Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT
Plate-forme nationale «Dangers naturels»
Piattaforma nazionale «Pericoli naturali»
National Platform for Natural Hazards

Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung

TEIL F: FLÜSSE

Lukas Hunzinger, Benno Zarn, Gian Reto Bezzola



Ufersicherung an der Aare in der Stadt Bern (Flussbau AG SAH)

Dieser Teilbericht ist integraler Bestandteil des Gesamtberichtes bestehend aus:
Teil A: Grundlagen und generelles Vorgehen
Teil B: Lawinen
Teil C: Sturzprozesse
Teil D: Rutschungen
Teil E: Wildbäche
Teil F: Flüsse

Inhalt

1. Charakteristik der Prozesse 1
2. Übersicht Schutzmassnahmen 2
3. Massnahme "Gewährleistung der Abflusskapazität des Gerinnes" 4
   - 3.1 Beschreibung des Gerinnes 4
   - 3.2 Grobbeurteilung 5
   - 3.3 Gerinne- und Massnahmenbeurteilung 5
     - 3.3.1 Vorgehen 5
     - 3.3.2 Grundlagen Prozesse 5
     - 3.3.3 Grundlagen Gerinne und Massnahme 6
     - 3.3.4 Gefährdungsbilder 7
     - 3.3.5 Einwirkung 8
     - 3.3.6 Widerstand 8
     - 3.3.7 Tragsicherheit, Kapazität/Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit 9
     - 3.3.8 Zuverlässigkeit 12
   - 3.4 Wirkungsbeurteilung 13
     - 3.4.1 Wirkung des Gerinnes 13
     - 3.4.2 Wirkung des Systems 14
   - 3.5 Bearbeitungsmethoden 16
     - 3.5.1 Methoden bei hoher Bearbeitungstiefe 16
     - 3.5.2 Methoden bei geringer Bearbeitungstiefe 17
4. Massnahme "Stabilisierung des Ufers" 18
   - 4.1 Beschreibung der Massnahme 18
   - 4.2 Grobbeurteilung 18
   - 4.3 Massnahmenbeurteilung 19
     - 4.3.1 Grundlagen Prozesse 19
     - 4.3.2 Grundlagen Gerinne und Massnahmen 19
     - 4.3.3 Gefährdungsbilder 19
     - 4.3.4 Einwirkung 20
     - 4.3.5 Widerstand 20
     - 4.3.6 Tragsicherheit und Dauerhaftigkeit 21
     - 4.3.7 Zuverlässigkeit 21
   - 4.4 Wirkungsbeurteilung 22
5. Fallbeispiel Aare Meiringen-Brienz: Gerinne mit Hochwasserschutzdamm 23
   - 5.1 Einleitung 23
   - 5.2 Betrachtungsebenen 23

5.3 Einhaltung der Grundsätze 23
5.4 Grobbeurteilung (Schritt 1) 24
5.5 Gerinne- und Massnahmenbeurteilung (Schritt 2) 26
5.5.1 Grundlagen Prozesse 26
5.5.2 Grundlagen Gerinne und Massnahme 27
5.5.3 Gefährdungsbilder 27
5.5.4 Einwirkung 29
5.5.5 Widerstand 29
5.5.6 Tragsicherheit, Kapazität/Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit 30
5.5.7 Zuverlässigkeit 31
5.6 Wirkungsbeurteilung 32
5.6.1 Wirkung des Gerinnes, Abschnitt B 32
5.6.2 Wirkung des Systems 33
6. Fallbeispiel Ufersicherung 35
Literatur 43

1. Charakteristik der Prozesse

In der Schweiz ist die Mehrzahl der Gewässer verbaut. An vielen Gewässern sind seit historischen Zeiten Massnahmen zum Schutz vor Hochwasser umgesetzt worden. Dies gilt in besonderem Masse für Gewässer und Gewässerabschnitte in Siedlungsgebieten, also in jenen Gebieten, für welche Gefahrenbeurteilungen prioritär durchgeführt werden, aber auch für deren Zuflüsse ausserhalb des Siedlungsgebietes. Eine Beurteilung der Hochwassergefahr schliesst damit immer eine Beurteilung von Massnahmen mit ein. Die Unterscheidung zwischen einer Gefahrenbeurteilung mit und ohne Massnahme ist für die allermeisten Gewässer – mit Ausnahme von einigen Wildbächen – überflüssig.

Abgrenzung

Die Ausführungen in diesem Berichtsteil beziehen sich auf die Gefahrenbeurteilung von Fliessgewässern mit einem Längengefälle von 5 % und weniger sowie auf Gewässer, welche in der LK25 mit einer blauen Signatur verzeichnet sind. Steilere Gewässer werden im Teilbericht Wildbäche behandelt.

System – Gerinne – Einzelmassnahme

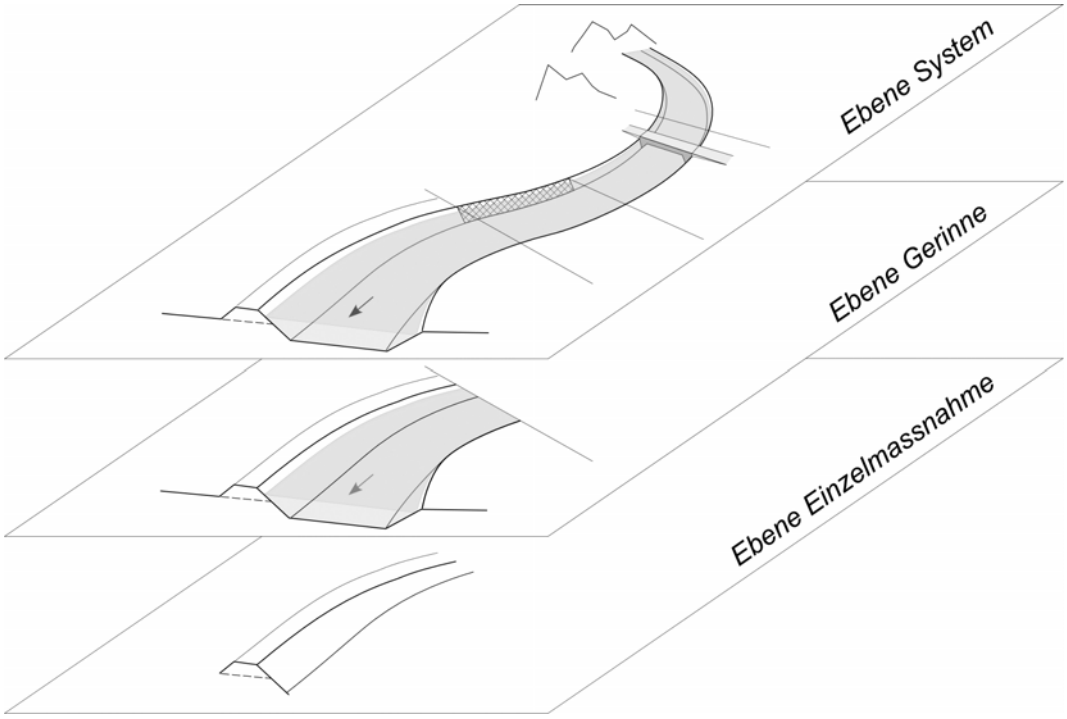


Abb. 1.1: Betrachtungsebenen System, Gerinne und Einzelmassnahme. Die gefahrenrelevante Wirkung geht unmittelbar von den Prozessen in der Ebene Gerinne aus.

Fliessgewässer sind als Teil eines *Systems* von Einzuggebiet, Gerinne und Überflutungsgebieten zu betrachten, welches in seiner Gesamtheit die hydrologischen, hydraulischen und flussmorphologischen Prozesse bestimmt. Das *Gerinne*, als Teil des Systems, wiederum wirkt als natürlich geformtes oder als durch *Einzelmassnahmen* anthropogen gestaltetes Gerinne (Abb. 1.1).

Zwischen den Prozessen in System, Gerinne und Einzelmassnahme besteht eine intensive Wechselwirkung. Eine Gefahrenbeurteilung schliesst somit die Betrachtung von allen drei Ebenen mit ein. Die massgebende Wirkung (Überflutung, Übersarung und Ufererosion) folgt unmittelbar aus den Prozessen auf der Ebene des Gerinnes. Deshalb liegt das Schwergewicht für eine Beurteilung von Massnahmen auf der mittleren Betrachtungsebene.

2. Übersicht Schutzmassnahmen

Flussbauliche Massnahmen lassen sich aufgrund ihrer primären Zielsetzung in zwei Hauptgruppen unterteilen: Massnahmen, welche die Kontinuität von Wasser, Sedimenten und Schwimmstoffen beeinflussen und Massnahmen, welche das Gerinne in der Vertikalen (Sohle) und der Horizontalen (Ufer) stabilisieren (Tab. 2.1).

Tab. 2.1: Systematisierung flussbaulicher Massnahmen.

Massnahmen zur Steuerung der Kontinuität von Wasser, Sedimenten und Schwimmstoffen		
Massnahme	Einzelmassnahme	Berücksichtigung bei der Gefahrenbeurteilung
Rückhalt von Wasser	Erhalten von natürlichen Rückhalteräumen	ja
	Hochwasserrückhaltebecken	ja
	Poldersystem (Rückhaltebecken im Nebenschluss)	ja
Rückhalt von Sedimenten	Geschiebesammler und Abschlussbauwerk	ja
	Bewirtschaftungsstrecke	bedingt, wenn ein Bewirtschaftungskonzept besteht und keine Intervention bei Hochwasser vorgesehen ist
	Flussaufweitung	ja
	forstliche Massnahmen im Einzugsgebiet	bedingt, wenn der Rückhalt quantifizierbar ist
Rückhalt von Schwimmstoffen	forstliche Massnahmen im Einzugsgebiet	bedingt, wenn der Rückhalt quantifizierbar ist
	Holzrechen u. ä.	ja
	Eiswehr	ja
Gewährleisten der Abflusskapazität	Hochwasserschutzdamm, -mauer	ja
	Gerinneverbreiterung	ja
	Sohlenabtiefung	ja
	Ufergestaltung	ja
	Brücke mit Druckabfluss	ja
Gewährleisten der Transportkapazität für Sedimente	Hochwasserschutzdamm, -mauer	ja
	Sohlenpflästerung	ja
	Gerinneverengung	ja
	Ufergestaltung	ja
	Brücke mit Druckabfluss	ja
Gewährleisten der Transportkapazität für Schwimmstoffe	Brückenverschalung	ja
Um- und Ableiten von Wasser	Hochwasserentlastung	ja
	Umleitstollen und Umleitgerinne	bedingt, wenn ohne Eingriff während Ereignis
Um- und Ableiten von Sedimenten	Umleitstollen und Umleitgerinne	bedingt, wenn ohne Eingriff während Ereignis

Massnahmen zur Stabilisierung des Gerinnes		
Massnahme	Einzelmassnahme	Berücksichtigung bei der Gefahrenbeurteilung
Stabilisierung der Sohlenlage	Schwelle	ja
	Rampe	ja
	Sohlenpflästerung	ja
	Anreicherung der Deckschicht	bedingt, wenn Wirkung quantifizierbar
	Flussaufweitung	ja
	Kiesentnahme und -zugabe	bedingt, wenn Bewirtschaftungskonzept besteht und keine Intervention bei Hochwasser vorgesehen
Stabilisierung des Ufers	Längsverbau	ja
	Ufermauern	ja
	Raubäume	nein
	Längsverbau mit lebenden Pflanzen	bedingt, bei kleinen Gewässern
	Buhnen	ja
	Baumbuhnen	nein
	Schwelle mit Flügel	ja

Am weitesten verbreitet sind die Massnahmen "Gewährleisten der Abflusskapazität eines Gerinnes" und "Stabilisierung des Ufers". Sie wirken sich am unmittelbarsten auf die in einer Gefahrenbeurteilung untersuchten Gefahrenprozesse Überflutung, Übersarung und Ufererosion aus. Diese Gefahrenprozesse sind eine unmittelbare Folge des Versagens des Gerinnes.

Die übrigen Massnahmen haben eine indirekte Wirkung auf die Gefahrenprozesse. So verhindert zum Beispiel der Rückhalt von Sedimenten eine potenzielle Auflandung im Gerinne und damit eine Reduktion der Abflusskapazität während eines Hochwasserereignisses. Weiter schützt die Stabilisierung der Sohle mit Hilfe von Schwellen und Rampen eine Uferverbauung vor Unterkolkung und damit vor dem Verlust ihrer Stabilität.

Einzelne Massnahmen können bei der Gefahrenbeurteilung nur bedingt berücksichtigt werden. Die Voraussetzung für eine Berücksichtigung sind in der Tab. 2.1 aufgeführt. So haben zum Beispiel Ufersicherungen mit Bäumen eine zu geringe Lebensdauer, als dass sie bei der Gefahrenbeurteilung berücksichtigt werden dürften. Ebenfalls nicht berücksichtigt – und deshalb in der Tab. 2.1 nicht aufgeführt – werden temporäre Hochwasserschutzmassnahmen, welche eine Intervention während eines Ereignisses erfordern (Erhöhung von Dämmen mit Sandsäcken, mobile Absperrvorrichtungen etc.). Automatische Vorrichtungen mit redundanten Systemen (z. B. Hubbrücke über die Saltina in Brig-Glis) dürfen hingegen als Massnahme berücksichtigt werden.

Im Folgenden wird die Anwendung des Beurteilungsschemas auf die Massnahme "Gewährleisten der Abflusskapazität des Gerinnes" mit den Einzelmassnahmen Hochwasserschutzdamm bzw. -mauer und Brücke sowie auf die Massnahme "Stabilisierung des Ufers" mit der Einzelmassnahme Längsverbau mit Blöcken erläutert.

3. Massnahme "Gewährleistung der Abflusskapazität des Gerinnes"

3.1 Beschreibung des Gerinnes

Als Gerinne wird jede Art eines Fliessgewässers betrachtet, welches eine endliche Höhe hat und deshalb eine beschränkte Abflusskapazität aufweist. Das Gerinne – und damit seine Abflusskapazität – kann auf drei verschiedene Arten begrenzt sein (Abb. 3.1), wobei auch Kombinationen möglich sind:

- *Begrenzung durch das gewachsene Terrain (a):* In einem Gerinne im Einschnitt ist die Gerinnesohle tiefster Punkt im Gelände. Massgebliche Kote ist die Böschungsoberkante.
- *Begrenzung durch Damm oder Mauer (b):* Die Abflusskapazität wird durch eine künstliche Terrainerhöhung (Hochwasserschutzdamm, Mauer) begrenzt, welche höher liegt als das umliegende Terrain. Massgebliche Kote ist die Dammoberkante bzw. die Maueroberkante.
- *Begrenzung durch Überdeckung (c):* Die Abflusskapazität wird durch eine Überdeckung (Brücke, Querdamm mit Durchlass) begrenzt. Massgebend für die Begrenzung ist die lichte Höhe des Durchlasses. Wo ein Abfluss unter Druck möglich ist, ist die Kote, welchen den Überstau begrenzt, ebenfalls zu berücksichtigen.

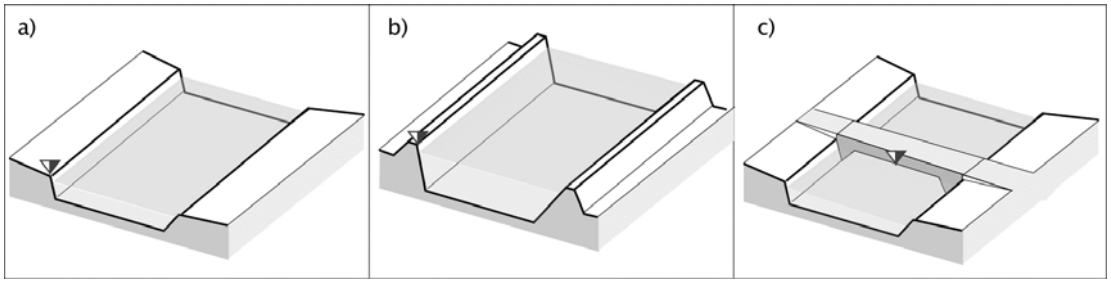


Abb. 3.1: Vertikale Begrenzung von Gerinnen: a) Terrain bei einem eingeschnittenen Gerinne, b) Damm-Oberkante, c) Brückenunterkante in einem überdeckten Gerinne.

Wirkung und Versagen

Als Wirkung des Gerinnes wird die Ableitung von Wasser und Feststoffen betrachtet und als Versagen das Überschreiten seiner Abflusskapazität und der Ausbruch von Wasser und Feststoffen aus dem Gerinne. Änderungen der Kapazität durch Sohlenveränderungen, durch Dammbrüche oder durch Verklausungen während eines Ereignisses sind darin eingeschlossen. Die verschiedenen Versagensarten sind durch die Gefährdungsbilder G1 bis G3 in Kap. 3.3.4 beschrieben.

