem Schritt der Schwachstellenanalyse kleiner. Während morphologische Veränderungen und Gefährdungsbilder über grössere Gewässerabschnitte untersucht werden, werden die Belastung und der Widerstand räumlich sehr begrenzt betrachtet.

Wird bei der Schwachstellenanalyse für einen Gewässerabschnitt die Möglichkeit der Seitenerosion erkannt, werden im Rahmen der Wirkungsanalyse das Ausmass möglicher Erosionen und ihre räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmt. Schliesslich muss abgeklärt werden, ob die Seitenerosion Folgeprozesse auslösen kann.

Das generelle Vorgehen ist unabhängig von der Bearbeitungstiefe der Gefahrenbeurteilung. Die Schwachstellen- und die Wirkungsanalyse werden für jedes Grundscenario einzeln durchlaufen.

Mit dem hier vorgestellten Vorgehen wird grundsätzlich die Gefahr beurteilt, welche von einem Einzelereignis ausgeht. Wenn ein Ufer bei einem Hochwasserereignis erodiert wurde, muss die Situation grundsätzlich neu beurteilt werden. Bei einem nachfolgenden Ereignis gleicher Grössenordnung können Belastung und Widerstand erheblich vom Ausgangszustand abweichen.

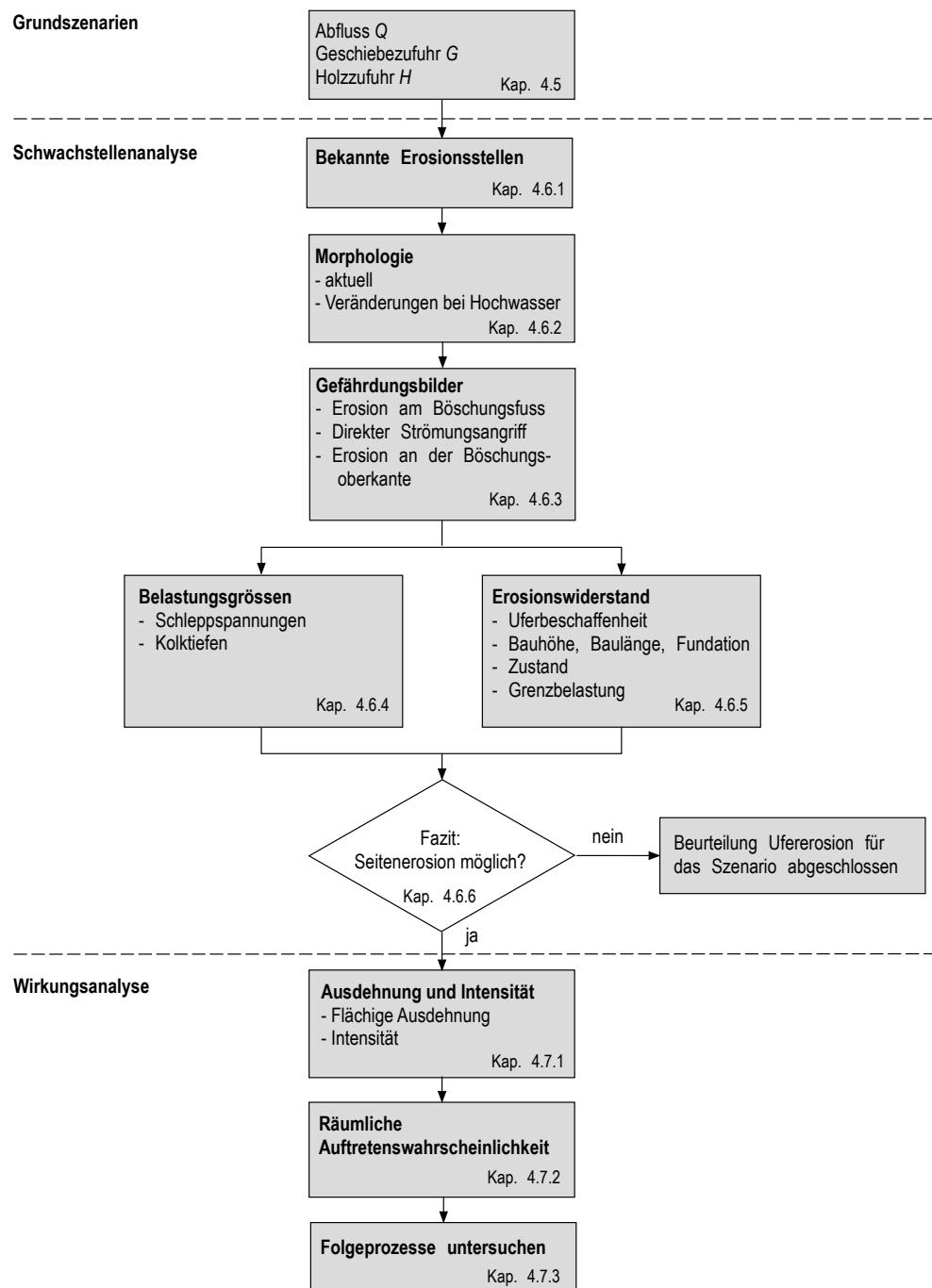


Abbildung 6: Generelles Vorgehen zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion.

4.5 Grundszenarien

Die Definition der Grundszenarien für die Beurteilung der Gefahr von Ufererosion unterscheidet sich nicht von der Definition der Grundszenarien für die Beurteilung anderer Wassergefahren. Es werden Abfluss, Geschiebezufuhr und Holzzufuhr für Hochwasserszenarien unterschiedlicher Jährlichkeit bestimmt. Ein besonderes Augenmerk muss auf die Dauer von Hochwasserabflüssen sowie auf die Geschiebezufuhr gelegt werden, weil Erosions- und Ablagerungsprozesse auf der Flusssohle die Gerinneprozesse wesentlich beeinflussen. Die Holzzufuhr ist dann entscheidend, wenn Verklausungen an Hindernissen (z.B. an Brückenpfeilern) zu einer Ablenkung der Strömung an das Ufer führen können.

4.6 Schwachstellenanalyse

4.6.1 Bekannte Erosionsstellen

Ein wichtiges Hilfsmittel bei der Beurteilung der Gefahr von Ufererosion sind Abklärungen zu bekannten Erosionsstellen am zu beurteilenden Gewässer. Sie liefern Hinweise dazu, wo Ufererosion möglich ist und welches Ausmass diese annehmen kann, geben aber kein abschliessendes Bild potenzieller Erosionsstellen. Mögliche Informationsquellen sind der Ereigniskataster, Karten der Phänomene, Luftbilder und Geländemodelle, alte Verbauungsprojekte, eine Begehung vor Ort oder lokale Wissensträger (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Vorgehen zur Analyse bekannter Erosionsstellen.

	Gefahrenhinweis	Gefahrenkarte	Einzelgutachten
Konsultation Ereigniskataster	ja, digital erfasste Prozessräume	ja	ja
Konsultation der Karte der Phänomene, von Luftbildern oder Terrainmodellen	–	ja	ja
Alte Verbauungsprojekte	–	ja	ja
Begehung vor Ort	–	ja	ja
Befragung von lokalen Wissensträgern	–	ja	ja

4.6.2 Morphologie

Die Morphologie des Gewässers und die im Gerinne ablaufenden Prozesse (Abfluss, Auflandung, Sohlenerosion, Seitenerosion) stehen in einer Wechselwirkung zueinander. Bei der Beurteilung der Gefahr von Ufererosion müssen deshalb sowohl die aktuelle Morphologie als auch mögliche Veränderungen während eines Hochwasserereignisses beachtet werden. Insbesondere bei grossen Hochwasserereignissen können übergeordnete morphologische Prozesse auftreten, welche die Morphologie grundlegend verändern und das Gerinne verlagern.

