

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 Koksch (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 Geschiebeeintrag 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).

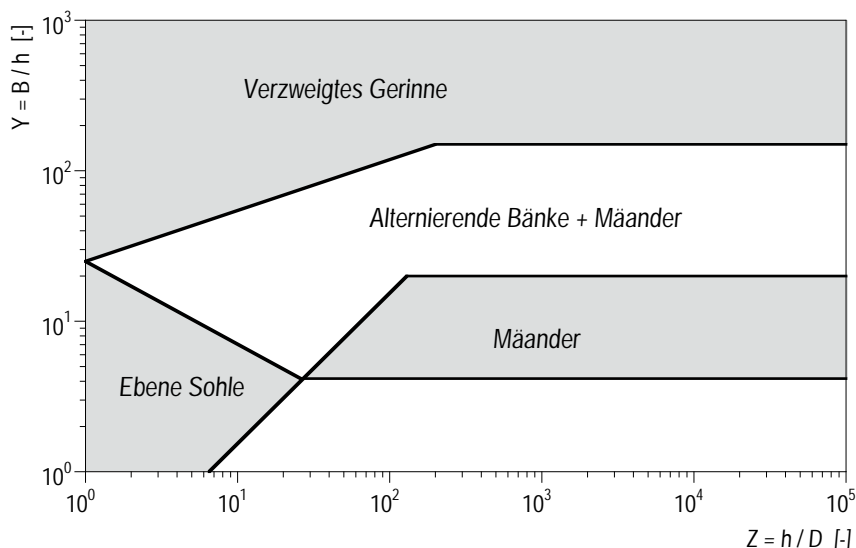


Abbildung 1: Abgrenzung der Gerinneform in Abhängigkeit von Gerinnebreite, Abflusstiefe und Korndurchmesser vereinfachte Darstellung nach Ahmari und da Silva (2011).



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 Pflasterungsschicht 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 ausgedrückt. 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	$d > 2 \text{ m}$

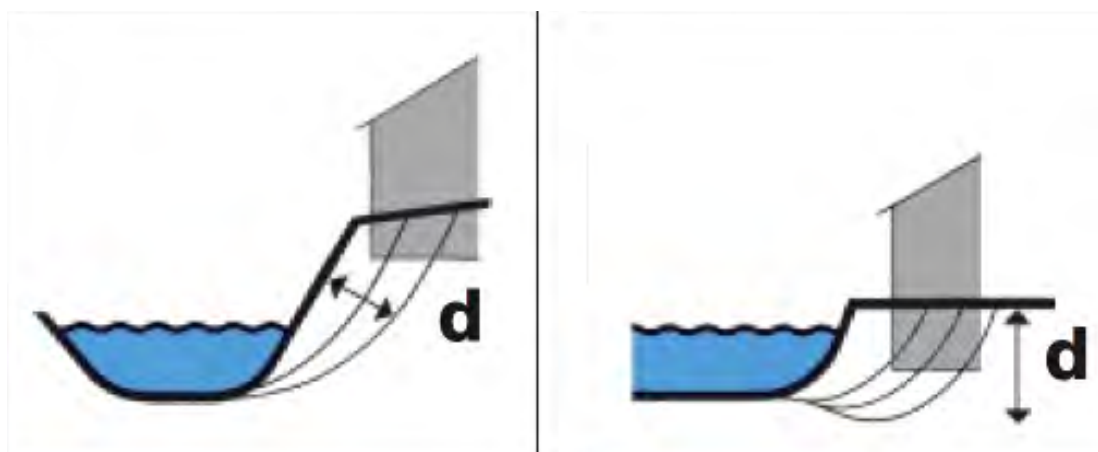


Abbildung 2: Unterscheidung zwischen Uferrutschung (links) und Verlagerung des Flussbettes (rechts).  
Quelle: Loat und Petrascheck 1997, S. 8

### 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.

## Empfehlung zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion an Fließgewässern

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.

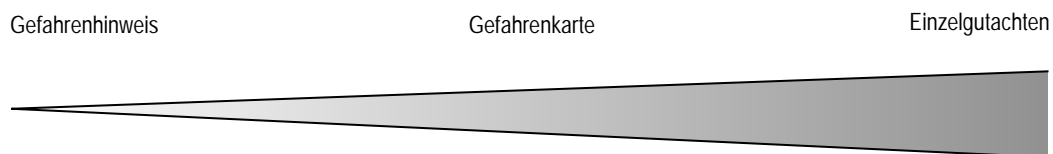


Abbildung 3: Bearbeitungstiefe in Abhängigkeit der Art des Gefahrengutachtens.

### 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 Lüttschine 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 Grundzenario 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.

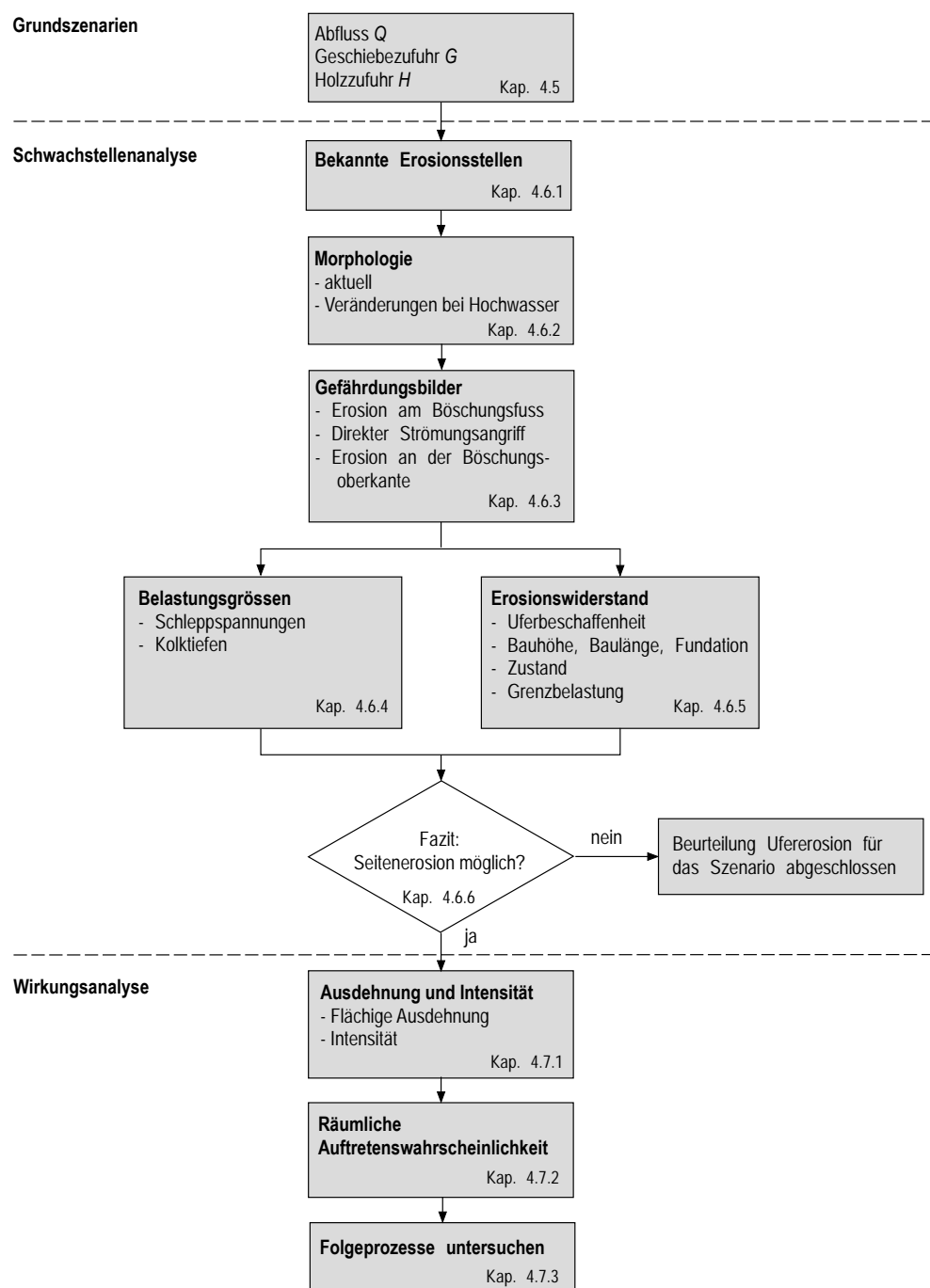


Abbildung 6: Generelles Vorgehen zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion.