Bei der Beurteilung der Zuverlässigkeit der Massnahme "Gewährleisten der Abflusskapazität" wird das im allgemeinen Teil A beschriebene Tragwerkmodell sowohl für die Beurteilung des Gerinnes als Ganzes als auch für die Beurteilung der Einzelmassnahmen übernommen. Dabei wird die Tragsicherheit nur für Einzelmassnahmen mit statischer Funktion (Erddamm, Brückenwiderlager etc.) beurteilt. Für das Gerinne als Ganzes wird die Kapazität im Sinne der Funktionstauglichkeit (Gebrauchstauglichkeit) beurteilt.

3.2 Grobbeurteilung

Verfügbarkeit, Zustand

Die Verfügbarkeit des Gerinnes ist grundsätzlich gegeben. Der Zustand des Gerinnes wird mit einem Augenschein erhoben. Dabei werden Veränderungen der Abflusskapazität durch Ablagerungen, Vegetation oder durch Einbauten betrachtet. Bei Dammstrecken wird der Zustand des Dammes grob beurteilt (Setzungen, bekannte undichte Stellen etc.).

Prozesskenntnisse Gefahrensituation

Als Grundlage für die Kenntnisse über die Gefahrensituation dient eine morphologische Zustandsanalyse, in welcher Parameter wie das Einzugsgebiet, die Gerinneform, das Längengefälle und der Gerinnequerschnitt erfasst werden. Daraus können die massgeblichen Gerinneprozesse abgeleitet werden.

Relevanz

Das Gerinne und seine Abflusskapazität sind für die Gefahrenbeurteilung immer relevant. Die Grobbeurteilung hat deshalb zum Ziel, die Tragweite eines Versagens zu beurteilen und die notwendige Bearbeitungstiefe zu bestimmen. Die Tragweite des Versagens misst sich an den Auswirkungen einer Überflutung am Ort ihrer Wirkung (hohe Gefährdung und/oder hohes Schadenpotenzial) und an den Auswirkungen auf das System (zum Beispiel wenn eine Hochwasserwelle durch die Retention in grossen Überflutungsflächen gedämpft wird).

Bearbeitungstiefe

Eine Beurteilung mit geringem Tiefgang hinsichtlich der Abflusskapazität genügt, wenn

- die potenziellen Überflutungsflächen klein sind oder ein geringes Schadenpotenzial aufweisen, und zwar sowohl zum Zeitpunkt der Beurteilung als auch in Zukunft,
- aufgrund der Talform das Überschreiten der Abflusskapazität keinen Einfluss auf die Kontinuität von Wasser, Sedimenten und Schwimmstoffen hat (keine dämpfende Wirkung auf die Hochwasserwelle, keine oder unbedeutende Ablagerung von Geschiebe).

In allen anderen Fällen muss die Beurteilung mit grossem Tiefgang bearbeitet werden. Die der jeweiligen Bearbeitungstiefe angepassten Untersuchungsmethoden sind in Kap. 3.5 aufgeführt.

3.3 Gerinne- und Massnahmenbeurteilung

3.3.1 Vorgehen

In Fliessgewässern sind Prozesse und Massnahmen eng miteinander verknüpft. Die Grundlagen zu den Massnahmen fliessen deshalb ebenso in die Definition von Gefährdungsbildern ein wie die Grundlagen zu den Prozessen.

Die Gerinnebeurteilung schliesst eine Beurteilung des Gerinnes als Ganzes sowie auch die Beurteilung der Einzelmassnahmen, also z. B. eines Hochwasserschutzdammes mit ein.

3.3.2 Grundlagen Prozesse

Grundszenarien

Die hydrologischen Szenarien, auch Grundszenarien genannt, umfassen:

- Abflussszenarien HQ_x (Abflussspitze, Ganglinie)
- Geschiebeszenarien G_x (Geschiebeeintrag, Kornzusammensetzung)
- Szenarien Schwemmholzaufkommen

Die Szenarien werden für Ereignisse unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit definiert. Insbesondere bei stark Geschiebe führenden Flüssen dürfen sich die Grundszenarien nicht nur auf kurze Hochwasser mit hoher Abflussspitze beschränken, sondern müssen auch lang andauernde Hochwasser mit hoher Wasser-, Geschiebe- und Schwemmholzfracht mit einbeziehen.

Die Unschärfe bei der Ermittlung der Szenarien nimmt vom Abfluss über das Geschiebe zum Schwemmholz zu. Bei sehr grosser Unschärfe ist eine halbquantitative Methode für die Definition von Schwemmholzszenarien zulässig. Dabei wird das Schwemmholzaufkommen in Abhängigkeit der Prozesse im Einzugsgebiet in drei Klassen aufgeteilt:

- Schwemmholz unbedeutend
- Schwemmholzmengen gering
- Schwemmholzmengen gross

Schwemmholz steht hier stellvertretend für alle Arten von Schwimmstoffen und Treibgut.

3.3.3 Grundlagen Gerinne und Massnahme

Grundlagen Gerinngeometrie

Das Gerinne wird mit folgenden Parametern beschrieben:

- Grundrissform des Flussabschnittes (gestrecktes Gerinne, Flusskrümmung, Mäander, verzweigtes Gerinne)
- Geometrie: Querprofil(e) und Längenprofil
- Kote(n) der oberen Begrenzung des Gerinnes
- Art der Begrenzung (Terrain, Damm, Mauer, Brücke)
- Rauheiten Ufer und Sohle
- Zusammensetzung und Aufbau der Sohle

Diese Grössen werden für alle Gerinne erhoben. Sie fliessen in die Abfluss- und Geschiebetransportrechnung (Kap. 3.3.5) ein. Für Gerinne, die mit einem Hochwasserschutzdamm oder einer Brücke begrenzt sind, werden zusätzliche Informationen benötigt.

Grundlagen Hochwasserschutzdamm

Ein Hochwasserschutzdamm wird mit folgenden Parametern beschrieben:

- Geometrie des Dammes (Höhe, Breite, Böschungsneigungen)
- Dammmaterial und Verdichtung
- Oberfläche
- Untergrund (Durchlässigkeit)
- Homogenität
- Zustand

Grundlagen Überdeckung

Eine Überdeckung wird mit folgenden Parametern beschrieben:

- Art der Überdeckung (Brücke, Rohrdurchlass)
- Form des überdeckten Querschnitts
- Beschaffenheit der Untersicht einer Brücke
- Rauheit eines Rohrdurchlasses
- Aufbau und Beschaffenheit der Sohle
- Einstaumöglichkeiten

Die erforderliche Qualität der zu erhebenden Grundlagen richtet sich nach der Bearbeitungstiefe (Kap. 3.5).

3.3.4 Gefährdungsbilder

In Tab. 3.1 sind die Gefährdungsbilder für ein Gerinne mit vertikaler Begrenzung sowie die dazu gehörenden Einwirkungen und die Parameter des Widerstandes aufgeführt. Die Gefährdungsbilder können in Kombination auftreten oder ein Gefährdungsbild als Folge eines anderen, wenn sich z.B. im Rückstau einer Verklausung (Gefährdungsbild G3) Geschiebe ablagert und die Abflusskapazität im Oberwasser des überdeckten Gerinnequerschnitts vermindert (Gefährdungsbild G1).

Das Gefährdungsbild G2 beschreibt das Versagen des Gerinnes als Folge des Versagens der Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm oder -mauer, dem wiederum verschiedene Gefährdungsbilder zugrunde liegen können. Diese sind in der Tab. 3.2 aufgeführt. Die Gefährdungsbilder D2, D4 und D5 sind nur bei Erddämmen von Bedeutung. Beim Gefährdungsbild D6 Bruch durch Erdbeben wird ein Erdbeben mit einem einjährlichen Hochwasserabfluss kombiniert. Die Wahrscheinlichkeit eines Erdbebens, das einen Damm zum Brechen bringt, dürfte in der Regel geringer sein als 1/300, weshalb dieses Gefährdungsbild meist nur für die Beurteilung der Restgefährdung von Bedeutung ist.

Tab. 3.1: Gefährdungsbilder für ein Gerinne mit begrenzter Abflusskapazität (OK = Oberkante, UK = Unterkante).

Gefährdungsbild	**Einwirkung**	**Widerstand**
G1 Abflusskapazität erschöpft durch Erreichen der vertikalen Begrenzung	Wasserstand, Fliessgeschwindigkeit	OK Böschung, Damm oder Brücke
G2 Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Versagen der Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm/-mauer	Wasserstand, Fliessgeschwindigkeit, Dauer der Einwirkung	OK Damm, Dammstabilität
G3 Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Verklausung des Querschnitts	Wasserstand, Fliessgeschwindigkeit, Eintrag Schwemmholz	UK Brücke

Tab. 3.2: Gefährdungsbilder für einen Hochwasserschutzdamm bzw. eine -mauer.

Gefährdungsbild	**Einwirkung**	**Widerstand**
D1 Überströmen und luftseitige Erosion	Wasserstand, Fliessgeschwindigkeit, Dauer der Einwirkung	OK Dammkrone/Mauer, Erosionswiderstand auf der Luftseite
D2 Wasserseitige direkte Erosion	Fliessgeschwindigkeit, Schleppspannung, Dauer der Einwirkung	Erosionswiderstand auf der Wasserseite
D3 Wasserseitige Instabilität durch Kolkbildung oder Sohlenerosion	Erosion am Damm- oder Mauerfuss	Erosionswiderstand auf der Wasserseite, Fundationstiefe
D4 Luftseitige Böschungsinstabilität	Potenzialgefälle, Dauer der Einwirkung	Dichtigkeit, Breite des Dammes
D5 Bruch durch innere Erosion	Potenzialgefälle, Dauer der Einwirkung	Dichtigkeit, Breite des Dammes
D6 Bruch durch hydraulischen Grundbruch	Potenzialgefälle, Dauer der Einwirkung	Dichtigkeit, Breite des Dammes, Durchlässigkeit des Untergrundes

D7 Bruch durch Erdbeben	Horizontale u. vertikale Beschleunigung	Scherfestigkeit

Tab. 3.3: Gefährdungsbilder für eine Überdeckung des Gerinnes (Brücke).

Gefährdungsbild	**Einwirkung**	**Widerstand**
B1 Bruch durch Unterspülen der Widerlager oder Pfeiler	Erosion der Sohle, Kolkbildung	Erosionswiderstand der Sohle, Fundationstiefe
B2 Überschreiten der Abflusskapazität durch Aufstau	Wasserstand, Fliessgeschwindigkeit	OK Brücke, Begrenzung Gerinne im Oberwasser
B3 Abheben der Brückenplatte durch Auftrieb	Wasserstand	Gewicht der Brücke, Verankerung
B4 Abschieben der Brückenplatte durch Wasserdruck	Wasserstand, Fliessgeschwindigkeit	Gewicht der Brücke, Verankerung

3.3.5 Einwirkung

Belastungsgrössen

Der Wasserstand und die Fliessgeschwindigkeit sind die eigentlichen Grössen der Einwirkung auf ein vertikal begrenztes Gerinne. Für die Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm kommen die Schleppspannung am Dammfuss sowie die Häufigkeit und die Dauer der Einwirkung als zusätzliche Belastungsgrössen hinzu, bei überdeckten Gerinnen der Eintrag von Schwemmholz. Der Geschiebeeintrag ist nur eine indirekte Einwirkung, die je nach Transportverhalten die Abflusskapazität oder die wasserseitige Stabilität eines Dammes verändert (Gefährdungsbild D3).

Abfluss- und Geschiebetransportrechnung

Die Parameter der Gerinnegeometrie (Kap. 3.3.3) bilden die Grundlage für die Abfluss- und Geschiebetransportrechnung, mit welcher die Grössen der Einwirkung (Wasserstand, Energiehöhe, Schleppspannung, Dauer der Belastung) bestimmt werden. Folgende Aspekte sind gegebenenfalls in besonderem Masse zu berücksichtigen:

- Sohlenveränderungen während eines Hochwasserereignisses
- Sohlenformen
- gewellter Abfluss
- gegliederte Querschnitte
- Strömungskonzentrationen
- Vegetation

3.3.6 Widerstand

Vertikale Begrenzung

Die Begrenzung des Gerinnes (Böschungsoberkante, Dammkrone, Brückenoberkante und -unterkante) ist eine geometrische Grösse, die aus bestehenden Querprofilplänen oder im Feld erhoben wird.

Tragfähigkeit Erddamm

Der Widerstand eines Dammes gegenüber einer hydrostatischen Belastung (Gefährdungsbilder D4, D5 und D6) wird anhand von geotechnischen Parametern wie Kornzusammensetzung, Durchlässigkeit, Scherfestigkeit, Beschaffenheit Untergrund etc. bestimmt.

Erosionswiderstand Dammböschung

Der Erosionswiderstand einer Dammböschung gegenüber der Strömungsbelastung auf der Wasserseite (Gefährdungsbild D3) kann in Abhängigkeit der Oberfläche mit anerkannten Ansätzen bestimmt werden.

Die Ansätze gelten auch für die Luftseite (Gefährdungsbild D4). Dort wird die Belastung aber in der Regel nicht rechnerisch bestimmt und der Erosionswiderstand kann qualitativ anhand des Schemas in Tab. 3.4 klassiert werden.

Tab. 3.4: Qualitative Klassierung des Erosionswiderstandes einer überströmten Böschung.

Dammkörper	**Bedeckung**	**Erosionswiderstand**
Blöcke	-	hoch
Mauer	-	hoch
Lockermaterial	Blöcke, Pflästerung	hoch
Lockermaterial	Gras	mittel
Lockermaterial	keine	gering

3.3.7 Tragsicherheit, Kapazität / Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit

Für jedes der in Kap. 3.3.4 definierten Gefährdungsbilder werden die Kriterien für die Tragsicherheit bzw. die Kapazität / Gebrauchstauglichkeit und für die Dauerhaftigkeit angegeben. Der Begriff Tragsicherheit im engeren Sinne wird nur bei Einzelmassnahmen mit einer statischen Wirkung angewandt (Hochwasserschutzdamm, Brückenwiderlager etc.). Die "Kapazität" des Gerinnes tritt an Stelle der "Gebrauchstauglichkeit" der Massnahme. Die Faktoren, welche die Dauerhaftigkeit von wasserbaulichen Massnahmen bestimmen, z.B. langfristige Sohlenveränderungen, Vegetation etc. werden durch den Gewässerunterhalt beeinflusst. Ist der Gewässerunterhalt gewährleistet, sind die Kriterien der Dauerhaftigkeit erfüllt.

Tab. 3.5: Kriterien für die Kapazität / Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit von Gerinnen mit einer vertikalen Begrenzung.

G1 Abflusskapazität erschöpft durch Erreichen der vertikalen Begrenzung.	
Kapazität/Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn $z_b + h + \alpha \frac{v^2}{2g} \leq OK\ Gerinne$ bzw. $z_b + h + \frac{v^2}{2g} \leq OK\ Brücke$ bei Abfluss unter Druck	erfüllt, wenn längerfristig - keine massgeblichen Sohlenhebungen zu erwarten sind[1] - keine Verminderung der Abflusskapazität durch Vegetation zu erwarten ist
G2 Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Versagen der Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm/-mauer	
Kapazität/Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn alle Kriterien der Tragsicherheit des Dammes/der Mauer erfüllt sind (D1…D7)	erfüllt, wenn alle Kriterien der Dauerhaftigkeit des Dammes/der Mauer erfüllt sind (D1…D7)

[1] Eine Sohlenhebung wird dann als massgeblich bezeichnet, wenn dadurch das Kriterium der Tragsicherheit für das entsprechende Szenario nicht mehr erfüllt wird.

G3 Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Verklausung des Querschnitts	
Kapazität/Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn die kleinste Abmessung (*H, B* oder *D*) > 1 m und $z_b + h + \frac{v^2}{2g} \leq UK\ Brücke$ oder $z_b + h + 1m \leq UK\ Brücke$ oder $z_b + h + \alpha \frac{v^2}{2g} \leq UK\ Brücke$ und Schwemmholzaufkommen gering Brücken unter Druckabfluss und Brücken mit Pfeilern müssen im Einzelfall beurteilt werden.	erfüllt, wenn längerfristig - keine massgeblichen Sohlenhebungen zu erwarten sind - keine Verminderung der Abflusskapazität durch Vegetation zu erwarten ist
mit z_b = Sohlenkote, h = Abflusstiefe, v = Fliessgeschwindigkeit, g = Erdbeschleunigung, H = lichte Höhe eines Brückenquerschnittes, B = Gerinnebreite, D = Durchmesser Rohrdurchlass, α = Faktor zwischen 0 und 1.	

Tab. 3.6: Kriterien für die Tragsicherheit und die Dauerhaftigkeit einer Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm bzw. -mauer.