Mit der Beschreibung der aktuellen Morphologie und der Prognose von morphologischen Veränderungen während eines Hochwasserereignisses wird aufgezeigt, welche Gefährdungsbilder an einem Gewässerabschnitt betrachtet werden müssen und welche von vornherein ausgeschlossen werden können. Im Weiteren liefern die morphologischen Betrachtungen Hinweise auf die mögliche Ausdehnung von Erosionsprozessen. Sie werden also bei der Wirkungsanalyse wieder verwendet.

Bei der Beurteilung der Gefahr von Ufererosion interessieren insbesondere die morphologischen Aspekte Gerinneform (verzweigt, mäandrierend, gerade), Linienführung (Gerade, Krümmung) und Veränderungen der Sohlenlage (Erosion bzw. Auflandung). Zudem müssen Unregelmässigkeiten im Gerinne als mögliche Auslöser von Erosionen in die Tiefe und die Breite betrachtet werden.

Aktuelle Gerinneform

Bei verzweigten Gerinnen kann die Seitenerosion beidseitig auftreten und hat ihr grösstes Ausmass nicht zwingend bei den höchsten Abflüssen. Die Erosionsbreite kann ein Vielfaches der ursprünglichen Gerinnebreite betragen. In erster Näherung hat das Gewässer mit erodierten Ufern eine Breite, welche seiner natürlichen Sohlenbreite entspricht. In Mäandergerinnen erodieren die Ufer stets an der Kurvenaussenseite einer Flusskrümmung und die Erosion ist bei hohen Abflüssen grösser als bei kleinen. Auch bei der Mäanderbildung kann die Erosionsbreite ein Vielfaches der ursprünglichen Gerinnebreite betragen.

Veränderung während eines Hochwasserereignisses

Während eines Hochwasserereignisses kann sich das Gerinne verlagern. Es können sich in ein und demselben Gewässer sowohl Mäander als auch ein verzweigtes Gerinne bilden (Abbildung 7). Die Gerinneform hängt einerseits vom Verhältnis der Abflusstiefe zur Flussbettbreite und dem Verhältnis der Abflusstiefe zum mittleren Korndurchmesser ab (vgl. dazu die Ausführungen in Kap. 2.2), andererseits davon, ob während des Hochwasserereignisses ein Geschiebedefizit (Tendenz zur Mäanderbildung) oder ein Geschiebeüberschuss (Tendenz zur Verzweigung) besteht. In diesem Schritt wird beurteilt, welche Gerinneform sich im betrachteten Gewässer in einem Zustand ohne Uferschutzbauten einstellen würde.

Linienführung

In geraden Flussabschnitten ist eine Seitenerosion auf beiden Seiten des Gewässers möglich. Wenn keine übergeordneten morphologischen Veränderungen auftreten, können in der Regel geringere Erosionsbreiten erwartet werden als in Gerinnen mit Verzweigung oder Mäandern. In Flusskrümmungen ist die Erosion am Prallhang auf der Kurvenaussenseite zu erwarten. In seltenen Fällen, wenn sich z.B. die Wellenlänge eines Mäanderbogens verändert, kann auch die Kurveninnenseite zum Prallhang werden.

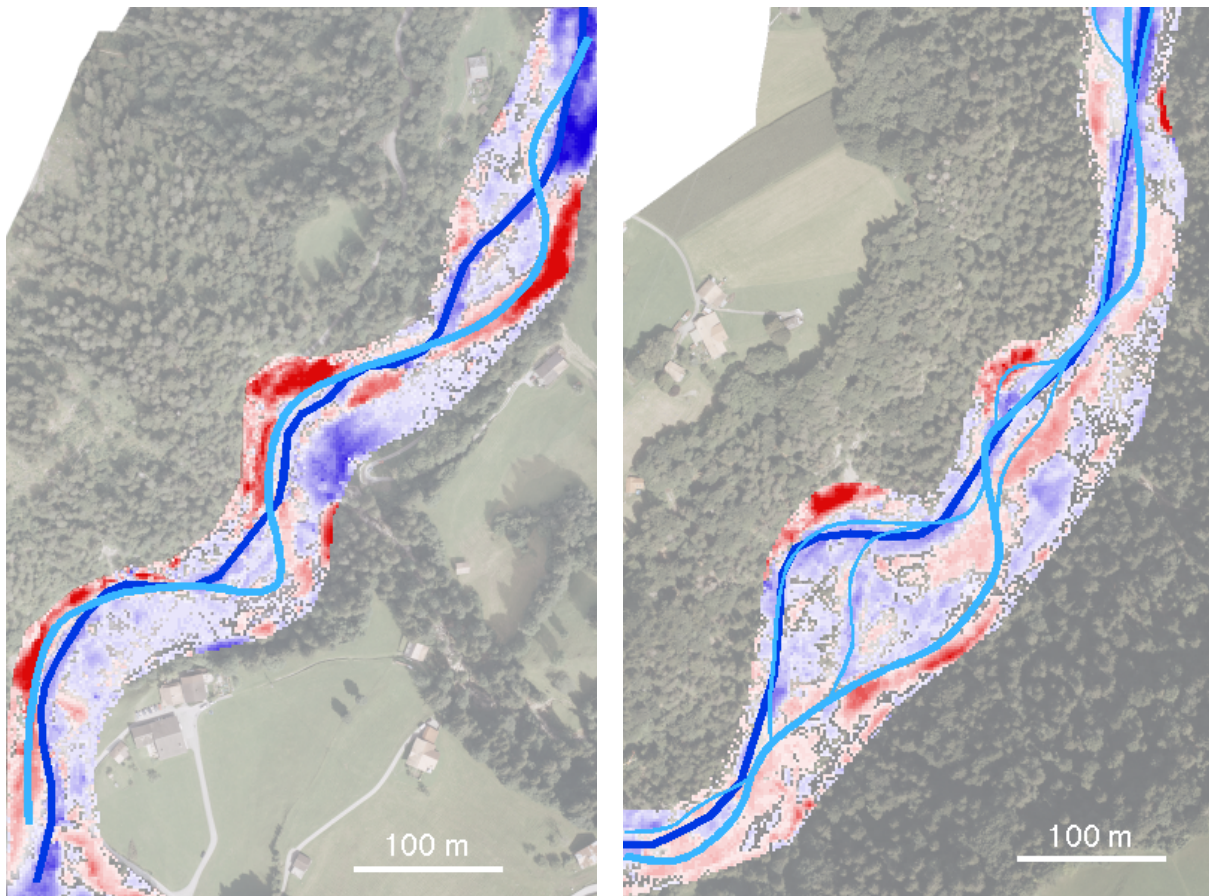


Abbildung 7: Seitenerosionsprozesse (rot) während des Hochwassers 2005 an der Chirel im Diemtigtal. Links in Aussenkurven bei Mäanderbildung, rechts beidseitig bei der Bildung eines verzweigten Gerinnes. Blaue Flächen: Ablagerung von Geschiebe, dunkelblaue Linie: Gerinne vor dem Hochwasserereignis, hellblaue Linie: Gerinne nach dem Hochwasserereignis. Fliessrichtung von unten links nach oben rechts.

Veränderungen der Sohlenlage

Erosionen und Ablagerungen auf der Sohle verändern den Ort, an welchem ein Ufer durch die Strömung beansprucht wird. In einem Gerinne mit Sohlenerosion kann eine Ufersicherung unterspült werden. In einem Gerinne mit Ablagerung kann eine Ufersicherung eingeschottet und damit wirkungslos werden.

Unregelmässigkeiten im Querschnitt

Unregelmässigkeiten im Querschnitt können Erosionsprozesse initiieren. Zu den zu betrachtenden Unregelmässigkeiten zählen abrupte Änderungen der Rauheit von Sohle und Ufer, Abstürze und andere Einbauten. Veränderungen der Richtung werden unter dem Aspekt Linienführung betrachtet.