## 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.

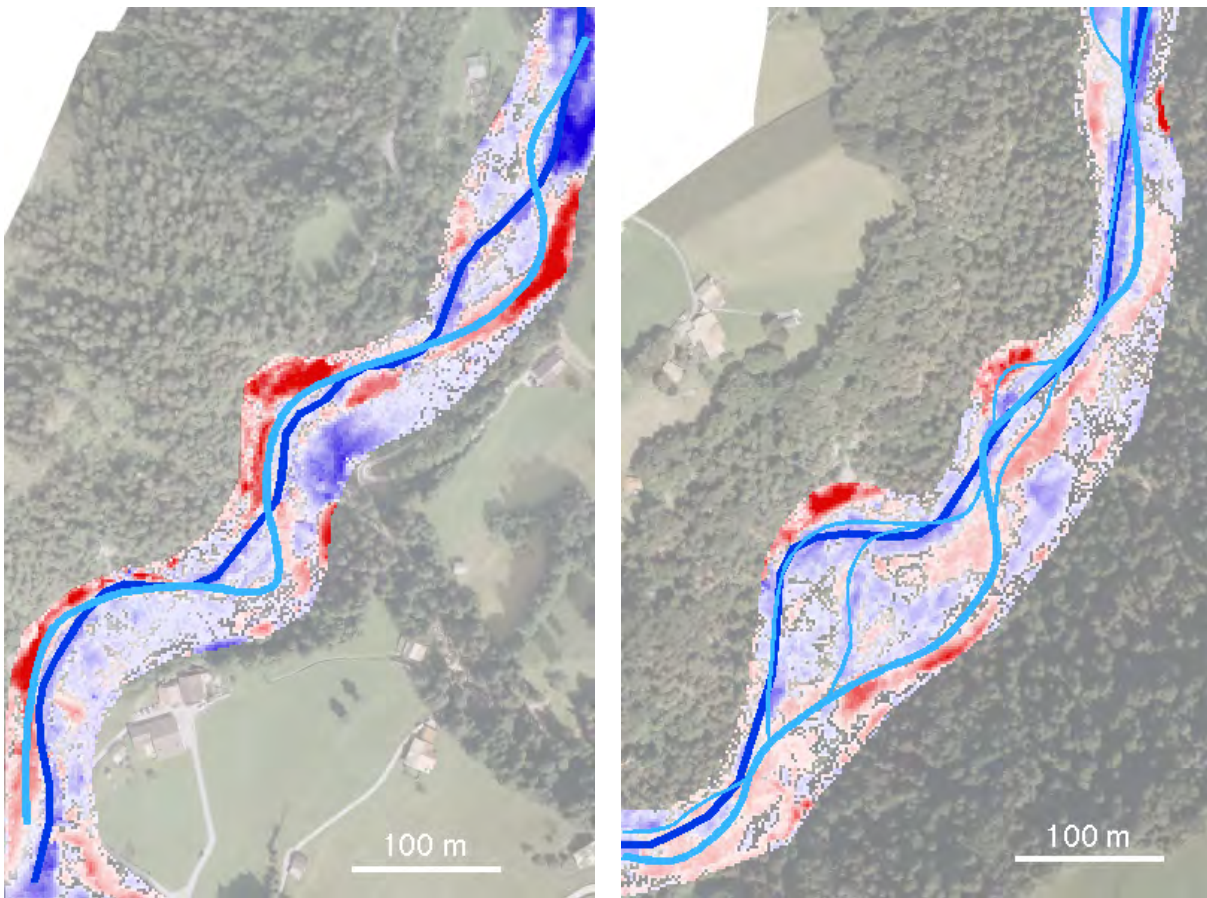


Abbildung 7: Seitenerosionsprozesse (rot) während des Hochwassers 2005 an der Chirel im Diemtigtal. Links in Aussenkurven bei Mäanderbildung, rechts beidseitig bei der Bildung eines verzweigten Gerinnes. Blaue Flächen: Ablagerung von Geschiebe, dunkelblaue Linie: Gerinne vor dem Hochwasserereignis, hellblaue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

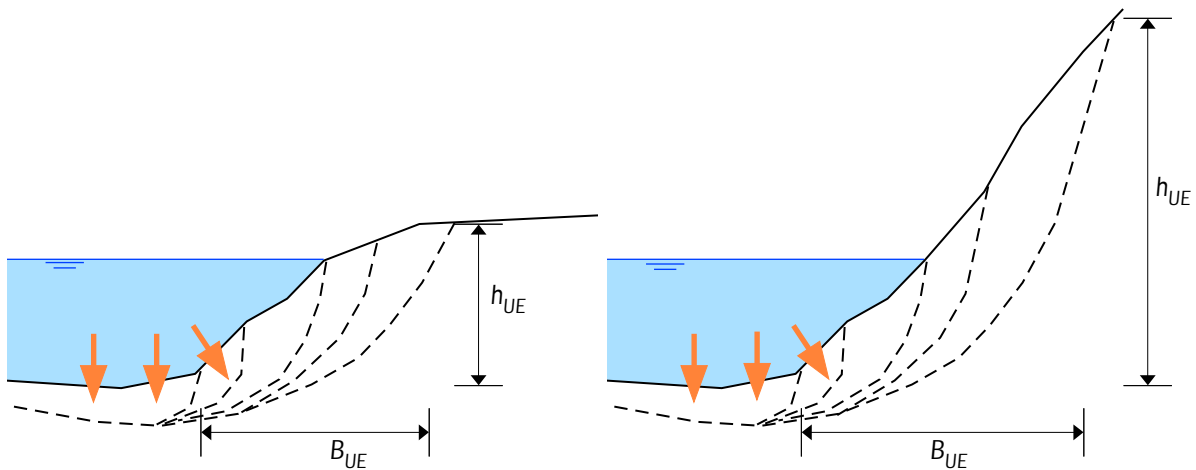


Abbildung 8: Sohlenerosion, Kolkbildung oder die Erosion des Böschungsfusses destabilisieren die Böschung (links bei niedriger, rechts bei hoher Böschung).

*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.

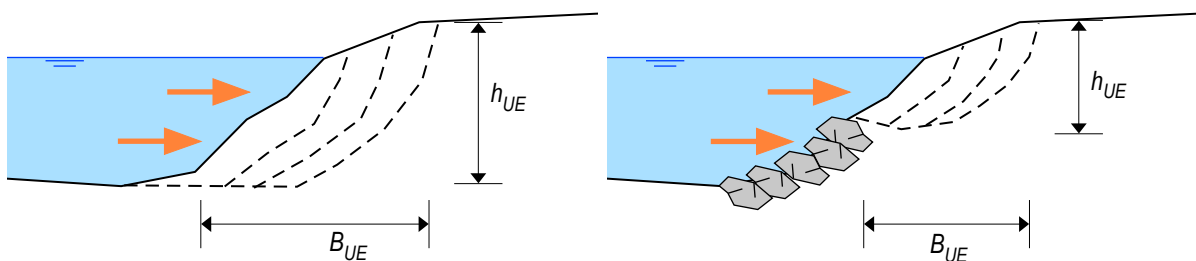


Abbildung 9: Seitenerosion durch direkten Strömungsangriff.



*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.

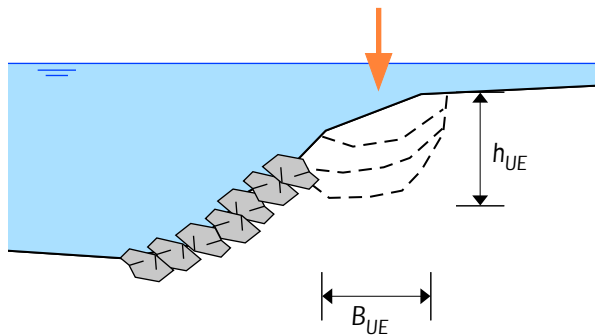


Abbildung 10: Erosion an der Böschungsoberkante.

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 Kolk-tiefen 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 Bänken<sup>1</sup>. 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 Kolk-tiefen gutachterlich schätzen. Kolk-tiefen aufgrund von Unregelmässigkeiten besonders beachten.  <i>erweiterte Beurteilung:</i> Sohlenerosion durch Geschiebe-transportrechnung bestimmen, Kolk-tiefen berechnen.	Sohlenerosion durch Geschiebe-transportrechnung bestimmen, Kolk-tiefen 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.

<sup>1</sup> 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, Böschungneigung, 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, Böschungneigung, 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, Böschungneigung, 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, Böschungneigung, etc.).  Grenzschleppspannung der Böschung berechnen.

Erosion an der Böschungsoberkante	Fels oder Lockermaterial mit Hilfe des GeoCover von Swisstopo abgrenzen.	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: Grenzschieppspannung für das Terrain oberhalb der Böschung berechnen.	Beschaffenheit und Zustand des Terrains an der Böschungsoberkante im Feld bestimmen und durch geotechnische Sondierung verifizieren (Fels, Kornzusammensetzung, Bewuchs, Neigung, etc.).  Grenzschieppspannung für das Terrain oberhalb der Böschung berechnen.
-----------------------------------	--	---	---

Bei Uferverbauungen mit Blockwürfen lässt sich der Erosionswiderstand z.B. mit dem Ansatz von Stevens & Simons (1971) bestimmen<sup>1</sup>. Für ingenieurbioologische Verbauungen sind Grenzwerte der Schieppspannung 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 Schieppspannung für ingenieurbioologische Bauweisen (Pasche 2000).

	Grenzwert Schieppspannung
Weidenfaschinen, Reisiglagen	60 N/m <sup>2</sup>
Weiden, Erlen	100-140 N/m <sup>2</sup>
junger bis gut verwachsener Rasen	50-80 N/m <sup>2</sup>

#### 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 Grundzenario 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 Grobbeurteilung 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 Grenzsleppspannung.	Eine Ufererosion wird angenommen, wenn die Schleppspannung auf der Böschung grösser ist als deren Grenzsleppspannung.
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 Grenzsleppspannung.	Eine Erosion an der Böschungsoberkante wird angenommen, wenn die Schleppspannung auf dem Terrain grösser ist als dessen Grenzsleppspannung.

## 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
<b>Gewässerabschnitt mit verzweigtem Gerinne</b>			
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.
<b>Gewässerabschnitt mit Mäanderbildung</b>			
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 Kartenmassstab 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.

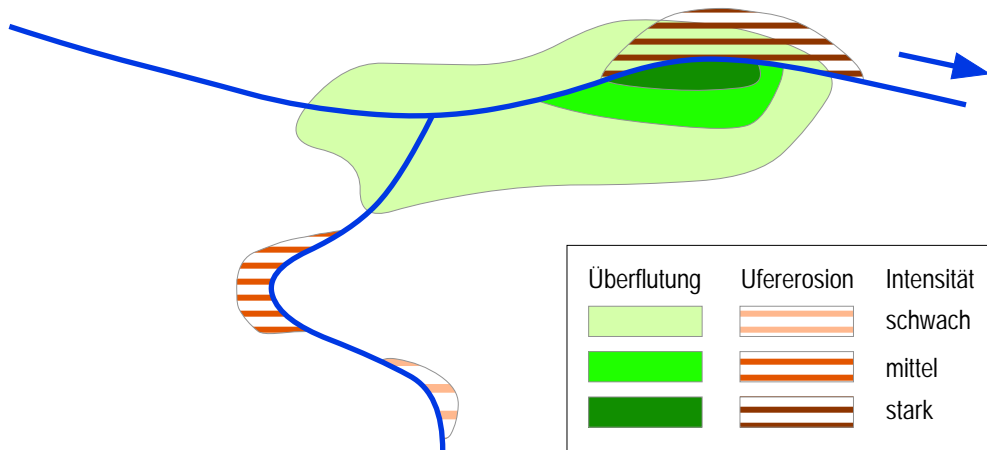


Abbildung 12: Mögliche Darstellung von potenziellen Erosionsflächen in einer Intensitätskarte Wasser nach Bundesstufen.