D1 Überströmen und luftseitige Erosion	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn $z_b + h + \frac{v^2}{2g} \leq OK\ Dammkrone$ oder Erosionswiderstand Luftseite hoch oder Erosionswiderstand Luftseite mittel und luftseitige Böschungsneigung ≤ 1:10	erfüllt, wenn längerfristig - keine massgeblichen Sohlenhebungen zu erwarten sind - keine Verminderung der Abflusskapazität durch Vegetation zu erwarten ist - keine Setzungen im Damm zu erwarten sind
D2 Wasserseitige direkte Erosion	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn die Strömungsbelastung auf der Wasserseite geringer ist als der Erosionswiderstand	erfüllt, wenn längerfristig - keine grösseren Sohlenhebungen zu erwarten sind - keine Strömungskonzentration durch Vegetation zu erwarten ist - die Stabilität der Oberfläche nicht durch Viehtritt vermindert wird

D3 Wasserseitige Instabilität durch Kolkbildung oder Sohlenerosion	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn z_b > Fundation von Damm bzw. Mauer	erfüllt, wenn längerfristig - keine grösseren Sohlenerosionen zu erwarten sind - keine Strömungskonzentration durch Vegetation zu erwarten ist
D4 Luftseitige Böschungsinstabilität	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn die geotechnischen Stabilitätskriterien für die Böschung bzw. die statischen Stabilitätskriterien für die Mauer eingehalten werden	erfüllt, wenn längerfristig - wiederholte Belastungen die Stabilität nicht vermindern
D5 Bruch durch innere Erosion	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn die Filterkriterien im Damm eingehalten werden	erfüllt, wenn längerfristig - durch wiederholte Belastungen Feinmaterial nicht ausgewaschen wird - die Durchlässigkeit durch Wurzel- und Tiergänge nicht erhöht wird
D6 Bruch durch hydraulischen Grundbruch	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn die geotechnischen Stabilitätskriterien eingehalten werden	erfüllt, wenn längerfristig - durch eine Verminderung der Abflusskapazität (Sohlenhebungen, Vegetation) der hydraulische Gradient bei gleichem Abfluss nicht zunimmt
D7 Bruch durch Erdbeben	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn die geotechnischen Stabilitätskriterien eingehalten werden	erfüllt, wenn längerfristig - wiederholte Belastungen die Stabilität nicht vermindern

Tab. 3.7: Kriterien für die Tragsicherheit und die Dauerhaftigkeit einer Einzelmassnahme Brücke.

B1 Bruch durch Unterspülen der Widerlager oder Pfeiler	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn z_b > Fundation von Widerlager bzw. Pfeiler	erfüllt, wenn längerfristig - keine grösseren Sohlenerosionen zu erwarten sind - keine Strömungskonzentration durch Vegetation zu erwarten ist
B2 Überschreiten der Abflusskapazität durch Aufstau	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn $z_b + h + \frac{v^2}{2g} \leq OK\,Brücke; Gerinne$	erfüllt, wenn längerfristig - keine massgeblichen Sohlenhebungen zu erwarten sind - keine Verminderung der Abflusskapazität durch Vegetation zu erwarten ist

B3 Abheben der Brückenplatte durch Auftrieb	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn Gewichtskraft der Brückenplatte > Auftriebskraft oder wenn die Verankerungskräfte > Auftriebskräfte	
B4 Abschieben der Brückenplatte durch Wasserdruck	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn Rückhaltende Kräfte > Wasserdruck	

3.3.8 Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit des Gerinnes mit seiner vertikalen Begrenzung wird nach dem Schema in Abb. 3.2 bestimmt. Dieses stellt eine Vereinfachung des Schemas in Abb. 5.2 im allgemeinen Teil A dar. Die Tragsicherheit der Einzelmassnahme (Damm, Brücke) und die Kapazität / Gebrauchstauglichkeit des Gerinnes sind gleichsam entscheidend für die Zuverlässigkeit der Massnahme "Gewährleisten der Gerinnekapazität".

Die Zuordnung der Zuverlässigkeit in die Klassen "Hohe Zuverlässigkeit" und "Eingeschränkte Zuverlässigkeit" ist eine Funktion der Dauerhaftigkeit des Gerinnes bzw. der Einzelmassnahme. Die Dauerhaftigkeit wiederum muss durch einen angemessenen Gewässerunterhalt gewährleistet werden. Wenn der Unterhalt vernachlässigt wird, muss angenommen werden, dass die Zuverlässigkeit eingeschränkt ist.

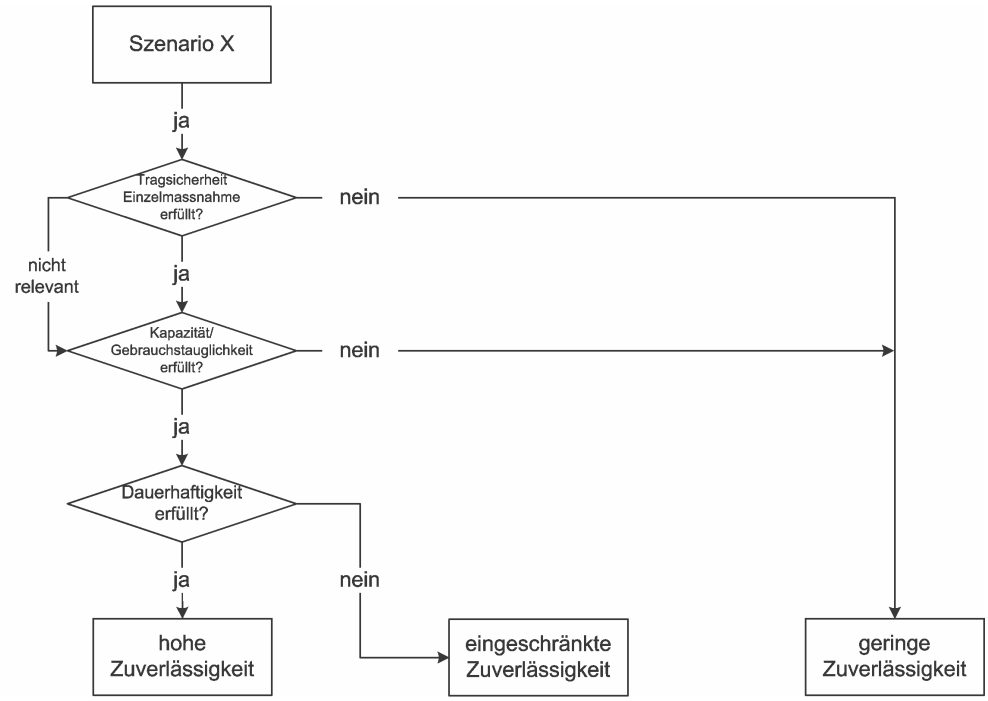


Abb. 3.2: Bestimmung der Zuverlässigkeit aufgrund von Tragsicherheit, Kapazität / Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

3.4 Wirkungsbeurteilung

3.4.1 Wirkung des Gerinnes

Im Rahmen der Wirkungsbeurteilung werden für die Gefährdungsbilder G1, G2 und G3 unterschiedliche Wirkungsszenarien W_x definiert, welche sich auf die Wirkung des Gerinnes, d.h. eines untersuchten Gerinneabschnittes beziehen. Das Wirkungsszenario beschreibt im Wesentlichen Zeitpunkt, Dauer und Menge des austretenden Wassers. In Abhängigkeit des Grades der Zuverlässigkeit des Gerinnes kann die Eintretenswahrscheinlichkeit des Wirkungsszenarios von demjenigen des Grundszenarios abweichen.

Tab. 3.8: Wirkungsszenarien der Gefährdungsbilder.

Gefährdungsbild	**Wirkungsszenarien**
G1 Abflusskapazität erschöpft durch Erreichen der vertikalen Begrenzung	Bei diesem Gefährdungsbild bleibt die ursprüngliche Abflusskapazität des Gerinnes vorerst erhalten und das aus dem Gerinne entlastete Wasser kann als Differenz zwischen Zufluss und Abflusskapazität bestimmt werden. Die Entlastung kann zur Ablagerung von Geschiebe auf der Sohle und damit zu einer Reduktion der Abflusskapazität führen. Im Extremfall reduziert sich die Abflusskapazität auf null und die entlastete Abflussmenge entspricht dem Zufluss. Bei hoher und bei eingeschränkter Zuverlässigkeit wird keine Entlastung angenommen. Das Wirkungsszenario hat die Eintretenswahrscheinlichkeit des Grundszenarios.
G2 Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Versagen der Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm/-mauer	Bei geringer und bei eingeschränkter Zuverlässigkeit des Gerinnes wird ein Versagen des Dammes/der Mauer und die Entlastung des Abflusses durch eine Bresche angenommen. Länge und Tiefe der Bresche sowie der Zeitpunkt der Breschenbildung (und damit die für die Entlastung massgeblichen Abflüsse) müssen im Einzelfall bestimmt werden. Bei hoher Zuverlässigkeit wird keine Breschenbildung angenommen. Die Entlastung durch Überströmen ohne Dammbruch (Gefährdungsbild G1) bleibt vorbehalten. Bei geringer Zuverlässigkeit hat das Wirkungsszenario die Eintretenswahrscheinlichkeit des Grundszenarios. Bei eingeschränkter Zuverlässigkeit wird dem Wirkungsszenario eine um eine Klasse geringere Eintretenswahrscheinlichkeit zugeordnet.
G3 Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Verklausung des Querschnitts	Mit einer Verklausung reduziert sich der Abflussquerschnitt unter einer Brücke/in einem Durchlass. Für Gerinne mit einer Querschnittsfläche bis 30 m^2 können für das Ausmass der Querschnittsreduktion folgende Szenarien definiert werden: Reduktion des Abflussquerschnittes um 100 % (vollständige Verklausung), wenn - Kleinste Abmessung des Querschnitts < 1 m oder Schwemmholzaufkommen gering und Anpassung der Sohle durch Auskolken nicht möglich - Schwemmholzmenge gross Reduktion des Abflussquerschnittes um 50 % (Teilverklausung), wenn - Schwemmholzaufkommen gering und Anpassung der Sohle durch Auskolken möglich

Gefährdungsbild	Wirkungsszenarien
	Eine weitere Reduktion des Gerinnequerschnitts durch Geschiebeablagerungen im Rückstau oder wegen der seitlichen Entlastung muss gegebenenfalls berücksichtigt werden. Für Gerinne mit grösseren Brückenquerschnitten als 30 m^2 muss das Ausmass der Querschnittsreduktion im Einzelfall definiert werden. Bei hoher Zuverlässigkeit wird keine Verklausung angenommen. Bei geringer Zuverlässigkeit hat das Wirkungsszenario die Eintretenswahrscheinlichkeit des Grundszenarios. Bei eingeschränkter Zuverlässigkeit wird dem Wirkungsszenario eine um eine Klasse geringere Eintretenswahrscheinlichkeit zugeordnet.

3.4.2 Wirkung des Systems

Längere Dammstrecke, Abfolge von Brücken

Eine längere Dammstrecke oder ein Gerinne mit einer Abfolge von Brücken wird als System von einzelnen Gerinnen betrachtet. Für die Wirkung des Systems werden zu jedem Grundszenario mehrere System-Wirkungsszenarien definiert. Dabei wird je System-Wirkungsszenario das Versagen (Dammbruch oder Verklausung) in jeweils *einem* Gerinne(abschnitt) angenommen. Das Erschöpfen der Abflusskapazität und damit eine Entlastung durch Überströmen werden immer betrachtet.

Reduktion der Abflussmenge

Die Entlastung in einem flussaufwärts liegenden Gerinne reduziert die für die Beurteilung des Versagens und der Wirkung massgebliche Abflussmenge im flussabwärts liegenden Gerinne, wenn das austretende Wasser nicht wieder ins Gerinne zurück fliesst. Wird eine solche Abflussreduktion bei der Beurteilung eines Gerinnes im Unterlauf berücksichtigt, müssen die diesbezüglichen Berechnungsannahmen ausgewiesen und begründet werden.

Reduktion der Wahrscheinlichkeit

Die System-Wirkungsszenarien haben die Eintretenswahrscheinlichkeit des jeweiligen Gerinne-Wirkungsszenarios. Wenn ein Gerinne mit Damm oder Brücke versagt, weil es eine eingeschränkte Zuverlässigkeit aufweist, wird dem System-Wirkungsszenario eine um eine Klasse geringere Eintretenswahrscheinlichkeit als dem Grundszenario zugeordnet.

Umhüllende Intensitätskarte

Die Intensitäten der Überflutung werden für jedes System-Wirkungsszenario einzeln bestimmt. Je Wahrscheinlichkeitsklasse wird eine Intensitätskarte als Umhüllende aller Intensitäten der System-Wirkungsszenarien dieser Wahrscheinlichkeitsklasse erstellt. Die Intensitätskarten stellen damit die Summe der verschiedenen Ausprägungen von Ereignissen gleicher Wahrscheinlichkeit dar.

Beispiel Abfolge von Gerinnen mit Brücken

Im folgenden Beispiel besteht das System aus einer Abfolge von vier Gerinnen mit Brücken (Abb. 3.3). Für ein bestimmtes Grundszenario (im Beispiel Wahrscheinlichkeit mittel) haben die Gerinne 1 und 2 eine geringe Zuverlässigkeit, d.h. ihre jeweiligen Wirkungsszenarien haben die Wahrscheinlichkeit mittel des Grundszenarios. Das Gerinne 3 hat eine hohe Zuverlässigkeit und versagt nicht und das Gerinne 4 hat eine eingeschränkte Zuverlässigkeit und sein Wirkungsszenario beim Versagen hat die Wahrscheinlichkeit gering (eine Klasse geringer als das Grundszenario). Es werden drei Systemwirkungsszenarien definiert, bei denen alternativ die Gerinne 1, 2 und 4 versagen. Die ersten beiden Systemwirkungsszenarien haben die Eintretenswahrscheinlichkeit des Grundszenarios, das dritte hat eine geringere Eintretenswahrscheinlichkeit, weil das Wirkungsszenario des Gerinnes 4 eine geringere Eintretenswahrscheinlichkeit hat als das Grundszenario (vgl. Kap. 3.4.1).

Die Intensitätskarte für die mittlere Wahrscheinlichkeit wird durch die Umhüllende der Intensitäten bei den Szenarien X.1 und X.2 gebildet (Abb. 3.4).

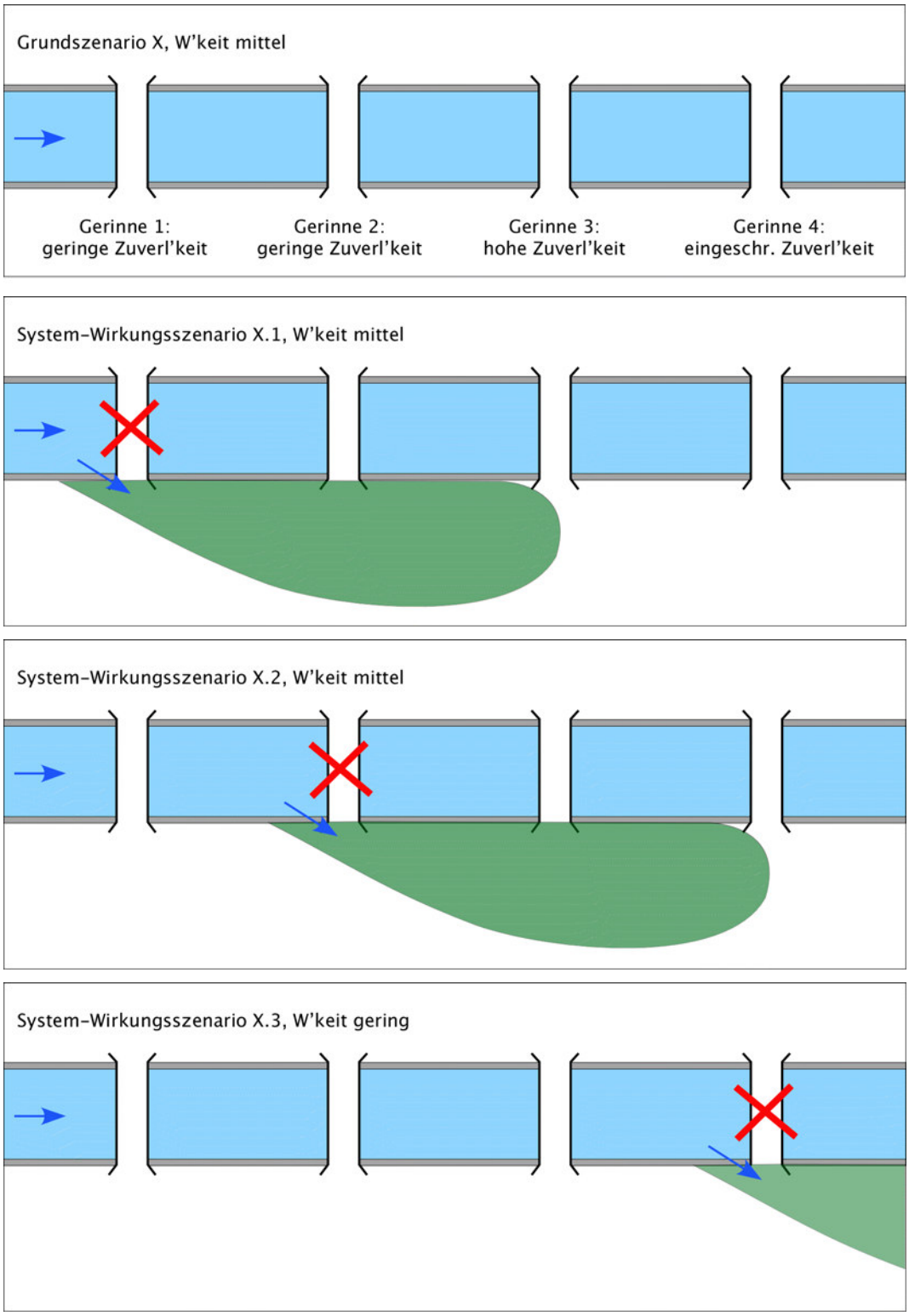


Abb. 3.3: Systemwirkungsszenarien am Beispiel einer Abfolge von Gerinnen mit Brücken.

