



# Strategie Naturgefahren Schweiz

Umsetzung des Aktionsplans PLANAT 2005 - 2008

Projekt A 3

## Wirkung von Schutzmassnahmen



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

Schlussbericht 2. Phase  
Testversion  
Dezember 2008





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**

# Strategie Naturgefahren Schweiz

Umsetzung des Aktionsplanes PLANAT 2005-2008

Projekt A 3

## Wirkung von Schutzmassnahmen

Schlussbericht 2. Phase  
Testversion  
Dezember 2008

# Impressum

## Auftraggeber

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT  
c/o Abteilung Gefahrenprävention  
Bundesamt für Umwelt BAFU  
3003 Bern  
Telefon: 031 324 17 81 Fax: 031 324 19 10  
[planat@bafu.admin.ch](mailto:planat@bafu.admin.ch) [www.planat.ch](http://www.planat.ch)

## Projektsteuerung (Gesamtprojekt)

Andreas Götz, BAFU, Präsident PLANAT (Leitung)  
Dr. Gian Reto Bezzola, BAFU, PLANAT  
Dr. Pierre Ecoffey, ECAB, PLANAT  
Willy Eyer, Amt für Wald, Wild und Fischerei Kanton Freiburg, PLANAT  
Bruno Hostettler, BABS, PLANAT  
Dr. Hans Rudolf Keusen, Geotest AG, PLANAT

## Projektbetreuung (Gesamtprojekt)

Dr. Thomas Egli, Egli Engineering (Leitung, Betreuung Projekt A 3)  
Dörte Aller, Aller Risk Management  
Christoph Werner, BABS  
Cornelia Winkler, Glenz, Walter & Winkler AG

## Projektleitung Projekt A 3

Dr. H. Romang, WSL / SLF

## Begleitung Projekt A 3

Dr. G.R. Bezzola, BAFU  
W. Eyer, Kanton FR  
Dr. M. Frehner, Forstingenieurbüro  
C. Guggisberg, ARE  
Dr. T. Egli, Egli Engineering AG  
Dr. C. Hegg, WSL  
Prof. Dr. H. Kienholz, GIUB  
Dr. M. Oplatka, Kanton ZH

## Auftragnehmer Projekt A 3

Eidg. Forschungsanstalt für  
Wald, Schnee und Landschaft WSL  
Zürcherstrasse 111  
8903 Birmensdorf  
Telefon: 044 739 21 11  
Fax: 044 739 22 15  
[wslinfo@wsl.ch](mailto:wslinfo@wsl.ch)  
[www.wsl.ch](http://www.wsl.ch)

## Autoren Projekt A 3

Dr. H. Romang, WSL / SLF (Leitung)  
A. Böll, WSL  
Dr. D. Bollinger, Kanton SZ  
Dr. L. Hunzinger, Flussbau AG SAH  
Dr. H.R. Keusen, Geotest AG  
S. Margreth, WSL / SLF  
Dr. G.R. Bezzola, BAFU  
C. Bonnard, EPFL  
H. Buri, Kanton BE  
A. Burkard, Schnee-Wasser-Lawinen  
W. Gerber, WSL  
Prof. Dr. H. Kienholz, GIUB  
A. Koschni, WSL  
H. Rovina, Rovina + Partner AG  
Dr. B. Zarn, Hunziker, Zarn + Partner AG

## Zitiervorschlag

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

## Hinweis

Die Reproduktion der Texte und Grafiken mit Quellenangabe und Belegexemplar an die Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT ist erwünscht.

## Vorwort

Angeregt durch die Motion Danioth (1999) hat der Bundesrat der Nationalen Plattform Naturgefahren PLANAT den Auftrag erteilt, eine übergeordnete und vernetzte Strategie zur Verbesserung der Sicherheit vor Naturereignissen auszuarbeiten. Der Bundesrat betonte, dass der Schutz vor Naturgefahren nicht nur für die Bevölkerung im Alpenraum zu gewährleisten sei, sondern für die Bevölkerung in der ganzen Schweiz. Zudem wolle er im Sinn eines umfassenden Risikomanagements einen gesamtschweizerisch vergleichbaren Sicherheitsstandard erreichen. Ziel ist dabei der Schutz des Menschen und seiner natürlichen Lebensgrundlagen sowie der Schutz von erheblichen Sachwerten.

Bisher hat die PLANAT in einer ersten Etappe eine übergeordnete und vernetzte Strategie für die Sicherheit von Naturgefahren<sup>\*1</sup> erarbeitet. Die von der PLA-NAT erarbeitete Strategie entspricht der vom Bundesrat verfolgten Politik der Nachhaltigkeit und den in der Strategie des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) verankerten Grundsätzen der einheitlichen Sicherheitsphilosophie. In der zweiten Etappe hat die PLANAT die heutige Situation im Bereich Naturgefahren analysiert<sup>\*2</sup> und einen Aktionsplan mit Massnahmen vorgeschlagen, welche 2005 bis 2008 in einer dritten Etappe umgesetzt werden.

Im Rahmen dieses Aktionsplans wurde im Projekt A3 die Wirkung von Schutzmassnahmen untersucht. Schutzmassnahmen spielen im Risikomanagement eine tragende Rolle. Ihre Schutzwirkung kann aber nur dann angemessen berücksichtigt werden, wenn die massgebenden Parameter und Zusammenhänge bekannt sind und quantifiziert werden können. Der vorliegende Schlussbericht zum Projekt A3 schliesst hier erhebliche Lücken. Zum einen wurden erstmals allgemein gültige Grundsätze und eine generelle Vorgehensweise für die Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen entwickelt, welche prozessübergreifend gültig sind. Zum andern wurden konkrete Arbeitshilfen für die Beurteilung von Schutzmassnahmen bei Lawinen, Stein- / Blockschlag / Felssturz, Rutschungen, Hochwasser und Murgängen erarbeitet und an Fallbeispielen illustriert. Damit sollen die Fachleute in der Praxis in ihrer Arbeit unterstützt und im Einklang mit der Strategie PLANAT schweizweit eine vergleichbare und nachvollziehbare Beurteilung von Schutzmassnahmen gefördert werden.

Es ist vorgesehen, das Dokument gestützt auf die damit gemachten Erfahrungen in einer weiteren Phase noch einmal zu überarbeiten.

Andreas Götz

Präsident PLANAT

Ittigen, Oktober 2008

Publikationen:

\*1 PLANAT (2004): Sicherheit vor Naturgefahren - Vision und Strategie.

\*2 PLANAT (2005): Strategie Naturgefahren Schweiz (2005). Synthesebericht.



## Zusammenfassung

Die Praxis steht vor der Herausforderung, Schutzmassnahmen in Gefahrenkarten zu berücksichtigen und darauf basierend Gefahrenzonen und vergleichbare rechtsrelevante Grundlagen anzupassen. Trotz grosser Erfahrungen im Umgang mit Schutzmassnahmen sind bei der Gefahrenbeurteilung nach wie vor erhebliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Prozessen und Massnahmentypen festzustellen. Weiter fehlt ein systematisches Vorgehen. Die Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT) hat deshalb im Rahmen ihres Aktionsplanes das Thema aufgegriffen und das Projekt A3 „Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung“ oder kurz PROTECT initiiert. Im Rahmen dieses Projektes wurden sowohl allgemein gültige Grundlagen erarbeitet als auch prozess- und massnahmenspezifische Arbeitshilfen entwickelt. Dementsprechend ist der Bericht gegliedert in den generellen Teil A, welcher für alle Prozesse und Massnahmen seine Gültigkeit hat, und die Teile B bis F, welche konkret auf Schutzmassnahmen bei Lawinen (Teil B), Sturzprozessen (Teil C), Rutschungen (Teil D) sowie in Wildbächen (Teil E) und Flüssen (Teil F) eingehen. Im Teil A werden zunächst die allgemeinen Grundsätze für die Berücksichtigung von Schutzmassnahmen in Gefahrenkarten und damit in der Raumplanung genannt, die in jedem Fall erfüllt sein müssen. So muss die Wirkung von Schutzmassnahmen mit angemessener Sicherheit quantifizierbar sein, verschiedene Szenarien inklusive Extremszenarien müssen sowohl hinsichtlich der Einzelmassnahme als auch des Gesamtsystems betrachtet werden, die Schutzmassnahmen müssen bestehend und permanent verfügbar sein und schliesslich muss die Überwachung und der Unterhalt sowie eine periodische Überprüfung der Situation gewährleistet sein. Die konsequente Anwendung dieser Grundsätze führt zu einer ersten Selektion der möglichen Schutzmassnahmen. In den Teilen B bis F werden deshalb auch einzelne, bei den jeweiligen Prozessen gebräuchliche Schutzmassnahmen bereits zu Beginn von der Berücksichtigung in Gefahrenkarten als Grundlage für die Raumplanung ausgeschlossen. Für die Schutzmassnahmen, welche im Einklang stehen mit den Grundsätzen, wird die Beurteilung schliesslich in vier Schritten durchgeführt. Einleitend liefert die Grobbeurteilung einen ersten Überblick über die Situation. Sie beinhaltet eine Einschätzung der Relevanz der Schutzmassnahmen und ermöglicht so zu entscheiden, ob eine weitere detaillierte Betrachtung der Massnahme gerechtfertigt ist. Dies ist der Fall, wenn entweder eine merkbare und quantifizierbare Reduktion des Gefahrenprozesses vermutet werden darf oder durch eine negative Folgewirkung eine quantifizierbare Verstärkung des Gefahrenprozesses möglich ist. Weiter bestimmt die Massnahmenbeurteilung die Zuverlässigkeit der Massnahme unter Berücksichtigung ihrer Eigenheiten sowie ihres unmittelbaren technischen und natürlichen Umfeldes. Die Zuverlässigkeit wird aufgrund von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit in Abhängigkeit der vorher aufgestellten Szenarien bzw. Gefährdungsbilder bestimmt. Anschliessend quantifiziert die Wirkungsbeurteilung den Einfluss der Massnahme auf den Prozessablauf unter Berücksichtigung ihrer Zuverlässigkeit. Diese Prozessbeurteilung ist vom Prozess und vom Massnahmentyp abhängig. Es resultieren Intensitäten und Wahrscheinlichkeiten je Szenario und somit die Grundlagen für die Gefahrenkarten. Schliesslich leiten Empfehlungen zur raumplanerischen Umsetzung über. Faktoren wie Unsicherheiten, Erfahrungen, räumliche Voraussetzungen im Wirkungsgebiet, etc. können hier relevant sein. Insgesamt soll mit den Grundsätzen, der generellen Vorgehensweise in vier Schritten sowie der Umsetzung in Arbeitshilfen für die verschiedenen Prozesse gewährleistet werden, dass die Berücksichtigung von Schutzmassnahmen in der Gefahrenbeurteilung als Grundlage für die Raumplanung vergleichbar und nachvollziehbar erfolgen kann.

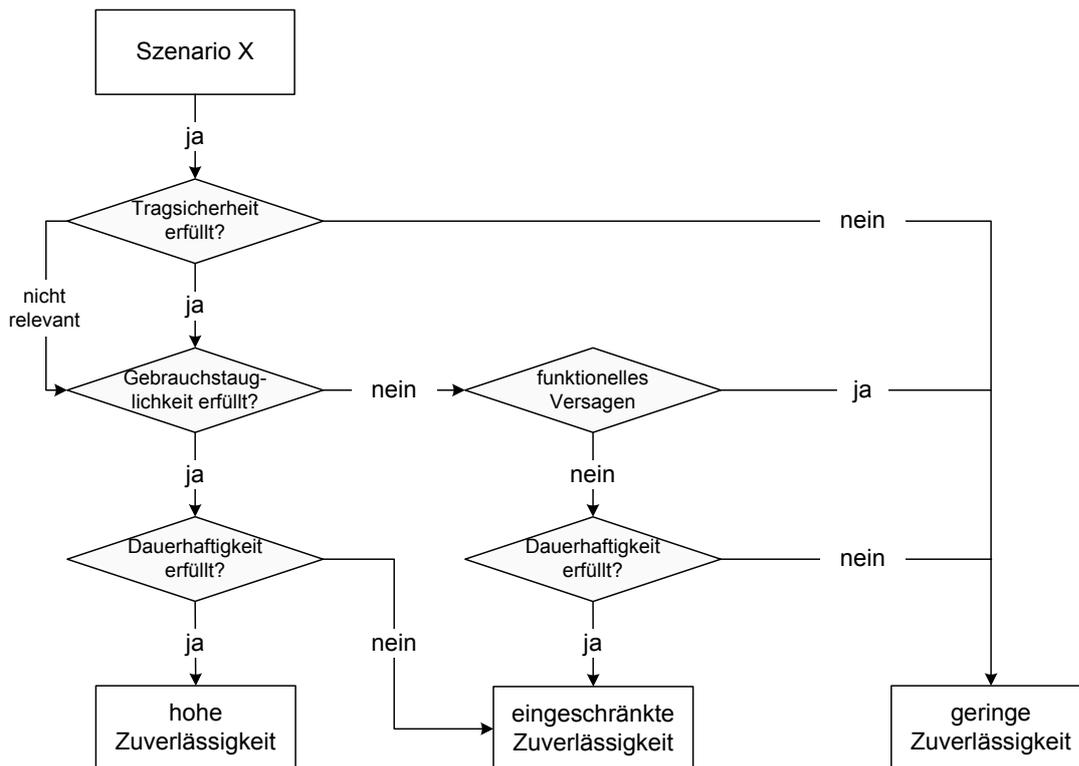




Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung

## Teil A: Grundlagen und generelles Vorgehen

Hans Romang, Stefan Margreth, Anja Koschni



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.	Einleitung	1
2.	Grundsätze zur Berücksichtigung von Schutzmassnahmen	2
3.	Allgemeine Vorgehensweise	3
4.	Schritt 1: Grobbeurteilung	4
	4.1 Übersicht	4
	4.2 Grundlagen und Bearbeitungstiefe	4
	4.3 Permanente Verfügbarkeit der Massnahmen	4
	4.4 Gesamtkonzept	5
	4.5 Erwartete Schutzwirkung	5
	4.6 Negative Wirkung	6
	4.7 Relevanz	6
5.	Schritt 2: Massnahmenbeurteilung	7
	5.1 Übersicht	7
	5.2 Definition von Massnahmen und Konsequenzen für die Beurteilung	7
	5.3 Grundlagen und Bearbeitungstiefe	8
	5.4 Tragsicherheit	9
	5.5 Gebrauchstauglichkeit	10
	5.6 Dauerhaftigkeit	11
	5.7 Zuverlässigkeit	11
	5.8 Interaktionen Einzelmassnahme – Gesamtsystem	12
6.	Schritt 3: Wirkungsbeurteilung	14
	6.1 Übersicht	14
	6.2 Massnahmenbeeinflusste Szenarien	14
	6.3 Prozessbeurteilung für Intensitätskarten	14
7.	Schritt 4: Empfehlungen zur raumplanerischen Umsetzung	16
	7.1 Anlass	16
	7.2 Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren	16
	7.3 Akteure	17
	7.4 Objektive Gefahrenkarten	17
	7.5 Unsicherheiten	17
	7.6 Versagensszenarien	18
	7.7 Gefahrenkarten vor und nach Massnahmenerstellung	18
	7.8 Umgang mit gelben und gelb-weissen Gefahrengebieten	19
	7.9 Zeitpunkt der Berücksichtigung	19
	Literatur	20



# 1. Einleitung

Die Praxis ist gefordert, Schutzmassnahmen in Gefahrenkarten zu berücksichtigen<sup>1</sup> und darauf basierende Gefahrenzonenpläne und vergleichbare rechtsrelevante Grundlagen anzupassen<sup>2</sup>. Trotz grosser Erfahrungen mit Schutzmassnahmen wird diese Aufgabe nicht einheitlich angegangen. Es bestehen klare Unterschiede zwischen den Herangehensweisen an verschiedene Prozesse und Massnahmen. Basierend auf den Erkenntnissen eines Workshops der Fachleute Naturgefahren Schweiz FAN im Jahr 2002 (Romang et al., 2003) hat die Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT im Rahmen ihres Aktionsplanes 2005-2008 das Projekt A3 „Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung“ oder kurz PROTECT initiiert.