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

Fachleute Naturgefahren Schweiz FAN  
Kommission für Hochwasserschutz KOHS des  
Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes

Empfehlung der Beurteilung der Gefahr  
der Ufererosion an Fliessgewässern

Anwendungsbeispiele  
Weisse Lütchine und Ticino

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	15.10.2014	Annette Bachmann		
V2.0	06.02.2015	Annette Bachmann		
V3.0	18.02.2015	Lukas Hunzinger Annette Bachmann		
V4.0	23.02.2015	Lukas Hunzinger		
V4.1	24.02.2015	Lukas Hunzinger		
V5.0	06.03.2015	Lukas Hunzinger Annette Bachmann		
V6.0	04.05.2015	Lukas Hunzinger Annette Bachmann		
V6.1	05.10.15	Lukas Hunzinger		zur Veröffentlichung

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	3
2	BEISPIEL WEISSE LÜTSCHINE – STUFE GEFAHREN-KARTE	5
2.1	Untersuchter Abschnitt	5
2.2	Grundszenarien	9
2.3	Schwachstellenanalyse	11
2.3.1	Bekannte Erosionsstellen	11
2.3.2	Morphologie	12
2.3.3	Gefährdungsbilder	12
2.3.4	Belastungsgrössen	13
2.3.5	Erosionswiderstand	14
2.3.6	Fazit der Schwachstellenanalyse	15
2.4	Wirkungsanalyse	16
2.4.1	Ausdehnung und Intensität	16
2.4.2	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit	18
2.5	Unsicherheiten bei der Beurteilung	18
3	BEISPIEL TICINO – STUFE GEFAHRENKARTE ERWEITERTE BEARBEITUNG	19
3.1	Untersuchter Abschnitt	19
3.2	Grundszenarien	19
3.3	Schwachstellenanalyse	20
3.3.1	Bekannte Erosionsstellen	20
3.3.2	Morphologie	21
3.3.3	Gefährdungsbilder	22
3.3.4	Belastungsgrössen	22
3.3.5	Erosionswiderstand	23
3.3.6	Fazit der Schwachstellenanalyse	24
3.4	Wirkungsanalyse	24
3.4.1	Ausdehnung und Intensität	24
3.4.2	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit	24
3.5	Unsicherheiten bei der Beurteilung	25
4	LITERATUR	27



## 1 EINLEITUNG

Die vorliegende Dokumentation beschreibt die Anwendung der Empfehlung zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion anhand von zwei Beispielen. Am Beispiel der Weissen Lüttschine in Stechelberg wird die Beurteilung mit einer Bearbeitungstiefe auf Stufe einer standardmässigen Gefahrenkarte aufgezeigt. Bei diesem Beispiel wird das 30-jährliche Hochwasserszenario berücksichtigt, bei welchem keine übergeordneten morphologischen Veränderungen erwartet werden. An der Weissen Lüttschine werden zwei Gerinneabschnitte betrachtet, einer mit und einer ohne Ufersicherung.

Das erweiterte Vorgehen einer Beurteilung auf der Stufe Gefahrenkarte wird am Beispiel des Ticino bei Chiggiona illustriert. Bei diesem Beispiel werden ein 100- und 300-jährliches Hochwasserszenario betrachtet, bei denen die Ufer durch morphologische Änderungen während eines Hochwassers beansprucht werden können. Die Beurteilung wurde im Rahmen der Risikoanalyse Naturgefahren für die Nationalstrassen durchgeführt (Bundesamt für Strassen ASTRA, 2008) und wird hier in angepasster Form wiedergegeben.



## 2 BEISPIEL WEISSE LÜTSCHINE – STUFE GEFAHREN-KARTE

### 2.1 Untersucher Abschnitt

Der zu untersuchende Abschnitt der Weissen Lütschine liegt zwischen Matta und Lengwald bei Stechelberg direkt neben der Seilbahnstation Richtung Müren (siehe Abbildung 1). Die Weisse Lütschine weist auf diesem Abschnitt einen gestreckten Verlauf auf. Gemäss der Siegfriedkarte wies die Weisse Lütschine auch schon früher diese Gerinneform auf (siehe Abbildung 2).

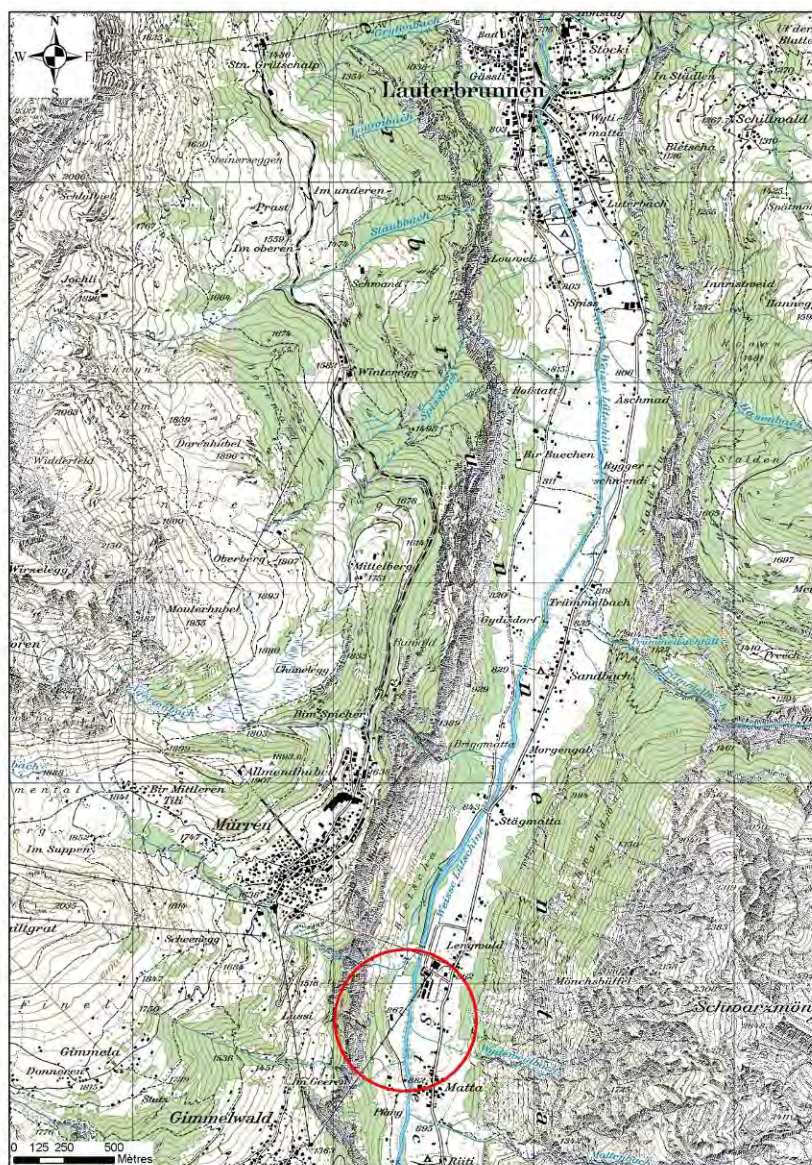


Abbildung 1: Untersucher Abschnitt an der Weissen Lütschine bei Stechelberg. Fließrichtung von Süd nach Nord.



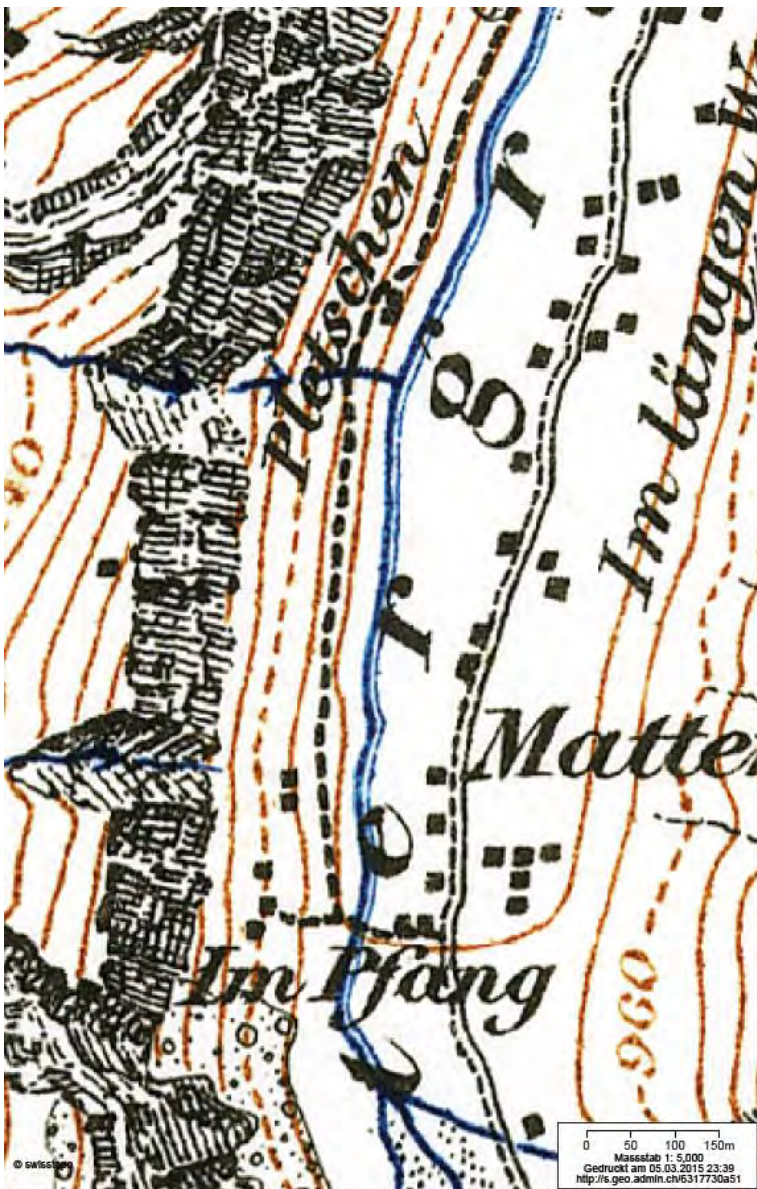


Abbildung 2: Siegfriedkarte der Weissen Lutschine bei Stechelberg.

Für die Gefahrenbeurteilung wurde das Gerinne in zwei homogene Abschnitte unterteilt, da das Gewässer auf dem nördlichen Teil 2 mit Blocksatz befestigt ist und im südlichen Teil 1 kaum eine Verbauung aufweist (siehe Abbildung 3). Für die Grundszenerien wurden die Daten der Gefahrenkarte Lutschine entnommen (OIK I 2013).