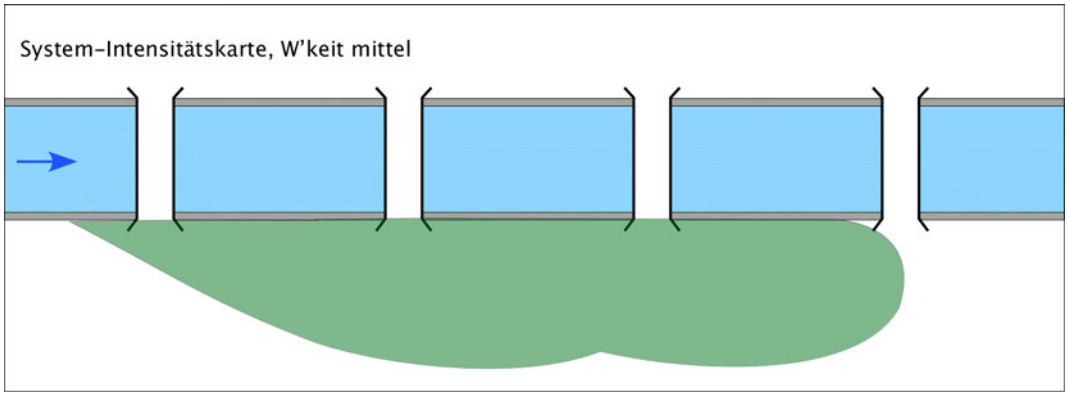


Abb. 3.4: Intensitätskarte am Beispiel für die Wahrscheinlichkeit mittel.

3.5 Bearbeitungsmethoden

3.5.1 Methoden bei hoher Bearbeitungstiefe

Beurteilung durch Spezialisten

Eine hohe Bearbeitungstiefe in der Beurteilung beinhaltet die nachfolgenden Methoden zur Ermittlung von Belastung, Widerstand und der Wirkung. Die Beurteilungen sollen durch Spezialisten in Hydraulik und Geschiebetransport bzw. durch Spezialisten in Geotechnik und Statik vorgenommen werden.

Staukurve, Geschiebetransportmodell

Eine Abflussrechnung mittels Staukurve oder mittels eindimensionalem Geschiebetransportmodell ist bei längeren Flussabschnitten mit wechselnder Gerinnegeometrie und Längengefälle sowie in flachen Gewässern (Längengefälle ≤ 1 %) notwendig.

Die Staukurvenrechnung soll die Reduktion von Abflusskapazitäten und den Rückstau im Gerinne infolge Verklausungen berücksichtigen.

Gerinnegeometrie für Staukurve

Die Gerinnegeometrie – und mit ihr die vertikale Begrenzung des Gerinnes – wird mit Querprofilen erfasst, deren Abstand das Fünffache der Gerinnebreite nicht übersteigt. Die Profile müssen in Lage und Höhe georeferenziert sein. Fixpunkte im Längenprofil (Schwellen und Abstürze) müssen zusätzlich beschrieben sein. Auf Dammstrecken ist die Bestimmung der Dammkote auch zwischen den Profilen sinnvoll.

Normalabflussrechnung

Die Abfluss- und Geschiebetransportrechnung kann mit Hilfe einer Normalabflussrechnung in einem typischen Querschnitt durchgeführt werden, wenn

- ein Gerinneabschnitt über eine längere Strecke einen homogenen Querschnitt aufweist,
- der Querschnitt als massgebliche Schwachstellen identifiziert werden konnte und damit die Kapazität in übrigen Gerinnequerschnitten nicht relevant ist.

Gerinnegeometrie für Normalabflussrechnung

Der Querschnitt für eine Normalabflussrechnung kann in einem lokalen Koordinatensystem erfasst sein. Das Längengefälle im Querschnitt muss mit besonderer Sorgfalt ermittelt werden.

Dammstabilität

Die geotechnischen Parameter eines Dammes werden mit geotechnischen Sondiermethoden wie Baggerschlitze, Rammsondierung oder Geoelektrik ermittelt.

Entlastung

Auf Dammstrecken ist die entlastete Wassermenge mit geeigneten rechnerischen Ansätzen (Entlastungsgleichung, Streichwehr, etc.) zu bestimmen. Eine Interaktion

zwischen Entlastung und Ablagerung von Geschiebe auf der Sohle und die dadurch reduzierte Abflusskapazität muss berücksichtigt werden.

Überflutungsflächen

Die von Überflutung und Übersarung betroffenen Flächen werden in Abhängigkeit der Geländeverhältnisse definiert. In steilem Gelände genügt eine Ausscheidung im Feld. In flachem Gelände sollen Intensitäten auf der Basis eines Verschnitts von Wasserspiegel oder Energielinie mit dem Terrain oder – bei Dammstrecken obligatorisch – auf der Basis einer Überflutungssimulation ausgeschieden werden.

3.5.2 Methoden bei geringer Bearbeitungstiefe

Eine geringe Bearbeitungstiefe in der Beurteilung beinhaltet folgende Methoden zur Ermittlung der Belastung, des Widerstandes und der Wirkungsszenarien:

Normalabflussrechnung

- Die Abfluss- und Geschiebetransportrechnung wird mit Hilfe einer Normalabflussrechnung durchgeführt.

Gerinnegeometrie für Normalabflussrechnung

- Der Querschnitt für eine Normalabflussrechnung kann in einem lokalen Koordinatensystem erfasst sein. Das Längengefälle im Querschnitt muss mit besonderer Sorgfalt ermittelt werden.

Pauschale Beurteilung der Kapazität

- In steilen Gewässern (Gefälle > 3 %) kann eine maximale Fliessgeschwindigkeit von 4 bis 5 m/s angenommen und die Kapazität mit der Kontinuitätsgleichung $Q = v \cdot A$ abgeschätzt werden. Darin bedeuten Q der Abfluss, v die Fliessgeschwindigkeit und A die Querschnittsfläche. Ein Freibord muss auch bei dieser Betrachtung berücksichtigt werden.

Enge Durchlässe

- Auf eine Berechnung von Wasserstand und Fliessgeschwindigkeit in Brückenquerschnitten und Durchlässen kann verzichtet werden, wenn deren kleinste Abmessung (Höhe, Breite oder Rohrdurchmesser) 1 m nicht übersteigt und im Grundszenario mindestens eine geringe Schwemmholzmenge angenommen wird. In diesem Fall kann man davon ausgehen, dass der Querschnitt in jedem Fall mit Schwemmholz oder Geschiebe vollständig verklaust. Die Kapazität kann dann als null angenommen werden.

Überflutungsflächen

- Die von Überflutung und Übersarung betroffenen Flächen werden im Feld ausgeschieden und die Intensitäten gutachterlich definiert.

4. Massnahme "Stabilisierung des Ufers"

4.1 Beschreibung der Massnahme

Als Massnahme zur Stabilisierung des Ufers wird jede bauliche Vorkehrung betrachtet, welche den Erosionswiderstand einer Uferböschung erhöht. Diese kann als linienförmiges Bauwerk (Längsverbau mit Blöcken, Mauerwerk, Holz oder lebenden Pflanzen) parallel zur Fliessrichtung ausgerichtet sein, oder aus einem Verband quer zur Fliessrichtung angeordneter Buhnen oder Leitwerken bestehen (Abb. 4.1).

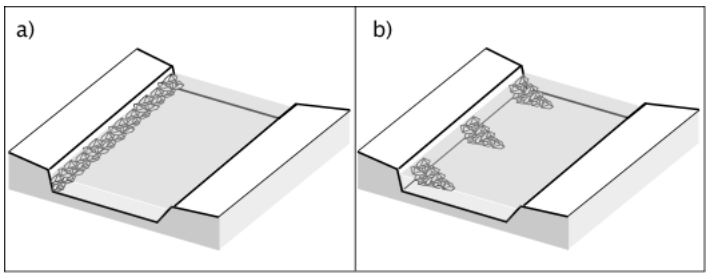


Abb. 4.1: Ufersicherung: a) mit Längsverbau, b) mit Querwerken.

Wirkung und Versagen

Als Wirkung der Uferverbauung wird das Verhindern von Ufererosion betrachtet und als Versagen die Erosion der von der Uferverbauung zu schützenden Uferböschung. Die verschiedenen Versagensarten sind durch die Gefährdungsbilder U1 bis U3 in Kap 4.3.3 beschrieben.

4.2 Grobbeurteilung

Verfügbarkeit, Zustand

Uferschutzmassnahmen sind grundsätzlich immer verfügbar (abgesehen von Bauten mit beschränkter Lebensdauer, vgl. Kap. 2). Sie sind auch dann verfügbar, wenn sie durch Vegetation oder künstliche Aufschüttungen überdeckt sind. Die Uferverbauung wird auf Unterspülungen, Unterkolkungen oder Lücken in einem geschlossenen Verband hin untersucht.

Prozesskenntnisse Gefahrensituation

Als Grundlage für die Kenntnisse über die Gefahrensituation dient eine morphologische Zustandsanalyse, in welcher Parameter wie Einzugsgebiet, Gerinneform, Längengefälle und Gerinnequerschnitt erfasst werden. Daraus können die massgeblichen Gerinneprozesse abgeleitet werden. Von Bedeutung ist die Exposition des Ufers in Bezug auf die Hauptströmungen im Gerinne: gerader Flussabschnitt, Innen- oder Aussenseite einer Krümmung, Verzweigungsstrecke.

Relevanz

Eine Ufersicherung ist relevant, wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

- die Ufersicherung hat eine den potenziellen Erosionsprozessen angepasste Baulänge,
- die Ufersicherung verfügt über eine ausreichende Bauhöhe,
- die Ufersicherung ist intakt (s. oben),
- die Ufersicherung wird regelmässig unterhalten,
- bei den betrachteten Hochwasserszenarien werden keine übergeordneten morphologischen Gerinneprozesse (Umlagerungen) erwartet.

Ist eine dieser Bedingungen nicht gewährleistet, muss die Ufersicherung als für die Gefahrenbeurteilung nicht relevant bezeichnet werden.

4.3 Massnahmenbeurteilung

4.3.1 Grundlagen Prozesse

Grundszenarien

Die für die Beurteilung der Uferstabilität massgeblichen hydrologischen Szenarien, auch Grundszenarien genannt, umfassen

- Abflussszenarien HQ_x (Abflussspitze, Ganglinie) und
- Geschiebeszenarien G_x (Geschiebeeintrag, Kornzusammensetzung).

Die Szenarien werden für Ereignisse unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit definiert. Die Grundszenarien dürfen sich nicht auf kurze Hochwasser mit hoher Abflussspitze beschränken, sondern müssen auch lang andauernde Hochwasser mit hoher Wasser- und Geschiebefracht mit einbeziehen.

4.3.2 Grundlagen Gerinne und Massnahmen

Grundlage Gerinngeometrie

Das Gerinne wird mit folgenden Parametern beschrieben:

- Grundrissform des Flussabschnittes (gestrecktes Gerinne, Flusskrümmung, Mäander, Verzweigtes Gerinne)
- Geometrie (Querprofil(e) und Längenprofil)
- Rauheiten des Ufers und der Sohle
- Zusammensetzung und Aufbau der Sohle

Diese Grössen fliessen in die Abfluss- und Geschiebetransportrechnung (Kap. 4.3.4) ein.

Grundlagen Längsverbau

Die Einzelmassnahme Längsverbau wird mit folgenden Parametern beschrieben:

- Geometrie (Länge, Fundationstiefe, Verbauungshöhe, Neigung)
- Baumaterial (Blöcke, Mauerwerk, Holz, lebende Pflanzen)

Grundlagen Buhnen

Die Einzelmassnahme Buhnenverbau wird mit folgenden Parametern beschrieben:

- Geometrie der Buhne (Länge, Fundationstiefe, Verbauungshöhe, Neigung)
- Anordnung der Buhnen (Abstand zwischen zwei Buhnen, Ausrichtung zur Flussachse)
- Baumaterial (Blöcke, Mauerwerk, Holz, lebende Pflanzen)

4.3.3 Gefährdungsbilder

In der Tab. 4.1 sind die Gefährdungsbilder für ein Gerinne mit Ufersicherung sowie die dazu gehörenden Einwirkungen und die Parameter des Widerstandes aufgeführt. Die Gefährdungsbilder können in Kombination auftreten oder ein Gefährdungsbild als Folge eines anderen, wenn zum Beispiel durch Sohlenerosion die Blöcke eines Längsverbaus in die Tiefe rutschen (Gefährdungsbild U2) und dann der Erosionswiderstand der Böschung so weit reduziert wird, dass die Böschung dem Strömungsangriff nicht mehr standhält (Gefährdungsbild U1).

Tab. 4.1: Gefährdungsbilder für eine Ufersicherung.

Gefährdungsbild	Einwirkung	Widerstand
U1 Erosion durch direkten Strömungsangriff	Schleppspannung, Strömungskraft	Erosionswiderstand
U2 Instabilität durch Kolkbildung oder Sohlenerosion	Erosion am Böschungsfuss oder am Buhnenkopf	Erosionswiderstand Flusssohle, Fundationstiefe
U3 Hinterspülen durch Überströmen	Wasserstand, Fliessgeschwindigkeit, Dauer der Einwirkung	Verbauungshöhe, Erosionswiderstand des Materials oberhalb/hinter der Ufersicherung, Verankerung der Buhne

4.3.4 Einwirkung

Belastungsgrössen

Die Strömungskraft bzw. die Schleppspannung und in zweiter Linie der Wasserstand sind die eigentlichen Grössen, welche auf ein Ufer wirken und dessen Erosion verursachen. Die Dauer der Einwirkung ist entscheidend für das Ausmass der Erosion. Der Geschiebeeintrag ist eine indirekte Einwirkung, die je nach Transportverhalten die Sohlenlage verändert und somit entweder das Unterspülen einer Verbauung verursacht oder die Kote des Strömungsangriffs verändert.

Schleppspannung und Kolktiefen

Die auf die Ufer wirkende Schleppspannung lässt sich in gestreckten oder gekrümmten Gerinnen ermitteln, nicht jedoch in einem Gerinne mit Bänken, bei welchen der Abfluss durch Querströmungen charakterisiert ist. In Gerinnen mit Bänken ist die Belastung nicht zwingend beim höchsten Abfluss am grössten. Querströmungen bei kleineren Hochwasserabflüssen können das Ufer lokal stark beanspruchen und die grössten Kolktiefen verursachen.

Abfluss- und Geschiebetransportrechnung

Die Parameter der Gerinnegeometrie (Kap. 4.3.2) bilden die Grundlage für die Abfluss- und Geschiebetransportrechnung, mit welcher die Grössen der Einwirkung (Wasserstand, Energiehöhe, Schleppspannung, Dauer der Belastung) bestimmt werden. Folgende Aspekte sind gegebenenfalls in besonderem Masse zu berücksichtigen:

- Sohlenveränderungen während eines Hochwasserereignisses
- Sohlenformen
- gewellter Abfluss
- gegliederte Querschnitte
- Strömungskonzentrationen
- Vegetation

4.3.5 Widerstand

Bei Ufersicherungen mit Blöcken ist der Widerstand durch die Blockgrösse, die Böschungsneigung, die Fundationsstiefe und die Bauhöhe definiert. Der Widerstand von Holz oder lebenden Pflanzen als Baumaterial ist schwierig zu quantifizieren. Versuche von Oplatka (1997) an Weiden haben gezeigt, dass der Widerstand in der Regel grösser ist als die Strömungsbelastung, solange die Wurzeln von Erdreich umgeben sind, jedoch schlagartig abnimmt, wenn dieses ausgespült wird.

Die Fundationsstiefe einer Uferverbauung ist den seltensten Fällen bekannt, es sei denn, es bestünden Projekt- oder Ausführungspläne. Unter Umständen muss sie im Einzelfall durch eine Sondierung ermittelt werden.

4.3.6 Tragsicherheit und Dauerhaftigkeit

Für jedes der in Kap. 4.3.3 definierten Gefährdungsbilder werden die Kriterien für die Tragsicherheit und die Dauerhaftigkeit angegeben. Die Gebrauchstauglichkeit einer Ufersicherung misst sich an ökologischen oder ästhetischen Funktionen, welche keinen Einfluss auf die Gefahrenbeurteilung haben. Aus diesem Grund werden hier keine Kriterien für die Gebrauchstauglichkeit aufgeführt.

Tab. 4.2: Kriterien für die Tragsicherheit und die Dauerhaftigkeit von Ufersicherungen.