In Tabelle 5 ist aufgeführt, welches Vorgehen gewählt werden soll, um die Morphologie des Gewässers im Rahmen einer Gefahrenbeurteilung anzusprechen. Das Vorgehen ist abhängig von der Bearbeitungstiefe.

Tabelle 5: Vorgehen zur Beurteilung der Morphologie.

	Gefahrenhinweis	Gefahrenkarte	Einzelgutachten
Aktuelle Gerinneform	–	Beurteilen im Feld oder mit Karte oder Luftbild.	Beurteilen im Feld oder mit Karte oder Luftbild.
Veränderung der Gerinneform bei Hochwasserszenario HQx	Immer Veränderung annehmen.	Beurteilen aufgrund von Abfluss- und Geschiebeszenarien. Potenzielle Gerinneform aus historischen Karten.	Beurteilen aufgrund von Abfluss- und Geschiebeszenarien. Potenzielle Gerinneform aus historischen Karten und aufgrund von morphologischen Berechnungen.
Linienführung	Immer Bedingungen wie an einem Prallhang annehmen.	Beurteilen im Feld oder mit Karte oder Luftbild.	Beurteilen im Feld oder mit Karte oder Luftbild.
Sohlenveränderung	Immer Erosion oder Ablagerung annehmen.	Beurteilen aufgrund von Abfluss- und Geschiebeszenarien. <i>erweiterte Beurteilung:</i> Sohlenveränderungen mit Geschiebetransportrechnungen bestimmen.	Sohlenveränderungen mit Geschiebetransportrechnungen bestimmen.
Unregelmässigkeiten im Querschnitt	-	Im Feld erheben.	Im Feld erheben.

4.6.3 Gefährdungsbilder

Die nachfolgend aufgeführten Prozesse können eine Seitenerosion auslösen und werden deshalb als Gefährdungsbilder bezeichnet. Sie können einzeln oder in Kombination auftreten. Oftmals lassen sie sich nicht scharf voneinander abgrenzen.

Erosion am Böschungsfuss

Sohlenerosion, Kolkbildung oder die Erosion des Böschungsfusses destabilisieren die Böschung, so dass diese nachrutscht (Abbildung 8). Die Sohlenerosion kann grossräumig oder nur lokal auftreten. Sie kann sich über einen längeren Zeitraum oder nur während eines einzelnen Hochwasserereignisses manifestieren. Kolke können bei Unregelmässigkeiten im Gerinne auftreten, also bei Krümmungen, bei einer Änderung des Querschnitts, bei einer Änderung der Rauheit oder bei Einbauten (Sperrern, Buhnen, Einleitungen). Kolke können auch als sekundärer Prozess auftreten, wenn z.B. eine umgestürzte Ufermauer oder ein umgestürzter Baum den Abflussquerschnitt verengt.

In steilen Wildbächen ist die Sohlenerosion die häufigste Ursache für die Erosion des Ufers.

Ufererosion, ausgelöst durch die Erosion des Böschungsfusses, wurde früher auch als Uferrutschung bezeichnet. Dieser Begriff wird hier nicht weiter verwendet.

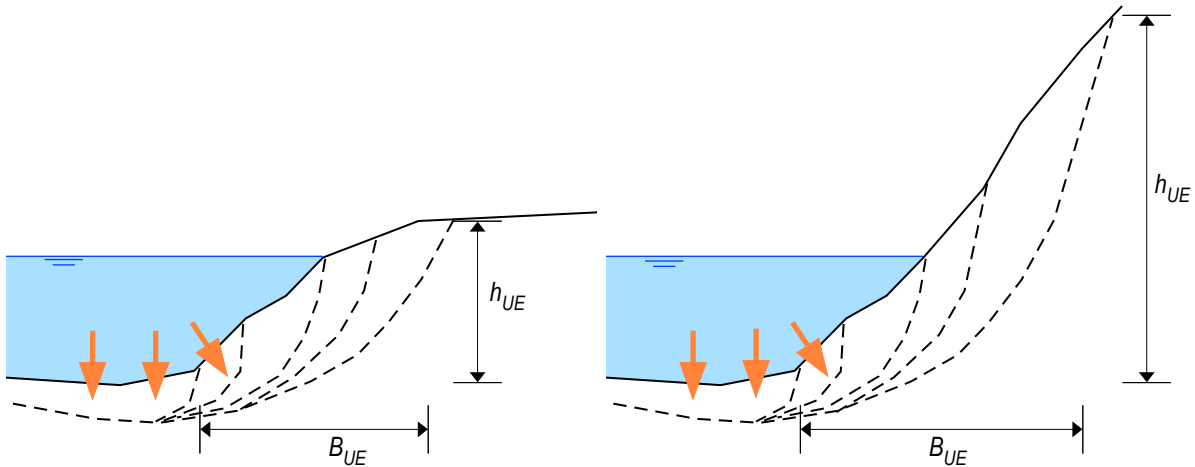


Abbildung 8: Sohlenerosion, Kolkbildung oder die Erosion des Böschungsfusses destabilisieren die Böschung (links bei niedriger, rechts bei hoher Böschung).

Direkter Strömungsangriff

Der direkte Strömungsangriff führt zum Abtrag von Material aus der Böschung (Primäre Seitenerosion, siehe Kapitel 2.1). Diese kann auf der ganzen Höhe der Böschung auftreten (Abbildung 9 links) oder nur auf einem unbefestigten oberen Teil der Uferböschung (Abbildung 9 rechts). Der direkte Strömungsangriff ist auf der Aussenseite von Krümmungen am häufigsten. Er kann aber auch, ähnlich wie die Kolkbildung, durch Einbauten im Gewässer verursacht werden.

Veränderungen der Sohlenlage während eines Hochwasserereignisses führen dazu, dass sich der Angriffspunkt der Beanspruchung nach oben oder unten verschiebt.

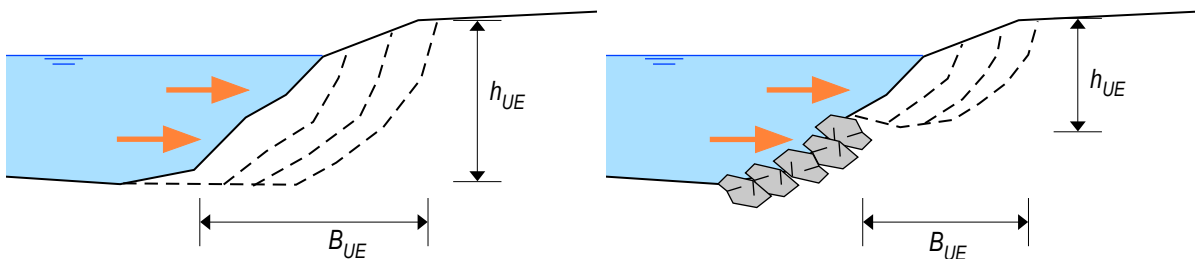


Abbildung 9: Seitenerosion durch direkten Strömungsangriff.

Erosion an der Böschungsoberkante

Durch Überströmen der Böschungsoberkante oder durch Hinterspülen der Ufersicherung wird die Böschungsoberkante erodiert (Abbildung 10). Dieser Erosionsprozess ist an den Austritt von Wasser aus dem Gerinne gekoppelt und hängt unter anderem von der Sohlenlage während eines Hochwassers ab.