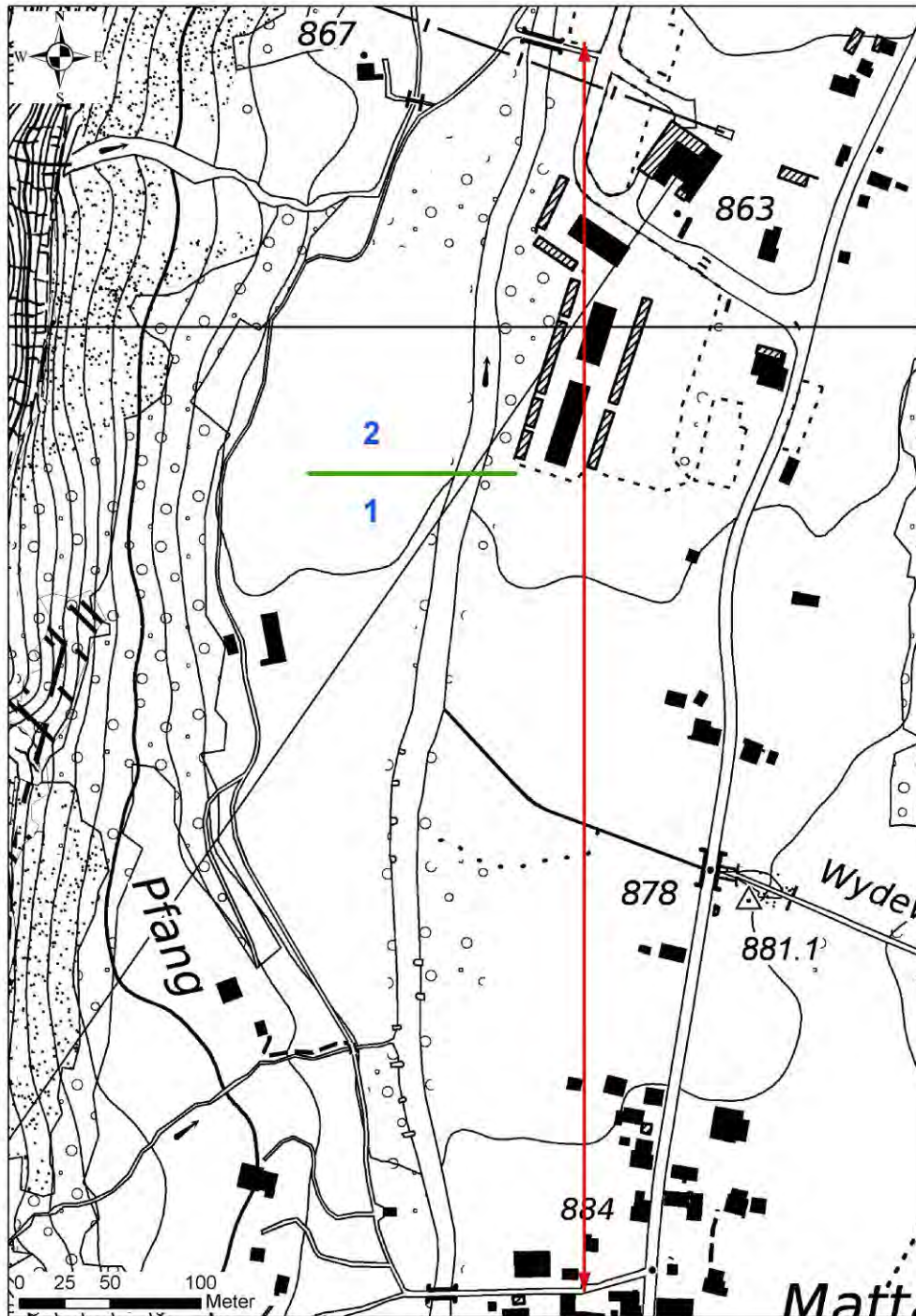


Abbildung 3: Untersucher Abschnitt der Weissen Lütschine

### *Abschnitt 1*

Der südliche Abschnitt 1 weist keine Verbauungen auf abgesehen von ein paar vereinzelt Buhnen mit grossem Abstand. Diese werden in der Beurteilung nicht berücksichtigt und das Ufer als unverbaut betrachtet. Die Weisse Lütschine hat auf diesem Abschnitt eine ungefähre Uferhöhe von 1-2m und

eine Breite von etwa 15m. Die Sohle ist unbefestigt. Am südlichen Ende des untersuchten Abschnittes befindet sich eine Brücke.



Abbildung 4: Zustand des Abschnittes 1

### *Abschnitt 2*

Das Ufer ist beidseits mit einem Blocksatz befestigt, aber die Sohle ist natürlich. Rechtsseitig befindet sich ein Damm zum Schutz der Talstation Richtung Mürren. Das Ufer weist auf diesem Abschnitt eine ungefähre Höhe von 2 m auf und die Gerinnebreite entspricht etwa 11m. Am nördlichen, flussabwärts gelegenen, Ende des untersuchten Abschnittes befindet sich eine Brücke.



Abbildung 5: Seitenerosion Hochwasser 2011 bei der Seilbahnstation Mürren



Abbildung 6: Nahaufnahme der Erosion und des Blocksatzes

## 2.2 Grundszenarien

### *Abfluss Q*

In der untenstehenden Tabelle 1 sind die verschiedenen Abflussszenarien für die Weisse Lüttschine aufgeführt. Im vorliegenden Beispiel wurde das 30-jährliche Szenario berücksichtigt und beurteilt.

Tabelle 1: Abflüsse nach Jährlichkeit in [m<sup>3</sup>/s] auf dem untersuchten Abschnitt (EZG: 78.7 km<sup>2</sup>) auf der Weissen Lüttschine.

	30* j	100 j	300 j	EHQ
Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	48*	70	82	98

\*: Berücksichtigte Jährlichkeit für das vorliegende Beispiel.

Bei häufigen Ereignissen kommt es auf der orografisch linken Seite des Abschnittes 2 auf der Weissen Lüttschine zu flächigen Überflutungen (siehe Intensitätskarte auf der Abbildung 7). Die Gerinnekapazität ist limitiert und die zu erwartenden Auflandungen führen zu Ausuferungen. Da der Uferbereich sehr flach ist und die Böschungen teilweise erhöht sind (Dämme), kann das Wasser nur schlecht in die Lüttschine zurückfliessen und fliesst deshalb parallel zum Gewässer Richtung Lauterbrunnen.

### *Geschiebe G*

Oberhalb Stechelberg ist das Geschiebeaufkommen so gross, dass der Abfluss der limitierende Faktor für den Geschiebetransport ist, d.h. es wird so viel Geschiebe transportiert, wie das Wasser Kapazität hat.

### *Holzzufuhr H*

Der Eintrag von Frischholz wird durch Seitenerosion und Uferrutschungen verursacht. Ansonsten ist wenig Totholz im Gerinne vorhanden.

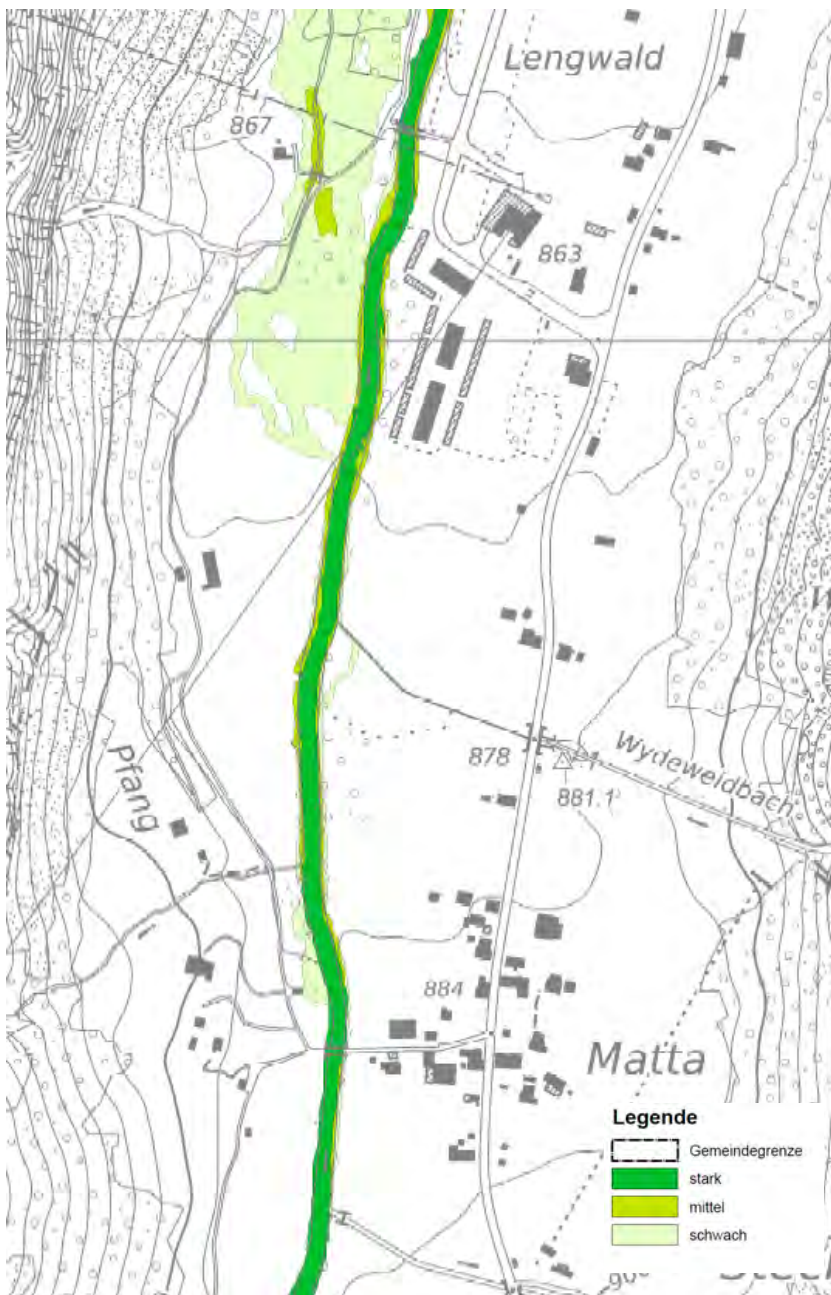


Abbildung 7: Intensitätskarte Überflutung für ein 30-jährliches Ereignis für den untersuchten Abschnitt (OIK I 2013)

## 2.3 Schwachstellenanalyse

### 2.3.1 Bekannte Erosionsstellen

	Vorgaben GK	Beurteilung Abschnitt 1	Beurteilung Abschnitt 2
Konsultation Ereigniskataster (EK)	Ja	Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE) 2005: Keine Seitenerosion Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE) 2011: - zwei Erosionsstellen beidseits unmittelbar nach der Brücke - rechtsufrige Erosion nach der Mündung des Wydeweidbaches Ereigniskataster (EK): Keine Angaben auf dem Geoportal.	Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE) 2005: Keine Seitenerosion Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE) 2011: - rechtsufrige Erosion bei der Seilbahnstation - rechtsufrige Erosion bei der Brücke unmittelbar nach der Seilbahnstation Ereigniskataster (EK): Keine Angaben auf dem Geoportal.
Konsultation der Karte der Phänomene, von Luftbildern oder Terrainmodellen	Ja	Es steht keine Karte der Phänomene zur Verfügung. Luftbilder geben keinen Hinweis, da zu klein und zu bewachsen.	Es steht keine Karte der Phänomene zur Verfügung. Luftbilder geben keinen Hinweis, da zu klein und zu bewachsen.
Alte Verbauungsprojekte	Ja	Keine Information	Keine Information
Begehung vor Ort	Ja	Oktober 2011 Bestätigung der Erosionsstellen der LLE 2011	Oktober 2011 Bestätigung der Erosionsstellen der LLE 2011
Befragung von lokalen Wissensträgern	Ja	Erfolgt:  Oberingenieurkreis I (OIK I) Bestätigung der Erosionsstellen der LLE 2005 und 2011 sowie EK.	Erfolgt:  Oberingenieurkreis I (OIK I) Bestätigung der Erosionsstellen der LLE 2005 und 2011 sowie EK