Motivation

Im Rahmen dieses Projektes wurden Methoden zur vergleichbaren und nachvollziehbaren Beurteilung von Schutzmassnahmen im Rahmen der Gefahrenbeurteilung erarbeitet. Dabei stehen technische und biologische Massnahmen zur Gefahrenabwehr bei Lawinen, Sturzprozessen, Rutschungen, Hochwasser (Flüsse) und Murgängen (Wildbäche) im Zentrum. Nicht behandelt wurden temporäre Massnahmen wie Lawinensprengungen, sowie Massnahmen, welche nicht den Gefahrenprozess, sondern die exponierten Werte beeinflussen (z.B. Objektschutz). Diese Abgrenzung ergibt sich aus dem Fokus auf Gefahrenkarte und raumplanerische Umsetzung. Grundsätzlich ist das Vorgehen nach PROTECT aber auch auf andere Bereiche wie Verkehrssicherheit oder Intervention im Ereignisfall erweiterbar.

Inhalt

Das Projekt wurde in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase 2006/07 wurde ein generelles Vorgehen entwickelt (Romang und Margreth, 2007). Es baut auf bestehenden Grundlagen auf, wie den Bundesempfehlungen, den SIA-Normen, den Regeln der Kunst oder der aktuellen Praxis, und ist für alle angesprochenen Prozesse und Massnahmen anwendbar. Diese Vorgehensweise bildet die Basis für den Teil A des vorliegenden Berichtes. In der zweiten Phase 2007/08 wurde dieses generelle Vorgehen auf seine konkrete praktische Anwendung hin geprüft. Daraus resultierten Arbeitshilfen für die Beurteilung der verschiedenen Prozesse und Massnahmen, wobei angesichts der Vielfalt der eingesetzten Schutzmassnahmen eine Fokussierung auf einzelne Massnahmentypen unumgänglich war (Teile B bis F). Zur Illustration des Vorgehens dienen Fallbeispiele.

Projektphasen

Der vorliegende Bericht soll die Fachleute in der Praxis unterstützen und eine gemeinsame Basis für die Beurteilung von Schutzmassnahmen schaffen. Dazu gehören die Festlegung von Standards, etwa in Form definierter Arbeitsabläufe und zu behandelnder Punkte, und methodische Empfehlungen zur Massnahmen- und Prozessbeurteilung. Das Vorgehen lässt aber immer noch Raum für eine situations- und sachgerechte individuelle Behandlung des Einzelfalles. So soll schweizweit ein einheitlicher Umgang mit Schutzmassnahmen gefördert werden und ein Sicherheitsgewinn in Form konsistenter Beurteilungen und langfristig wirkungsvoller Massnahmen resultieren, ohne die Arbeit von Gutachtern und Sicherheitsverantwortlichen im weiteren Sinne unverhältnismässig einzuschränken.

Einheitliches Vorgehen  
für die Praxis

1 Bei der Gefahrenbeurteilung werden die Wirkungsräume und die Eintretenswahrscheinlichkeit der gefährlichen Prozesse bestimmt. Beurteilt wird auch die Wirkung bestehender Schutzbauten. Das Ergebnis einer Gefahrenbeurteilung ist bspw. eine Gefahrenkarte, deren Farbgebung die Massnahmenwirkung widerspiegeln kann (in Anlehnung an [www.planat.ch](http://www.planat.ch)).

2 Entsprechend der in den Gefahrenkarten aufgezeigten Gefährdung teilen Raumplaner den Nutzungsraum in unterschiedliche Zonen ein. Sie bestimmen, wie die Zonen in Abhängigkeit der Farben genutzt werden können (in Anlehnung an [www.planat.ch](http://www.planat.ch)).

## **2. Grundsätze zur Berücksichtigung von Schutzmassnahmen**

Sind folgende allgemein formulierte Grundsätze erfüllt, können Schutzmassnahmen in Gefahrenkarten und damit auch in der Raumplanung berücksichtigt werden.

### **1. Quantifizierbare Wirkungen**

Schutzmassnahmen werden beurteilt, indem ihre Auswirkungen auf die Wahrscheinlichkeit und Intensität eines Prozesses quantifiziert werden. Somit müssen sie eine erkennbare bzw. bestimmbare Wirkung auf den Prozess ausüben.

### **2. Unsicherheiten**

Sind die Auswirkungen einer Massnahme auf den Prozess kleiner als die Unsicherheiten in der Prozessbeurteilung, wird die Massnahme nicht berücksichtigt.

### **3. Szenarien**

Bei der Beurteilung von Schutzmassnahmen werden mindestens vier Szenarien betrachtet: Szenarien mit hoher, mittlerer und geringer Eintretenswahrscheinlichkeit sowie ein Szenario für ein extremes Ereignis mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit, welches eine bedeutende Mehrbelastung für das untersuchte System darstellt.

### **4. Systemabgrenzung**

Die Massnahme ist sowohl als Einzelsystem (Bauwerk) als auch in Bezug auf das Gesamtsystem (z.B. Prozessraum, Zusammenwirken von Massnahmen) zu betrachten.

### **5. Permanente Verfügbarkeit**

Die Wirkung einer Schutzmassnahme muss zum Zeitpunkt einer Beurteilung sowie mit üblichem Unterhalt permanent über einen Zeitraum von 50 Jahren gewährleistet sein.

### **6. Überwachung und Unterhalt**

Für jede Schutzmassnahme muss die Überwachung, der Unterhalt und bei Mängeln der Ersatz gewährleistet sein.

### **7. Temporäre Massnahmen**

Temporäre Massnahmen, wie die künstliche Lawinenauslösung oder der mobile Hochwasserschutz, werden grundsätzlich nicht berücksichtigt.

### **8. Geplante Werke**

Nach der Realisierung einer Massnahme muss überprüft werden, ob die Ausführung der Projektierung entspricht (Bauabnahme) und ob die Gefahrenbeurteilung aus der Planungsphase noch gültig ist. Erst dann kann eine Berücksichtigung in der Raumplanung erfolgen.

### **9. Zeit**

Sowohl die Massnahmen als auch die Prozesse bzw. deren Rahmenbedingungen verändern sich mit der Zeit. Die Berücksichtigung von Schutzmassnahmen setzt voraus, dass das System als Ganzes und im Speziellen die Massnahmen unterhalten werden sowie eine periodische Überprüfung der Gefahrensituation erfolgt.

### 3. Allgemeine Vorgehensweise

Die Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen kann für alle behandelten Prozesse und Massnahmen analog strukturiert werden (Abb. 3.1). In jedem Fall wird vorausgesetzt, dass die Grundsätze (Kap. 2) eingehalten werden und die Schutzmassnahmen mit den prozessspezifischen Auswahllisten der berücksichtgbaren Massnahmen (Teile B bis F) übereinstimmen.

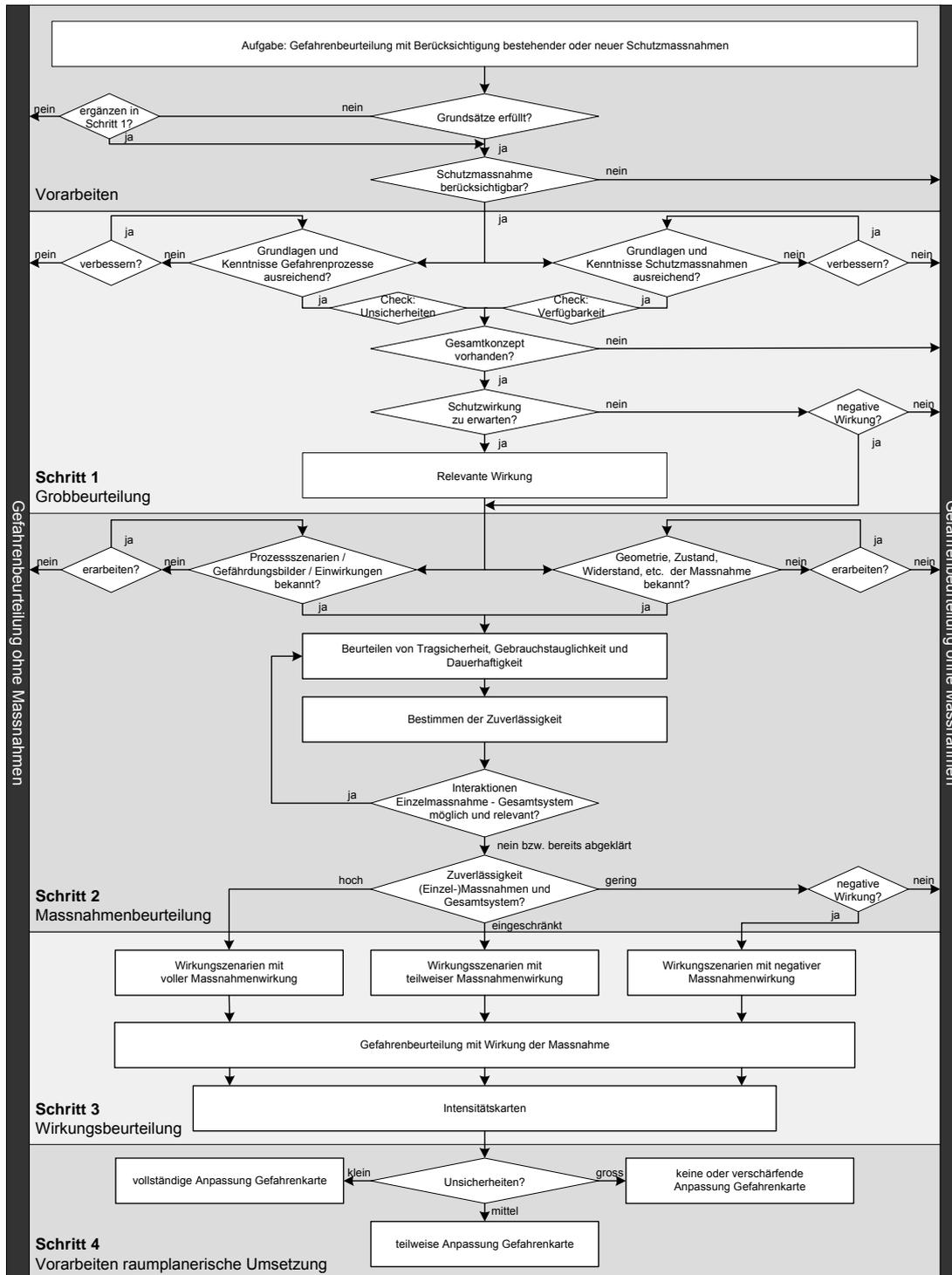


Abb. 3.1: Generelles Vorgehen zur Beurteilung von Schutzmassnahmen.

## 4. Schritt 1: Grob beurteilung

### 4.1 Übersicht

Die Grob beurteilung liefert einen ersten Überblick über die Situation. Sie beinhaltet insbesondere eine Einschätzung der Relevanz der Schutzmassnahme und ermöglicht so den Entscheid, ob eine detaillierte Betrachtung der Massnahme gerechtfertigt ist. Dies ist der Fall, wenn entweder eine merkbare und quantifizierbare Reduktion des Gefahrenprozesses vermutet werden kann oder durch eine negative Folgewirkung eine quantifizierbare Verstärkung des Gefahrenprozesses möglich ist.

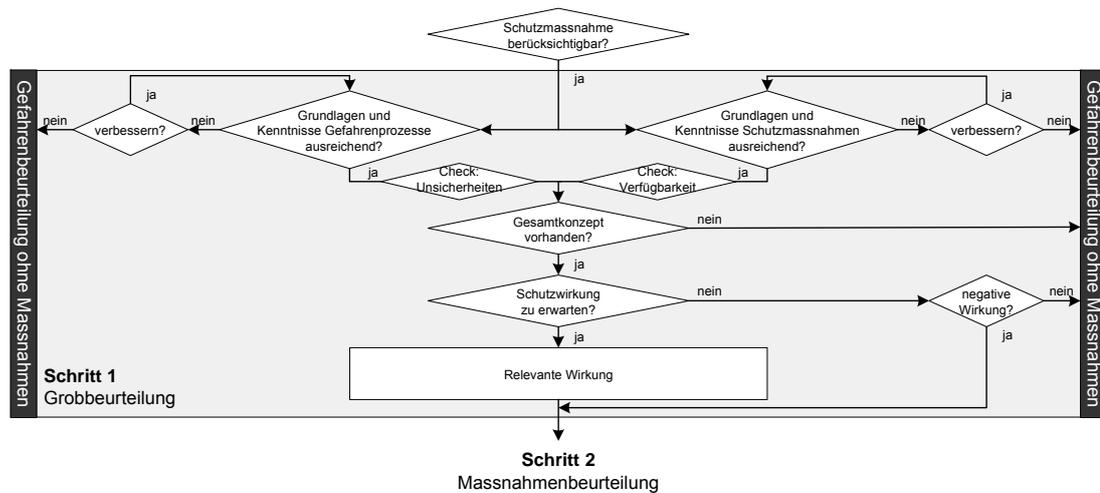


Abb. 4.1: Beurteilung von Schutzmassnahmen – Schritt 1, Grob beurteilung.