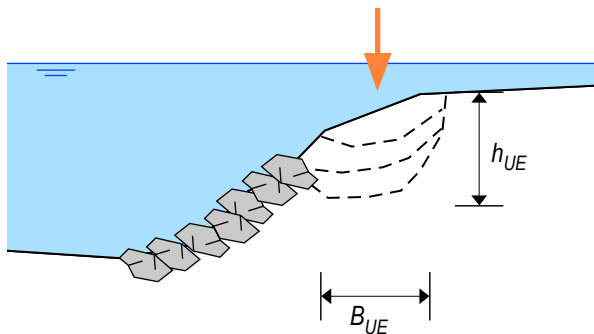


Abbildung 10: Erosion an der Böschungsoberkante.

Die Tabelle 6 gibt Hinweise dazu, in welchen Fällen welches Gefährdungsbild zu betrachten ist.

Tabelle 6: Vorgehen zur Festlegung von massgebenden Gefährdungsbildern für die Seitenerosion.

	Gefahrenhinweis	Gefahrenkarte	Einzelgutachten
Erosion am Böschungsfuss	Immer betrachten	Bei Sohlenerosion und bei Unregelmässigkeiten im Querschnitt betrachten. In Flusskrümmungen, bei Verzweigung und bei Mäanderbildung betrachten.	Bei Sohlenerosion und bei Unregelmässigkeiten im Querschnitt betrachten. In Flusskrümmungen, bei Verzweigung und bei Mäanderbildung betrachten.
Direkter Strömungsangriff	Immer betrachten	Bei allen Gerinneformen betrachten und bei Unregelmässigkeiten im Querschnitt betrachten.	Bei allen Gerinneformen betrachten und bei Unregelmässigkeiten im Querschnitt betrachten.
Erosion an der Böschungsoberkante	Immer betrachten	Bei Überströmen der Böschung und beim Rückfluss von austretendem Wasser betrachten.	Bei Überströmen der Böschung und beim Rückfluss von austretendem Wasser betrachten.

4.6.4 Belastungsgrössen

Für die im vorangehenden Schritt als massgebend identifizierten Gefährdungsbilder werden die Grössen der Belastung ermittelt. In vielen Fällen ist man auf eine gutachterliche und qualitative Beurteilung angewiesen. In Gewässern in denen die hydraulischen Verhältnisse bei Hochwasser mit ausreichender Genauigkeit vorhergesagt werden können, sollen die Belastungsgrössen jedoch berechnet werden (Tabelle 7). Eine grossräumige Sohlenerosion kann über eine Bilanzierung von Geschiebezufuhr und Transportkapazität ermittelt werden. Für die Berechnung von Kolkiefen sind aus der Literatur verschieden Ansätze bekannt, z.B. von Tschopp & Bisaz (1972) bei Überfällen, von Peter (1986) oder Kikkawa (1976) bei Flusskrümmungen und von Zarn (1997) in Gerinnen mit Bänken¹. Die massgebliche Belastungsgrösse beim direkten Strömungsangriff ist die Schleppspannung auf der Böschung. Bei Unregelmässigkeiten im Querschnitt kann die Belastung örtlich wesentlich grösser sein als bei gleichförmigen Abflussverhältnissen. Die Unregelmässigkeiten spielen bei kleinen Gewässern eine grössere Rolle als bei grossen.

Auf Stufe Gefahrenhinweis werden die Belastungsgrössen nicht ermittelt.

Tabelle 7: Vorgehen zur Beurteilung der Belastung auf die Ufer.

	Gefahrenhinweis	Gefahrenkarte	Einzelgutachten
Erosion am Böschungsfuss	-	Ausmass von Sohlenerosion und Kolkiefen gutachterlich schätzen. Kolkiefen aufgrund von Unregelmässigkeiten besonders beachten. <i>erweiterte Beurteilung:</i> Sohlenerosion durch Geschiebe-transportrechnung bestimmen, Kolkiefen berechnen.	Sohlenerosion durch Geschiebe-transportrechnung bestimmen, Kolkiefen berechnen.
Direkter Strömungsangriff	-	Belastung gutachterlich schätzen, Belastungsspitzen aufgrund von Unregelmässigkeiten besonders beachten. <i>erweiterte Beurteilung:</i> Schleppspannung auf der Böschung berechnen, Belastungsspitzen bei Unregelmässigkeiten schätzen.	Schleppspannung auf der Böschung berechnen.
Erosion an der Böschungsoberkante	-	In Abhängigkeit der Überflutung gutachterlich beurteilen (z.B. in Funktion der Intensität der Überflutung). <i>erweiterte Beurteilung:</i> Schleppspannung auf dem Terrain berechnen.	Schleppspannung auf dem Terrain berechnen.

¹ Die zitierten Ansätze sind in Bezzola (2014) zusammengefasst.

4.6.5 Erosionswiderstand

Für die als massgebend bezeichneten Gefährdungsbilder wird der Widerstand des Ufers gegenüber der erwarteten Belastung bestimmt. Dazu 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 unverbaut), seine Kornzusammensetzung (Kies, Feinsedimente, kohäsiv oder nicht), sein Bewuchs (flachgründig, tiefgründig) seine Neigung und die Fundationstiefe von Verbauungen (Tabelle 8). Beim Übergang von starren zu lockeren Materialien kann der Widerstand des Ufers lokal geringer sein als bei gleichmässiger Uferbeschaffenheit.

In vielen Fällen ist eine gutachterliche und qualitative Beurteilung notwendig. Insbesondere die Fundationstiefe einer Uferverbauung ist nur selten bekannt oder kann nur mit verhältnismässig grossem Aufwand ermittelt werden.

Tabelle 8: Vorgehen zur Beurteilung des Widerstandes der Böschung.

	Gefahrenhinweis	Gefahrenkarte	Einzelgutachten
Erosion am Böschungsfuss	Fels oder Lockermaterial mit Hilfe des GeoCover von Swisstopo abgrenzen.	Beschaffenheit, Zustand und Dauerhaftigkeit des Böschungsfusses im Feld bestimmen (Fels, Verbauungsart, Blockgrössen, Kornzusammensetzung, Böschungseignung, etc.). Fundationstiefe soweit ersichtlich im Feld abschätzen. Widerstand des Böschungsfusses qualitativ beschreiben. <i>erweiterte Beurteilung:</i> zusätzlich zu den o.g. Aufnahmen: Fundationstiefe von Verbauungen aus Projektplänen ermitteln. Grenzschleppspannung des Böschungsfusses berechnen.	Beschaffenheit, Zustand und Dauerhaftigkeit des Böschungsfusses im Feld bestimmen und durch geotechnische Sondierung verifizieren (Fels, Verbauungsart, Blockgrössen, Kornzusammensetzung, Böschungseignung, etc.) Fundationstiefe von Verbauungen aus Projektplänen oder durch Sondierung ermitteln. Beurteilen der Tragsicherheit einer Uferverbauung (z.B. einer Ufermauer) bei Unterkolkung mit beschränkter Länge.
Direkter Strömungsangriff	Fels oder Lockermaterial mit Hilfe des GeoCover von Swisstopo abgrenzen.	Beschaffenheit Zustand und Dauerhaftigkeit der Böschung im Feld bestimmen (Fels, Verbauungsart, Bauhöhe der Ufersicherung, Blockgrössen, Kornzusammensetzung, Bewuchs, Böschungseignung, etc.). Widerstand der Böschung gegenüber dem direkten Strömungsangriff qualitativ beschreiben. <i>erweiterte Beurteilung:</i> zusätzlich zu den o.g. Aufnahmen: Grenzschleppspannung der Böschung berechnen.	Beschaffenheit Zustand und Dauerhaftigkeit der Böschung im Feld bestimmen und durch geotechnische Sondierung verifizieren (Fels, Verbauungsart, Bauhöhe der Ufersicherung, Blockgrössen, Kornzusammensetzung, Bewuchs, Böschungseignung, etc.). Grenzschleppspannung der Böschung berechnen.