## 2.3.2 Morphologie

	Vorgaben GK	Beurteilung Abschnitt 1	Beurteilung Abschnitt 2
Aktuelle Gerinneform	Beurteilen im Feld oder mit Karte oder Luftbild.	Gerades Gerinne.	Gerades Gerinne.
Veränderung der Gerinneform bei Hochwasserszenario HQx	Beurteilen aufgrund von Abfluss- und Geschiebeszenarien. Potentielle Gerinneform aus historischen Karten.	Das Wasser ist mit Geschiebe gesättigt. Da das Gerinne nach dem Zusammenfluss abflacht, ist grundsätzlich mit Auflandungen zu rechnen und somit mit einer verzweigten Morphologie. Beim HQ30 kann allerdings davon ausgegangen werden, dass keine nennenswerten Auflandungen und somit auch keine Veränderung der Morphologie auftreten.	Das Wasser ist mit Geschiebe gesättigt. Da das Gerinne nach dem Zusammenfluss abflacht, ist grundsätzlich mit Auflandungen zu rechnen und somit mit einer verzweigten Morphologie. Beim HQ30 kann allerdings davon ausgegangen werden, dass keine nennenswerten Auflandungen und somit auch keine Veränderung der Morphologie auftreten.
Linienführung	Beurteilen im Feld oder mit Karte oder Luftbild.	Gerader Abschnitt.	Gerader Abschnitt.
Sohlenveränderung	Beurteilen aufgrund von Abfluss- und Geschiebeszenarien.	Keine relevante Veränderung der Sohlenlage. Es ist mit geringen Auflandungen zu rechnen.	Keine relevante Veränderung der Sohlenlage. Es ist mit geringen Auflandungen zu rechnen.
Unregelmässigkeiten im Querschnitt	Im Feld erheben	Brücke beim Abschnittsbeginn, ansonsten keine Unregelmässigkeiten.	Brücke unterhalb der Seilbahnstation, ansonsten keine Unregelmässigkeiten.

## 2.3.3 Gefährdungsbilder

	Vorgaben GK	Beurteilung Abschnitt 1	Beurteilung Abschnitt 2
Erosion am Böschungsfuss	Bei Sohlenerosion und bei Unregelmässigkeiten im Querschnitt betrachten. In Flusskrümmungen, bei Verzweigung und bei Mäanderbildung betrachten.	Keine relevante Sohlenerosion zu erwarten, da es sich eher um eine Auflandungsstrecke handelt. Lokale Kolkbildung bei der Brücke möglich. Keine übergeordneten morphologischen Prozesse.	Keine relevante Sohlenerosion zu erwarten, da es sich eher um eine Auflandungsstrecke handelt. Lokale Kolkbildung bei der Brücke möglich. Keine übergeordneten morphologischen Prozesse.
Direkter Strömungsangriff	Bei allen Gerinneformen und bei Unregelmässigkeiten im Querschnitt betrachten.	Mit direktem Strömungsangriff auf das Ufer ist zu rechnen. Da das Gerinne einen gestreckten Verlauf aufweist ist nicht mit lokalen Belastungsspitzen aufgrund der Linienführung zu rechnen. Unregelmässigkeiten bestehen bei der Brücke beim Abschnittsbeginn.	Mit direktem Strömungsangriff auf das Ufer ist zu rechnen. Da das Gerinne einen gestreckten Verlauf aufweist ist nicht mit lokalen Belastungsspitzen aufgrund der Linienführung zu rechnen. Unregelmässigkeiten bestehen bei der Brücke unterhalb der Seilbahnstation.
Erosion an der Böschungsoberkante	Bei Überströmen der Böschung und beim Rückfluss von austretendem Wasser betrachten.	Auf diesem Abschnitt ist mit keinen Ausuferungen gemäss IK30 zu rechnen. Es treten keine Erosionen durch rückfliessendes Wasser auf.	Linksufrig gibt es beim HQ30 Ausuferungen. Es handelt sich um schwache Intensitäten. Rückfliessendes Wasser tritt auf diesem Gerinneabschnitt nicht auf.

2.3.4 Belastungsgrößen

	Vorgaben GK	Beurteilung Abschnitt 1	Beurteilung Abschnitt 2
Erosion am Böschungsfuss	Ausmass von Sohlenerosion und Kolkiefen gutachterlich schätzen. Kolkiefen aufgrund von Unregelmässigkeiten besonders beachten.	Erhöhte Belastung auf Böschungsfuss eher unwahrscheinlich, da es eine Auflandungsstrecke ist und somit nicht mit einer Sohlenerosion zu rechnen ist. Die gutachterlich bestimmte Kolkiefe bei der Brücke beträgt ungefähr 1m.	Erhöhte Belastung auf Böschungsfuss eher unwahrscheinlich, da es eine Auflandungsstrecke ist und somit nicht mit einer Sohlenerosion zu rechnen ist. Die gutachterlich bestimmte Kolkiefe bei der Brücke beträgt ungefähr 1m.
Direkter Strömungsangriff	Belastung gutachterlich schätzen, Belastungsspitzen aufgrund von Unregelmässigkeiten besonders beachten.	Es ist von einer erhöhten hydraulischen Belastung auf das Ufer bei einem HQ30 auszugehen.	Es ist von einer erhöhten hydraulischen Belastung auf das Ufer bei einem HQ30 auszugehen.
Erosion an der Böschungsoberkante	In Abhängigkeit der Überflutung gutachterlich beurteilen (z.B. in Funktion der Intensität der Überflutung).	Keine Ausuferungen auf diesem Abschnitt gemäss IK30.	Linksufrig gibt es Ausuferungen. Es handelt sich allerdings um schwache Intensitäten.



2.3.5 Erosionswiderstand

	Vorgaben GK	Beurteilung Abschnitt 1	Beurteilung Abschnitt 2
Erosion am Böschungsfuss	<p>Beschaffenheit, Zustand und Dauerhaftigkeit des Böschungsfusses im Feld bestimmen (Fels, Verbauungsart, Blockgrößen, Kornzusammensetzung, Böschungsneigung, etc.).</p> <p>Foundationstiefe soweit ersichtlich im Feld abschätzen.</p> <p>Widerstand des Böschungsfusses qualitativ beschreiben.</p>	<p>Das Ufer und die Sohle weisen auf diesem Abschnitt keine Verbauung auf, sondern sind aus Lockermaterial aufgebaut. Das Ufermaterial besteht aus grobblockiger Ablagerung in feinkörniger Matrix. Die Lütschine verläuft in ihrem eigenen Alluvium. Es gibt keinen Fels auf diesem Abschnitt.</p> <p>Die Böschungsneigung beträgt ungefähr 1:2.</p> <p>Der Widerstand des Böschungsfusses ist allgemein und gegenüber Kolkbildung eher gering.</p>	<p>Das Ufer und der Böschungsfuss sind mit einem Blocksatz befestigt. Es handelt sich vorwiegend um kantige Steine mit einem Durchmesser von d ~ 0.5m. Wahrscheinlich ist der Blocksatz nicht fundiert.</p> <p>Die Ufersicherung ist intakt und in einem guten Zustand, da sie teilweise nach dem Hochwasser 2011 erneuert wurde.</p> <p>Die Böschungsneigung beträgt ungefähr 1:1.</p> <p>Der Widerstand des Böschungsfusses ist allgemein hoch. Der Widerstand gegenüber Kolkbildung und Sohlenerosion ist mangels Fundierung gering.</p>
Direkter Strömungsangriff	<p>Beschaffenheit Zustand und Dauerhaftigkeit der Böschung im Feld bestimmen (Fels, Verbauungsart, Bauhöhe der Ufersicherung, Blockgrößen, Kornzusammensetzung, Bewuchs, Böschungsneigung, etc.).</p> <p>Widerstand der Böschung gegenüber dem direkten Strömungsangriff qualitativ beschreiben.</p>	<p>Uferbeschaffenheit siehe „Erosion am Böschungsfuss“.</p> <p>Der Widerstand des Ufers gegenüber dem direkten Strömungsangriff ist gering.</p>	<p>Beschrieb Uferverbauung siehe „Erosion am Böschungsfuss“.</p> <p>Das Ufer ist auf der gesamten Höhe befestigt.</p> <p>Der Widerstand des Ufers gegenüber dem direkten Strömungsangriff ist hoch.</p>
Erosion an der Böschungsoberkante	<p>Beschaffenheit und Zustand des Terrains an der Böschungsoberkante im Feld bestimmen (Fels, Kornzusammensetzung, Bewuchs, Neigung, etc.).</p> <p>Widerstand des Terrains gegenüber der Beanspruchung durch die Strömung qualitativ beschreiben.</p>	<p>Das Terrain wird ab Uferoberkante landwirtschaftlich genutzt. Der obere Bereich des Ufers ist aus Lockermaterial und einer Gras überwachsenen Erdauflage zusammengesetzt.</p> <p>Bei einer Überflutung ist der Widerstand der Böschungsoberkante sehr gering.</p>	<p>Der Damm wurde mit Lockermaterial aufgeschüttet. Die Verdichtung ist nicht bekannt. Die Böschungsoberkante besteht aus einer mit Gras überwachsenen Erdauflage.</p> <p>Bei Überströmen der Uferverbauung ist der Widerstand gering.</p>