### 4.2 Grundlagen und Bearbeitungstiefe

Grundlagenbeschaffung

Die Grob beurteilung basiert auf Grundlagen, welche entweder bereits vorhanden sind, mit geringem Aufwand beschafft werden können, oder aber – bei grösserem Aufwand – für die Massnahmen- (Schritt 2) und die Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) später ohnehin benötigt werden. Zur Beurteilung der Gefahrensituation können z.B. Ereigniskataster, bestehende Gefahrenkarten oder Luftbilder benutzt werden. Hinsichtlich der Schutzmassnahmen stellen Projektdossiers, Schutzbautenkataster oder Dokumente über den Werkzustand wichtige Informationsquellen dar. Auf eine Beurteilung der Massnahmenwirkung wird verzichtet, falls notwendige Informationen auch mit Zusatzaufwand nicht in der benötigten Detaillierung erarbeitet werden können oder falls die verbleibenden Unsicherheiten wegen einem komplexen Prozessumfeld, einer ungenügenden Datenlage oder methodischen Defiziten zu gross sind (Kap. 2, Grundsatz 2).

### 4.3 Permanente Verfügbarkeit der Massnahmen

Ausschlusskriterium:  
keine permanente  
Verfügbarkeit

Im Hinblick auf die raumplanerische Umsetzung sind nachhaltige Lösungen wichtig. Daraus lässt sich die Notwendigkeit einer permanenten Verfügbarkeit der Massnahme ableiten. Dieses Kriterium (Kap 2, Grundsätze 5 und 7) schliesst die Berücksichtigung folgender Massnahmen von der Gefahrenbeurteilung aus:

- Massnahmen, die nicht fest vor Ort installiert sind (z.B. mobiler Hochwasserschutz),
- Massnahmen, deren Funktionsfähigkeit bereits in kurzen Zeiträumen stark von der menschlichen Einflussnahme abhängt (z.B. Lawinensprengungen) oder
- Massnahmen, die in absehbarer Zeit ihre Wirkung nicht mehr erfüllen können (z.B. alte Werke in schlechtem Zustand ohne Sanierungsprojekt).

Gerade die ersten zwei Massnahmengruppen haben in einer integralen Sichtweise durchaus ihre Berechtigung, helfen sie doch mit, Schäden wirkungsvoll zu verhindern. Für die langfristige Raumnutzung werden aber hohe Ansprüche an die Verfügbarkeit gestellt, weshalb dieser Punkt hier als Ausschlusskriterium gilt.

#### 4.4 Gesamtkonzept

Jede Schutzmassnahme ist in ein Gesamtkonzept eingebunden. Die Einordnung in dieses ist sowohl bei der Projektierung einer Massnahme als auch bei der im Folgenden diskutierten Beurteilung ihrer Wirkung wesentlich (Kap 2, Grundsatz 4). Ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, können folgende Punkte genannt werden:

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Prozessraum: Der Blick richtet sich immer auf den ganzen Prozessraum und auf alle relevanten Prozesse (Bsp. Interaktion Steinschlag – Lawinenverbau). Häufig ist es auch angebracht Nachbargebiete einzubeziehen (Bsp. Lawinenverbau in benachbarten Prozessräumen).</li> </ul>                                                                            | Einordnung der Massnahme in: |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Schutzziel der Massnahme: Es muss bekannt sein oder abgeschätzt werden können, welcher Schutz mit den Massnahmen überhaupt angestrebt wurde.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                    | Prozessraum                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Standort: Die Wirkung einer Schutzbaute wird von ihrem Standort beeinflusst. Es muss abgeklärt werden, wie der Ort hinsichtlich Prozessablauf (z.B. Dynamik) oder lokalen Bedingungen (z.B. Geotechnik) zu bewerten ist.</li> </ul>                                                                                                                        | Schutzziel                   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Interaktion: Mögliche Interaktionen zwischen Massnahmen sind für die weitere Beurteilung wesentlich (z.B. Gerinneverbau und Hangverbau).</li> </ul>                                                                                                                                                                                                        | Standort                     |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Ausdehnung: Bei linienförmigen oder flächigen Massnahmen stellt sich die Frage nach der Ausdehnung der Massnahme im Vergleich zur Gesamtgrösse des Prozessraumes bzw. im Vergleich zur Grösse des prozessrelevanten Bereiches (z.B. Länge eines mit Sperren verbauten Abschnittes im Vergleich zur gesamten Erosionsstrecke).</li> </ul>                   | Interaktion                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Erfahrung: Wegen den mit Unsicherheiten behafteten Grössen oder dem teilweise qualitativen Charakter der Abschätzungen sind Erfahrungswerte wichtig. Dabei können Erfahrungen mit Massnahmen dieses Typs in ähnlichem Umfeld, Erfahrungen vor Ort oder vertiefte Kenntnisse etwa aus Typenprüfungen oder Modellversuchen berücksichtigt werden.</li> </ul> | Ausdehnung                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Erfahrungen                  |

#### 4.5 Erwartete Schutzwirkung

Eine weitergehende Prüfung der Massnahme ist nur dann sinnvoll, wenn eine relevante Wirkung vermutet wird. Relevant bedeutet, dass die Beeinflussung des Prozesses durch die Massnahme grösser als die Unsicherheiten in dessen Beurteilung ist (Kap.2, Grundsatz 2). Die Überlegungen zum Gesamtkonzept bilden die Basis für diesen Entscheid. Im Folgenden werden drei mögliche Faktoren vorgestellt, die für diesen Entscheid betrachtet werden können. Die zugehörigen Beispiele stellen Fälle dar, in denen auf eine detailliertere Abklärung verzichtet würde.

Schutzwirkung in Abhängigkeit des Gesamtkonzeptes

Räumliche Abgrenzung: Prozess- und Wirkungsraum, Ort und Ausdehnung der Massnahmen

Beispiel: Drei Sperren zur lokalen Gerinnesicherung bei einer Wasserfassung werden die Geschiebefracht nicht entscheidend beeinflussen (keine relevante Veränderung von Intensität und Wahrscheinlichkeit).

- Prozess: Art und vermutete Grössenordnung, Ereignisse

Beispiel: In einem Steinschlaggebiet, wo der Absturz von Blöcken bis 1 m<sup>3</sup> dokumentiert ist, entfalten die im Transitgebiet vorhandenen alten Holzbohlenwände keine relevante Bremswirkung.

- Massnahme: Art, Grösse (Abmessungen, Bemessung) und vermuteter Zustand, Erfahrungen / Bewährung

Beispiel: Ein altes Hangentwässerungssystem, welches nicht unterhalten wird und offensichtlich nicht mehr funktionstüchtig ist, reduziert die Hangbewegungen nicht.

#### 4.6 Negative Wirkung

Bei negativer Wirkung Schutzmassnahme detailliert beurteilen

Bei Mängeln an Schutzbauten ist eine zusätzliche, gefahrenverschärfende Wirkung möglich, gerade in Fällen mit nicht unterhaltenen oder alten Massnahmen (z.B. Hangverbau oder Steinschlag aus zerfallenden Stützmauern). In diesen Fällen sind die nachfolgenden Schritte ebenfalls zu bearbeiten, wobei der Fokus dann auf der Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit Versagensszenarien liegt.

#### 4.7 Relevanz

Nichtrelevante Massnahmen führen zum Abbruch der Beurteilung

Die Frage nach der Relevanz ist ein Abbruchkriterium, welches eingeführt wird, um insbesondere bei bestehenden Massnahmen eine Triage vornehmen und den Aufwand in Grenzen halten zu können. Die Relevanz wird anhand relativ grober Angaben rein gutachtlich beurteilt. Entsprechend vorsichtig muss das Abbruchkriterium gehandhabt werden. Im Zweifelsfall wird eine genaue Beurteilung durchgeführt.

Bei relevanten Massnahmen folgt eine detaillierte Beurteilung

Eine Detailbeurteilung einer Massnahme wird durchgeführt, wenn aufgrund der Grobbeurteilung von einem wirkungsvollen Gesamtkonzept und somit relevanten Schutzmassnahmen ausgegangen werden kann, welche permanent über längere Zeit verfügbar und nach heutigem Stand des Wissens quantitativ und mit vertretbaren Unsicherheiten zu beurteilen sind. Dasselbe gilt für jene Fälle, in denen aufgrund einer schlechten Verbauungswirkung eine zusätzliche bzw. eine gegenüber der natürlichen Situation veränderte Gefährdung möglich scheint. In den übrigen Fällen wird das Resultat der Grobbeurteilung festgehalten und die weitere Beurteilung der Massnahme an dieser Stelle abgebrochen. Je nach Aufgabenstellung schliesst aber eine Gefahrenbeurteilung ohne Berücksichtigung der Schutzmassnahmen an.

## 5. Schritt 2: Massnahmenbeurteilung

### 5.1 Übersicht

Die Massnahmenbeurteilung bestimmt die Zuverlässigkeit der Massnahme unter Berücksichtigung ihrer Eigenheiten sowie ihres unmittelbaren technischen und natürlichen Umfeldes im Hinblick auf ihre Wirkung auf den Prozess. Die Zuverlässigkeit wird bestimmt aufgrund von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit (SIA, 2003a, 2003b, in Vorb.) in Abhängigkeit der vorher aufgestellten Szenarien bzw. Gefährdungsbilder.

Zuverlässigkeit bestehend aus:  
Tragsicherheit,  
Gebrauchstauglichkeit,  
Dauerhaftigkeit

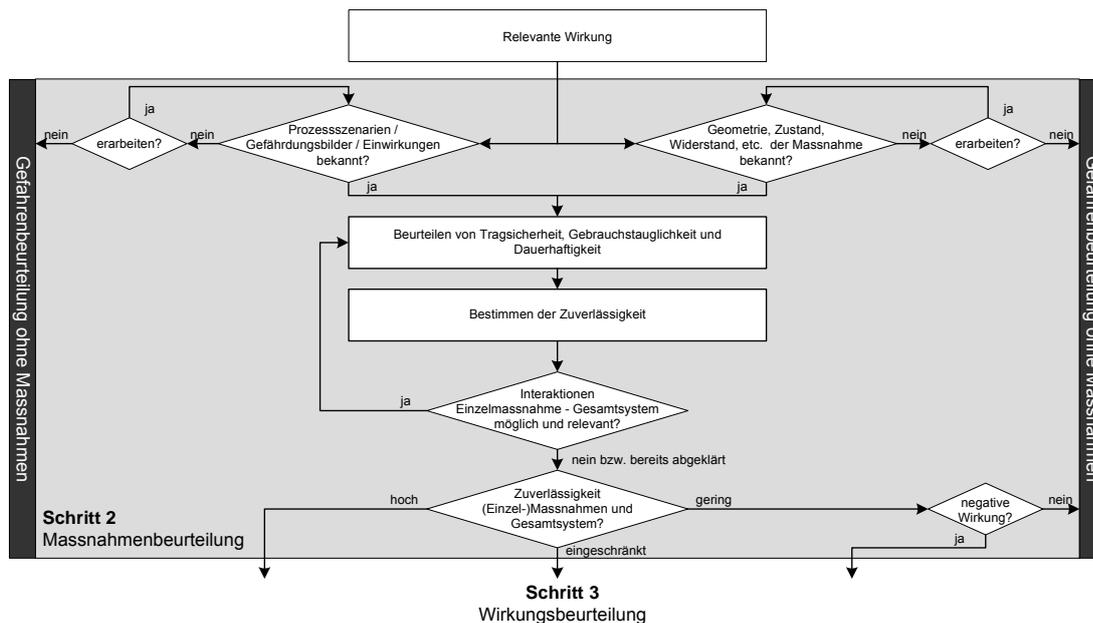


Abb. 5.1: Beurteilung von Schutzmassnahmen – Schritt 2, Massnahmenbeurteilung.

### 5.2 Definition von Massnahmen und Konsequenzen für die Beurteilung

Jede Massnahme hat eine konkrete Zielsetzung und Wirkung (z.B. Schneerückhalt, Erhöhung der Gerinnekapazität). Sie ist durch ihre Ausgestaltung charakterisiert (z.B. Schneebrücken, Sohlenabsenkung) und besteht aus einzelnen Elementen oder Bauteilen. Soweit diese derselben Zielsetzung dienen und räumlich benachbart sind, gilt die Summe aller Teile als eine Massnahme. Beispiele:

Massnahmenbestandteile

- Die Massnahme Lawinenstützverbau umfasst alle zusammenwirkenden technischen Bauwerke (z.B. Schneebrücken) im Anrissgebiet.
- Die Massnahme Steinschlagschutzdamm umfasst den Damm und den dahinter liegenden Rückhalteraum.
- Die Massnahme Hangentwässerung umfasst sämtliche diesem Zweck dienenden Elemente wie Drainagegräben oder Bohrungen.
- Die Massnahme Wildbachsperrern umfasst die einzelnen Sperrern und, sofern die Sperrern entsprechend angeordnet sind, die gesamte Sperrertreppe.
- Die Massnahme Hochwasserdamm umfasst den Damm und das Gerinne.

Eine weitere Unterteilung der Massnahme ist nur bei den Elementen oder Bauteilen sinnvoll, die eine für die Schutzwirkung relevante statische Funktion haben. Diese Unterscheidung zwischen Massnahmen und Elementen hat Konsequenzen für die Art der Beurteilung von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit und somit auch der Zuverlässigkeit:

- Die Beurteilung der Tragsicherheit erfolgt nur für Massnahmen oder Teile davon mit statischer Funktion. Sie bezieht sich explizit (Bsp. Damm) oder pauschal (Bsp. Felssicherung mit Ankern) auf die Elemente der Massnahme.
- Die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit bezieht sich auf die Massnahme (Bsp. Rückhaldedamm und Raum dahinter).
- Die Beurteilung der Dauerhaftigkeit bezieht sich in der Regel auf die Massnahme (Bsp. Sperrenverbau aus Holz). Bei entsprechender Bedeutung kann die Dauerhaftigkeit des einzelnen Elementes trotzdem einen grossen Einfluss haben (Bsp. tragende Elemente der Sperren aus Holz).

Die Zuverlässigkeit einer Massnahme wird zusammenfassend anhand der Tragsicherheit bestimmt, welche sich nur aus den tragenden Elementen ergibt, sowie der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit, welche sich aus der Gesamtheit der Massnahme zusammensetzen.