<p>Erosion an der Böschungsoberkante</p>	<p>Fels oder Lockermaterial mit Hilfe des GeoCover von Swisstopo abgrenzen.</p>	<p>Beschaffenheit und Zustand des Terrains an der Böschungsoberkante im Feld bestimmen (Fels, Kornzusammensetzung, Bewuchs, Neigung, etc.). Widerstand des Terrains gegenüber der Beanspruchung durch die Strömung qualitativ beschreiben. erweiterte Beurteilung: zusätzlich zu den o.g. Aufnahmen: Grenzscherpspannung für das Terrain oberhalb der Böschung berechnen.</p>	<p>Beschaffenheit und Zustand des Terrains an der Böschungsoberkante im Feld bestimmen und durch geotechnische Sondierung verifizieren (Fels, Kornzusammensetzung, Bewuchs, Neigung, etc.). Grenzscherpspannung für das Terrain oberhalb der Böschung berechnen.</p>
---	---	--	--

Bei Uferverbauungen mit Blockwürfen lässt sich der Erosionswiderstand z.B. mit dem Ansatz von Stevens & Simons (1971) bestimmen¹. Für ingenieurbio-logische Verbauungen sind Grenzwerte der Schlep-pspannung in der Literatur zu finden (Tabelle 9). Diese sind aber mit der notwendigen Vorsicht zu geniessen, weil sie oftmals aus nur wenigen Beobachtungen abgeleitet wurden. Um die Dauerhaftigkeit der Uferverbauung zu bestimmen, werden die Qualität des Baumaterials beurteilt und die Auswirkungen von langfristigen Sohlenveränderungen (Erosionen und Auflandung) in die Überlegungen mit einbezogen.

Tabelle 9: Grenzwerte der Schlep-pspannung für ingenieurbio-logische Bauweisen (Pasche 2000).

	Grenzwert Schlep-pspannung
Weidenfaschinen, Reisiglagen	60 N/m ²
Weiden, Erlen	100-140 N/m ²
junger bis gut verwachsener Rasen	50-80 N/m ²

4.6.6 Fazit der Schwachstellenanalyse

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. Dabei werden für jedes Grundscenario die möglichen Gefährdungsbilder betrachtet und die jeweilige Belastung auf das Ufer seinem Widerstand gegenüber gestellt (Tabelle 10).

Auf Stufe Gefahrenhinweis wird die Belastung immer grösser als der Widerstand – und damit eine Ufererosion – angenommen, es sei denn, das Gewässer werde durch ein felsiges Ufer begrenzt.

Bei der Beurteilung auf Stufe einer standardmässigen Gefahrenkarte werden die Grössen von Belastung und Widerstand qualitativ betrachtet. Für verbaute Ufer wird in Anlehnung an die Grob-beurteilung nach Protect (Romang 2008) angenommen, dass der Widerstand grösser ist als die Belastung, wenn:

- die Ufersicherung eine den potenziellen Erosionsprozessen angepasste Baulänge hat,
- die Ufersicherung über eine ausreichende Bauhöhe verfügt,

- die Ufersicherung intakt ist,
- die Ufersicherung regelmässig unterhalten wird und wenn
- bei dem betrachteten Hochwasserszenario keine übergeordneten morphologischen Veränderungen erwartet werden (s. Kap. 4.6.2).

Für unverbaute Ufer, welche aus Lockermaterial aufgebaut sind, wird der Widerstand immer kleiner als die Belastung angenommen.

Bei einer Beurteilung auf Stufe Gefahrenkarte erweitert und im Rahmen von Einzelgutachten werden Belastung und Widerstand quantitativ miteinander verglichen. Damit wird die Tragsicherheit des Ufers bzw. der Uferverbauung im Sinne der Massnahmenbeurteilung von Protect nachgewiesen.

In vielen Fällen ist – auch bei guter Datengrundlage – eine gutachterliche Entscheidung unumgänglich. Diese erfordert viel Erfahrung in der Beurteilung von Gerinneprozessen.

Tabelle 10: Vorgehen zum Fazit der Schwachstellenanalyse.

	Gefahrenhinweis	Gefahrenkarte	Einzelgutachten
Erosion am Böschungsfuss	Ausser bei Fels immer Erosion annehmen.	Bei unverbauten Ufern wird bei Sohlenerosion oder Kolkbildung immer eine Erosion des Ufers angenommen. Bei verbauten Ufern wird eine Ufererosion angenommen, wenn die Sohlenerosion oder der Kolk unter die Fundation der Ufersicherung reicht.	Bei unverbauten Ufern wird bei Sohlenerosion oder Kolkbildung immer eine Erosion des Ufers angenommen. Bei verbauten Ufern wird eine Ufererosion angenommen, wenn die Sohlenerosion oder der Kolk unter die Fundation der Ufersicherung reicht, es sei denn, die Tragkonstruktion der Uferverbauung liesse eine begrenzte Unterkolkung zu.
Direkter Strömungsangriff	Ausser bei Fels immer Erosion annehmen.	Es wird eine Ufererosion angenommen, wenn die Bedingungen nach Protect (Stufe Grobbeurteilung) nicht eingehalten sind. Bei unverbauten Ufern in Lockermaterial immer Erosion annehmen. <i>erweiterte Beurteilung:</i> Eine Ufererosion wird angenommen, wenn die Schleppspannung auf der Böschung grösser ist als deren Grenzscheppspannung.	Eine Ufererosion wird angenommen, wenn die Schleppspannung auf der Böschung grösser ist als deren Grenzscheppspannung.
Erosion an der Böschungsoberkante	Ausser bei Fels immer Erosion annehmen.	In Abhängigkeit der Überflutung gutachterlich beurteilen (z.B. in Funktion der Intensität der Überflutung). <i>erweiterte Beurteilung:</i> Eine Erosion an der Böschungsoberkante wird angenommen, wenn die Schleppspannung auf dem Terrain grösser ist als dessen Grenzscheppspannung.	Eine Erosion an der Böschungsoberkante wird angenommen, wenn die Schleppspannung auf dem Terrain grösser ist als dessen Grenzscheppspannung.

4.7 Wirkungsanalyse

4.7.1 Ausdehnung und Intensität

Wird im Rahmen der Schwachstellenanalyse ein Ufer als erosionsgefährdet eingestuft, muss das Ausmass der Erosion bestimmt werden. Hinweise dazu geben z.B. Untersuchungen von Erosionen bei vergangenen Hochwasserereignissen (Hunzinger und Durrer 2008, Bachmann 2012, Beck 2006) bei welchen typische Erosionslängen und Erosionsbreiten beziffert wurden. So wurden zum Beispiel während des Hochwassers von 2005 in Gebirgsflüssen, in denen die Abflussspitze eine Wiederkehrdauer von mehr als 100 Jahren aufwies, Erosionsbreiten von bis zu viermal der Gerinnebreite beobachtet.

Erosionsbreite und Erosionslänge

In der Praxis hat sich bisher bewährt Erosionsbreiten als ein Vielfaches der bestehenden Gerinnebreite zu definieren. Aus den erwähnten Untersuchungen lässt sich ableiten, dass die Breite von Seitenerosionen, welche durch übergeordnete morphologische Prozesse hervorgerufen werden, wesentlich grösser sind als die Breite von Erosionen welche durch lokale Phänomene (Einbauten, Unregelmässigkeiten) verursacht werden.

Eine Erosionslänge kann dort sinnvoll abgegrenzt werden, wo eine Seitenerosion klar lokalisiert werden kann, d.h. wenn sie durch eine Einbaute ausgelöst wird oder in einer Flusskrümmung erwartet wird. Auf geraden Flussabschnitten oder auf Abschnitten mit verzweigten Gerinnen ist u. U. die gesamte Uferlänge erosionsgefährdet, auch wenn beim konkreten Ereignis das Ufer nicht auf der ganzen Länge erodiert.