2.3.6 Fazit der Schwachstellenanalyse

	Vorgaben GK	Beurteilung Abschnitt 1	Beurteilung Abschnitt 2
Erosion am Böschungsfuss	<p>Bei unverbauten Ufern wird bei Sohlenerosion oder Kolkbildung immer eine Erosion des Ufers angenommen.</p> <p>Bei verbauten Ufern wird eine Ufererosion angenommen, wenn die Sohlenerosion oder der Kolk unter die Fundation der Ufersicherung reicht.</p>	<p>Auf diesem Abschnitt ist mit keiner Ufererosion am Böschungsfuss zu rechnen.</p> <p>Weder das Ufer noch der Böschungsfuss sind verbaut, aber da es sich um eine Auflandungsstrecke handelt, ist eher mit einer Anhebung der Sohle zu rechnen.</p> <p>Wegen der Brücke beim Abschnittsbeginn können sich lokale Kolke bilden. An dieser Stelle ist mit Erosion am Böschungsfuss zu rechnen.</p>	<p>Auf diesem Abschnitt ist mit keiner Ufererosion am Böschungsfuss zu rechnen. Der Blocksatz ist wahrscheinlich nicht fundiert, aber da es sich um eine Auflandungsstrecke handelt, ist eher mit einer Anhebung der Sohle zu rechnen.</p> <p>Wegen der Brücke am Abschnittsende können sich lokale Kolke bilden. An dieser Stelle ist mangels Fundationstiefe mit Erosion am Böschungsfuss zu rechnen.</p>
Direkter Strömungsangriff	<p>Es wird eine Ufererosion angenommen, wenn die Bedingungen nach Protect (Stufe Grobbeurteilung) nicht eingehalten sind.</p> <p>Bei unverbauten Ufern in Lockermaterial immer Erosion annehmen.</p>	<p>Auf diesem Abschnitt ist mit Ufererosion durch direkten Strömungsangriff zu rechnen. Das Ufer ist ungesichert und kann durch die hydraulische Belastung aufgerissen werden.</p> <p>Durch die Brücke beim Abschnittsbeginn können Querströmungen verursacht werden. An dieser Stelle ist mit Ufererosion durch direkten Strömungsangriff wegen Unregelmässigkeiten zu rechnen.</p>	<p>Auf diesem Abschnitt ist mit keiner Ufererosion durch direkten Strömungsangriff zu rechnen. Gemäss der Grobbeurteilung nach Protect weist die Uferverbauung eine ausreichende Länge und Höhe auf und ist intakt. Es werden keine übergeordneten morphologischen Gerinneprozesse erwartet. Dementsprechend ist die hydraulische Belastung des HQ30 zu gering, um den Blocksatz zu beschädigen.</p> <p>Die Uferverbauung weist einen ausreichenden Schutz gegenüber Querströmungen bei der Brücke am Abschnittsende auf. Deshalb ist mit keiner Ufererosion durch direkten Strömungsangriff wegen Unregelmässigkeiten zu rechnen.</p>
Erosion Böschungsoberkante	<p>In Abhängigkeit der Überflutung gutachterlich beurteilen (z.B. in Funktion der Intensität der Überflutung).</p>	<p>Auf diesem Abschnitt ist mit keiner Ufererosion an der Böschungsoberkante zu rechnen, weil es beim HQ30 nicht zu Ausuferungen kommt.</p>	<p>Auf diesem Abschnitt ist mit keiner Ufererosion an der Böschungsoberkante zu rechnen. Obschon es linksufrig zu Wasseraustritten kommen kann, sind die Intensitäten zu gering, um das Ufermaterial abzutragen. Rückfliessendes Wasser wird auf diesem Abschnitt nicht erwartet.</p>

## 2.4 Wirkungsanalyse

### 2.4.1 Ausdehnung und Intensität

#### *Abschnitt 1*

Auf dem Abschnitt 1 ist sowohl am linken als auch am rechten Ufer Seitenerosion entlang des gesamten Ufers möglich. Dies ist auf das Gefährdungsbild des direkten Strömungsangriffes zurückzuführen. Das Erosionsausmass wurde basierend auf frühere Ereignisse, aber insbesondere aus den Erfahrungswerten des Hochwassers 2011 abgeleitet. Beim Ereignis 2011 wurden auf diesem Abschnitt Erosionsbreiten von 3-4m gemessen. Da es sich dabei um ein HQ100 handelte, wurden für die vorliegende Gefahrenbeurteilung des HQ30 eine Erosionsbreite ( $B_{UE}$ ) von 2m ausgeschieden. Die Ausdehnung ist relativ gering, da es sich nicht um einen übergeordneten morphologischen Prozess, sondern um eine primäre Seitenerosion handelt. Die Erosionslänge ( $L_{UE}$ ) wird auf dem gesamten Abschnitt ausgeschieden, da der direkte Strömungsangriff überall ungefähr gleich gross ist.

Durch die Unregelmässigkeit bei der Brücke wird eine punktuelle Ufererosion verursacht, welche wegen der lokal erhöhten hydraulischen Belastung eine grössere Ausdehnung aufweisen kann. Direkt bei der Brücke wurde entsprechend eine Erosionsbreite ( $B_{UE}$ ) von 3-4m und eine Erosionslänge ( $L_{UE}$ ) von 20m ausgeschieden.

Die Uferhöhe auf dem Abschnitt 1 entspricht etwa 2m. Da es sich bei diesem Abschnitt eher um eine Auflandungsstrecke handelt, wird von einem Abtrag auf der gesamten Uferhöhe ausgegangen. Es handelt sich bei den ausgeschiedenen Erosionsstellen somit um eine mittlere Intensität, da die Erosionshöhe  $H_{UE}$  zwischen 0,5 bis 2m liegt.

#### *Abschnitt 2*

Auf dem Abschnitt 2 tritt keine kontinuierliche Ufererosion auf. Die Brücke am Abschnittsende verursacht eine Unregelmässigkeit im Abflussprofil, weshalb eine lokale Ufererosion auftreten kann. Die Erosionsbreite ( $B_{UE}$ ) und die Erosionslänge ( $L_{UE}$ ) werden ähnlich wie bei Abschnitt 1 basierend auf vergangenen Ereignissen bestimmt. Die Erosionsbreite ( $B_{UE}$ ) beträgt somit 3-4 m und die Erosionslänge ( $L_{UE}$ ) ungefähr 20 m. Die Ausdehnung der Ufererosion ist relativ gering, da es sich nicht um einen übergeordneten morphologischen Prozess handelt.

Die Uferhöhe vor der Brücke entspricht 2m. Es wird davon ausgegangen, dass das Ufer auf der gesamten Höhe abgetragen wird. Es handelt sich bei der Erosionsstelle vor der Brücke somit um eine mittlere Intensität, da die Erosionshöhe  $H_{UE}$  zwischen 0,5 bis 2m liegt.

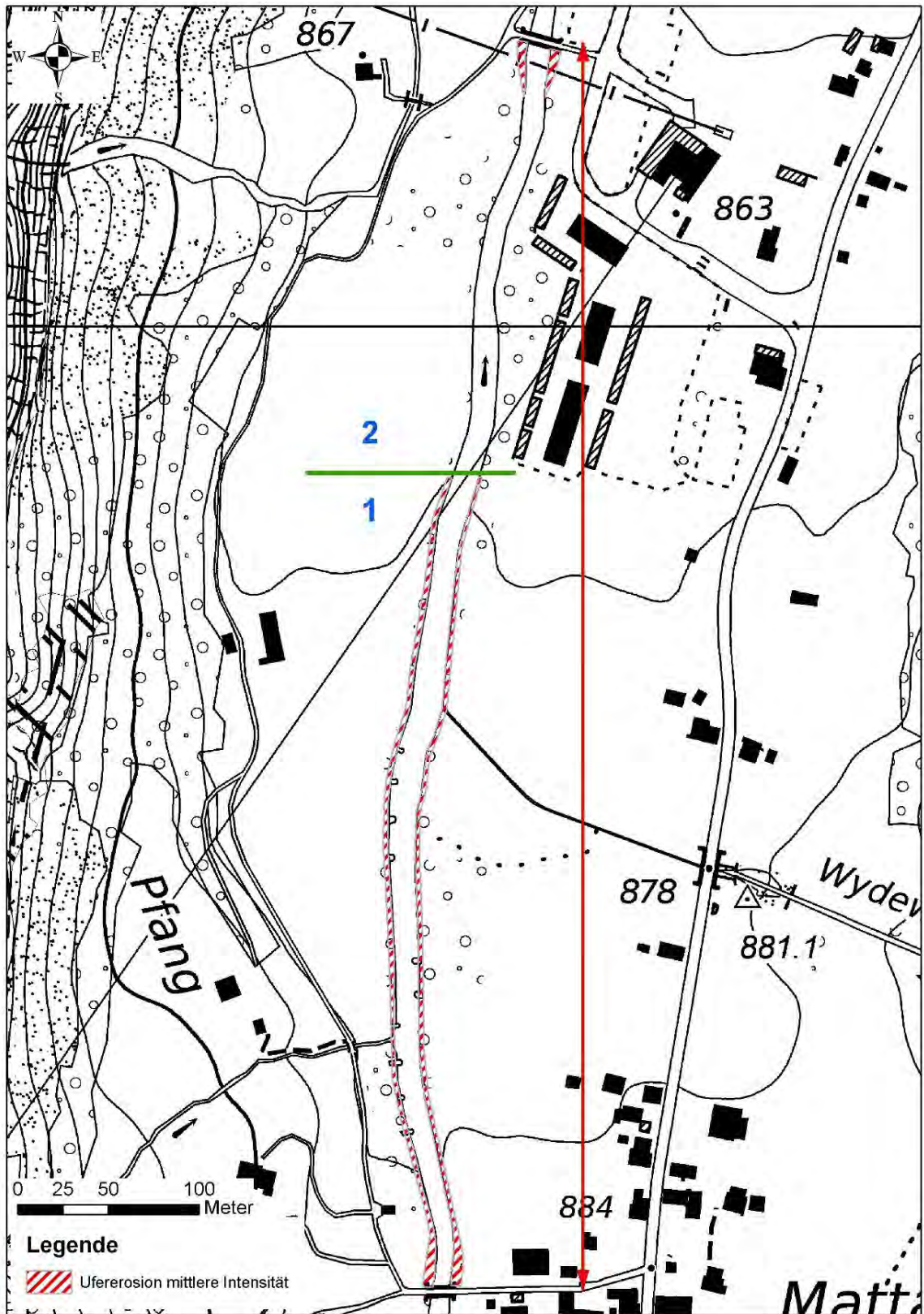


Abbildung 8: Intensitätskarte Ufererosion für ein 30-jährliches Ereignis an der Weissen Lutschine

#### 2.4.2 Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit

Die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit hängt insbesondere von der Gerinneform und der Linienführung ab. Die Weisse Lütschine weist auf der gesamten untersuchten Strecke einen geraden Gerinneverlauf auf.

Die Auftretenswahrscheinlichkeit auf dem Abschnitt 1 ist durch die homogene Linienführung entlang des gesamten Ufers gleich hoch. Da entlang der gesamten Strecke keine lokalen Belastungsspitzen wie bei Prallhängen auftreten, und da keine übergeordneten morphologischen Prozesse zu erwarten sind, wird die Auftretenswahrscheinlichkeit mit 0.1 als eher gering eingestuft. Nach der Brücke auf dem Abschnitt 1 ist eine Ufererosion wahrscheinlicher, wegen der Unregelmässigkeit im Abflussquerschnitt. Dieser Ufererosion wird dementsprechend eine Auftretenswahrscheinlichkeit von 0.5 zugeteilt. Auch beim Abschnitt 2 wird unmittelbar vor der Brücke eine Auftretenswahrscheinlichkeit von 0.5 ausgedehnt.