### 5.3 Grundlagen und Bearbeitungstiefe

Szenarienbildung

Für die Massnahmenbeurteilung müssen die in Schritt 1 erarbeiteten Prozessinformationen erweitert werden. Dabei ist wichtig, dass die Variabilität der möglichen Prozesswirkungen auf die Massnahmen aufgezeigt wird. Gemäss Grundsatz 3 (Kap. 2) werden dazu Szenarien gebildet. Die Wirkung der Massnahmen wird dabei für Szenarien mit häufiger (bis 30-jährlich), seltener (bis 100-jährlich) und sehr seltener (bis 300-jährlich) Eintretenswahrscheinlichkeit des Prozesses sowie für ein Extremszenario hergeleitet und beurteilt.

Schwellenprozesse müssen betrachtet werden

Es müssen aber auch Schwellenprozesse und Prozessverkettungen mit einbezogen werden, die zu einer deutlichen Überlastung der Systeme führen. Als Schwellenprozesse werden jene Prozesse bezeichnet, welche erst beim Erreichen gewisser Bedingungen auftreten und bspw. das Abflussverhalten eines Einzugsgebiets plötzlich verändern. Typische Beispiele sind Boden- oder Karstspeicher, die eine bestimmte Menge Wasser zurückhalten. Wenn sie gefüllt sind, steht plötzlich mehr Wasser für den oberflächlichen Abfluss zur Verfügung.

Informationsbeschaffung

Für die Schutzmassnahmen müssen Informationen zu Abmessungen, Ausführung, Zustand sowie zu ihrem Verhalten bei vergangenen Ereignissen vorliegen (Bewährung). Gerade bei älteren Massnahmen ist die Aktenlage oft lückenhaft und Angaben zur Bemessung fehlen. Die fehlenden Informationen müssen dann zusammengetragen oder im Feld erhoben werden. Bei neuen oder projektierten Massnahmen liegen die notwendigen Dokumente meist vor.

Für die Beurteilung können in Abhängigkeit des Prozesses und des Massnahmen-typs qualitative und quantitative Methoden eingesetzt werden:

Qualitative Beurteilung

- Für qualitative Bearbeitungen sind Methoden wie gutachtliche Einschätzungen, Beurteilungen im Gelände, Wertungen aus Erfahrung, etc. bezeichnend. Ungeachtet der eher geringen Bearbeitungstiefe sind solche Betrachtungen für das Gesamtverständnis wichtig und in vielen Fällen für die Mass-

nahmenbeurteilung ausreichend. Das typische Resultat einer qualitativen Betrachtungsweise hinsichtlich Schutzmassnahmen sind Gefährdungsbilder<sup>3</sup>.

- Für quantitative Bearbeitungen sind messtechnische Untersuchungen oder Berechnungen typisch. Diese Bearbeitungstiefe ist dann angebracht, wenn sich die Massnahmenbeurteilung speziell auf quantitative Betrachtungen einzelner Parameter stützt. Dies ist nicht notwendigerweise gleichbedeutend mit einer quantitativen Massnahmenüberprüfung im Sinne der Tragwerksbemessung. Entsprechend der Vorgehensweise resultieren Zahlenwerte, welche hier als Einwirkungen<sup>4</sup> bezeichnet werden.

Quantitative  
Beurteilung

## 5.4 Tragsicherheit

Die Tragsicherheit ist die Fähigkeit eines Bauwerkes, für die anzunehmenden Einwirkungen einen ausreichenden Tragwiderstand zu gewährleisten. Das heisst, bei einer bestimmten Belastung darf kein Versagen des Bauwerkes auftreten. Die Tragsicherheit gilt als erfüllt, wenn die Prozesseinwirkungen vom Bauwerk unter Berücksichtigung der erforderlichen Sicherheiten, z.B. gemäss den SIA-Normen, aufgenommen werden können. Die Überprüfung der Tragsicherheit kann je nach Massnahme und Situation in einem unterschiedlichen Detaillierungsgrad erfolgen.

Definition  
Tragsicherheit

Eine pauschale Beurteilung ist in folgenden Fällen gerechtfertigt:

- Die Belastung ist deutlich kleiner als der Tragwiderstand. Die Einwirkungen beeinflussen die Tragsicherheit nur unwesentlich bzw. es bestehen grosse Sicherheitsreserven (z.B. Lawinenauffangdamm, wo die Einwirkungen einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Tragsicherheit haben).
- Der Tragwiderstand ist bekannt. Der Tragsicherheitsnachweis ist in den Bauwerksakten enthalten bzw. es handelt sich um typengeprüfte Bauwerke (z.B. homologierte Steinschlagschutznetze).

Pauschale  
Beurteilung

Bei einer pauschalen Beurteilung muss der Zustand des Bauwerkes im Hinblick auf eine mögliche Reduktion der Tragsicherheit kritisch beurteilt werden.

Eine qualitative Beurteilung steht im Vordergrund, wenn die exakte Überprüfung der Tragsicherheit unverhältnismässig ist oder gar nicht durchgeführt werden kann (z.B. Wildbachsperre älteren Baujahres). Qualitative Beurteilungen dürften bei vielen Massnahmen für eine Überprüfung der Tragsicherheit genügen. Im Vergleich zur pauschalen Beurteilung muss bei der qualitativen Beurteilung der Tragwiderstand abgeschätzt werden, was bei einer robusten und bekannten Konstruktionsweise durch eine visuelle Beurteilung von Verformungen und Rissen geschehen kann. Bei der qualitativen Beurteilung der Tragsicherheit ist darauf zu achten, dass

Qualitative  
Beurteilung

- mit der erkennbaren, vermuteten oder absehbaren Alterung des Bauwerkes der Tragwiderstand abnehmen kann,
- sich die spezielle Bedeutung verborgener und nicht kontrollierbarer Tragwerksteile erst im Schadensfall zeigen kann und
- die massgebende Einwirkung unter Umständen noch gar nicht aufgetreten ist.

<sup>3</sup> Die Gefährdungsbilder stellen eine systematische Sammlung aller möglichen Prozesseinwirkungen auf die Bauwerke dar. Der Begriff „Bild“ widerspiegelt die Tatsache, dass sich die massgebenden Einwirkungen häufig schlecht quantitativ festlegen lassen und die integrale Betrachtung des gesamten Ereignisverlaufes relevant ist.

<sup>4</sup> Unter dem Begriff Einwirkungen werden alle quantitativ hergeleiteten Prozessgrössen zusammengefasst. Entsprechend kann es sich dabei etwa um Schnehöhen (Stützverbau), Energien (Steinschlagnetze) oder Wasserstände (Hochwasserdamm) handeln.

Die Tragsicherheit kann im Allgemeinen als erfüllt angenommen werden, wenn die Überprüfung des Bauwerkes vor Ort keine verdächtigen Mängel oder Schäden ergibt und der vermutete Tragwiderstand auch unter Berücksichtigung der oben aufgelisteten Punkte den zu erwartenden Einwirkungen gewachsen ist. Zu beachten ist in jedem Fall, dass die Beurteilung sehr vorsichtig vorgenommen werden muss, wenn nur wenige Angaben zum Bauwerk oder zu dessen Belastungsgeschichte vorliegen.

Quantitative  
Beurteilung

Bei neuen Bauwerken oder bei Massnahmen, bei denen die Funktionsfähigkeit vom Tragwiderstand dominiert wird<sup>5</sup>, steht eine quantitative Überprüfung der Tragsicherheit im Vordergrund<sup>6</sup>. Bei der quantitativen Überprüfung wird die Tragsicherheit rechnerisch nachgewiesen. Dies kann etwa bei Hochwasserdämmen erforderlich sein, wo der qualitativ-visuelle Eindruck unter Umständen nicht ausreichend ist, um die Konsequenzen der Einwirkungen (z.B. Höhe des Wasserspiegels, Überströmen oder Dauer des Einstaus) auf die Tragsicherheit bestimmen zu können.

## 5.5 Gebrauchstauglichkeit

Definition  
Gebrauchstauglichkeit

Die Gebrauchstauglichkeit ist die Fähigkeit eines Bauwerkes die Funktionstüchtigkeit in Bezug auf die festgelegten Nutzungsanforderungen während des Einsatzes zu gewährleisten. Sie hat bei Schutzbauwerken gegen Naturgefahren eine grosse Bedeutung, ergibt sich doch die Wirkung erst aus dem ordnungsgemässen Funktionieren (z.B. Gewährleisten einer genügend grossen Abflusskapazität).

Die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit (Schritt 2) ist eng mit der Beurteilung der Wirkung der Massnahme als Ganzes (Schritt 3) verwandt. Wie weit die Bearbeitung speziell in Schritt 2 geht, ergibt sich weitgehend aus der Unterscheidung von qualitativer und quantitativer Beurteilung (vgl. Kap. 5.3):

Qualitative  
Beurteilung

- Bei der qualitativen Beurteilung ergibt sich die Gebrauchstauglichkeit primär aus der Konzeption, der Ausführung und dem Zustand des Bauwerkes. Sie wird also pauschal aufgrund von Erfahrungswerten und der Situation im Gelände abgeschätzt. Ein Beispiel dafür sind Steinschlagdämme, bei welchen die Gebrauchstauglichkeit unter anderem aus der tatsächlichen oder vermuteten Vorverfüllung (reduzierte Wirkungshöhe) und der bergseitigen Böschungsneigung (Gefahr des Überrollens) resultiert.

Quantitative  
Beurteilung

- Bei der quantitativen Beurteilung müssen Zahlenwerte zu den Einwirkungen vorliegen. Somit kann auch die Gebrauchstauglichkeit (unterschieden nach den Szenarien) quantitativ angenähert werden. Dabei spielt die qualitative Betrachtung nach wie vor eine wichtige Rolle. So ergibt sich die Gebrauchstauglichkeit von Gerinnen mit Hochwasserdämmen aus dem Vergleich der Abflusswerte mit der Durchflusskapazität (Überfließen der Dämme ja / nein), aber auch aus Beeinträchtigungen wie z.B. starker wasserseitiger Bestockung.

Schwachstellen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit zeigen sich häufig erst nach längeren Zeiträumen insbesondere bei ungenügendem Unterhalt. Eine mangelhafte Gebrauchstauglichkeit äussert sich in der Regel in einer Abnahme der Wirkung auf den Prozess. Weiter können Mängel zu neuen, bisher nicht berücksichtigten Gefährdungsbildern bzw. Einwirkungen und damit zu einem Verlust der Tragsicherheit führen.

<sup>5</sup> der Prozess wie z.B. Steinschlag oder Hochwasser belastet die Massnahme direkt und bei einem Versagen besteht keine Wirkung mehr.

<sup>6</sup> Sofern der Nachweis nicht bereits in der Projektierung erfolgt ist oder eine pauschale Betrachtung genügt.

Eine fehlende Gebrauchstauglichkeit kann in gewissen Fällen zu einem funktionellen Versagen der Massnahme führen (z.B. deutlich zu geringe (Rest-) Nutzungshöhe von Dämmen). Eine geringe Zuverlässigkeit und damit geringe Wirkung von Schutzmassnahmen kann deshalb sowohl aus einer fehlenden Tragsicherheit (strukturelles Versagen) als auch aus einer mangelhaften Gebrauchstauglichkeit (keine Funktionsfähigkeit) resultieren (vgl. Kap. 5.7).

## 5.6 Dauerhaftigkeit

Die Anforderungen an die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit einer Massnahme sollen im Rahmen der vorhersehbaren Einwirkungen über längere Zeit erfüllt bleiben, ohne unvorhergesehenen Aufwand für die Instandhaltung betreiben zu müssen. Die Dauerhaftigkeit einer Massnahme kann als gewährleistet betrachtet werden, wenn im Rahmen eines „normalen“ Unterhaltes eine Nutzungsdauer der Massnahme von 50 Jahren und mehr angenommen werden kann.

Definition  
Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit ist stark von der jeweiligen Situation abhängig. Nicht nur der Typ der Massnahme, sondern auch der Standort, die Bauausführung, die Art und Frequenz der Einwirkungen etc. spielen eine wichtige Rolle. Weiter sind Unterhaltsaspekte von Bedeutung. Nicht kontrollierbare und damit nicht unterhaltbare Massnahmen, bei denen beispielsweise verborgene Bauteile wie nicht kontrollierbare Anker für die Tragsicherheit relevant sind, erfüllen in der Regel die Kriterien der Dauerhaftigkeit nicht.

Die Überprüfung der Dauerhaftigkeit erfolgt in der Regel qualitativ. Aus dem aktuellen Zustand, dem Alter, der möglichen Zustandsentwicklung der Massnahme und den angenommenen Einwirkungen kann die Dauerhaftigkeit abgeschätzt werden. Die Überprüfung basiert stark auf dem Erfahrungsschatz mit der Massnahme und den lokalen Gegebenheiten.

I.d.R. qualitative  
Beurteilung

## 5.7 Zuverlässigkeit

Zustand und Verhalten einer Massnahme werden für die verschiedenen Gefährdungsbilder, Einwirkungen oder Szenarien basierend auf Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit qualitativ oder quantitativ eingeschätzt (Abb. 5.2).

Das Resultat besteht in einer Unterscheidung zwischen hoher, eingeschränkter und geringer Zuverlässigkeit:

- Für eine hohe Zuverlässigkeit müssen Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit erfüllt sein. Bei der anschliessenden Wirkungsbeurteilung kann die Massnahme als voll wirksam betrachtet werden.
- Eine eingeschränkte Zuverlässigkeit ist durch eine reduzierte Wirkung der Massnahme gekennzeichnet. Sie kann sowohl aus ungenügender Gebrauchstauglichkeit als auch aus mangelhafter Dauerhaftigkeit resultieren. Bei der Wirkungsbeurteilung sind die Szenarien bzw. die für die Wirkung der Massnahme massgebenden Grössen entsprechend anzupassen.
- Bei einer geringen Zuverlässigkeit muss ein Versagen der Massnahme erwartet werden. Die Massnahme entfaltet keine reduzierende Wirkung auf den Prozess. In solchen Situation muss geprüft werden, ob die Massnahme nicht sogar negative Auswirkungen auf den Prozessablauf haben kann.