U1 Erosion durch direkten Strömungsangriff	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn die Strömungsbelastung geringer ist als der Erosionswiderstand	erfüllt, wenn - das Ufer mit dauerhaftem Material gesichert ist (Blöcke) oder Holzverbauungen einer konstanten Feuchte ausgesetzt sind - längerfristig keine grösseren Sohlenerosionen zu erwarten sind, welche zu einer Deformation und Schwächung der Verbauung führen
U2 Instabilität durch Kolkbildung oder Sohlenerosion	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn zb > Fundation der Ufersicherung	erfüllt, wenn längerfristig - das Ufer mit dauerhaftem Material gesichert ist (Blöcke) oder Holzverbauungen einer konstanten Feuchte ausgesetzt sind - keine grösseren Sohlenerosionen zu erwarten sind - keine Strömungskonzentration durch Vegetation zu erwarten ist
U3 Hinterspülen durch Überströmen	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn die Strömungsbelastung oberhalb bzw. hinter der Ufersicherung geringer ist als der Erosionswiderstand	erfüllt, wenn längerfristig - keine massgeblichen Sohlenhebungen zu erwarten sind - keine Verminderung der Abflusskapazität durch Vegetation zu erwarten ist

4.3.7 Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit einer Massnahme "Stabilisierung des Ufers" wird nach dem Schema in Abb. 4.2 bestimmt. Die Zuordnung der Zuverlässigkeit in die Klassen "Hohe Zuverlässigkeit" und "Eingeschränkte Zuverlässigkeit" ist eine Funktion der Dauerhaftigkeit der Ufersicherung. Die Dauerhaftigkeit wiederum muss durch einen angemessenen Gewässerunterhalt gewährleistet werden. Wenn der Unterhalt vernachlässigt wird, muss angenommen werden, dass die Zuverlässigkeit eingeschränkt ist.

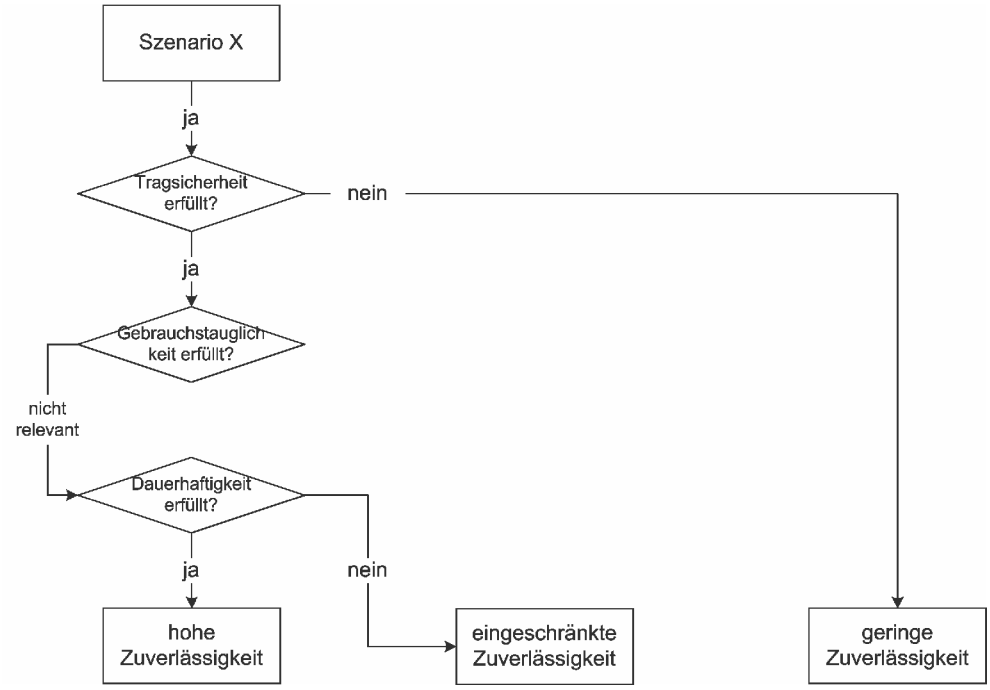


Abb. 4.2: Bestimmung der Zuverlässigkeit einer Ufersicherung aufgrund von Tragsicherheit und Dauerhaftigkeit.

4.4 Wirkungsbeurteilung

Die Wirkungsszenarien beschreiben im Wesentlichen das Ausmass der Seitenerosion in Länge und Rückgriffweite. Für die Wirkungsszenarien ist es von untergeordneter Bedeutung, durch welches Gefährdungsbild eine Ufersicherung versagt. Hingegen unterscheidet sich das Ausmass der Erosion durch die Grösse des Ereignisses und die mit dem Ereignis verbundenen übergeordneten morphologischen Prozesse im Gerinne.

Das Ausmass einer potenziellen Ufererosion muss von Fall zu Fall gutachterlich beurteilt werden. Dazu können die Erfahrungen aus der Analyse von 120 Erosionsstellen vom Hochwasser 2005 herangezogen werden (Hunzinger & Durrer, 2008):

- Über die Hälfte der Seitenerosionen sind an Prallhängen aufgetreten. Potenzielle Erosionsstellen dieser Art sind vorhersehbar. Allerdings ist fast die Hälfte der Seitenerosion *nicht* an Prallhangssituationen aufgetreten und demzufolge nicht von vorneweg zu lokalisieren.
- Bei hohen Belastungen (Wiederkehrdauer der Abflussspitze > 100 Jahre) haben die Rückgriffweiten in Gebirgsflüssen bis zu vier mal die Gerinnebreite betragen und in Talflüssen bis zu zweimal die Gerinnebreite.

Bei hoher Zuverlässigkeit der Massnahme "Stabilisierung des Ufers" wird keine Ufererosion angenommen. Bei eingeschränkter und bei geringer Zuverlässigkeit wird Ufererosion angenommen. Ufererosion hat immer die Intensitätsstufe hoch. Bei geringer Zuverlässigkeit hat das Wirkungsszenario die Eintretenswahrscheinlichkeit des Grundszenarios. Bei eingeschränkter Zuverlässigkeit wird dem Wirkungsszenario eine um eine Klasse geringere Eintretenswahrscheinlichkeit zugeordnet.

5. Fallbeispiel Gerinne mit Hochwasserschutzdamm

5.1 Einleitung

Dieses Kapitel beschreibt die Gefahrenbeurteilung für einen Abschnitt der Aare zwischen Meiringen und Brienz, auf welchem das Gerinne auf beiden Seiten mit Hochwasserschutzdämmen begrenzt wird. Die Gefährdung durch die Aare wurde 2004 von Schälchli, Abegg + Hunzinger im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Bern, OIK I, ermittelt und nach dem Hochwasser vom August 2005 neu beurteilt.

Das Fallbeispiel beschränkt sich auf den Abschnitt zwischen der Brücke Balm (km 262.9) und Junzlen (km 260.3).

5.2 Betrachtungsebenen

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Unterteilung in Betrachtungsebenen gemäss Abb. 1.1.

Das *System* wird aus dem untersuchten Abschnitt der Aare zwischen der Brücke Balm (km 262.9) und Junzlen (km 260.3), seinem Einzugsgebiet und dem umliegenden Terrain gebildet.

Das System wird in 3 *Gerinne* unterteilt (mit A, B und C bezeichnet), für welche die Zuverlässigkeit einzeln bestimmt wird. Bei der Wirkungsanalyse werden mögliche Interaktionen zwischen den Gerinnen berücksichtigt.

Die Hochwasserschutzdämme, die das Gerinne begrenzen, werden als *Einzelmassnahme* bezeichnet.

5.3 Einhaltung der Grundsätze

Bei der vorliegenden Gefahrenbeurteilung werden alle im Teil A Grundlagen und generelles Vorgehen festgelegten Grundsätze erfüllt:

1. Quantifizierbarkeit

Die Wirkung der Dämme auf die Abflusskapazität und damit auf die Überflutungsgefährdung lässt sich quantifizieren.

2. Unsicherheiten

Die Unschärfe in der ermittelten Gefährdung ist geringer als die Unterschiede in der Gefährdung mit und ohne Massnahme.

3. Szenarien

Die Gefährdung wird für Ereignisse mit hoher, mittlerer und geringer Eintretenswahrscheinlichkeit durchgeführt. Diese werden durch Hochwasser mit Wiederkehrperioden von 30, 100 bzw. 300 Jahren repräsentiert.

4. Gesamtsystem

In der nachfolgenden Gefahrenbeurteilung werden sowohl das Einzugsgebiet als auch eine Abfolge von verschiedenen Gerinneabschnitten betrachtet.

5. Permanent verfügbar

Das Gerinne und seine Hochwasserschutzdämme sind feste Bauwerke und permanent verfügbar.

6. Unterhalt

Das Gerinne und seine Hochwasserschutzdämme werden im Rahmen des Gewässerunterhaltes in Stand gehalten.

7. Temporäre Massnahmen

Die Abflusskapazität im Gerinne wird ohne temporäre Massnahmen (z. B. Verstärkung oder Erhöhung der Dämme mit Sandsäcken) beurteilt.

8. Geplante Werke

Die Hochwasserschutzdämme entlang der Aare sind bestehende Bauwerke.

9. Zeit

Mögliche zukünftige Veränderungen werden durch eine geeignete Wahl der Hochwasserszenarien berücksichtigt.

5.4 Grobbeurteilung (Schritt 1)

Prozesskenntnisse Gefahrensituation

Die Aare tritt bei Meiringen aus der Aareschlucht und fliesst in einem kanalisierten, gestreckten Gerinne durch die alluviale Ebene des Aarebodens. Der Querschnitt hat die Form eines Doppeltrapezes mit einem Hauptgerinne und beidseitigen Vorländern, die durch Hochwasserschutzdämme begrenzt sind (Abb. 5.1). Das Einzugsgebiet der Aare misst 554 km^2 und hat eine mittlere Höhe von 2150 m. Seine Hydrologie ist durch die Wasserkraftnutzung im Einzugsgebiet beeinflusst. Die Landeshydrologie betreibt bei Brienzwiler eine Abflussmessstation, bei welcher die Abflüsse seit 1933 aufgezeichnet werden. Die Dämme entlang der Aare wurden bereits einige Male überströmt, letztmals bei den Hochwasserereignissen von 1987 und 2005. 2005 ist der Damm im hier vorgestellten Abschnitt an zwei Stellen gebrochen (Tab. 5.2), was dazu geführt hat, dass die Talebene zwischen Meiringen und Brienz grossflächig überflutet wurde.

Verfügbarkeit, Zustand

Das Gerinne ist grundsätzlich permanent verfügbar (s. Grundsatz 5, Kap. 5.3). Das Hauptgerinne weist keine Anzeichen von Sohlenerosion oder Geschiebeablagerung auf. Die Ufer des Hauptgerinnes sind mit Blockwurf gesichert und bewachsen. Der Damm links ist sehr homogen, der Damm rechts trägt die Trasse der Zentralbahn. Undichte Stellen in den Dämmen sind keine bekannt.

Bearbeitungstiefe

Die potenziellen Überflutungsflächen und das Schadenpotenzial sind gross (Militärflugplatz Meiringen in der linken Talebene) und eine Überflutung der Talebene dämpft die Hochwasserwelle. Die Gefährdung wird deshalb mit grossem Tiefgang beurteilt. Die Prozesse im Gerinne und die Entlastung durch Überströmen oder durch einen Dammbruch werden mit Hilfe einer 1D-Abflussrechnung mit Geschiebetransport modelliert, die Überflutung mit einer 2D-Simulation.



Abb. 5.1: Blick von der Brücke Balm flussabwärts.



Abb. 5.2: Hochwasser 2005: Dammbrüche an der Aare zwischen Meiringen und Brienz. Blick in Fliessrichtung.

5.5 Gerinne- und Massnahmenbeurteilung (Schritt 2)

5.5.1 Grundlagen Prozesse

Grundszenarien

Die Hochwasserabflüsse verschiedener Jährlichkeit werden mit Hilfe einer Frequenzanalyse der Jahreshöchsthochwasser bei der Messstelle Brienzwiler ermittelt. Dabei werden die bisher grössten gemessenen Abflusswerte von 1987 und 2005 um den Abflussanteil erhöht, welcher in den Talboden entlastet bzw. wegen ausserordentlich tiefer Wasserstände in den Stauseen im Einzugsgebiet zurückgehalten worden ist. Für die Form der Hochwasserwelle wird das längste, bisher gemessene Hochwasserereignis (2005) verwendet. Es resultieren die Abflusswerte von Tab. 5.1 und die Ganglinien von Abb. 5.3.

Die Geschiebeszenarien beschreiben Geschiebeeinträge aus dem Einzugsgebiet oberhalb der Aareschlucht sowie aus den beiden wichtigsten Seitenzubringern Alpbach und Louwibach. Dabei wird das Zusammentreffen von Hochwassern unterschiedlicher Jährlichkeit im Hauptfluss und den Seitengewässern kombiniert und die jeweils ungünstigste Kombination verwendet.

Das Schwemmholzaufkommen ist für dieses Fallbeispiel nicht von Bedeutung.

Tab. 5.1: Grundszenarien: Abflussspitzen und Geschiebeeintrag für Ereignisse unterschiedlicher Jährlichkeit.

Szenario	**Abflussspitze**	**Geschiebeeintrag**		
	Aare	Aare	Alpbach	Louwibach
HQ_{30}	400 m^3/s	20'600 m^3	~0	~0
HQ_{100}	530 m^3/s	33'800 m^3	750 m^3	3'000 m^3
HQ_{300}	650 m^3/s	48'300 m^3	1'100 m^3	4'500 m^3

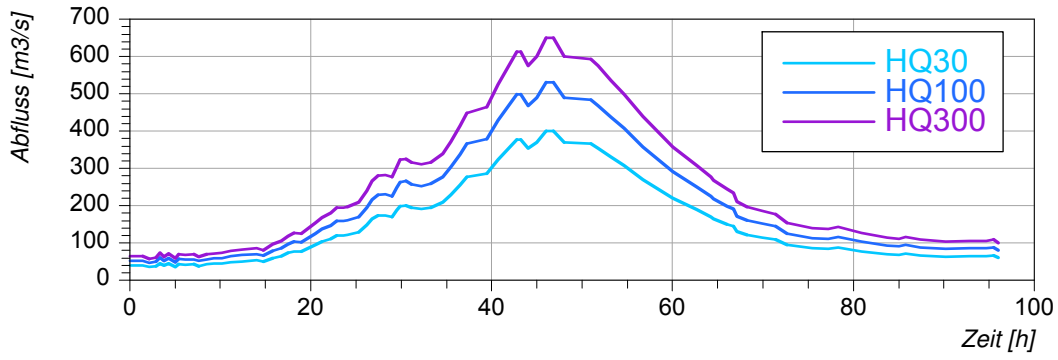


Abb. 5.3: Abflussganglinien der Grundszenarien.

5.5.2 Grundlagen Gerinne und Massnahme

Folgende Parameter beschreiben das Gerinne der Aare:

Grundlage Gerinngeometrie

- Grundrissform: die Aare fliesst in einem gestreckten, kanalisierten Gerinne.
- Geometrie: Die Sohle der Aare ist 25 m breit. Die Vorländer liegen im Durchschnitt 2.5 m über der mittleren Sohle und sind zwischen 8 m und 12 m breit. Das Gerinne wird durch die Dämme begrenzt, deren Krone zwischen 3.0 m und 3.5 m über der mittleren Sohle liegen.
- Koten: Die Dammkoten wurden aus den Querprofilen im Abstand von 200 m ermittelt. Der rechte Damm trägt die Trasse der Zentralbahn und besteht auf den obersten 60 cm aus Bahnschotter. Als zweite massgebliche Kote wird die UK des Schotters betrachtet.
- Art der Begrenzung: Hochwasserschutzdamm.
- Rauheiten Ufer und Sohle: Die Rauheiten des Ufers wurden anhand der gemessenen Pegel-Abflussbeziehung an der Messstelle Brienzwiler geeicht. Die eingesetzten kstr-Werte liegen zwischen 20 $m^{1/3}/s$ für Buschwerk und 36 $m^{1/3}/s$ für Grasland.
- Zusammensetzung und Aufbau der Sohle: Die Sohle ist alluvial. Die charakteristischen Korngrössen sind d_{90} = 16.9 cm und d_m = 7.0 cm.

Folgende Parameter beschreiben die Hochwasserschutzdämme entlang der Aare:

Grundlagen Hochwasserschutzdamm

- Geometrie des Dammes: Die Hochwasserschutzdämme links und rechts sind auf der Wasserseite zwischen 0.7 m und 1.0 m hoch, auf der Luftseite zwischen 1.0 m und 2.5 m.
- Dammmaterial und Verdichtung: Erddämme. Der Bahnschotter auf dem rechten Damm ist sehr durchlässig.
- Oberfläche: Gras.
- Untergrund (Durchlässigkeit): Es handelt sich um alluviale Böden, keine Angaben zur Durchlässigkeit.
- Homogenität: der linke Damm ist homogen aufgebaut. Der rechte Damm wurde beim Bau der Zentralbahn 1916 umgeschichtet.
- Zustand: Die Dämme sind rund 100 Jahre alt. Ihr Zustand wurde geotechnisch nicht untersucht. Er wird pauschal als mittelmässig bezeichnet.