#### 2.5 Unsicherheiten bei der Beurteilung

Auf dieser Bearbeitungstiefe treten insbesondere bei der Wirkungsanalyse Unsicherheiten auf. Bei der Schwachstellenanalyse sind die Unsicherheiten tendenziell kleiner, weil man sich bei der Beurteilung auf die Erfahrung aus zwei wenige Jahre zurück liegende Hochwasserereignisse abstützen konnte (Ereignisse von 2005 und 2011). Aus den Beobachtungen dieser Ereignisse wurde auch die Ausdehnung möglicher Erosionsstellen abgeleitet. Je nach untersuchtem Grundszenario können die Erosionsbreiten und -längen aber von den Beobachtungen abweichen (siehe Kapitel 2.4.1).

### 3 BEISPIEL TICINO – STUFE GEFAHRENKARTE ERWEITERTE BEARBEITUNG

#### 3.1 Untersucher Abschnitt

In diesem Beispiel wird ein Abschnitt des Ticino bei Chiggiogna untersucht. Auf der rechten Seite des Ticino verläuft die Autobahn N2 parallel zum Fluss. Die Gefahrenbeurteilung konzentriert sich deshalb auf das rechte Ufer.



Abbildung 9: Ausschnitt aus der Landeskarte LK100 mit dem untersuchten Abschnitt des Ticino.



Abbildung 10: Ticino bei Chiggiogna (rechtes Teilgerinne), Blick in Fließrichtung.

#### 3.2 Grundszenarien

Die Grundszenarien sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Beurteilung konzentriert sich auf die Szenarien mit einer Wiederkehrdauer von 100 bzw. 300 Jahren. Auf dem untersuchten Abschnitt führen keine Brücken über den Ticino, deren Verkläuserung eine Seitenerosion provozieren könnte. Aus diesem Grund ist das Schwemmholzaufkommen nicht relevant.

Tabelle 2: Grundszenarien der Gefahrenbeurteilung am Ticino bei Chiggiogna.

	30 j	100 j	300 j
Abfluss	470 m <sup>3</sup> /s	540 m <sup>3</sup> /s	610 m <sup>3</sup> /s
Geschiebe	10-15'000 m <sup>3</sup>	30-40'000 m <sup>3</sup>	60-70'000 m <sup>3</sup>
Schwemmholz	für Beurteilung Ufererosion nicht relevant		

### 3.3 Schwachstellenanalyse

#### 3.3.1 Bekannte Erosionsstellen

	Vorgaben GK erweitert	Beurteilung
Konsultation Ereigniskataster (EK)	Ja	In der Dokumentation des Hochwassers von 1987 wird rund 3 km oberhalb des untersuchten Abschnittes eine Erosion auf einer Länge von rund 300m dokumentiert (Abbildung 11).
Konsultation der Karte der Phänomene, von Luftbildern oder Terrainmodellen	Ja	Es steht keine Karte der Phänomene zur Verfügung. Luftbilder geben keinen weiteren Hinweis auf Erosionsstellen.
Alte Verbauungsprojekte	Ja	Keine Information.
Begehung vor Ort	Ja	Begehung im Mai 2010: Keine Erosionsstellen sichtbar.
Befragung von lokalen Wissensträgern	Ja	Keine Information.



Abbildung 11: Ufererosion bei Faido. Aus Unwetterdokumentation 1987. Quelle: Ufficio corsi d'acqua (1987).

### 3.3.2 Morphologie

	Vorgaben GK erweitert	Beurteilung
Aktuelle Gerinneform	Beurteilen im Feld oder mit Karte oder Luftbild.	Verzweigtes Gerinne mit ein bis zwei Einzelgerinnen. Auf den Kiesbänken hat sich eine dichte Vegetation entwickelt. Das Gerinne hat auch schon 1911 eine ähnliche Form.
Veränderung der Gerinneform bei Hochwasserszenario HQx	Beurteilen aufgrund von Abfluss- und Geschiebeszenarien. Potenzielle Gerinneform aus historischen Karten.	Bei HQ <sub>100</sub> wird keine Veränderung der Gerinneform erwartet. Bei HQ <sub>300</sub> werden großräumige Ablagerungen auf der Sohle erwartet, welche zu neuen Gerinneverzweigungen führen.
Linienführung	Beurteilen im Feld oder mit Karte oder Luftbild.	Prallhangsituation aktuell und bei Gerinneverzweigung erwartet.
Sohlenveränderung	Sohlenveränderungen mit Geschiebetransportrechnungen bestimmen.	HQ <sub>100</sub> : Sohlenerosion wird wegen eines Geschiebedefizits erwartet. Eintiefung der Einzelgerinne um rund -1 m. HQ <sub>300</sub> : Auflandung wegen eines Geschiebeüberschusses.
Unregelmässigkeiten im Querschnitt	Im Feld erheben	keine Unregelmässigkeiten



Abbildung 12: Ausschnitt aus der Siegfriedkarte von 1911. Das Gerinne war damals schon verzweigt.



Abbildung 13: Luftbild des Ticino von 2008. Die Gerinneform ist ähnlich derjenigen von 1911.



### 3.3.3 Gefährdungsbilder

	Vorgaben GK erweitert	Beurteilung
Erosion am Böschungsfuss	Bei Sohlenerosion und bei Unregelmässigkeiten im Querschnitt betrachten. In Flusskrümmungen, bei Verzweigung und bei Mäanderbildung betrachten.	Erosion am Böschungsfuss ist ein massgebliches Gefährdungsbild bei $HQ_{100}$ (Sohlenerosion) und bei $HQ_{300}$ (Kolkbildung bei Verzweigung).
Direkter Strömungsangriff	Bei allen Gerinneformen und bei Unregelmässigkeiten im Querschnitt betrachten.	Der direkte Strömungsangriff ist ein massgebliches Gefährdungsbild bei allen betrachteten Szenarien.
Erosion an der Böschungsoberkante	Bei Überströmen der Böschung und beim Rückfluss von austretendem Wasser betrachten.	Auf diesem Abschnitt ist mit keinen Ausuferungen zu rechnen. Erosion an der Böschungsoberkante ist kein massgebliches Gefährdungsbild.

### 3.3.4 Belastungsgrössen

	Vorgaben GK erweitert	Beurteilung
Erosion am Böschungsfuss	Sohlenerosion durch Geschiebetransportrechnung bestimmen, Kolkiefen berechnen	$HQ_{100}$ : Sohlenerosion -1 m $HQ_{300}$ : Morphologische Kolke im verzweigten Gerinne -2.5 m bis -4.3 m (nach Zarn, 1997).
Direkter Strömungsangriff	Schleppspannung auf der Böschung berechnen, Belastungsspitzen bei Unregelmässigkeiten schätzen.	$HQ_{300}$ : Schleppspannung auf der Böschung $370N/m^2$ mit Abflussrechnung in einem 40 m breiten Gerinne bestimmt. Belastung an der Kurvenaussenseite +15%. Keine Unregelmässigkeiten → gleichmässige Belastung.
Erosion an der Böschungsoberkante	Schleppspannung auf dem Terrain berechnen.	Kein Gefährdungsbild, keine Belastung.

3.3.5 Erosionswiderstand

	Vorgaben GK erweitert	Beurteilung
Erosion am Böschungsfuss	Beschaffenheit, Zustand und Dauerhaftigkeit des Böschungsfusses im Feld bestimmen (Fels, Verbauungsart, Blockgrößen, Kornzusammensetzung, Böschungsneigung, etc.). Foundationstiefe von Verbauungen aus Projektplänen ermitteln. Grenzscherpspannung der Böschung an ihrem Fuss berechnen.	Das rechte Ufer ist mit einem Blocksatz mit Blöcken bis 4 t Gewicht gesichert. Neigung: 1:1 Foundationstiefe: -1.5 m (aus Projektplänen) Der Zustand der Ufersicherung ist gut (Abbildung 14). Berechnung der Grenzscherpspannung s. unten.
Direkter Strömungsangriff	Beschaffenheit Zustand und Dauerhaftigkeit der Böschung im Feld bestimmen (Fels, Verbauungsart, Bauhöhe der Ufersicherung, Blockgrößen, Kornzusammensetzung, Bewuchs, Böschungsneigung, etc.) Grenzscherpspannung der Böschung berechnen.	Das rechte Ufer ist mit einem Blocksatz mit Blöcken bis 4 t Gewicht gesichert. Neigung: 1:1 Grenzscherpspannung nach Stevens & Simons: $390\text{N/m}^2$ mit Teilsicherheitsbeiwert 1.1 Der Zustand der Ufersicherung ist gut (Abbildung 14). Hinter der Ufersicherung wird anstehendes Alluvium vermutet, im Bereich des Schwemmkegels der Gribbiasca (Zufluss von rechts) wird grobblockiges Material vermutet. Der Damm der Autobahn ist wahrscheinlich aus leicht erodierbarem Material aufgebaut.
Erosion an der Böschungsoberkante	Beschaffenheit und Zustand des Terrains an der Böschungsoberkante im Feld bestimmen (Fels, Kornzusammensetzung, Bewuchs, Neigung, etc.). Grenzscherpspannung für das Terrain oberhalb der Böschung berechnen.	Kein Gefährdungsbild, der Widerstand wird nicht bestimmt.



Abbildung 14: Blocksatz am rechten Ufer des Ticino.

### 3.3.6 Fazit der Schwachstellenanalyse

	Vorgaben GK erweitert	Beurteilung
Erosion am Böschungsfuss	Bei verbauten Ufern wird eine Ufererosion angenommen, wenn die Sohlenerosion oder der Kolk unter die Foundation der Ufersicherung reicht. Bei verbauten Ufern wird eine Ufererosion angenommen, wenn die Sohlenerosion oder der Kolk unter die Foundation der Ufersicherung reicht.	$HQ_{100}$ : Sohlenerosion $-1.0\text{ m} > \text{Foundationstiefe } -1.5\text{ m} \rightarrow$ kein Versagen. $HQ_{300}$ : Kolktiefe $-2.5\text{ m} < \text{Foundationstiefe } -1.5\text{ m} \rightarrow$ Versagen der Ufersicherung und Erosion
Direkter Strömungsangriff	Eine Ufererosion wird angenommen, wenn die Schleppspannung auf der Böschung grösser ist als deren Grenzschleppspannung.	$HQ_{300}$ : Belastung $370\text{ N/m}^2 < \text{Grenzschleppspannung } 390\text{ N/m}^2 \rightarrow$ kein Versagen
Erosion an der Böschungsoberkante	Eine Erosion an der Böschungsoberkante wird angenommen, wenn die Schleppspannung auf dem Terrain grösser ist als dessen Grenzschleppspannung.	Kein Gefährdungsbild, keine Erosion an der Böschungsoberkante.