Hohe Zuverlässigkeit =>  
Massnahme ist wirksam

Eingeschränkte  
Zuverlässigkeit =>  
reduzierte Wirkung

Geringe Zuverlässigkeit  
=> keine oder negative  
Wirkung

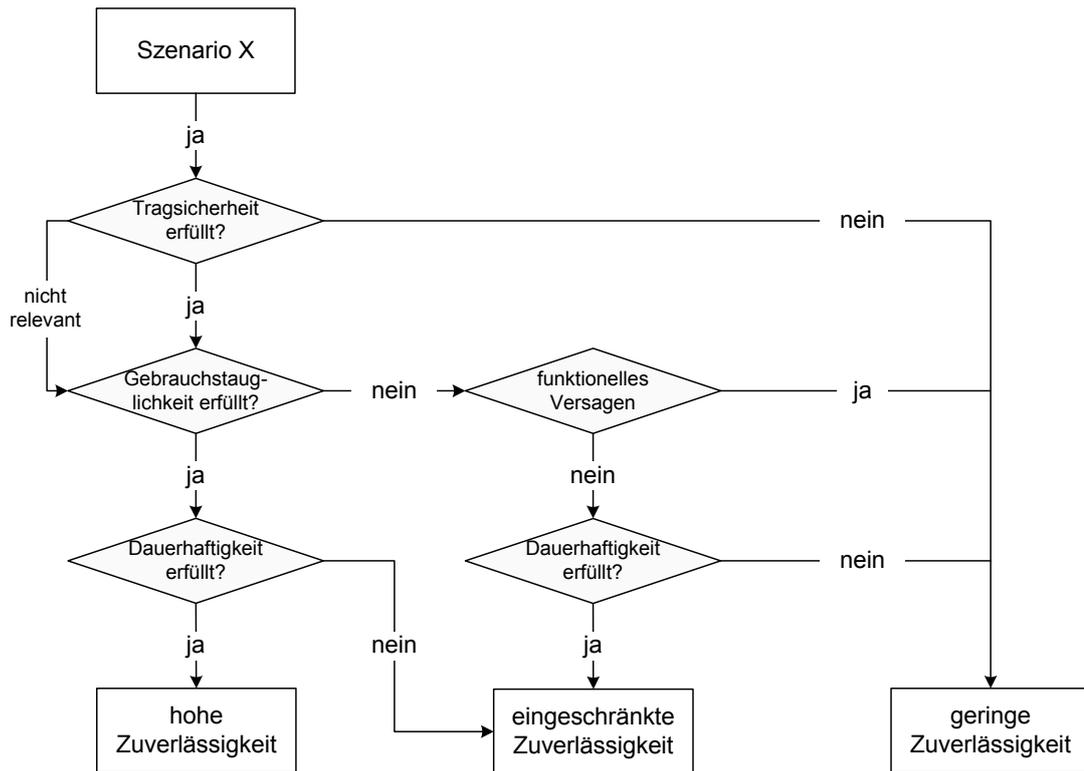


Abb. 5.2: Bestimmung der Zuverlässigkeit aufgrund von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

## 5.8 Interaktionen Einzelmaßnahme – Gesamtsystem

Einzelteile einer  
Maßnahme zusammen  
betrachten

Eine Maßnahme im Sinne von Kapitel 5.2 („Summe aller Teile“) kann aus verschiedenen Elementen bestehen, welche insbesondere hinsichtlich ihrer Tragsicherheit einzeln beurteilt werden. Für die Zuverlässigkeit der Maßnahme müssen die Detailergebnisse zusammengefasst werden:

- In vielen Fällen bietet sich eine pauschale Abhandlung an. Die Beurteilung der einzelnen Elemente wird zwar vorgenommen, aber die Maßnahme wird zusammenfassend und nicht bauteilspezifisch bewertet (z.B. 20% der Elemente sind nicht tragsicher). Typische Vertreter dafür sind Lawinenverbauungen und Felssicherungen mit einer Vielzahl von tragenden Elementen (Schneebrücken, Anker). Im Einzelfall ist zu beurteilen, ob die Summe von allfälligen Mängeln bei den einzelnen Elementen zu einer nicht erfüllten Tragsicherheit und damit geringen Zuverlässigkeit der Maßnahme führen (z.B. wenn der Anteil nicht tragfähiger Elemente über 30 % liegt). Evtl. können einzelne Ausfälle aus Sicht der Maßnahme als Mängel der Gebrauchstauglichkeit (eingeschränkte Funktionsfähigkeit) und damit als eingeschränkte Zuverlässigkeit bewertet werden.
- Ist das einzelne Element der dominierende Teil der Maßnahme, ergibt sich die Zuverlässigkeit der Maßnahme aus dessen Beurteilung. Typische Vertreter dafür sind Dämme aller Art.
- Schliesslich gibt es wenige Fälle, bei denen die einzelnen Elemente und deren Kombination als (Gesamt-) Maßnahme gleichbedeutend sind (z.B. Wildbachsperrungen und Sperrentreppen). Hier müssen Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit für beide Ebenen nacheinander explizit beurteilt werden.

Bilden zwei verschiedene Massnahmen ein „Gesamt-Schutzsystem“ und handelt es sich nicht um eine Massnahme im Sinne von Kapitel 5.2, sind sie in logischer Reihenfolge einzeln unter Berücksichtigung des Zusammenwirkens zu beurteilen. Dabei sind Iterationen denkbar. Beispiele sind vor allem im Zusammenhang mit Hangbewegungen (Rutschungen, Wildbäche) zu finden, so etwa Sperrenverbau mit Hangsicherung oder Hangentwässerung mit Stützmauer am Hangfuss.

Einzelmassnahmen  
eines Gesamt-  
Schutzsystems separat  
betrachten

## 6. Schritt 3: Wirkungsbeurteilung

### 6.1 Übersicht

Die Wirkungsbeurteilung quantifiziert den Einfluss der Massnahme auf den Prozessablauf unter Berücksichtigung ihrer Zuverlässigkeit. Die Prozessbeurteilung ist von Prozess- und Massnahmentyp abhängig. Daraus resultieren die Intensitäten und Wahrscheinlichkeiten pro Szenario und somit die Grundlagen für die Gefahrenkarten.

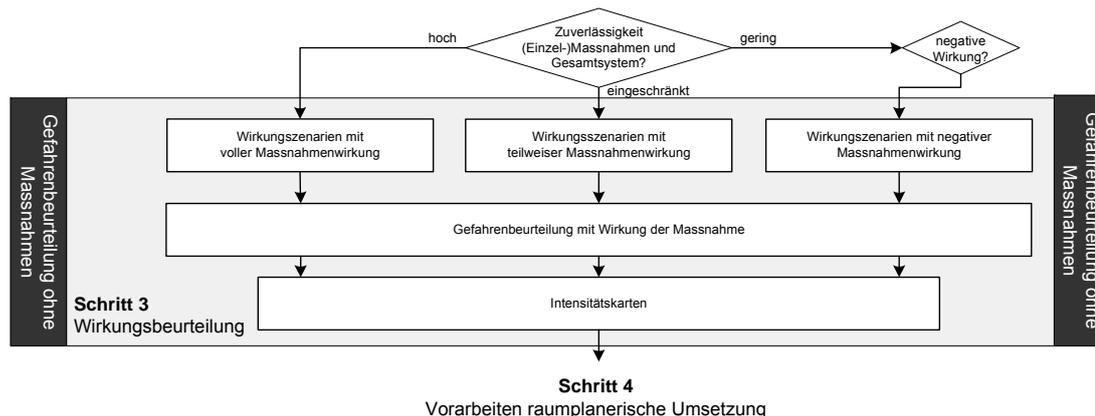


Abb. 6.1: Beurteilung von Schutzmassnahmen – Schritt 3, Wirkungsbeurteilung.

### 6.2 Massnahmenbeeinflusste Szenarien

Die Szenarien für die Gefahrenbeurteilung werden unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit der Massnahmen festgelegt. In der Regel gilt, dass bei einer hohen Zuverlässigkeit mit der vollen Massnahmenwirkung gerechnet werden kann. Szenarien mit eingeschränkter Zuverlässigkeit sind genauer zu spezifizieren. Die Einschränkungen können verschiedene Ursachen haben und sich somit unterschiedlich auf den Prozess auswirken. Szenarien mit geringer Zuverlässigkeit entsprechen entweder einem Szenario ohne Massnahmenwirkung oder aber einem Szenario mit negativer Wirkung.

Extremszenarien sind immer zu berücksichtigen. Dabei handelt es sich definitionsgemäss um Szenarien, die nicht den bekannten, angenommenen oder vermuteten Grundlagen bei der Bemessung der Massnahmen entsprechen. Beim Extremereignis stellt eine hohe Zuverlässigkeit der Massnahmen eher die Ausnahme dar.

### 6.3 Prozessbeurteilung für Intensitätskarten

Mit den Methoden der Prozessbeurteilung (z.B. lawinendynamische Berechnungen oder Steinschlagsimulationen) wird die Intensität für die untersuchten Szenarien unter Berücksichtigung der Wirkung der Massnahmen bestimmt. Oft stehen nur grobe, empirische Ansätze zur Verfügung. Insbesondere ist die Wirkung einer Schutzmassnahme ein Extremereignis oft nur schlecht bekannt.

Es sind zwei Vorgehensweisen üblich:

- die Massnahme wird in der Prozessmodellierung direkt berücksichtigt (z.B. Überflutungsmodellierung mit Damm).

Zuverlässigkeit einer Massnahme in Gefahrenbeurteilung spezifizieren

- die Massnahme wird indirekt in der Prozessmodellierung berücksichtigt, indem mit massnahmenbeeinflussten Szenarien aber ohne die in die Modellierung integrierten Massnahmen gearbeitet wird (z.B. Stabilitätsberechnung eines Rutschhanges mit durch Entwässerungen abgesenktem Hangwasserspiegel). Dieses Vorgehen wird dort angewendet, wo die Interaktion von Prozess und Massnahme sehr komplex ist und nicht in ein Modell integriert werden kann.

Das Resultat der Wirkungsbeurteilung wird in Intensitätskarten dargestellt. Falls bereits für die Ausgangssituation eine Beurteilung durchgeführt wurde, stellt die Differenz der Karten ohne Massnahmen und mit Massnahmen die Wirkung dar.

## 7. Schritt 4: Empfehlungen zur raumplanerischen Umsetzung

### 7.1 Anlass

Schutzmassnahmen in Gefahrenkarten

Gefahrenkarten bilden eine von mehreren wichtigen Grundlagen für die optimale Gestaltung der Raumnutzung. Gestützt auf die Richtlinien und Empfehlungen des Bundes zeigen sie die Gefährdung durch Lawinen, Hochwasser und Murgänge, Rutschungen sowie Sturzprozesse auf. Gefahrenreduzierende Schutzmassnahmen führen dazu, dass Gefahrenbereiche kleiner ausfallen oder einer geringeren Gefährdungsklasse zugewiesen werden können. Bei neuen Schutzmassnahmen können sich daraus Anpassungen des Zonenplanes mit einer Ausweitung der bebaubaren Fläche ergeben. Dabei besteht die Gefahr, dass die Besiedlung in Gebieten erfolgt, welche potenziell etwa bei vernachlässigtem Unterhalt infolge Finanzierungslücken nach wie vor einer Gefährdung ausgesetzt sind. Daraus ergibt sich das vitale Interesse aller Beteiligten, die Gefährdung insbesondere unter Berücksichtigung der Wirkung der Schutzmassnahmen möglichst treffend bestimmen zu können. Dazu müssen angemessene Konsequenzen gezogen werden, hinsichtlich der Raumplanung, Bautätigkeit und Besiedlung, z.B. indem Unterhaltspläne erstellt und ausgeführt werden.

Gefahrenreduktion durch Schutzmassnahmen bestimmen

Der erste Teil, die Bestimmung der Gefahrenreduktion, wird durch das vorgestellte Vorgehen von PROTECT abgedeckt. Es stellt nach heutigem Stand des Wissens die bestmögliche Vorgehensweise dar, um die Wirkung von Schutzmassnahmen zu bestimmen.

Umsetzungsempfehlungen aus Sicht der Naturgefahrenfachleute

Der zweite Teil, die raumplanerische Umsetzung, wird im Folgenden diskutiert. Dazu gilt es aber einschränkend festzuhalten, dass die Betrachtung primär aus Sicht der Naturgefahrenfachleute erfolgt. Eine umfassende Behandlung der Thematik aus raumplanerischer Sicht unter Einbezug von weiteren Aspekten wie Wirtschaft und Recht ist hier nicht möglich.

### 7.2 Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren

Restgefährdung bei Schutzmassnahmen

Der Zusammenhang von Raumplanung und Naturgefahren wurde 2005 in den Empfehlungen des Bundes thematisiert (ARE et al., 2005). Darin werden auch einzelne Aspekte zur Bedeutung von Schutzmassnahmen angesprochen. Mit direktem Bezug zur raumplanerischen Umsetzung wird etwa festgehalten, dass Schutzbauten zur Erweiterung bestehender Bauzonen oder zur Ausscheidung von neuen Baugebieten nur sehr zurückhaltend erstellt werden sollten. „Dies gilt umso mehr, wenn es sich um Gefährdungen durch Naturgefahren mit geringer Vorwarnzeit und hoher Intensität handelt oder wenn die Nutzung in Richtung der Gefahrenquelle erweitert wird. Durch Schutzbauten gesicherte Räume sollten im Zonenplan als potenzielle Gefahrengelände mit einer Restgefährdung ausgewiesen werden“ (ARE et al., 2005: 25). PROTECT steht grundsätzlich im Einklang mit diesen Empfehlungen und unterstützt ihre Berücksichtigung. Einzelne Aspekte werden durch PROTECT genauer spezifiziert.

### 7.3 Akteure

Im gesamten Prozess lassen sich im Wesentlichen vier Hauptakteure unterscheiden:

- Der Naturgefahrenexperte ist in enger Zusammenarbeit mit der kantonalen Naturgefahren-Fachbehörde für die fachgerechte Erarbeitung der Gefahrenkarte verantwortlich. Generelle Empfehlungen zur raumplanerischen Umsetzung sind in der Regel nicht Teil des Auftrages. Spezifische Empfehlungen beispielsweise zu möglichen Schutzmassnahmen (z.B. Objektschutzmassnahmen) können bei Bedarf verlangt werden.
- Der Raumplaner kümmert sich um die raumplanerische Einbindung in die Nutzungspläne der Gemeinde gemäss den Richtlinien des Kantons. Im Allgemeinen ist sein Freiraum relativ klein. So sollen Festlegungen nachvollziehbar sein, Richtlinien und Ähnliches sind zu berücksichtigen und über das gesamte Kantonsgebiet soll ein vergleichbarer Massstab angewendet werden.
- Die politische Behörde hat eine Kontrollfunktion und ist für die Umsetzung zuständig. Mit der Genehmigung durch die kantonale Behörde (meist Regierungsrat) übernimmt die Genehmigungsbehörde die Verantwortung.
- Der Grundeigentümer darf sich auf den Zonenplan und mit ihm auf den Gefahrenzonenplan beziehungsweise die Gefahrenkarte verlassen. Mit der Einzonung seines Grundstücks wird grundsätzlich die Baueignung zugesprochen<sup>7</sup>. Mit der Überlagerung durch eine Gefahrenzone sind einer freien Überbauung jedoch Einschränkungen auferlegt (Polizeirecht).