5.5.3 Gefährdungsbilder

Für die Gerinne der Aare werden die Gefährdungsbilder

- G1 Abflusskapazität erschöpft durch Erreichen der vertikalen Begrenzung und
- G2 Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Versagen der Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm

betrachtet. Auf dem untersuchten Abschnitt gibt es keine Brücken, das Gefährdungsbild G3 Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Verklausung des Querschnitts ist deshalb ohne Bedeutung.

Für die Hochwasserschutzdämme entlang der Aare sind die Gefährdungsbilder

- D1 Überströmen und luftseitige Erosion und
- D1.2 Durchströmen des Bahnschotters und luftseitige Erosion

von Bedeutung (Abb. 5.4). Gefährdungsbild D1.2 ist ein neu definiertes, nur für den rechten Damm mit Bahnschotter relevantes Gefährdungsbild. Erreicht der Wasser-

spiegel die Unterkante des Bahnschotters, wird dieser durchströmt und das Wasser kann auf der Luftseite abfliessen und, wie beim Überströmen des Dammes, die luftseitige Böschung erodieren.

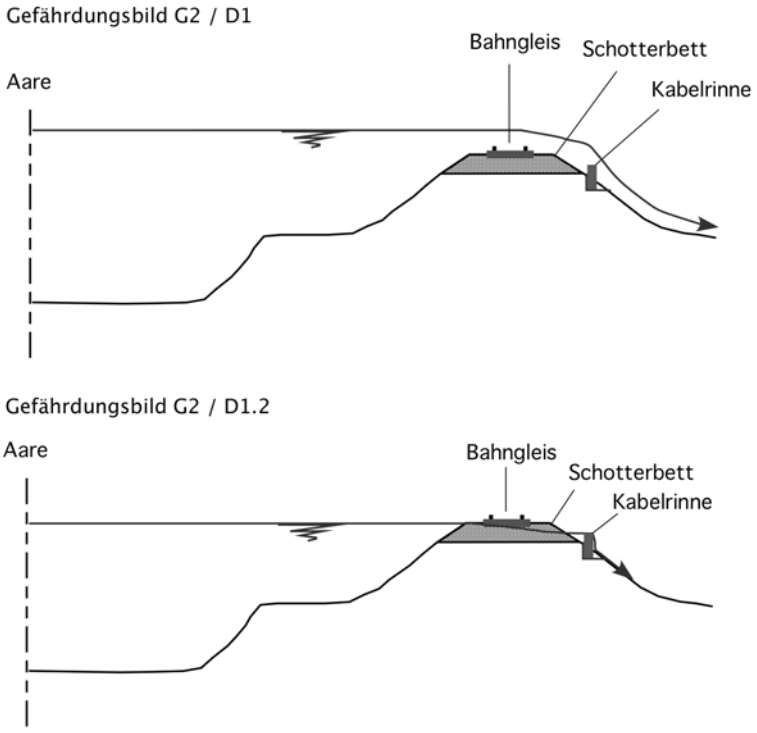


Abb. 5.4: Gefährdungsbilder für die Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm entlang der Aare.

Die übrigen Gefährdungsbilder werden aus folgenden Gründen als nicht relevant betrachtet:

- D2 Wasserseitige direkte Erosion: auf den Vorländern entlang der Hochwasserschutzdämme herrschen geringe Fliessgeschwindigkeiten und somit eine geringe hydraulische Belastung auf die Dammböschung.
- D3 Wasserseitige Instabilität durch Kolkbildung oder Sohlenerosion: Sohlenerosion würde die Begrenzung des Hauptgerinnes betreffen, nicht jedoch den weiter davon entfernten Hochwasserschutzdamm.
- D4 Luftseitige Böschungsinstabilität: bei den verhältnismässig niedrigen Dämmen und der kurzen Dauer der Belastung reicht die Potenzialdifferenz nicht aus, um die luftseitige Böschung zu destabilisieren.
- D5 Bruch durch innere Erosion: die Dämme sind dicht und es werden keine Feinsedimente ausgewaschen.
- D6 Bruch durch hydraulischen Grundbruch: bei den verhältnismässig niedrigen Dämmen und der kurzen Dauer der Belastung reicht die Potenzialdifferenz nicht aus, um einen hydraulischen Grundbruch zu erzeugen.
- D7 Bruch durch Erdbeben: bei HQ_1 verbleibt das Wasser im Hauptgerinne der Aare. Die Dämme werden nicht beansprucht.

Die Gefährdungsbilder D4, D5 und D6 wurden nach einer geotechnischen Grobbeurteilung ausgeschlossen. Der Ausschluss ohne rechnerische Nachweise ist nur deshalb zulässig, weil aus den betrachteten Gefährdungsbildern D1 und D1.2 bei allen untersuchten Szenarien eine geringe Zuverlässigkeit der Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm resultiert und damit ohnehin ein Versagen angenommen werden muss.

5.5.4 Einwirkung

Belastungsgrössen

Mit Hilfe einer 1d-Abflusssimulation werden die maximale Lage von Wasserspiegel und Energielinie für alle Grundszenarien bestimmt. Die Simulation berücksichtigt den Geschiebetransport und Sohlenveränderungen während des Ereignisses. Die Energielinie wird mit der mittleren Fliessgeschwindigkeit auf dem Vorland berechnet, welche geringer ist als die Fliessgeschwindigkeit im Hauptgerinne. Die Wasserspiegel und Energielinien werden mit den massgeblichen Koten der Begrenzung des Gerinnes (Dammkrone bzw. Dammkrone abzüglich 60 cm Bahnschotter) verglichen (Abb. 5.5). Für die Berechnung wurden keine Entlastungen durch Überströmen oder Dammbruch angenommen.

5.5.5 Widerstand

Vertikale Begrenzung

Die Begrenzung des Gerinnes ist in Abb. 5.5 als Referenzhöhe für die Lage von Wasserspiegel und Energielinie aufgetragen.

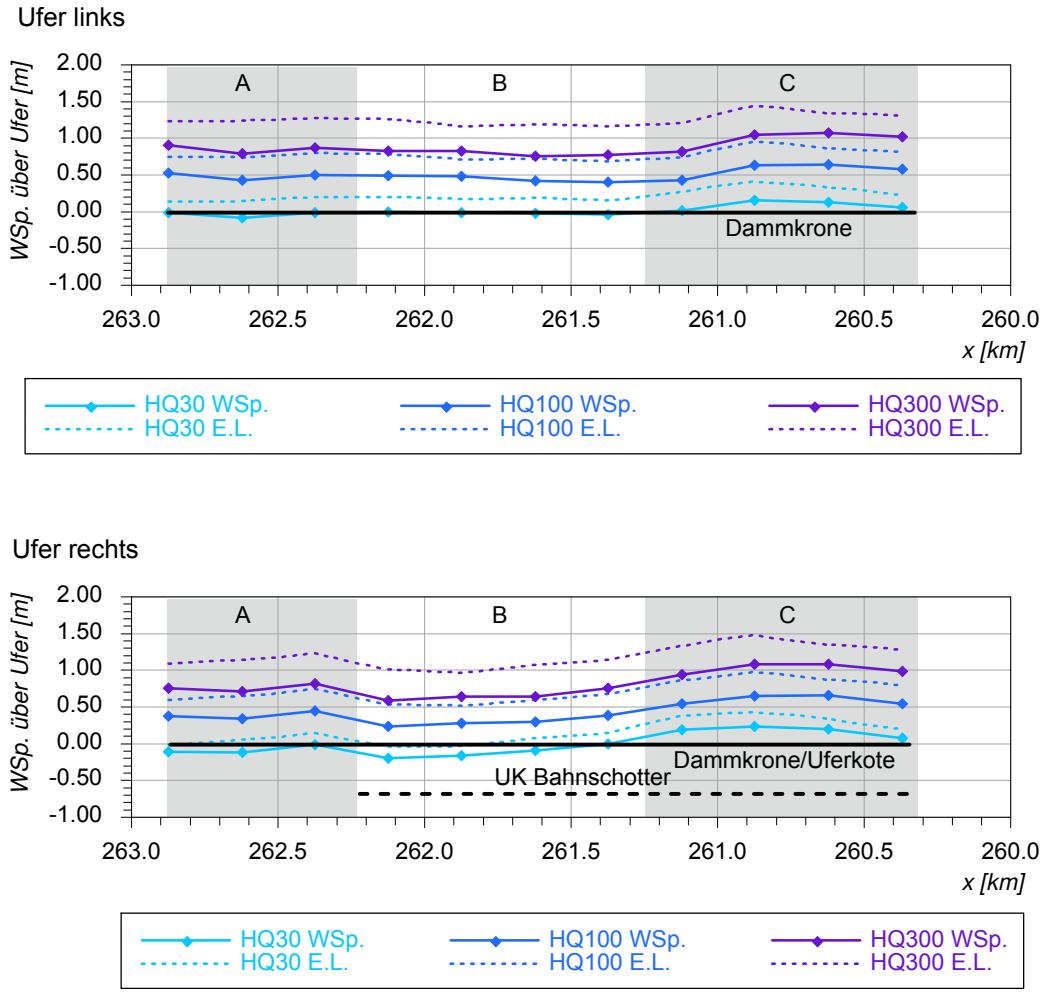


Abb. 5.5: Vergleich der maximalen Lage von Wasserspiegel und Energielinie mit den massgeblichen Koten der Begrenzung des Gerinnes.

Erosionswiderstand Dammböschung

Der Erosionswiderstand der Dammböschung wird gemäss Tab. 3.4 als mittel bezeichnet (Dammkörper Lockermaterial, Bedeckung Gras). Der Erosionswiderstand des Bahnschotters wird als gering bezeichnet (Dammkörper Lockermaterial, keine Bedeckung).

5.5.6 Tragsicherheit, Kapazität / Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit

Die Tragsicherheit, die Kapazität / Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit werden für jeden Gerinneabschnitt, jede Flussseite, jedes Grundszenario und jedes Gefährdungsbild einzeln betrachtet. Grundlage dazu bildet der Vergleich der Wasserspiegellage mit den massgeblichen Koten, wie er in Abb. 5.5 dargestellt ist. Das Vorgehen wird in Tab. 5.2 und Abb. 5.6 exemplarisch am Gerinneabschnitt B dargestellt.

Tab. 5.2: Tragsicherheit, Kapazität / Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit im Gerinneabschnitt B. Für Abkürzungen siehe Legende der Tabelle 3.5, Seite 8.

Grundszenario	Gefährdungsbild	TS Einzelmassnahme	Kap/GT	DH
linksufrig				
HQ_{30}	G1	–	erfüllt, weil $z_b + h \leq OK\ Gerinne$	erfüllt
	G2 / D1	nicht erfüllt, weil $z_b + h + \frac{v^2}{2g} > OK\ Gerinne$	nicht erfüllt, weil TS Einzelmassnahme nicht erfüllt ist	erfüllt
HQ_{100}	G1	–	nicht erfüllt, weil $z_b + h > OK\ Gerinne$	erfüllt
	G2 / D1	nicht erfüllt, weil $z_b + h + \frac{v^2}{2g} > OK\ Gerinne$	nicht erfüllt, weil TS Einzelmassnahme nicht erfüllt ist	erfüllt
HQ_{300}	G1	–	nicht erfüllt, weil $z_b + h > OK\ Gerinne$	erfüllt
	G2 / D1	nicht erfüllt, weil $z_b + h + \frac{v^2}{2g} > OK\ Gerinne$	nicht erfüllt, weil TS Einzelmassnahme nicht erfüllt ist	erfüllt
rechtsufrig				
HQ_{30}	G1	–	erfüllt, weil $z_b + h \leq OK\ Gerinne$	erfüllt
	G2 / D1	erfüllt, weil $z_b + h + \frac{v^2}{2g} < OK\ Gerinne$	erfüllt, weil TS Einzelmassnahme erfüllt ist	erfüllt
	G2 / D1.2	nicht erfüllt, weil $z_b + h > UK\ Bahnschotter$	nicht erfüllt, weil TS Einzelmassnahme nicht erfüllt ist	erfüllt
HQ_{100}	G1	–	nicht erfüllt, weil $z_b + h > OK\ Gerinne$	erfüllt
	G2 / D1	nicht erfüllt, weil	nicht erfüllt, weil TS Einzelmassnahme nicht erfüllt ist	erfüllt

Grundszenario	Gefährdungsbild	TS Einzelmassnahme	Kap/GT	DH
		$z_b + h + \frac{v^2}{2g} > OK\ Gerinne$		
	G2 / D1.2	nicht erfüllt, weil $z_b + h > UK\ Bahnschotter$	nicht erfüllt, weil TS Einzelmassnahme nicht erfüllt ist	erfüllt
HQ300	G1	–	nicht erfüllt, weil $z_b + h > OK\ Gerinne$	erfüllt
	G2 / D1	nicht erfüllt, weil $z_b + h + \frac{v^2}{2g} > OK\ Gerinne$	nicht erfüllt, weil TS Einzelmassnahme nicht erfüllt ist	erfüllt
	G2 / D1.2	nicht erfüllt, weil $z_b + h > UK\ Bahnschotter$	nicht erfüllt, weil TS Einzelmassnahme nicht erfüllt ist	Erfüllt

Die Dauerhaftigkeit der Massnahme ist erfüllt, weil

- die Sohlenlage durch regelmässige Kiesentnahme am Ausgang der Aareschlucht und bei der Mündung der Aare in den Brienzersee kontrolliert wird,
- der Bewuchs des Vorlandes im Rahmen des Gewässerunterhaltes periodisch zurück geschnitten wird.

Für die Gerinne A und C gelten die Überlegungen sinngemäss, wobei das Gefährdungsbild G2 / D1.2 nur auf das Gerinne C angewandt wird.

5.5.7 Zuverlässigkeit

Für den betrachteten Abschnitt B kann die Zuverlässigkeit der Massnahme "Gewährleisten der Gerinnekapazität" mit der Einzelmassnahme "Hochwasserschutzdamm" mit dem Schema in Abb. 4.2 bestimmt werden.

Für alle untersuchten Szenarien hat das Gerinne eine geringe Zuverlässigkeit, weil bei mindestens einem der betrachteten Gefährdungsbilder entweder die Tragsicherheit der Einzelmassnahme oder die Kapazität / Gebrauchstauglichkeit des Gerinnes nicht erfüllt ist (Abb. 5.6). Auch für die Abschnitte A und C resultiert eine geringe Zuverlässigkeit.

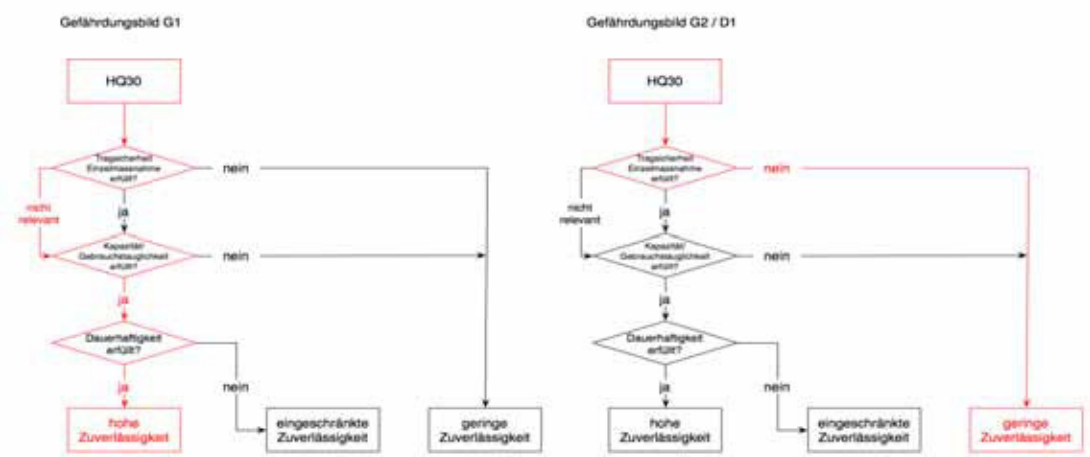


Abb. 5.6: Zuverlässigkeit des Gerinneabschnitts B, linkes Ufer in Bezug auf die zwei massgeblichen Gefährdungsbilder beim Szenario HQ30.

5.6 Wirkungsbeurteilung

5.6.1 Wirkung des Gerinnes, Abschnitt B

Für das Gerinne B sind in Abhängigkeit der Zuverlässigkeit der Massnahme und des Gefährdungsbildes grundsätzlich die folgenden Wirkungen möglich (vgl. Tab. 5.3):

- hohe Zuverlässigkeit → keine Wirkung
- geringe Zuverlässigkeit G1 → Überströmen des Dammes, Entlastung über Dammkrone
- geringe Zuverlässigkeit G2 → Dammbruch, Entlastung durch Dammbresche

Die Wirkung Überströmen des Dammes wird durch die überströmte Länge des Dammes charakterisiert. Dafür wurden Werte zwischen 80 m und 250 m festgelegt.

Die Wirkung Dammbruch wird mit folgenden Parametern präzisiert:

- Breite der Dammbresche: 100 m (Erfahrungswert vom Hochwasser 2005).
- Tiefe der Bresche: gesamte wasserseitige Höhe des Dammes.
- Zeitpunkt der Breschenbildung: Bei Gefährdungsbild G2 / D1 Beginn der Breschenbildung nach 2 Stunden Überströmen, bei Gefährdungsbild G2 / D1.2 Beginn der Breschenbildung nach 4 Stunden Durchsickern des Bahnschotters.
- Dauer der Breschenbildung: 3 Stunden bis zur Bildung der vollständigen Bresche.