## 3.4 Wirkungsanalyse

### 3.4.1 Ausdehnung und Intensität

Bei  $HQ_{300}$  kann sich ein neues verzweigtes Gerinne bilden. Dieses kann sich über den gesamten Bereich des ehemaligen Auenwaldes in der Talebene des Ticino ausdehnen. Die von Erosion gefährdete Fläche wird durch die Talflanke bzw. den Schwemmkegel der Gribbiasca begrenzt (Abbildung 15).

Die Böschung hat eine Höhe von 2.5 m bis 3 m. Die Intensität der Erosion ist daher hoch ( $> 2\text{m}$ ).

### 3.4.2 Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit

Für die Ufererosion entlang des verzweigten Gerinnes am Ticino wird eine räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit von 0.25 veranschlagt.

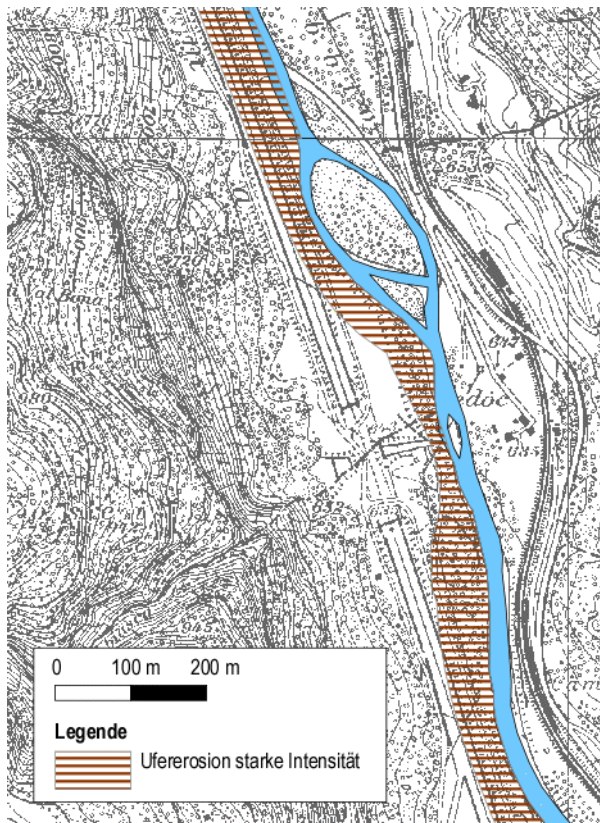


Abbildung 15: Intensitätskarte Ufererosion am Ticino für  $HQ_{300}$ .

### 3.5 Unsicherheiten bei der Beurteilung

Die Unsicherheiten in der Beurteilung der Gefahr der Ufererosion am Ticino und ihre Auswirkung auf das Ergebnis sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Thema	Unsicherheit	Auswirkung auf die Beurteilung
Veränderung der Gerinneform bei Hochwasserszenario $HQ_x$	Ein Szenario der Bildung eines verzweigten Gerinnes ist denkbar, seine Wahrscheinlichkeit ist aber schwierig abzuschätzen.	Die Jährlichkeit der in Abbildung 15 dargestellten Gefahrenfläche kann über- oder unterschätzt sein.
Sohlenveränderung und Gefährdungsbild Erosion am Böschungsfuss	Die Stabilität der Deckschicht und damit das Ausmass der Sohlenerosion bei einem Hochwasser $HQ_{100}$ mit wenig Geschiebe ist schwierig abzuschätzen.	Erodiert die Sohle während eines Ereignisses $HQ_{100}$ deutlich mehr als 1 m kann die Ufersicherung ihren Widerstand verlieren. In diesem Fall müsste auch bei $HQ_{100}$ eine Erosionsgefahr angenommen werden.
Fazit Schwachstellenanalyse bei direktem Strömungsangriff	Der Erosionswiderstand ist nur wenig höher als die berechnete Belastung bei $HQ_{300}$ . Bei der Berechnung des Widerstandes wurde eine Teilsicherheitsbeiwert berücksichtigt.	Müsste auch ein Versagen der Ufersicherung durch direkten Strömungsangriff angenommen werden, hätte das keine Auswirkung auf die ausgewiesene Gefahrenfläche, weil für $HQ_{300}$ bereits ein Versagen durch Unterkolkung postuliert wird.



## 4 LITERATUR

Bachmann A. 2012. Ausmass und Auftreten von Seitenerosionen bei Hochwasserereignissen.

Bundesamt für Strassen ASTRA (2012): Gefahrenbeurteilung und Risikoanalyse betreffend Naturgefahren auf Nationalstrassen. Los 03 - Leventina. Überprüfen der prioritären Naturgefahrenstellen in Ergänzung zur Phase II (Risikobestimmung). Technischer Bericht. *IMPULS AG, geo7 AG, Flussbau AG SAH, Kellerhals + Haefeli AG*, Thun, 30.09.2012.

Geoportal des Kantons Bern. 2014. Bau- Verkehrs- und Energiedirektion. [http://www.map.apps.be.ch/pub/synserver?project=a42pub\\_ngkat&language=de](http://www.map.apps.be.ch/pub/synserver?project=a42pub_ngkat&language=de)

Oberingenieurkreis I (OIK I). 2007. Hochwasser 2005 – Lokale Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE) Lüttschine. *Dr. Martin Jäggi, Dr. Felix Naef, Dr. Christoph Lehmann, Mätzener & Wyss, Geotest, Bettschen + Blumer*, Mai 2007.

Oberingenieurkreis I (OIK I). 2014. Hochwasser 2011 – Lokale, lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE) Lüttschine. Entwurf vom 4. Juli 2014. *Flussbau AG SAH, Geotest AG, geo7 AG, Mätzener & Wyss Bauingenieure AG, Porta West G, Dr. C. Lehmann, Dr. F. Näf*, Juli 2014.

Oberingenieurkreis I (OIK I). 2013. Technischer Bericht. Gefahrenkarte Lüttschine. *Ingenieure Bart AG*, Januar 2013.

Ufficio corsi d'acqua 1987: Alluvione del 25.8.1987. Documentazione fotografica zone Valle Bedretto, Valle Leventina, Valle Maggia. *SEA, Bellinzona*, 31.8.1987

Arbeitshilfe Feldbegehung Schwachstellenanalyse für Ufererosion (Allgemeiner Teil):

Routen Nr. / Gewässername / Gefahrenquelle: .....

Gewässerabschnitt: .....

Themen	Aufnahme/Beurteilung	Beschrieb/Ergänzungen/Bemerkungen:
<p>Grundlagen Kontrolle/Verifizierung der vorhandenen Grundlagen wie Kartenmaterial, Angaben aus Projekten, Ereigniskataster etc.</p>	<p><input type="checkbox"/> alles aktuell</p>	<p>Ergänzungen: .....</p>
<p>Grundszenarien Plausibilitätsprüfung/Verifizierung der berechneten oder angenommenen Grundszenarien (Kap. 3.5)</p>	<p><input type="checkbox"/> Hochwasserabflüsse (HQ 30/100/300/ EHQ) sind z.B. aufgrund bestehendem Gerinne plausibel <input type="checkbox"/> Geschiebezufuhr G plausibel <input type="checkbox"/> Holzzufuhr H plausibel</p>	<p>Bemerkungen: .....</p>
<p>Bekannte Erosionsstellen (sichtbar) (Kap. 3.6.1)</p>	<p><input type="checkbox"/> Erosion am Böschungsfuss, Kolk oder Sohlenerosion sichtbar <input type="checkbox"/> Direkter Strömungsangriff sichtbar (Primäre Seitenerosion) <input type="checkbox"/> Erosion an der Böschungsoberkante sichtbar</p>	<p>Lage und Ausdehnung (Station, Uferseite, Länge, Breite, Höhe oder Eintrag in Aufnahmeplan): ..... ..... Bemerkungen: .....</p>
<p>Morphologie (Kap. 3.6.2)</p>	<p><input type="checkbox"/> aktuell: ..... <input type="checkbox"/> Linienführung: .....</p>	<p>Bemerkungen: .....</p>

Arbeitshilfe Feldbegehung Schwachstellenanalyse für Ufererosion (Detail):

Routen Nr. / Gewässername / Gefahrenquelle: .....

Gewässerabschnitt: .....

Uferseite: orographisch links , rechts

Lokale Unstetigkeiten (Diskontinuität) in der Sohle oder an den Ufern (Kap. 3.6.3)	<input type="checkbox"/> Hindernisse an Sohle vorhanden <input type="checkbox"/> Hindernisse am Ufer vorhanden <input type="checkbox"/> Flussbiegungen <input type="checkbox"/> Kiesbänke in Flussmitte	Lage und Beschrieb (Station, Uferseite, Länge, Breite, Höhe oder Eintrag in Aufnahmeplan): .....
Potentielle Erosionsprozesse (Kap. 3.6.3)	<input type="checkbox"/> Erosion am Böschungsfuss, Kolk oder Sohlenerosion möglich <input type="checkbox"/> Direkter Strömungsangriff möglich (Primäre Seitenerosion) <input type="checkbox"/> Erosion an der Böschungsoberkante möglich	Lage und Ausdehnung (Station, Länge, Breite, Höhe oder Eintrag in Aufnahmeplan): ..... Bemerkungen: .....
Verbauung ja/nein (Kap. 3.6.4)	<input type="checkbox"/> Nicht verbaut (→ Beurteilung der Uferbeschaffenheit)	<input type="checkbox"/> Lockermaterial (-> Beurteilung der Uferverbauung)
Beurteilung Uferbeschaffenheit (Kap. 3.6.4)	<input type="checkbox"/> Fels (keine Ufererosion möglich) <input type="checkbox"/> Lockermaterial (Ufererosion möglich) Beschaffenheit: ..... Böschungsneigung: ..... Widerstand: ..... (Schätzung oder qualitativ)	Bemerkungen: .....
Beurteilung Uferverbauung (mind. Aufnahmen für Grobbeurteilung nach Protect) (Kap. 3.6.4)	<input type="checkbox"/> nötige Baulänge vorhanden (m .....), ansonsten eine Unstetigkeit <input type="checkbox"/> Bauhöhe auf ganze Uferhöhe vorhanden <input type="checkbox"/> Bauhöhe nur teils vorhanden (→ Beschrieb) <input type="checkbox"/> Böschungsneigung: ..... <input type="checkbox"/> Foundationstiefe: ..... <input type="checkbox"/> baulicher Zustand in Ordnung	Beschrieb (Art, evtl. Bauhöhe in m ab Sohle etc.): ..... ..... ..... Bemerkungen: .....