Die Vielzahl der involvierten Akteure und deren unterschiedliche Aufgaben machen deutlich, dass die Herausforderung der angemessenen raumplanerischen Umsetzung von durch Schutzmassnahmen gesicherten Gebieten keinesfalls alleine von Naturgefahrenfachleuten bewältigt werden kann. Die Gefahrensituation ist nur einer von verschiedenen relevanten Faktoren. Naturgefahrenfachleute können aber aus ihrer Sicht Grundlagen bereitstellen, welche die übrigen Akteure in ihrer Arbeit unterstützen und gesamthaft zu möglichst optimalen Lösungen führt.

Umsetzung ist von verschiedenen Akteuren abhängig

### 7.4 Objektive Gefahrenkarten

Gefahrenkarten sind nach wissenschaftlichen Kriterien zu erstellen. Dies gilt auch im Zusammenhang mit Schutzmassnahmen, denn Gefahrenkarten bilden nicht nur eine Grundlage für die Raumnutzung, sondern auch für Interventionskarten oder für temporäre Massnahmen. PROTECT liefert für die Beurteilung von Schutzmassnahmen die Methodik. Diese soll konsequent angewendet werden. Politische, strategische und ähnliche Überlegungen hingegen gehören nicht in eine Gefahrenkarte.

Wissenschaftliche Kriterien

### 7.5 Unsicherheiten

Jede Gefahrenbeurteilung ist mit Unsicherheiten verbunden. Schutzmassnahmen können sie sowohl erhöhen (unsichere Wirkung) als auch verringern (hohe Wirksamkeit). Grundsätzlich sind Naturgefahrenexperten gefordert und geübt mit Unsicherheiten umzugehen. Das klar strukturierte Vorgehen von PROTECT reduziert

Unsicherheiten in der Gefahrenbeurteilung

<sup>7</sup> Artikel 15, Bundesgesetz über die Raumplanung (Raumplanungsgesetz, RPG) vom 22. Juni 1979.

zudem die Gefahr von Unsicherheiten aufgrund von fehlenden oder unvollständigen Analysen. Die mit der raumplanerischen Umsetzung betrauten Stellen und Personen sollen sich auf die fachtechnische Beurteilung des Naturgefahrenexperten verlassen können.

Unsicherheiten in der  
Szenarienabgrenzung

Im Grundsatz sollen Unsicherheiten deshalb im Rahmen der Gefahrenbeurteilung (mit und ohne PROTECT) behandelt werden. Die Szenarien und Gefahrenkarten sollen entsprechende Überlegungen widerspiegeln. So wird der Gutachter bei kleinen Unsicherheiten die Szenarien enger abgrenzen und kann unter Umständen die Gefahrenbereiche kleiner halten. Bei grossen Unsicherheiten ist hingegen die Bandbreite der einzelnen Szenarien grösser, was sich in der Regel auch in der Ausscheidung der Gefahrenggebiete zeigt.

In einzelnen Fällen ist es denkbar, dass der Gutachter zu seinen Ergebnissen den Vorbehalt von erheblichen Unsicherheiten anbringt. Wenn trotz der grossen Bandbreite der Szenarien bzw. einer vagen Festlegung der Gefährdung ein Beibehalten oder Ausweisen einer gleich grossen Gefährdung sowohl mit als auch ohne Schutzmassnahmen nicht angemessen ist (z.B. wegen kleiner Wahrscheinlichkeit), soll der Gutachter dies explizit erläutern. Ob und wie diese Zusatzinformationen umgesetzt werden, bleibt aber den zuständigen Stellen vorbehalten.

## 7.6 Versagensszenarien

Die Anwendung von Schutzmassnahmen schliesst implizit ihr Versagen etwa bei Überlastung mit ein. Die Folgen einer solchen Überlastung durch ein extremes oder nicht erwartetes Ereignis soll im Rahmen von PROTECT explizit geprüft werden. Die in einem solchen Fall betroffene Fläche wird in der Regel gelb-weiss markiert, sofern das Versagen nicht bereits bei einem Ereignis  $\leq 300$  jährlich eintritt.

Darüber hinaus wird keine Ausscheidung des durch die Schutzmassnahmen gesicherten Raumes vorgenommen. Die Analyse einer Überlastung entspricht der Realität mehr als ein hypothetisches Weglassen der Massnahmen.

## 7.7 Gefahrenkarten vor und nach Massnahmenerstellung

Besteht für ein Gebiet mit Schutzmassnahmen noch keine Gefahrenbeurteilung oder ist die bestehende veraltet und daher keine Vergleichsbasis, wird die Gefahrenkarte unter Berücksichtigung der Schutzmassnahmen nach PROTECT erstellt.

Gefahrenkarten zeigen  
Bedarf von Schutz-  
massnahmen

Ein Vergleich von alter und neuer Beurteilung ist bei bereits bestehenden qualitativ genügenden Gefahrenkarten möglich. Diese Situation tritt besonders bei der Planung von neuen Schutzmassnahmen auf, deren Bedarf und Verhältnismässigkeit sich aus dem Vergleich der Situation vor und nach Massnahmenrealisierung und der damit verbundenen Gefahrenreduktion ableitet.

Rückstufungen nach  
Massnahmenerstellung  
möglich

Die besondere Bedeutung dieses Vergleichs ergibt sich durch die mögliche Rückstufung von Gefahrenggebieten von einer höheren (z.B. rot) zu einer schwächeren Gefährdung (z.B. blau). Bei entsprechender raumplanerischer Umsetzung kann eine verstärkte Besiedlung die Folge sein. Hier gilt es, die Objektivität der Gefahrenkarte zu wahren und die Farbgebung mit Massnahmen getreu der Methodik PROTECT zu bestimmen und politische Betrachtungen im weiteren Sinne der Konsequenzen einer (Nicht-) Änderung der Farbgebung zu vermeiden respektive in die Verfahren nach Erstellung der Gefahrenkarte zu verweisen. Grundsätzlich ist bei der Nutzung von Gebieten, die durch Schutzmassnahmen gesichert sind, eine gewisse Zurück-

haltung empfehlenswert (vgl. ARE et al., 2005: 25). Es ist aber auch zu respektieren, dass weitere Argumente für den Entscheid massgebend sind.

Eine gewisse Zurückhaltung bei der Anpassung (Intensivierung) der Raumnutzung scheint unter anderem in folgenden Fällen angebracht:

- Der Gutachter weist explizit auf erhebliche Unsicherheiten hin, z.B. wegen Unsicherheiten beim Prozess und bei der Wirkung der Massnahme, wegen allgemeinen Veränderungen des Gebietes, wegen Klimasensitivität oder wegen gegenseitiger (negativer) Beeinflussung von Prozessen
- Extremereignisse sind schwer abschätzbar bzw. kaum quantifizierbar. Die Folgen eines extremeren Ereignisses, als es der Gefahrenbeurteilung zu Grunde gelegt wurde, sind somit weitgehend unbekannt.
- Die Schutzmassnahmen sind bei einem Extremereignis weitgehend wirkungslos. Die Gefahrenbeurteilung ist damit sensitiv auf Abweichungen bei den Szenarien.

## 7.8 Umgang mit gelben und gelb-weissen Gefahrengebieten

Gelbe und gelb-weisse Gefahrengebiete spielen bei der Berücksichtigung von Schutzmassnahmen eine wichtige Rolle. Eine reduzierende Wirkung vorausgesetzt, können viele gesicherte Gebiete so eingefärbt werden. Es stellt sich aber die Frage, ob die heutige unverbindliche Regelung als Hinweiszonen genügend bzw. angemessen ist. So kann es durchaus sinnvoll sein, auch in diesen Gebieten eine gewisse Steuerung der Raumnutzung vorzunehmen. Diese Fragen sind aber nicht im Rahmen von PROTECT zu lösen, sondern sprechen eine Diskussion und allenfalls Anpassung der Bundesempfehlungen zur Gefahrenkartierung an.

Umgang mit gelb bzw. gelb-weiss klären

## 7.9 Zeitpunkt der Berücksichtigung

Geplante und bestehende Massnahmen werden gleich beurteilt. Nach der Realisierung einer Massnahme muss überprüft werden, ob die Ausführung dem Projekt entspricht und ob eine Gefahrenbeurteilung, welche in der Planungsphase vorgenommen wurde, noch gültig ist. Frühestens dann ist eine raumplanerische Berücksichtigung des neuen Zustandes angebracht. Bei einzelnen Typen von Schutzmassnahmen ist zudem eine Karenzfrist angemessen. Dies betrifft beispielsweise Werke mit biologischen Komponenten (Aufforstungen, Ingenieurbiologie), viele Werke im Bereich der Rutschungssicherung oder Werke, bei denen einige Jahre der Beobachtung einen wesentlichen Erkenntnisgewinn für die Wirkungsbeurteilung ermöglichen.

Nur realisierte Massnahmen berücksichtigen

## Literatur

ARE (Bundesamt für Raumentwicklung), BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie), BAFU (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft), 2005: Empfehlungen Raumplanung und Naturgefahren. Bern.

Romang H., Margreth S., Böll A., Kienholz H., 2003: Berücksichtigung von Schutzmassnahmen in der Gefahrenbeurteilung. Auswertung des Workshops der Forstlichen Arbeitsgruppe Naturgefahren (FAN) 2002.

Romang H., Margreth S., 2007: Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung. Umsetzung der Strategie Naturgefahren Schweiz: Projekt A 3. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, Bern.

SIA, 2003a: Grundlagen der Projektierung von Tragwerken. SIA Norm 260. Schweiz. Ingenieur und Architekten Verein, Zürich.

SIA, 2003b: Einwirkungen auf Tragwerke. SIA Norm 261. Schweiz. Ingenieur und Architekten Verein, Zürich.

SIA, in Vorb.: Erhaltung von Tragwerken. SIA Normenwerk 269. Schweiz. Ingenieur und Architekten Verein, Zürich.



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 B: LAWINEN

Stefan Margreth, André Burkard, Heinrich Buri



Lawinerverbau Männlichen, Wengen, BE (S. Margreth, SLF)

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
1.1	Übersicht	1
1.2	Besonderheiten	1
1.3	Stand der Beurteilungsmethodik	2
2.	Übersicht Schutzmassnahmen	5
3.	Grobbeurteilung	7
3.1	Übersicht	7
3.2	Grobanalyse Lawinensituation	7
3.3	Grobanalyse Schutzmassnahme	8
3.4	Relevante Wirkung	9
3.5	Fazit Grobbeurteilung	12
4.	Massnahmenbeurteilung	13
4.1	Übersicht	13
4.2	Stützverbau	13
4.2.1	Prozessgrundlagen	13
4.2.2	Grundlagen über die Stützverbauung	16
4.2.3	Überprüfung der Tragsicherheit	16
4.2.4	Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit	18
4.2.5	Überprüfung der Dauerhaftigkeit	19
4.2.6	Bestimmung der Zuverlässigkeit	20
4.3	Ablenk-, Brems- und Auffangbauwerke	20
4.3.1	Prozessgrundlagen	20
4.3.2	Grundlagen über das Bauwerk	21
4.3.3	Überprüfung der Tragsicherheit	21
4.3.4	Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit	22
4.3.5	Überprüfung der Dauerhaftigkeit	23
4.3.6	Bestimmung der Zuverlässigkeit	23
4.4	Objektschutzmassnahmen	23
4.5	Wald	24
4.5.1	Prozessgrundlagen	24
4.5.2	Grundlagen zum Wald	25
4.5.3	Überprüfung der Tragsicherheit	25
4.5.4	Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit	25
4.5.5	Überprüfung der Dauerhaftigkeit	25
4.5.6	Bestimmung der Zuverlässigkeit	26

5.	Wirkungsbeurteilung	27
5.1	Stützverbau	27
5.1.1	Übersicht	27
5.1.2	Fall 1: Lawinenanbruch ausserhalb der Stützverbauung	28
5.1.3	Fall 2: Lawinenanbruch in der Stützverbauung	29
5.1.4	Fall 3: Anbruch Oberlawine	30
5.2	Auffangdamm	32
5.2.1	Übersicht	32
5.2.2	Fall 1: Lawinenaufprall mit zu grosser Geschwindigkeit	34
5.2.3	Fall 2: Ungenügendes Auffangvolumen	37
5.2.4	Bremshöcker	37
5.3	Ablenkdämme	39
5.4	Leitdämme	40
5.5	Objektschutzmassnahmen	41
5.6	Wald	41
5.6.1	Übersicht	41
5.6.2	Fall 1: Dichter Wald	41
5.6.3	Fall 2: Dichter Wald mit kleinen Lücken	41
5.6.4	Fall 3: Lawinenanbruch oberhalb vom Wald, Wald in der Sturzbahn	42
6.	Fallbeispiel Stützverbau	43
7.	Fallbeispiel Auffangdamm	47
	Literatur	51

# 1. Charakteristik der Prozesse

## 1.1 Übersicht

Lawinen entstehen, wenn eine ganze Schneetafel grossflächig abbricht und in einzelne mehr oder weniger grosse Schollen zerfällt, die während der Bewegung mit dem Boden in Kontakt bleiben. Je nach Beschaffenheit des Schnees und der Topographie kann der Fliess- oder der Staubanteil einer Lawine dominieren (Abb. 1.1 und Abb. 1.2). Bei Gefahrenbeurteilungen stehen Fliess- und Staublawinen im Vordergrund. Schneegleiten, eine langsame Bewegung der Schneedecke auf dem Boden, hat im Vergleich dazu in Gefahrenkarten eine kleinere Bedeutung und wird im Folgenden nicht detailliert behandelt.

Lawinenbildung



Abb. 1.1: Lawinenabgang im SLF Versuchsgelände Vallée de la Sionne. Der Fliessanteil wird vom Staubanteil überdeckt.

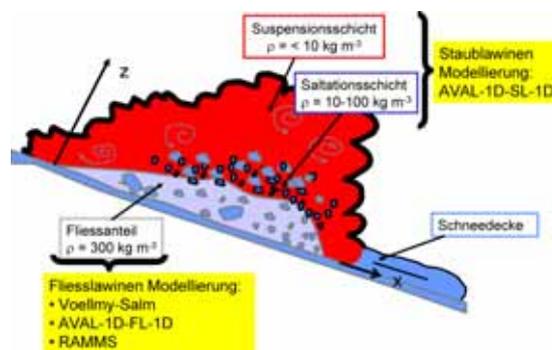


Abb. 1.2: Aufbau einer Lawine – der Fliessanteil wird vom Staubanteil, der aus der Saltationschicht und der Suspensionschicht besteht, überdeckt.