Das Ausmass von primärer Erosion in gestreckten Gerinnen lässt sich mit einer Betrachtung der Grenzbreite abschätzen. Die Grenzbreite ist erreicht, wenn die Schleppspannung auf der Böschung den kritischen Wert für den Transportbeginn des Böschungsmaterials unterschreitet. Wenn keine Schleppspannungen berechnet werden, lässt sich das Ausmass von Erosionen u. U. aus Beobachtungen früherer Ereignisse ableiten.

In Mäandergerinnen ist das Erosionsvolumen in einem Mäanderbogen durch die Transportkapazität des Gewässers begrenzt. Wenn die Länge und Höhe der Erosionsstelle bekannt sind, kann daraus die maximale Breite abgeschätzt werden.

In Gewässern, in denen übergeordnete morphologische Veränderungen zu erwarten sind, soll die Vorgehensweise aus Tabelle 11 angewandt werden, um die Erosionsbreite bzw. die Lage von Mäanderbögen zu bestimmen.

Tabelle 11: Vorgehen zum Bestimmen der Erosionsbreite in verzweigten Gerinnen bzw. der Wellenlänge und Amplitude von Mäandern.

	Gefahrenhinweis	Gefahrenkarte	Einzelgutachten
Gewässerabschnitt mit verzweigtem Gerinne			
Natürliche Sohlenbreite / Regimebreite	Pauschales Vielfaches der aktuellen Gerinnebreite.	Pauschales Vielfaches der aktuellen Gerinnebreite. <i>erweiterte Beurteilung:</i> Bestimmen aufgrund von historischen Karten und von morphologischen Berechnungen.	Bestimmen aufgrund von historischen Karten und von morphologischen Berechnungen.
Gewässerabschnitt mit Mäanderbildung			
Wellenlänge Mäander	Pauschale Annahme.	Pauschale Annahme. <i>erweiterte Beurteilung:</i> Bestimmen aufgrund von historischen Karten und von morphologischen Berechnungen.	Bestimmen aufgrund von historischen Karten und von morphologischen Berechnungen.
Amplitude Mäander	Pauschales Vielfaches der aktuellen Gerinnebreite	Pauschales Vielfaches der aktuellen Gerinnebreite. <i>erweiterte Beurteilung:</i> Bestimmen mit einer Bilanz von Erosionsvolumen und Transportkapazität.	Bestimmen mit einer Bilanz von Erosionsvolumen und Transportkapazität.

Intensität

Als Mass für die Intensität der Ufererosion wird die Erosionshöhe h_{UE} bezeichnet. Sie wird lotrecht von der Böschungsoberkante bis zur Sohle der Erosionsstelle gemessen (Abbildung 4). Es gelten die Intensitätsklassen, wie sie bereits in der Bundesempfehlung von 1997 (Petrascheck und Loat 1997) bezeichnet wurden (Tabelle 12). Über die Erosionsbreite wird die Intensitätsklasse nicht verändert. Ufererosion mit schwacher Intensität dürfte nur in den seltensten Fällen ausgewiesen werden. Nur in sehr kleinen Wiesenbächlein ist eine Uferböschung weniger als einen halben Meter hoch und in diesen Gewässern ist die Erosionsbreite in der Regel so gering, dass sie nicht explizit bezeichnet wird.

Die Erosionshöhe wird als Mass für die Intensität gewählt, weil mit dieser Grösse die Einwirkung der Ufererosion auf ein Gebäude charakterisiert werden kann. Ein normal fundiertes Gebäude nimmt bei einer Erosionshöhe der Intensitätsklasse schwach ($h_{UE} < 0.5$ m) keinen Schaden. Bei einer Erosionshöhe der Intensitätsklasse hoch ($h_{UE} > 2$ m) muss hingegen mit einem Einsturz des Gebäudes gerechnet werden (Abbildung 11). Damit folgt die Zuordnung der Intensität des Gefahrenprozesses Ufererosion den Kriterien, die bei anderen Prozessarten auch angewandt werden.

Tabelle 12: Intensitätsstufen der Ufererosion

Intensität	Erosionshöhe (h_{UE})
Schwach	$h_{UE} < 0.5 \text{ m}$
Mittel	$0.5 \text{ m} < h_{UE} < 2 \text{ m}$
Stark	$h_{UE} > 2 \text{ m}$



Abbildung 11: Die Erosionshöhe als das Mass, welches die Einwirkung der Ufererosion auf ein Gebäude charakterisiert. Foto Flussbau AG SAH.

4.7.2 Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit

Für Risikobetrachtungen wird dem Prozess Ufererosion eine räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit p_{RA} zugeordnet. Sie hängt von der Gerinneform und der Linienführung ab.

An Prallhängen ist die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit hoch. Wird eine Erosionsgefahr beidseits eines Flusslaufes ausgeschieden, z.B. bei verzweigten Gerinnen, ist die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit geringer. Tabelle 13 gibt einen Hinweis auf mögliche Werte, mit denen die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit beziffert werden kann. Die Werte müssen im Einzelfall festgelegt und begründet werden. Wenn die Lage der wahrscheinlichsten Erosionsstelle durch die Situation vorgezeichnet ist, wird ein Wert an der oberen Grenze der Bandbreite gewählt. Gibt es keine Hinweise darauf, wo eine Erosion am wahrscheinlichsten ist, wird ein kleinerer Wert für die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit gewählt.

Tabelle 13: Mögliche Werte für die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit p_{RA} von Ufererosion.

Gerinneform und Linienführung	PRA
Prallhang	0.50 - 1.00
Gerades Gerinne	0.10 – 0.50
Prallhang im Mäander	0.50 - 1.00
Verzweigung	0.25 - 0.75

4.7.3 Folgeprozesse

Die Seitenerosion in einem Fließgewässer kann u.a. folgende Prozesse auslösen:

- Es werden Feststoffe mobilisiert (Geschiebe, Bäume und Sträucher, am Ufer gelagerte Gegenstände), welche weiter flussabwärts transportiert werden und dort durch Ablagerung oder Verklausung neue Gefahrenprozesse verursachen.
- Die Erosion am Fuss einer hohen Böschung löst einen Hangrutsch aus oder beschleunigt eine bestehende Rutschung.
- Im durch Seitenerosion verbreiterten Gerinne vermindert sich die Transportkapazität und Geschiebe und Schwemmholz lagern sich auf der Sohle ab.

Im Rahmen einer Gefahrenbeurteilung müssen die Möglichkeit solcher Folgeprozesse und deren Auswirkungen untersucht werden. Unter Umständen muss der oder die Bearbeiter/in der Gefahrenbeurteilung dazu eine Fachperson aus einer anderen Disziplin beiziehen.

4.8 Dokumentation

Die erhobenen Daten, die Annahmen, Berechnungen und Überlegungen, welche bei der Beurteilung der Gefahr von Ufererosion vorgenommen wurden, müssen, wie bei jeder anderen Gefahrenbeurteilung auch, in einem technischen Bericht dokumentiert werden. Darin müssen die grundlegenden Überlegungen, die getroffenen Annahmen und die Ergebnisse sowie deren Unschärfe (vgl. Kap. 5.2) nachvollziehbar zusammengefasst sein.

Wird das Ergebnis der Gefahrenbeurteilung kartographisch festgehalten (auf Intensität-, Gefahren- oder Gefahrenhinweiskarten) sollen die von Erosion gefährdeten Bereiche als Flächen dargestellt werden. Sind die Flächen so klein, dass sie im gewählten Kartenmasstab nicht erkennbar sind, ist auch eine Liniensignatur denkbar. In diesem Fall muss die Erosionsbreite durch die Signatur erkennbar sein.