Analog dazu können die Wirkungen für die Abschnitt A und C definiert werden.

Tab. 5.3: Mögliche Wirkungen für den Gerinneabschnitt B.

Grundszenario	Gefährdungsbild	Wirkung links	Wirkung rechts
HQ_{30}	G1	hohe Zuverlässigkeit: keine Wirkung	hohe Zuverlässigkeit: keine Wirkung
	G2 / D1	geringe Zuverlässigkeit: Dammbruch	hohe Zuverlässigkeit: keine Wirkung
	G2 / D1.2	–	geringe Zuverlässigkeit: Dammbruch
HQ_{100}	G1	geringe Zuverlässigkeit: Überströmen des Dammes	geringe Zuverlässigkeit: Überströmen des Dammes
	G2 / D1	geringe Zuverlässigkeit: Dammbruch	geringe Zuverlässigkeit: Dammbruch
	G2 / D1.2	–	geringe Zuverlässigkeit: Dammbruch
HQ_{300}	G1	geringe Zuverlässigkeit: nur Überströmen	hohe Zuverlässigkeit: keine Wirkung
	G2 / D1	geringe Zuverlässigkeit: Dammbruch	geringe Zuverlässigkeit: Dammbruch
	G2 / D1.2	–	geringe Zuverlässigkeit: Dammbruch

5.6.2 Wirkung des Systems

Abfolge von Gerinneabschnitten

Als Systemwirkung wird die Kombination der Wirkungen in den verschiedenen Gerinnen bezeichnet. Die Beurteilung zeigt, dass in allen Abschnitten ein Versagen des Gerinnes möglich ist und Wasser entweder links oder rechts durch Überströmen des Dammes oder durch eine Dammbresche ausfliessen kann. Daraus liessen sich sehr viele Systemwirkungsszenarien kombinieren. Aus praktischen Gründen wird die Anzahl der Systemwirkungsszenarien begrenzt. Dabei werden die folgenden Regeln angewandt:

1. Ist Überströmen links und rechts möglich, wird Überströmen auf der Seite mit der tieferen Dammkote angenommen.
2. Dammbrüche werden entweder links oder rechts angesetzt, nicht aber beidseitig.
3. Überströmen wird immer angenommen, wenn die Zuverlässigkeit der Massnahme gering ist.
4. Ein Dammbruch wird nicht zwingend angenommen, auch wenn die Zuverlässigkeit der Massnahme gering ist. (Damit wird verhindert, dass im Unterwasser des Dammbruches in jedem Fall mit einer geringeren Abflussmenge gerechnet wird.)
5. Ein Dammbruch in einem flussaufwärts liegenden Gerinneabschnitt steht stellvertretend für einen Dammbruch in einem flussabwärts liegenden Gerinneabschnitt auf derselben Flussseite, wenn davon die gleichen Überflutungsflächen betroffen sind.

Daraus ergeben sich die möglichen System-Wirkungsszenarien von Tab. 5.4. Im Gerinne C ist ein Dammbruch nicht explizit aufgeführt, weil ein solches Szenario durch die Wirkung eines Dammbruches im Gerinne B abgedeckt ist (Regel 5). Die Systemwirkungsszenarien haben die Wahrscheinlichkeit des Grundszenarios.

Tab. 5.4: Systemwirkungsszenarien als Kombinationen von Gerinnewirkungen.

Grundszenario	**Systemwirkungsszenario**	**A**	**B**	**C**
HQ30	HQ30 _A	Dammbruch links	keine Wirkung	Überströmen rechts
	HQ30 _B	keine Wirkung	Dammbruch rechts	Überströmen rechts
HQ100	HQ100 _A	Dammbruch links	Überströmen links	Überströmen rechts
	HQ100 _B	Überströmen links	Dammbruch rechts	Überströmen rechts
HQ300	HQ300 _A	Dammbruch links	Überströmen links	Überströmen rechts
	HQ300 _B	Überströmen links	Dammbruch rechts	Überströmen rechts

Im Rahmen der Wirkungsbeurteilung werden die Ausflussmengen für jedes der o. g. Systemwirkungsszenarien bestimmt. Dazu wird mit Hilfe des 1D-Abflussmodells eine seitliche Entlastung entweder über die Dammkrone oder durch eine sich sukzessive vergrössernde Bresche simuliert. Daraus resultieren Ausflussganglinien,

welche als Eingangsgrössen für die zweidimensionale Überflutungssimulation im Talboden verwendet werden.

Im vorliegenden Beispiel steht ein Dammbruch im Gerinne B rechts stellvertretend für einen Dammbruch im Gerinne C rechts. Die Intensitäten der Überflutung im Nahbereich der Bresche, welche für den Stellvertreter ermittelt werden, werden auf die flussabwärts liegende potenzielle Dammbruchstelle im Gerinne C extrapoliert.

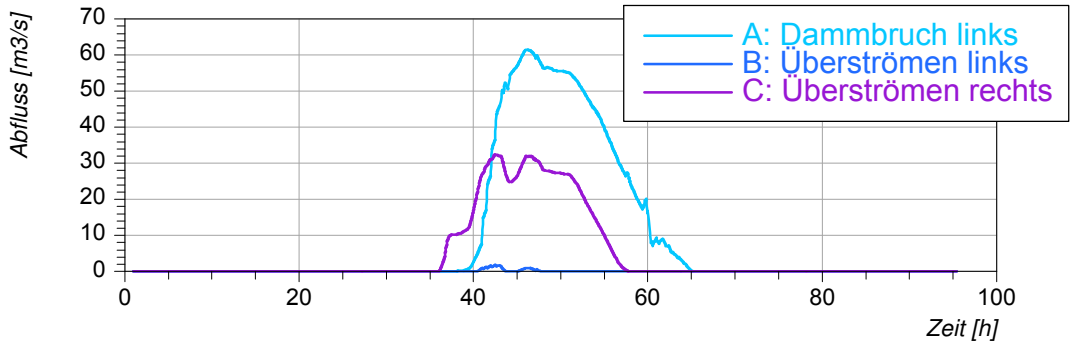


Abb. 5.7: Systemwirkungsszenario HQ100_A. Entlastungsganglinien.

6. Fallbeispiel Ufersicherung

6.1 Einleitung

Für das Fallbeispiel Ufersicherung wurde der Alpenrhein ausgewählt. Die Beurteilung erfolgte im Rahmen des Projektes Schadenrisiken und Schutzmassnahmen im Alpenrheintal in den Jahren 2000 bis 2003 (Teilbericht hydraulische und morphologische Analyse des Alpenrheins, bearbeitet von Hunziker, Zarn & Partner für die IG Flussbau Alpenrhein im Auftrag der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein).

Das Fallbeispiel beschränkt sich auf den Abschnitt zwischen Sargans (ca. km 35) und Ruggell (ca. km 60).

6.2 Betrachtungsebenen

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Unterteilung in Betrachtungsebenen gemäss Abb. 1.1.

Das *System* wird aus dem Alpenrheinabschnitt zwischen Sargans (ca. km 35) und Ruggell (ca. km 60) und seinem Einzugsgebiet gebildet.

Die Ufersicherung ist eine *Einzelmassnahme*. Diese muss sowohl in Bezug auf die Strömungsbeanspruchung isoliert sowie in Bezug auf Unterkolkung im Zusammenhang mit der Morphologie und den möglichen Sohlenveränderungen im gesamten Gerinneabschnitt betrachtet werden.

6.3 Einhaltung der Grundsätze

Bei der vorliegenden Gefahrenbeurteilung werden alle im Teil A Grundlagen und generelles Vorgehen festgelegten Grundsätze erfüllt:

1. Quantifizierbarkeit

Die Wirkung der Ufersicherung auf die Seitenerosion lässt sich quantifizieren.

2. Unsicherheiten

Die Beurteilung einer Ufersicherung ist zwar immer mit Unsicherheiten behaftet. Im Fall des Beispiels ist aber die Wirkung des Uferschutzes grösser als die Unsicherheit bei der Prozessbeurteilung. Zudem dienen die Ereignisse der letzten 100 Jahre der Verifikation der rechnerischen Beurteilungen.

3. Szenarien

Die Gefährdung wird für Ereignisse mit hoher, mittlerer und geringer Eintretenswahrscheinlichkeit durchgeführt. Diese werden durch Hochwasser mit Widerkehrperioden von 30, 100 bzw. 300 Jahren repräsentiert.

4. Gesamtsystem

Es werden sowohl die Ufersicherung als Einzelmassnahme als auch in Kombination mit verschiedenen Prozessen im beschriebenen Gerinneabschnitt betrachtet.

5. Permanent verfügbar

Die Ufersicherung ist ein festes Bauwerk und permanent verfügbar.

6. Unterhalt

Die Ufersicherung wird im Rahmen des Gewässerunterhaltes in Stand gehalten. Die Sohlenlagen werden regelmässig mit Querprofilaufnahmen überprüft.

7. Temporäre Massnahmen

Die Wirkung wird ohne temporäre Massnahmen beurteilt.

8. Geplante Werke

Die Ufersicherung des Alpenrheins ist ein bestehendes Bauwerk.

9. Zeit

Mit dem Rheinunternehmen besteht eine permanente Organisation, welche für den Unterhalt zuständig ist.

6.4 Grobbeurteilung (Schritt 1)

Prozesskenntnisse Gefahrensituation

Der Alpenrhein fliesst zwischen Sargans und Ruggell in einer Dammstrecke und formt alternierende Bänke. Kiesentnahmen aus dem Alpenrhein, vor allem jene zwischen 1950 und 1972, führten zu einer massiven Abtiefung der Rheinsohle. Heute stabilisiert eine Blockrampe bei Buchs bei km 49.6 die Sohlenlage. Die Ufer sind im unteren Teil mit einem massiven Blockwurf gesichert (Vorgrund). Im Prinzip handelt es sich um eine Unterfangung des ursprünglichen Uferschutzes, welche als Folge der Eintiefung notwendig wurde. Der obere Teil ist mit kleineren, glatt versetzten Steinen geschützt (Blocksatz), welche praktisch vollständig mit Vegetation überwachsen sind.

Im Rheinabschnitt zwischen Sargans und Ruggell ist der Damm letztmals 1927 gebrochen. Der rechtsufrige Damm wurde im Bereich der Brücken bei Schaan überströmt und zerstört. Schäden an den Ufern respektive Dämmen durch Seitenerosionsprozesse sind keine bekannt.

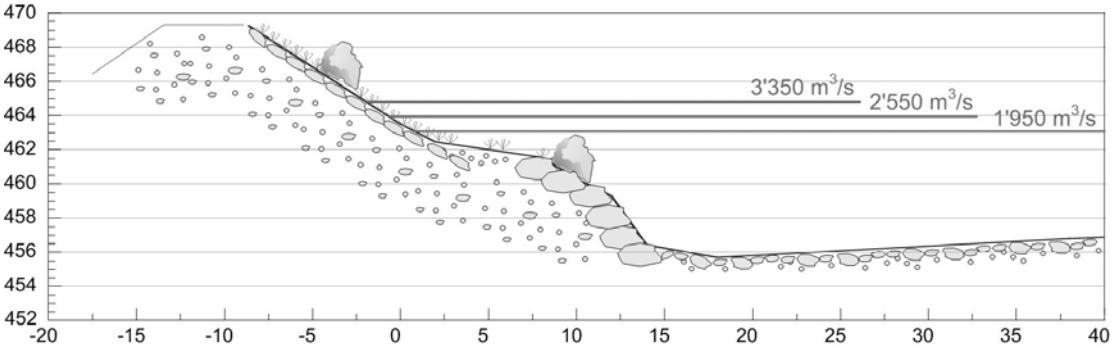


Abb. 6.1: Schematische Darstellung der Ufersicherung des Hochwasserschutzdammes des Alpenrheins zwischen Sargans und Ruggell.



Abb. 6.2: Alpenrhein bei Buchs (km 51).

Verfügbarkeit, Zustand, Relevanz

Die Ufersicherung ist durchgehend und permanent verfügbar. Die Ufer werden ständig unterhalten und die Höhe der Sohlenlage wird regelmässig überprüft. Die Fundierungstiefe der Ufer ist aber nicht explizit bekannt. Nach Angaben des Rheinunternehmens wurde der Blockwurf des Vorgrundes so lange ergänzt, bis er stabil war. Es darf deshalb angenommen werden, dass der Uferschutz bis auf das Kolkniveau der alternierenden Bänke reicht.

Bearbeitungstiefe

Die potenziellen Überflutungsflächen und das Schadenpotenzial sind gross und eine Überflutung der Talebene dämpft die Hochwasserwelle. Die Gefährdung wird deshalb mit grossem Tiefgang beurteilt. Die Prozesse im Gerinne werden mit Hilfe einer 1D-Abflussrechnung mit Geschiebetransport und Abschätzverfahren erfasst.

6.5 Gerinne- und Massnahmenbeurteilung (Schritt 2)

6.5.1 Grundlagen Prozesse

Grundszenarien

Der Alpenrhein entwässert bei Sargans ein Einzugsgebiet von rund 4'500 km^2. Zwischen Sargans und Rugell münden heute nur noch zwei Zuflüsse in den Alpenrhein, welche in Bezug auf das Abfluss- und Geschieberegime vernachlässigbar sind. Die Hochwasserabflüsse im Alpenrhein wurden im Rahmen einer umfangreichen Hydrologiestudie analysiert. Dabei wurden Jahresmaxima von Abflussmessreihen von rund 100 Jahren ausgewertet, die Güte der Pegelrelationen bei den grössten drei Abflüssen im letzten Jahrhundert beurteilt, historische Ereignisse analysiert, die Beeinflussung der Speicherseen abgeschätzt und mit einem Niederschlags-Abflussmodell verschiedene Meteoszenarien modelliert. Als massgebende Abflussganglinie wurde ein formgleiches Hochwasser verwendet, wie 1987 beobachtet wurde. In der Tab. 6.1 und in Abb. 6.3 sind die verwendeten Abflussmengen und die Ganglinien dargestellt.

Das eingesetzte numerische Feststofftransportmodell umfasst den Alpenrhein von Reichenau (km 0) bis zum Bodensee (km 90). Simulationen mit unterschiedlichem Geschiebeaufkommen in den Einzugsgebieten der wichtigen Zuflüsse zeigen, dass im beschriebenen Abschnitt (km 35 bis km 60) der Geschiebetransport während

eines einzelnen Hochwasserereignisses wenig vom Geschiebeeintrag der Zuflüsse abhängt. In Tab. 6.1 ist der berechnete Geschiebedurchgang bei den verschiedenen Grundszenarien aufgeführt.

Das Schwemmholzaufkommen ist für dieses Fallbeispiel nicht von Bedeutung.

Die in Tab. 6.1 und Abb. 6.3 aufgeführten Grundszenarien HQ_{30}, HQ_{100} und HQ_{300} stehen stellvertretend für Ereignisse mit hoher, geringer und mittlerer Wahrscheinlichkeit.

Tab. 6.1: Grundszenarien: Abflussspitzen und Geschiebedurchgang für Ereignisse unterschiedlicher Jährlichkeit.

Szenario	**Abflussspitze**	**Geschiebedurchgang**		
	Alpenrhein	km 35 Sargans	km 49.6 Buchs	km 60 Ruggell
HQ_{30}	1'950 m^3/s	60'000 m^3	50'000 m^3	20'000 m^3
HQ_{100}	2'550 m^3/s	100'000 m^3	80'000 m^3	35'000 m^3
HQ_{300}	3'350 m^3/s	165'000 m^3	125'000 m^3	60'500 m^3

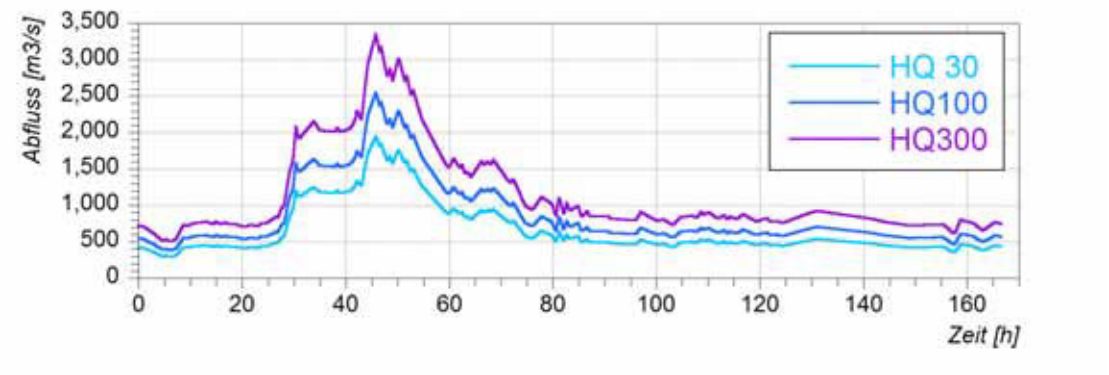


Abb. 6.3: Abflussganglinien der Grundszenarien.