## 1.2 Besonderheiten

Das Ausmass (Lawinenlänge) und die Intensität von Lawinen hängen vom Anbruchvolumen, von der Topographie und von der Reibung ab. Das Anbruchvolumen wird für verschiedene Jährlichkeiten bestimmt, indem die Anrissmächtigkeit und -fläche entsprechend variiert werden. Als Basiswert für die Festlegung der Anrissmächtigkeit wird der maximale Schneedeckenzuwachs in 3 Tagen verwendet. Bei der Gefahrenbeurteilung von Lawinen besteht im Vergleich zu den übrigen gravitativen Prozessen eine wesentlich längere Tradition. Es bestehen etablierte Berechnungsmodelle und Anleitungen, die das Vorgehen bei Gefahrenbeurteilungen detailliert umschreiben. Das Voellmy-Salm-Modell (Salm et al., 1990) wird seit mehreren Jahrzehnten für die Berechnung von Fliesslawinen eingesetzt. Mit AVAL-1D (SLF, 2005), einem eindimensionalen Simulationsmodell, können Fliess- und Staublawinen berechnet werden. Das zweidimensionale Fliesslawinenberechnungsmodell RAMMS (SLF, 2007) steht kurz vor der Praxiseinführung.

1- und 2D Modelle

Bei Lawinen kommen Massnahmen im Anbruchgebiet, in der Sturzbahn und im Auslaufgebiet zum Einsatz. Bemerkenswert ist, dass auch bei "richtiger" Bemessung eine Restgefährdung bestehen bleibt, weil der Prozess sehr unterschiedlich ablaufen kann. So kann etwa ein auf Fliesslawinen bemessener Auffangdamm von Staublawinen überflossen werden.

### 1.3 Stand der Beurteilungsmethodik

Gefahrenbeurteilung

Ein Lawenniedergang ist ein komplexer, einmaliger, physikalischer Prozess, der heute nur ansatzweise bekannt ist und wohl auch in Zukunft kaum bis in alle Details erfasst werden kann. Die Lawinenauslösung hängt zudem von meteorologischen und weiteren Randbedingungen ab, welche sich nur beschränkt voraussagen lassen. Entsprechend gibt es für die Beurteilung der Lawinengefährdung nicht eine allgemein anerkannte richtige Lösung, sondern zahlreiche, verschiedenartige Ansätze. Folgende Schritte sind bei der Beurteilung von Lawinengefahren üblich:

- Aufarbeitung und Analyse des Ereigniskatasters
- Beurteilung und Begehung des Geländes
- Analyse der klimatischen Verhältnisse
- Einschätzung der zu erwartenden Lawinenarten und der Wiederkehrdauer
- Durchführung von lawinendynamischen Berechnungen mit aktuellen Prozessmodellen / Nachrechnung von Ereignissen
- Bewertung der Wirkung von bestehenden Gebäuden, Schutzmassnahmen und Wald

Diese Grundlagen müssen vom Lawinenexperten für die gesamtheitliche Entscheidungsfindung analysiert, interpretiert und gewichtet werden. Die gutachtliche Beurteilung muss zu realistischen, nachvollziehbaren Lösungen führen.

Unsicherheit in der  
Gefahrenbeurteilung

In Tab. 1.1 werden Faktoren aufgezeigt, welche die Unsicherheit bei der Szenarienburgung resp. der Prozessbeurteilung beeinflussen. Die Tabelle kann als Checkliste verwendet werden, um eine Gefahrenbeurteilung hinsichtlich vorhandener Unsicherheiten einzustufen. Je mehr Unsicherheiten mit einem Bedeutungsfaktor von 3 verzeichnet werden, desto ungünstiger ist die Situation.

Mit folgenden Fragen kann die Unsicherheit bei einer Gefahrenbeurteilung im Zusammenhang mit Schutzmassnahmen beurteilt werden:

- Sind die Szenarien eindeutig und nachvollziehbar erfasst (z.B. Wahl der Anrissfläche, Bestimmung der Fliessrichtung, Wahl des Lawinentyps)?
- Welche Faktoren beeinflussen den Ablauf des Szenarios am stärksten (z.B. Steilabsturz, Richtungsänderung, Vorlawinen)?
- Können die Eingangsgrössen für die Lawinenmodellierung genau bestimmt werden (Wahl der Lawinenkubatur, Reibungswerte, Lawinenbahn)?
- Was für Schwachstellen gibt es, wurde das Szenario vollständig erfasst (gleichzeitiger Anbruch von verschiedenen Anrissflächen, kleinere Reibung als angenommen, „Entrainment“ vom Schnee in der Sturzbahn, mögliches Überfliessen eine Geländerippe)?
- Was sind die Konsequenzen einer Überlastung der Schutzmassnahme?

Tab. 1.1: Checkliste zur Abschätzung der Unsicherheit bei der Szenarienbildung bzw. Gefahrenbeurteilung (Bedeutungsfaktor: 3=gross, 1=klein).

	Kriterium	Schwierigkeit	Kleine Unsicherheit (+)	Grosse Unsicherheit (-)	Bedeutung
<b>Allg.</b>	Ereigniskataster, Beobachtungen	Unter Umständen liegen keine direkten Beobachtungen vor.	Häufige Ereignisse, viele Beobachtungen	Seltene Ereignisse, keine dokumentierten Fälle	3
<b>Anrissgebiet</b>	Fläche	Festlegen der Lawinengrösse bei sehr grossen Anrissgebieten schwierig. Heikel, wenn die Schneemassen von grossen Anrissflächen kanalisiert werden.	Klein (<3-5 ha)	Gross (>10 ha)	2
	Neigung	Festlegen der Anrissfläche; heikel insbesondere Verflachungen (28°-30°) zwischen steileren Gebieten (>30°) oder unterhalb des Anbruchgebietes.	30°-45°	28°-30°; >45°	3
	Höhenlage	In hoch gelegenen Gebieten nimmt der Windeinfluss stark zu. In tief gelegenen Gebieten nimmt die Anbruchwahrscheinlichkeit stark ab.	1500...3000 m	>3000 m	1
	Triebschnee	Starke Zunahme der Anrissmächtigkeit und der Schneehöhe; z.B. grosse Fläche ausserhalb Anrissgebiet, von wo der Schnee ins Anrissgebiet verfrachtet wird.	Unwahrscheinlich	Wahrscheinlich (Plateau oberhalb Anrissgebiet)	1
	Abgrenzung	Festlegen der Lawinengrösse resp. des Anbruchszenarios	Klar abgrenzbar, 1 Geländekessel	Nicht genau definierbar, offene Hänge, verschiedene Lawinengebiete	3
	Topographie	Geländerauhigkeit, Rippen, Felswände	Keine oder klein, gleichförmig geneigt	Stark strukturiert; viele kleine Teilanbruchgebiete	1
	Sekundäre Anrissgebiete	Abgetrennte Anrissgebiete im gleichen Lawinenzug	Nein, keine vorhanden	Ja	2
<b>Sturzbahn</b>	Schneeaufnahme („Entrainment“)	Steile, flächige Lawinengebiete mit kleinen Rauigkeiten	Unwahrscheinlich	Möglich	2
	Durchschnittsneigung	In steilen Sturzbahnen werden grössere Geschwindigkeiten erreicht und Staublawinen können entstehen	< 25°	>35°	1
	Fliessrichtung und Fliessbreite	Gerade in offenen Lawinengebieten kann es schwierig sein, die Fliessrichtung und Breite festzulegen.	Klar festgelegt	Unklar, mehrere Richtungen möglich	3
	Richtungswechsel, Rauigkeit, Verflachungen	Es kann ein schwieriger Massenverlust eintreten.	Nein	Ja	1
	Steilabstürze (>30-100 m)	Es können Staublawinen entstehen.	Nein	Ja	2
<b>Auslaufgebiet</b>	Auslaufbeginn	Durch die Topographie klar festgelegt.	Ja	Nein	2
	Neigung Auslauf	Kritisch, wenn nahe bei der Grenzneigung	<5°	>5°...11°	3
	Hauptstossrichtung und Fliessbreite	Kritisch z.B. auf breitem Schuttfächer	Klar bestimmbar	unbestimmt	2
	Lawinentyp	Die Auslaufstrecke von Staublawinen ist schwierig zu bestimmen.	Fliesslawinen	Staublawinen	2
	Höhenlage	Unterhalb von rund 1300-1500 m kann mit einer grösseren Reibung gerechnet werden.	<1300-1500 m	>1500 m	1

Im Folgenden werden drei Beispiele gezeigt, bei denen eine grosse Unsicherheit bei der Prozessbeurteilung im Zusammenhang mit Schutzmassnahmen besteht.

### Beispiel 1: Unterscheidung von Teilanrissgebieten

Das Anrissgebiet besteht aus 3 durch Geländerrippen getrennten, rund 25 ha grossen, benachbarten Teilanrissgebieten. Die Geländebeziehungen der Teilanrissgebiete sind sehr ähnlich. Die Lawinenmassen der Teilanrissgebiete fliessen im oberen Teil der Sturzbahn zusammen. Lawinenbeobachtungen fehlen weitgehend. In dieser Situation ist die Szenariobildung sehr unsicher, da die Annahme über die Anzahl von gleichzeitig anbrechenden Teilanrissgebieten für den Prozessablauf entscheidend ist. Würde sich am Beginn der Auslaufstrecke ein Auffangdamm befinden, der für den Anbruch von einer 100-jährlichen Lawine aus einem Teilanrissgebiet dimensioniert wurde, müsste die Unsicherheit bei der Szenariowahl im Vergleich zur Wirkung des Damms als gross eingestuft werden.

### Beispiel 2: Stützverbauung unterhalb Geländeverflachung

Ein sekundäres Anrissgebiet oberhalb einer Verflachung. Darunter liegt das Hauptanrissgebiet, das mit Stützwerken verbaut ist. Rechnerisch ist ein Durchfliessen der Verflachung möglich, wurde aber noch nie beobachtet. Falls eine Lawine die Verflachung durchfliesst, müsste mit der Zerstörung der Verbauung gerechnet werden (z.B. Abb. 4.1, Seite 15). Bei einem seltenen Szenario gibt es grosse Unsicherheiten.

### Beispiel 3: Topographie unterhalb Stützverbauung

Im Fall 3 (Abb. 1.3), wo bereits kleine Lawinen das Schadenpotential erreichen, ist die Konsequenz der Unsicherheit in der Beurteilung des Prozesses und der Massnahme viel grösser, als wenn wie bei Fall 1 (Abb. 1.3) die Lawinenbahn grosse Rauigkeiten aufweist und eine Abflachung vorhanden ist. Im Fall 1 werden die Unsicherheiten durch die Bremswirkung des Waldes und die vorhandene Auslaufstrecke klein gehalten. Im Fall 3 bleiben sie unverändert.

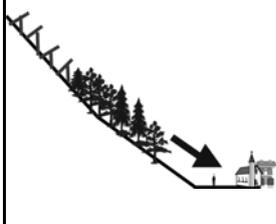
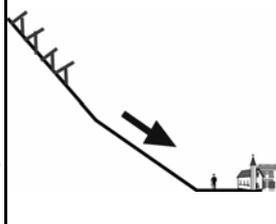
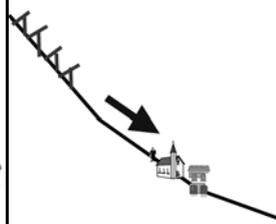
Ausbildung der Lawinenbahn unterhalb der Stützverbauung	Fall 1: Schutzwald unter Stützverbauung und Abflachung im Auslauf	Fall 2: Offene Sturzbahn und Abflachung im Auslauf	Fall 3: Offene, steile Sturzbahn ohne Abflachung im Auslauf
Längsprofil			
Konsequenzen bei einem Versagen der Stützverbauung	Klein: Lawinen werden durch Wald und Abflachung abgebremst. Nur extreme Lawinen erreichen Schadenpotential.	Mittel: Lawinen werden durch Abflachung abgebremst. Mittलगrosse Lawinen erreichen Schadenpotential.	Gross: Lawinen erreichen das Schadenpotential praktisch ungebremst. Bereits kleine, häufige Lawinen erreichen Schadenpotential.

Abb. 1.3: Einfluss des Längsprofils und der Beschaffenheit der Lawinenbahn unterhalb einer Stützverbauung auf die Unsicherheiten.

## 2. Übersicht Schutzmassnahmen

Tab. 2.1 zeigt unter Berücksichtigung der Grundsätze gemäss Teil A, welche Lawinenschutzmassnahmen bei Gefahrenbeurteilungen prinzipiell berücksichtigt werden können und welche nicht. Zu beachten ist, dass die Massnahme genügend dimensioniert und der Zustand gut sein muss, damit eine relevante Wirkung entsteht. Es kann durchaus der Fall eintreten, dass eine Massnahme bei der Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) keine Wirkung zeigt, obwohl sie a priori berücksichtigt werden kann. Ausserdem müssen etliche Massnahmen differenziert betrachtet werden, damit eine Einstufung der Massnahme erfolgen kann. So müssen etwa beim Schutzwald im Anrissgebiet der Kronendeckungsgrad, die Stammzahl und die Grösse von Öffnungen angesprochen werden. Im Folgenden werden der permanente Stützverbau, Dämme und Wald im Detail erläutert. Für temporäre Stützverbauungen und Objektschutzmassnahmen werden ergänzend grobe Angaben gemacht. Verwehungsverbauungen, künstliche Lawinenauslösung und temporäre Massnahmen werden nicht diskutiert.

Kriterien zur  
Berücksichtigung der  
Massnahmen

Tab. 2.1: Prinzipielle Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Lawinenschutzmassnahmen.