Wenn Überflutungsflächen und von Erosion gefährdete Flächen auf derselben Karte dargestellt werden, soll eine Signatur verwendet werden, welche es ermöglicht, die Flächen der unterschiedlichen Prozesse voneinander zu unterscheiden. Eine mögliche Signatur dazu ist in Abbildung 12 dargestellt.

Im Datenmodell eines geographischen Informationssystems sollen die Flächen mit der Prozessart Ufererosion attribuiert sein. Im Weiteren sei hier auf die Geodatenmodelle des Bundes bzw. der Kan-

tone verwiesen. Das Geodatenmodell des Bundes schreibt zwingend Flächen- und keine Linienelemente vor.

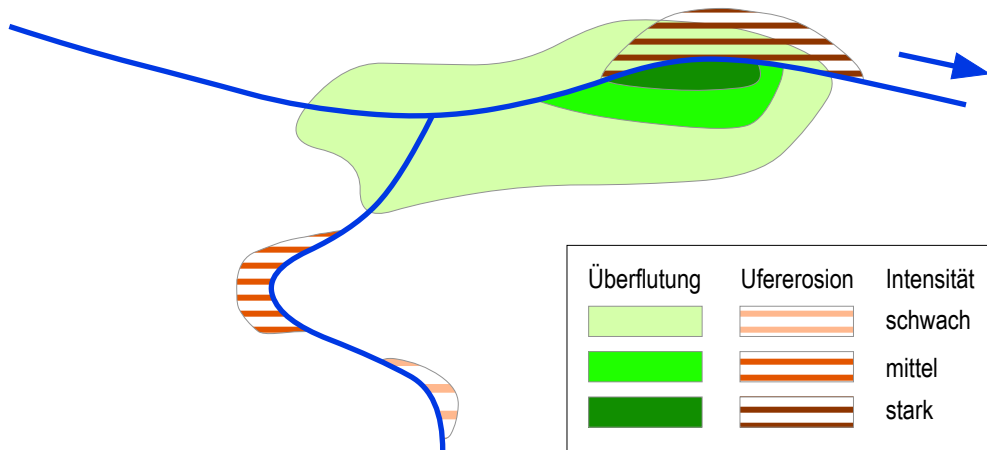


Abbildung 12: Mögliche Darstellung von potenziellen Erosionsflächen in einer Intensitätskarte Wasser nach Bundesstufen.

5 HINWEISE ZUR ANWENDUNG

5.1 Arbeitshilfe für Feldaufnahmen

Manche der in Kap. 1 aufgeführten Arbeitsschritte zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion erfordern eine Beurteilung im Feld. In der Regel werden zwei Begehungen notwendig sein. Die erste im Rahmen der Schwachstellenanalyse, bei welcher das Auftreten möglicher Prozesse evaluiert und die Uferbeschaffenheit erfasst wird, die zweite im Rahmen der Wirkungsanalyse, um das Ausmass der Erosion abzuschätzen oder um ein rechnerisch bestimmtes Ausmass zu verifizieren.

Im Anhang ist ein Beispiel für eine Arbeitshilfee aufgeführt, welche als Gedankenstütze während der Feldaufnahmen verwendet werden kann. Der Nutzer oder die Nutzerin ist angehalten, die Arbeitshilfe nach den örtlichen oder projektspezifischen Gegebenheiten zu ergänzen. Als Vorbereitung auf die Feldaufnahmen empfiehlt es sich, die Grundlagen von Tabelle 14 aufzubereiten.

Tabelle 14: Grundlagen zur Vorbereitung von Feldaufnahmen.

Kartenmaterial	Übersichtsplan 1:5000 oder grösser Gewässernetz 1:5000 oder grösser Geologische Karten (Atlas, geotechnische Karten etc.) Karte der Phänomene
Bereits vorhandene Aufnahmen/Angaben/ Hinweise aus anderen Projekten/Akten oder dem Ereigniskataster	Angaben aus Projekt Ökomorphologie (Sohlenbreite, Verbauungen) Abschlussakten im entsprechenden Projektabschnitt Studie(n) mit Hinweisen oder Untersuchungen von Auflandungs-, Gleichgewichts- oder Erosionstendenzen andere
Grundszenerarien	Hochwasserszenarien HQ_x Geschiebeaufkommen G_x Holzzufuhr H_x

5.2 Umgang mit Unsicherheiten in der Beurteilung

Wie jede andere Gefahrenbeurteilung ist auch die Beurteilung der Ufererosion mit Unsicherheiten verbunden. Dies gilt umso mehr, als bei der Beurteilung noch relativ wenig kollektive Erfahrung besteht und mancherorts eine gutachterliche Beurteilung notwendig ist. Unsicherheiten können auftreten

- bei der Bestimmung von Belastungsgrössen: In einem geraden und gleichförmigen Gerinne lassen sich die Schleppspannungen als die massgebliche Belastungsgrösse relativ gut vorhersagen. Bei unregelmässigen Querschnitten und bei variablen Strömungsverhältnissen treten aber Belastungsspitzen auf, welche sich nur schlecht quantifizieren lassen.
- bei der Bestimmung des Erosionswiderstandes: der Erosionswiderstand von homogenen Bauwerken ist einfacher zu bestimmen als derjenige von strukturierten Ufern. Bei Bauwerken ist zudem die Foundationstiefe oft nicht bekannt.
- beim Fazit der Schwachstellenanalyse: wenn die Belastung ungefähr gleich gross ist wie der Widerstand, ist die Wahrscheinlichkeit, einer fehlerhaften Entscheidung grösser, als wenn man davon ausgehen kann, dass die Belastung in jedem Fall deutlich grösser oder deutlich kleiner ist

- als der Widerstand des Ufers.
- bei der Wirkungsanalyse: die Ausdehnung der Ufererosion kann falsch eingeschätzt werden, wenn der Untergrund anders zusammengesetzt ist als angenommen wird. Sie kann z.B. überschätzt werden, wenn der Untergrund felsig ist oder sie kann unterschätzt werden, wenn nicht erkannt wird, dass im Untergrund Schichten von feinkörnigem und erosivem Material vorhanden sind.

Zielt die Gefahrenbeurteilung darauf ab, eine für die Raumplanung relevante Gefahrenkarte zu erstellen, wird man bei grosser Unsicherheit Ufererosion annehmen und die gefährdeten Flächen grosszügig ausscheiden. Dies in dem Sinne als die Gefahrenkarte verschiedene mögliche Ausprägungen eines Ereignisses darstellen soll.

Ein Mittel, um die Unschärfe einer Beurteilung 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.

6 QUELLEN

6.1 Prozess

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.

Ahmari H. und da Silva A.M.F. 2011. Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan. J. of Hydraulic Research. Vol. 49, No. 6, pp. 718-727.

Amiri-Tokaldany E., Darby S.E., Tosswell P. 2003. *Bank stability analysis for predicting reach scale land loss and sediment yield*. Journal of the american water resources association, 897-909.

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.

Bezzola G.R. 2014. Vorlesungsskript Flussbau, Professur für Wasserbau, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich.

Dongdong J., Xuejun S., Wang H., Zhou G. 2010. *Three-dimensional modeling of bank erosion and morphological changes in the Shishou bend of the middle Yangtze River*. Advances in Water Resources 33, 348-360.

Duan J.G. 2005. *Analytical Approach to Calculate Rate of Bank Erosion*. Journal of hydraulic engineering ASCE, 980-990.

Eaton B.C. 2006. *Bank stability analysis for regime models of vegetated gravel bed rivers*. Earth Surface Processes and Landforms 31, 1438-1444.

Ercan A., Younis B.A. 2009. *Prediction of Bank Erosion in a Reach of the Sacramento River and its Mitigation with Groynes*. Water Resources Management 23, 3121-3147.