6.5.2 Grundlagen Gerinne und Massnahme

Grundlage Gerinnegeometrie

Der Alpenrhein kann zwischen Sargans (km 35) und Ruggell (km 60) wie folgt charakterisiert werden:

- Grundrissform: der Alpenrhein fliesst in einem gestreckten, kanalisierten Gerinne. Wegen der Sohlenbreite von rund 95 m formt er alternierende Bänke.
- Geometrie: Die Sohle ist im Mittel 95 m breit und der Dammabstand beträgt 140 m. Der befahrbare Vorgrund liegt rund 1 m tiefer als der Uferschutz und ist ca. 5 m breit. Die Gerinnetiefe, das heisst der Abstand zwischen Dammkote und mittlerer Sohle liegt bei 11.3 m.
- Rauheiten Ufer und Sohle: Die Rauheiten nach Strickler wurden für die Ufer konservativ auf 25 $m^{1/3}/s$ und für die Sohle auf rund 35 $m^{1/3}/s$ festgelegt. Soweit möglich wurden diese Annahmen mit Hilfe der Hochwasserspuren von 1987 überprüft.

- Zusammensetzung und Aufbau der Sohle: Die Sohle ist alluvial. Die charakteristischen Korngrössen schwanken zwischen Sargans und Ruggell für d_{90} von 7 bis 12 cm und d_m von 4.5 bis 3 cm (= Modellwerte).

Die folgenden Parameter beschreiben den Längsverbau:

Grundlagen
Längsverbau

- Geometrie: Der Längsverbau ist durchgehend. Der Vorgrund ist mit grosser Wahrscheinlichkeit auf der Kolktiefe der alternierenden Bänke fundiert. Der Schutz reicht bis zur Dammkrone. Die Böschung ist im Mittel 33° geneigt.
- Material: Die Sicherung des Vorgrundes besteht aus Blöcken (geschätztes Alter: bis 40 Jahre), der obere Teil aus versetzten Steinen (Blocksatz), welche vollständig mit einer Grasnarbe überwachsen sind (geschätztes Alter bis 100 Jahre und mehr).

6.5.3 Gefährdungsbilder

Für die Ufersicherung des Alpenrheins werden folgende Gefährdungsbilder betrachtet

- U1 Erosion der Ufersicherung durch direkten Strömungsangriff
- U2 Instabilität durch Kolkbildung oder Sohlenerosion

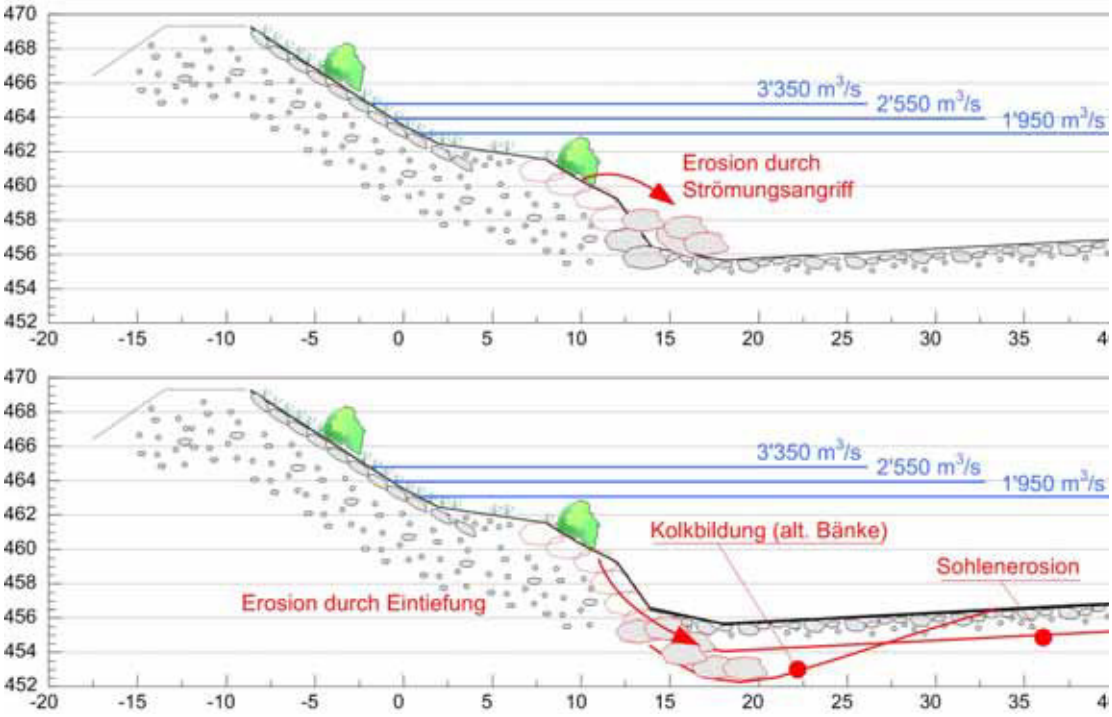


Abb. 6.4: Gefährdungsbilder für die Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm entlang der Aare.

Die übrigen Gefährdungsbilder werden mit den folgenden Begründungen als nicht relevant betrachtet:

- U3 Hinterspülen durch Überströmen: Der Erosionsschutz reicht über den Wasserspiegel.

6.5.4 Einwirkung

Belastungsgrössen

Mit Hilfe der Resultate einer 1D-Abflusssimulation wurden die maximale Strömungsbeanspruchungen der Ufer bestimmt. In Abb. 6.5 werden sie mit Grenzwerten für verschiedene Verbauungsarten verglichen. Die Berechnung auf der Basis einer 1D-Abflusssimulation ist trotz der Bankstrukturen zulässig, weil diese bei hohen Abflüssen abflachen und die Querströmungen abnehmen. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass die Ufersicherung bei kleineren Hochwasserabflüssen der Querströmung standhält.

Auf der Höhe des Blocksatzes über dem Vorgrund beträgt die Belastung 50 % bis 60 % der maximalen Schleppspannung.

Eine weitere Belastungsgrösse sind die Kolktiefen der vorhandenen alternierenden Bänke und grossräumige Sohlenveränderungen. Abb. 6.6 zeigt, dass die Kolktiefen der alternierenden Bänke mit zunehmendem Abfluss abnehmen, weil diese Gerinneformen abflachen respektive ausgewaschen werden. Die rechnerischen Kolktiefen von rund 3.5 m bei Abflüssen unter 500 m^3/s werden durch die Querprofilaufnahmen 1995/96 bestätigt, welche für den Untersuchungsabschnitt eine maximale Kolktiefe von 3.7 m ausweisen.

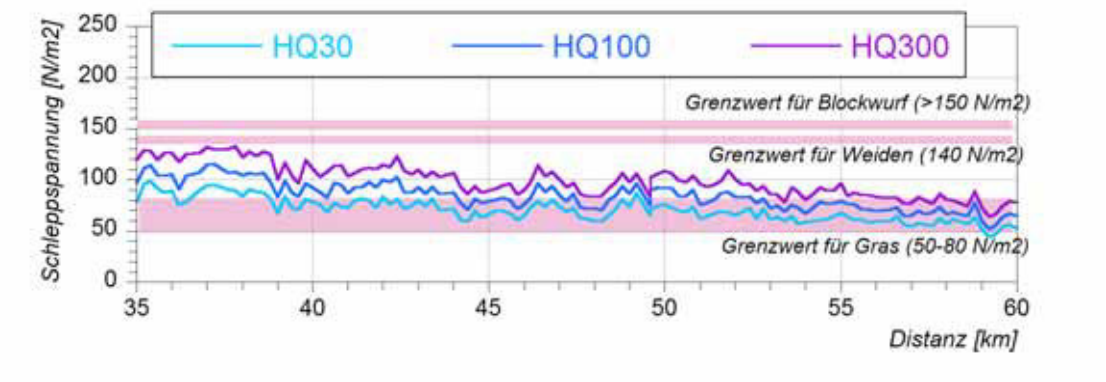


Abb. 6.5: Vergleich der maximalen Schleppspannung am Ufer mit Grenzwerten für Gras und Weiden. Letztere werden als eher konservative Werte betrachtet (Oplatka, 1998).

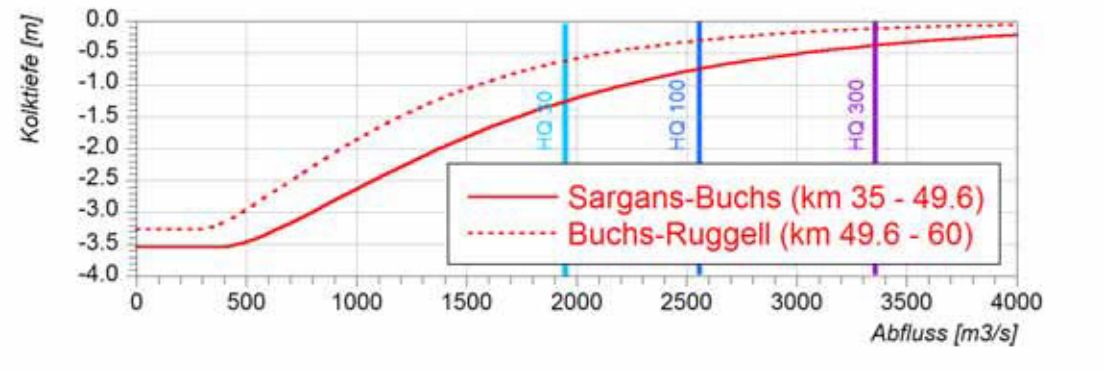


Abb. 6.6: Entwicklung der Kolktiefen von alternierenden Bänken zwischen Sargans und Ruggell bei zunehmendem Abfluss (Kolktiefe bezieht sich auf die mittlere Sohle).

Im Falle eines grossen Hochwassers dominieren zwischen Sargans und Ruggell Ablagerungen (siehe auch Angaben in Tab. 6.1). Wegen der grossen Abmessungen des Flussbettes betragen die mittleren Anlandungen nur wenige Zentimeter. Lokal werden Sohlenveränderungen von rund 20 cm erwartet (Anlandungen und Erosionen). Längerfristig sind bei Sargans Sohleneintiefungen von bis zu 50 cm möglich (Rotationserosion um Blockrampe bei Buchs km 49.6).

6.5.5 Widerstand

Vertikale Begrenzung

Der Erosionswiderstand des am meisten beanspruchten Vorgrundes wird mit 150 N/m^2 und mehr bestimmt. Der überwachsene Blocksatz im oberen Teil der Böschung hat zwar theoretisch einen noch höheren Erosionswiderstand. Es kann aber nicht davon ausgegangen werden, dass er keine Lücken aufweist. Auf jeden Fall darf mindestens der Erosionswiderstand von Gras in Rechnung gestellt werden.

Erosionswiderstand Dammböschung

Die Fundationstiefe des Vorgrundes dürfte aufgrund des beschriebenen Einbaus im Bereich der Kolktiefen der alternierenden Bänke liegen (ca. 3.5 m unterhalb der mittleren Sohle).

6.5.6 Tragsicherheit und Dauerhaftigkeit

Die Tragsicherheit und die Dauerhaftigkeit für das Gefährdungsbild U1 Ufersicherung durch direkten Strömungsangriff und das Gefährdungsbild U2 Instabilität durch Kolkbildung oder Sohlenerosion ist für alle Grundszenarien erfüllt. Die Begründungen können der Tab. 6.2 und der Tab. 6.3 entnommen werden.

Tab. 6.2: Tragsicherheit und Dauerhaftigkeit für das Gefährdungsbild U1: Erosion der Ufersicherung durch direkten Strömungsangriff.

Grundszenario	Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
HQ_{30}	erfüllt Die maximale Schleppspannung liegt im Bereich des Grenzwertes für Gras. Der Erosionswiderstand wird höher eingeschätzt.	erfüllt Die Ufersicherung besteht aus dauerhaftem Material Die Ufer werden regelmässig unterhalten
HQ_{100}	erfüllt Die maximalen Schleppspannungen liegen zwischen den Grenzwerten für Gras und Weiden. Im Bereich des Vorgrundes ist die Belastung deutlich geringer als der berechnete Erosionswiderstand (> 150 N/m^2). Auch die Tragsicherheit der Ufersicherung über dem Vorgrund ist gegeben, weil dort die Belastung wegen der deutlich geringeren Fliesstiefe nur etwa 50 bis 60% der maximalen Belastung von Abb. 6.5 beträgt und somit im Bereich des Grenzwertes für Gras liegt.	erfüllt Begründung dito oben
HQ_{300}	Erfüllt Begründung dito oben, Erosionswiderstand (> 150 N/m^2) aber geschätzt und nicht berechnet.	erfüllt Begründung dito oben

Tab. 6.3: Tragsicherheit und Dauerhaftigkeit für das Gefährdungsbild U2: Instabilität durch Kolkbildung oder Sohlenerosion.

Grundszenario	Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
HQ_{30}	erfüllt Die Fundation der Ufersicherung liegt zwar höchstens auf dem Niveau der Kolktiefe der alternierenden Bänke. Da die Kolktiefe mit zunehmendem Abfluss erheblich abnimmt und lokal nur Sohleneintiefungen von rund 20 cm erwartet werden, ist die Tragsicherheit gegeben.	erfüllt Die Ufersicherung besteht aus dauerhaftem Material. Die Sohlenlage im Alpenrhein wird im Rahmen eines Überwachungskonzeptes regelmässig vermessen. Dies bietet Gewähr, dass auf langfristige Sohlenveränderung reagiert werden kann. Die Ufervegetation wird regelmässig zurück geschnitten. Wegen der grossen Gerinnebreite ist keine unzulässige Strömungskonzentration durch Vegetation zu erwarten.
HQ_{100}	erfüllt dito Begründung HQ30	erfüllt dito Begründung HQ30
HQ_{300}	erfüllt dito Begründung HQ30	erfüllt dito Begründung HQ30

Blockrampe Buchs

Rechnerisch ist die Stabilität der Blockrampe Buchs (km 49.6) bei einem HQ_{100} nicht mehr gewährleistet. Aufgrund der dokumentierten Auswirkungen der Blockrampe Felsberg, welche beim Hochwasser von 1987 zerstört wurde, muss von einer Eintiefung im Oberwasser in der Grössenordnung von 1 m ausgegangen werden. Trotzdem dürften die Ufer während des Durchgangs der Abflussspitze wegen dem bereits mehrmals erwähnten Effekt des Abflachens der Bänke bei grossen Abflüssen kaum unterspült werden. Allerdings werden sich die Bänke und damit auch die Kolke beim Rückgang des Hochwassers wieder auf einem tieferen Niveau bilden. Aber selbst dann dürfte sich für den Uferschutz keine kritische Situation einstellen, weil das Flussbett mit dem Bau der Blockrampe in deren Oberwasser angehoben wurde und davon ausgegangen werden kann, dass der Uferschutz auf der ursprünglichen Sohle fundiert ist.

Kurve km 35.8

In der Kurve beim km 35.8 können Kolktiefen in der Grössenordnung wie bei den alternierenden Bänken erwartet werden. Bezüglich Gefährdungsbild U2 gelten die gleichen Überlegungen wie oben aufgeführt.

Ereignisse 1927 und 1987

Das Hochwasser von 1927 lag im Bereich eines 100-jährlichen Ereignisses und das Hochwasser von 1987 zwischen einem 30- und 100-jährlichen Ereignis. Beim Hochwasserereignis von 1927 brach zwar der Damm bei Schaan. Die Ursache war aber nicht ein Versagen des Uferschutzes, sondern ein Überströmen des Dammes im Bereich der Brücken Buchs-Schaan. Bei beiden Ereignissen werden nicht von Problemen mit der Ufersicherung berichtet. 1927 lag die Sohle zwischen Sargans und Ruggell substantiell höher als heute. Die Uferbereiche oberhalb des Vorgrundes dürften damals also deutlich mehr belastet worden sein als heute und haben 1927 der Belastung Stand gehalten. Diese Erkenntnisse stützen die Beurteilung, welche auf rechnerischen Ansätzen basieren.

6.5.7 Zuverlässigkeit

Weil die Tragsicherheit und Dauerhaftigkeit erfüllt ist, kann der Ufersicherung eine hohe Zuverlässigkeit attestiert werden.

6.6 Wirkungsbeurteilung

Die Beurteilung kommt zum Schluss, dass nicht mit einem Versagen der Ufersicherung zu rechnen ist. Müsste aber davon ausgegangen werden, so würde in jedem Fall das Ausmass der Erosion ausreichen, um die Rheindämme zu zerstören.

Literatur

Hunzinger L. & Durrer S. (2008): Seitenerosion. In: Bezzola G. R. & Hegg C. (eds.): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2, Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Bern und Birmensdorf.

Oplatka M. (1998): Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, 156, Zürich, 217 p.

Gefahrenbeurteilung Überflutung der Aare zwischen der Aareschlucht und dem Brienzersee. Neubeurteilung nach dem Hochwasser 2005. Schälchli, Abegg + Hunzinger, im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Bern, 18. Oktober 2006.