Hafner T. 2008. *Uferrückbau und eigendynamische Gewässerentwicklung – Aspekte der Modellierung und Abschätzungsmöglichkeiten in der Praxis*. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München.

Hafner T., Schindler M., Schmautz M. 2004. *Wertach Vital – Eigendynamische Gewässerentwicklung – Vergleich zwischen numerischer Simulation und Wirklichkeit*. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München.

Hasegawa K. 2013. *Studies on Qualitative and Quantitative Prediction of Meander Channel Shift*. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University.

Henshaw A.J., Thorne C.R., Clifford N.J. 2012. *Identifying causes and controls of river bank erosion in a British upland catchment*. Catena 100, 107-119.

Hickin E.J., Nanson G.C. 1984. *Lateral Migration Rates of River Bends*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, N° 11, 1557-1567.

- Hooke J.M. 1979. *An analysis of the processes of river bank erosion*. Journal of Hydrology, 42, 39-62.
- Hunzinger L. und Durrer S.: *Seitenerosion*. in Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2008. *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen*. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825: 429 S.
- Jäggi M., Hunziker R., Arborino T. 2011. *Auswirkungen der 3. Rhonekorrektur auf Geschiebehaushalt und Flussmorphologie*. Wasser Energie Luft, 2-2011, 122-127
- Jud D. 2009. *Eigendynamische Flussaufweitungen der Kander im Gebiet Heustrich Süd*. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne.
- Julian J.P., Torres R. 2006. *Hydraulic erosion of cohesive riverbanks*. Geomorphology 76, 193-206.
- Kikkawa H., Ikeda S. und 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.
- Leopold L.B. und Wolman M.G. 1957: *River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight*. Geological Survey Professional, Paper 282-B.
- Loat R. und Petrascheck A. 1997. *Empfehlungen zur Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten*. Bundesamt für Wasserwirtschaft BWW, Bundesamt für Raumplanung BRP, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.
- Magilligan F.J. 1992. *Thresholds and the spatial variability of flood power during extreme floods*. Geomorphology 5, 373-390.
- Nagata N., Hosoda T., Muramoto Y. 2000. *Numerical Analysis of River Channel Processes with Bank Erosion*. Journal of hydraulic Engineering, 243-252.
- Oplatka M. 1998. *Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern*. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.156.
- Parker G. 1978. *Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part 2. The gravel river*. Journal of Fluid Mechanics, Vol 89, part 1, 127-146
- Pasche E. 2000. *Wasserbau*. Skript zur Vorlesung, Technische Universität Hamburg, zitiert in Bezzola 2014.
- Peter W. 1986. *Kurvenkolk - Untersuchung über die Sohlensausbildung in Flusskrümmungen*. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 85.
- Piégay H., Darby S.E, Mosselman E., Surian N. 2005. *A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion*. River Research and Applications 21, 773-789.

Requena R. 2008. *Seitenerosion in kiesführenden Flüssen – Prozessverständnis und quantitative Beschreibung*. Mitteilung 210, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Hrsg. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich.

Romang H. (Ed.) 2008: Wirkung von Schutzmassnahmen. Teil F Flüsse. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 289 S.

Schmautz M. 2003. *Eigendynamische Aufweitung in einer geraden Gewässerstrecke*. Bericht Nr. 96 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München.

Schmautz M. 2004. *Gravel river widening by bank erosion in a straight stretch of river – investigations on a numerical model*. River Flow 2004 – Greco, Carravetta & Della Morte (eds.), 99-107.

Stevens M.A. und 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. und Bisaz E. 1972. *Profundidad de erosion al pie de un vertedero para la aplicacion de correction de arroyos en quebradas empinados (Erosion depth at weir toe for the application of river corrections at steep canyons)*. 5. Congresso Latinoamericano de Hidraulica, IAHR, Lima, PE

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.

6.2 Gefahrenbeurteilung

ATB SA. 2011. Carte des dangers crues Basse Allaine. Coeuvette, Vendline.

Amt für Umwelt, Kanton Solothurn. 2012: Leitfaden zur Erstellung von Gefahrenkarten, Version 11.1.

Basellandschaftliche Gebäudeversicherung 2009. Pflichtenheft Naturgefahrenkarten Basel-Landschaft.

Baudirektion Kanton Zürich, AWEL. 2011. Gefahrenkartierung Naturgefahren im Kanton Zürich – Hochwasser. Pflichtenheft 2011

Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Raumentwicklung, Kanton Aargau. 2007. Submissionsunterlagen und Leistungsverzeichnis Gefahrenkarte Hochwasser Oberes Reusstal, Beilage 7 (Erfassen der Seitenerosion).

Flussbau AG / geo7. 2009. Technischer Bericht Gefahrenkarte Diemtigen.

Gefahrenkommissionen, Amt für Wald und Naturgefahren des Kantons Graubünden. 2002. Merkblatt Gefahrenzonenausscheidung für Prozess Ufererosion.

Hunziker, Zarn & Partner. 2010. Gefahrenkarte Kleine Emme - Technischer Bericht. Bau-, Umwelt und Wirtschaftsdepartement, Dienststelle Verkehr und Infrastruktur. Kanton Luzern.

IG Teilgebiete 2+3 (Bart-Beffa-Louis-Philippina & Brügger). 2011. Technischer Bericht Methodik Gefahrenkarte Teilgebiet 2+3, Kanton St. Gallen

IG Teilgebiete 4-9 (Bart-Beffa-Louis-Philippina & Brügger). 2013. Technischer Bericht Methodik Gefahrenkarte Teilgebiete 4-9, Kanton St. Gallen

Naturgefahrenkommission (NGK) des Kantons St. Gallen. 2003. Wegleitung Naturgefahrenanalyse im Kanton St. Gallen, Version 2003.

Romang Hans (Ed.) 2008: Wirkung von Schutzmassnahmen. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 289 S.

Stucky SA. 2007. Rapport d'expertise – établissement de la carte des dangers liée à la Baye de Clarens au lieu-dit « Les Bonnettes ». Canton de Vaud, Tribunal administratif.

Stucky SA. 2009. Etude des dangers naturels liés à l'eau – Secteur de la Basse-Areuse et du Sud du Canton. Rapport technique – cours d'eau. République et canton de Neuchâtel.

Tiefbauamt, Kanton Schaffhausen. 2005. Angebotsunterlagen für Ingenieurarbeiten zur Erstellung der Gefahrenkarten für den Kanton Schaffhausen, Teilgebiet 1.

6.3 Sonstige Literatur

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL. 1998. Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer in der Schweiz – Ökomorphologie Stufe F (flächendeckend). BUWAL, Bern.

FAN-KOHS Arbeitsgruppe Ufererosion. 2014. Bisherige Praxis bei der Beurteilung der Gefahr der Ufererosion an Fliessgewässern in der Schweiz. Unveröffentlicht. 43 S.

7 SYMBOLE

Symbol	Einheit	Bedeutung
<i>b</i>	[m]	Sohlenbreite
<i>B_{UE}</i>	[m]	Erosionsbreite
<i>d</i>	[m]	Mächtigkeit der Abtragung gemäss Bundesempfehlung (Loat und Petrascheck 1997)
<i>d_m</i>	[m]	Mittlerer Korndurchmesser
<i>h</i>	[m]	Abflusstiefe
<i>h_{UE}</i>	[m]	Erosionshöhe
<i>L_{UE}</i>	[m]	Erosionslänge
<i>Q</i>	[m ³ /s]	Abfluss
<i>G</i>	[m ³]	Geschiebezufuhr
<i>H</i>	[m ³]	Holzzufuhr
<i>p_{RA}</i>	[-]	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit
<i>Y</i>	[-]	Relative Flussbreite (=b/h)
<i>Z</i>	[-]	Relative Abflusstiefe (=h/d _m)