Massnahme	Berücksichtigung der Wirkung bei Gefahrenbeurteilungen	Kriterien/Bemerkung
<b>Permanenter Stützverbau</b>		
- Stützwerke - Schneenetze	Ja	- Anforderungen gemäss technischer Richtlinien Lawinenverbau (Margreth, 2007) - Unterhalt gewährleistet
- Mauerterrassen - Erdterrassen	Differenzierte Betrachtung erforderlich	- Dauerhaftigkeit (Unterhalt) muss gewährleistet sein. - Oft ungenügende Wirkungshöhe
<b>Verwehungsverbau</b>		
- Zäune - Kolktafeln	Nein	- Als Einzelmassnahme zu unsicher
<b>Temporärer Stützverbau</b>		
- Ohne Aufforstung	Nein	- Dauerhaftigkeit nicht gewährleistet - Stützwerke, bei denen tragende Bauteile aus Holz gefertigt sind, werden wie temporäre Stützwerke behandelt.
- Mit Aufforstung bzw. natürlicher Verjüngung	Differenzierte Betrachtung erforderlich	- Ja, wenn Aufforstung/ Verjüngung schutzwirksam (Baumhöhe > ca. zweifache extreme Schneehöhe) - Ja, wenn Erfolg Aufforstung/ Verjüngung sichergestellt (günstige Wuchsbedingungen wie z.B. tiefe Höhenlage)
<b>Dämme</b>		
- Auffangdämme	Ja	- Genügend hohe Relevanz
- Bremshöcker	Differenzierte Betrachtung erforderlich	- In Zusammenhang mit Auffangdamm: Ja - Als Einzelmassnahme: i.d.R. Nein.
- Ablenkdamme	Ja	- Genügend hohe Relevanz
- Leitdamme	Ja	- Genügend hohe Relevanz
<b>Objektschutzmassnahmen</b>		
- Am Objekt	Differenzierte Betrachtung erforderlich	- Wenn nur lokaler Effekt: Nein - Wenn flächige Wirkung: Möglich
<b>Wald</b>		
- Intakter Schutzwald im Lawinenanbruchgebiet	Ja	- Anforderungen gemäss NAIS (Frehner et al. 2005)
- Wald in der Sturzbahn und im Auslaufgebiet	Differenzierte Betrachtung erforderlich	- Bei starken Intensitäten, häufigen Ereignissen und Staublawinen: Nein. - Bei geschlossenen, hochstämmigen Beständen und Kleinlawinen: Möglich
<b>Künstliche Lawinenauslösung</b>		
- Nicht ortsfeste Sprenganlagen	Nein	- Funktionsfähigkeit ist zu stark von der menschlichen Einflussnahme abhängig
- Ortschaftsfeste Sprenganlagen	Nein	- Funktionsfähigkeit ist zu stark von der menschlichen Einflussnahme abhängig
<b>Temporäre Massnahmen</b>		
- Schneedämme - maschinelle Leerung	Nein	- Funktionsfähigkeit ist zu stark von der menschlichen Einflussnahme abhängig

### 3. Grobbeurteilung

#### 3.1 Übersicht

Im Schritt 1 Grobbeurteilung ist abzuschätzen, ob von der zu beurteilenden Massnahme eine relevante Wirkung erwartet werden kann und folglich eine vertiefte Untersuchung angebracht ist. Die Grobbeurteilung sollte nur in unbestrittenen Situationen zum Abbruch führen. Falls bei der Beurteilung der Relevanz Zweifel bestehen, wird empfohlen, die Wirkung der Massnahme mit den Schritten 2 und 3 detailliert zu ermitteln.

#### 3.2 Grobanalyse Lawinensituation

Die Grobanalyse soll einen Überblick über die Gefahrensituation speziell mit Blick auf die zu beurteilende Schutzmassnahme verschaffen. Die erforderlichen Informationen hängen von der zu beurteilenden Massnahme ab. Es werden einerseits die bei Gefahrenbeurteilungen üblichen Grundlagen benötigt (z.B. Lawinenkataster, Gefahrenkarte, technische Berichte mit verwendeten Szenarien), andererseits müssen je nach Massnahme spezifische Prozessinformationen erarbeitet werden (Tab. 3.1). Im Schritt 1 genügt es meist, diese Informationen gutachtlich abzuschätzen. Zusätzlich sollen die bei der Prozessbeurteilung bestehenden Unsicherheiten eingeschätzt werden (Tab. 1.1), v.a. hinsichtlich des Grundsatzes 2 "Unsicherheiten" im Kap. 2, Teil A.

Tab. 3.1: Erforderliche Prozessinformationen um die Wirkung der verschiedenen Lawinenschutzmassnahmen beurteilen zu können.

Information	Grundlage	Schutzmassnahme		
		Stützverbau	Dämme	Wald
Potenzielles Lawinenanbruchgebiet (Lage, Grösse)	Kataster, Hangneigungskarte, Abschätzung an der Geländebegehung	entscheidend	weniger wichtig	entscheidend
Schneehöhen	Erfahrungswerte, Technische Richtlinie, Schneedaten	entscheidend	weniger wichtig	wichtig
Lawinenkubatur	Berechnung, Abschätzung, Kataster	weniger wichtig	entscheidend	wichtig
Lawinenhäufigkeit	Kataster, Lawinenspuren, Abschätzung	wichtig	wichtig	wichtig
Lawinengeschwindigkeit	Lawinentechnische Berechnung, Abschätzung	weniger wichtig	entscheidend	entscheidend
Fliesshöhe	Lawinentechnische Berechnung, Abschätzung	weniger wichtig	wichtig	entscheidend
Lawinenablagerungshöhe	Lawinentechnische Berechnung, Abschätzung	weniger wichtig	entscheidend	weniger wichtig
Lawinentyp (Fließ-/Staublawine)	Kataster, Topographie, Abschätzung an der Geländebegehung	weniger wichtig	wichtig	entscheidend
Geländesituation	Übersichtskarte, Begehung	wichtig	wichtig	wichtig

### 3.3 Grobanalyse Schutzmassnahme

Die Grobanalyse der Schutzmassnahme liefert einen ersten Überblick über die Situation. Dazu sind folgende Unterlagen hilfreich:

- Projektdossier (z.B. Baujahr, Konstruktion)
- Schutzbautenkataster
- Zweck der Massnahmen (z.B. Damm gegen Steinschlag, Murgang)
- Angaben über Kontrollen und Unterhalt der Massnahmen

Minimaler Informationsstand zur Beurteilung der Schutzmassnahmen

Je nach Massnahme müssen noch spezifische Informationen beschafft werden. In Tab. 3.2 sind die wichtigsten Kriterien/Informationen aufgezählt, die die Wirkung der Schutzmassnahmen definieren. Bei verschiedenen Kriterien genügt im Schritt 1 eine pauschale Abschätzung.

Tab. 3.2: Kriterien, um die Wirksamkeit von Lawinenschutzmassnahmen grob abschätzen zu können.

Massnahme	Kriterium/Information	Schritt 1
Stützverbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Werktyp</li> <li>- Standortfaktoren (Werkhöhe, Gleitfaktor)</li> <li>- Ausdehnung (verbaute Fläche)</li> <li>- Anordnung u. Werkabstände</li> <li>- Topographie</li> <li>- Zustand (Unterhalt)</li> <li>- Gefahrenquellen für den Stützverbau (z.B. Steinschlag; Hanginstabilitäten)</li> <li>- Bewährung</li> </ul>	pauschal quantitativ quantitativ pauschal pauschal pauschal pauschal
Dämme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dammhöhe und -länge</li> <li>- Dammvorfeld (Neigung, Länge)</li> <li>- Dammgeometrie (Böschungsneigung)</li> <li>- Auffangvolumen</li> <li>- Topographie am Standort</li> <li>- Gefahrenquellen (z.B. geotechnische Instabilitäten, Erosion, Wasserdruck)</li> </ul>	quantitativ pauschal quantitativ pauschal pauschal pauschal
Wald	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baumhöhe</li> <li>- Kronendeckungsgrad</li> <li>- Ausdehnung der bewaldeten Fläche</li> <li>- Lücken im Bestand (Länge, Breite, Hangneigung)</li> <li>- Zustand (Sturmschäden, Käfer, Pflege)</li> <li>- Baumarten (wintergrün, Lärchen, Laubwald)</li> <li>- Gefahrenquellen für Wald (z.B. Anbrüche von weiter oben)</li> </ul>	pauschal pauschal pauschal pauschal pauschal pauschal pauschal

Häufig Feldbegehung notwendig

Bei älteren Bauwerken, bei denen oft nur wenige oder keine Unterlagen verfügbar sind, ist meist die Durchführung einer Feldbegehung mit der Aufnahme der wichtigsten Kriterien erforderlich. Einerseits können so die vorhandenen Unterlagen geprüft bzw. ergänzt und andererseits kann die Gesamtsituation erfasst werden. Empfehlenswert sind dafür eine Gegenhangbetrachtung und eine Begehung des Massnahmenstandortes.

Bei gut dokumentierten neueren Massnahmen oder wenn die Wirkung der Massnahmen unbestritten ist, kann im Schritt 1 auf eine Begehung verzichtet werden. Meist ist dann jedoch eine Begehung im Schritt 2 und 3 erforderlich.

### 3.4 Relevante Wirkung

Eine relevante Wirkung besteht dann, wenn die Massnahmen den Prozess stärker beeinflusst als die Unsicherheiten in dessen Beurteilung sind. Die Beurteilung der Relevanz erfolgt in der Regel gutachtlich. Bei den meisten dem heutigen Stand der Technik entsprechenden Schutzmassnahmen ist die Relevanz gegeben, so dass eine vertiefte Untersuchung der Wirkung in den Schritten 2 und 3 angezeigt ist. Anders kann es bei älteren Schutzmassnahmen aussehen oder bei Schutzmassnahmen wie z.B. Steinschlagdämmen, die nicht primär als Lawinenschutz ausgelegt wurden. Entspricht die Massnahme nicht der Gefahrensituation (z.B. Lawinenablenkdamm und Staublawine als massgebender Prozess) oder sind die Unsicherheiten bei der Prozessbeurteilung z.B. wegen einer sehr komplexen Lawinensituation oder methodischen Defiziten grösser als die vermutete Wirkung der Massnahme, kann ein Abbruch bzw. eine Gefahrenbeurteilung ohne Berücksichtigung der Massnahme angezeigt sein. Wichtig ist, dass bei der Beurteilung der Relevanz die Gesamtsituation im Auge behalten wird.

Einfluss auf Prozess muss grösser als dessen Beurteilungsunsicherheit sein

Nachfolgend werden für die verschiedenen Massnahmen minimale Anforderungen vorgeschlagen, falls sich eine vertiefte Analyse nicht lohnt. Dies ist der Fall, wenn die Relevanz dieser Massnahmen ist nicht gegeben ist bzw. die Wirkung innerhalb der Unschärfe der Prozessbeurteilung liegt. Zu beachten ist, dass die aufgestellten Regeln insbesondere für Szenarien mit einer Wiederkehrdauer von 100 und mehr Jahren gelten, da diese im Allgemeinen bei Gefahrenbeurteilungen massgebend sind. Bei Risikoanalysen können jedoch auch kleinere, unbedeutende Bauwerke bei Szenarien mit einer kleinen Wiederkehrdauer eine gewisse Relevanz haben.

Regeln für Grobanalyse

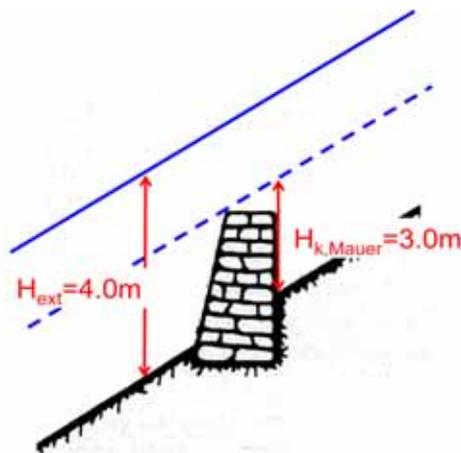
#### Generell

Ältere Massnahmen, die sich in einem schlechten Zustand befinden und nicht mehr unterhalten werden, werden als nicht relevant betrachtet.

Generelle Regel bei älteren Massnahmen



Abb. 3.1: Stützverbauung, die weniger als 20% der potentiellen Anbruchfläche abdeckt. Zusätzlich besteht Steinschlaggefahr.



Beispiel:

$$H_{\text{ext}} = 4.0 \text{ m}$$

$$H_{k,\text{Mauer}} = 3.0 \text{ m}$$

$$H_{\text{ext}} - 0.5 H_{k,\text{Mauer}} = 4.0 - 1.50 = 2.5 \text{ m} > 2 \text{ m}$$

Bedingung ist nicht erfüllt

Abb. 3.2: Wirkungshöhe  $H_k$  einer Steinmauer. Da Steinmauern schnell hinterfüllt werden, muss  $H_k$  um 50% reduziert werden.

Stützverbau ohne relevante Wirkung

Ein Stützverbau zeigt in der Regel keine relevante Wirkung, wenn mindestens einer der folgenden Punkte zutrifft:

- Die mit Stützwerken verbaute Fläche beträgt weniger als 20% der potenziellen Anrissfläche (Abb. 3.1).
- Die Verbauung wurde klar nicht richtliniengemäss ausgeführt (z.B. Einzelwerke mit zu grossen Werkabständen und zu kleinen Werkhöhen).
- Die Verbauung ist selber durch weiter oben anbrechende Lawinen oder Sturzereignisse gefährdet.
- Die Mehrzahl der Stützwerke ist nicht typengeprüft und klar ungenügend bemessen.
- Die mittlere Werkhöhe  $H_K$ , der Verbauung ist ungenügend, wenn sie 2 m kleiner ist als die extreme Schneehöhe  $H_{ext}$  für ein 300-jährliches Szenario. Die extreme Schneehöhe kann gemäss Ziffer 3.5.4 der technischen Richtlinie (Margreth, 2007) abgeschätzt werden. Da Steinmauern und Erdterrassen durch Tribschnee viel schneller als gegliederte Stützwerke hinterfüllt sind, ist deren Werkhöhe um 50 % zu reduzieren (Abb. 3.2).

Auffangdamm ohne relevante Wirkung

Ein Auffangdamm zeigt in der Regel keine relevante Wirkung (Abb. 3.3 und Abb. 3.4), wenn mindestens einer der folgenden Punkte zutrifft:

- Der Geschwindigkeitsverlust beim Überfliessen des Dammes ist kleiner als 20% (Tab. 3.3).
- Das Auffangvolumen des Dammes ist kleiner als 20% des Anbruchvolumens.
- Es können grosse Staublawinen auftreten und die Dammhöhe ist kleiner als ein Fünftel der Fliesshöhe.

Tab. 3.3 Minimale Dammhöhen in Abhängigkeit der Lawinengeschwindigkeit, um einen Geschwindigkeitsverlust von mindestens 20% zu erzeugen (Bezeichnungen siehe Abb. 5.6, Seite 35).

Lawinengeschwindigkeit vor Damm $v_1$	Steighöhe ( $v_1^2/2g\lambda$ , wobei $\lambda=2.0$ )	Fliesshöhe $d_1$	Schneehöhe $d_0$	Minimale Dammhöhe für einen Geschwindigkeitsverlust von 20%
10 m/s	1.0 m	1.0 m	1.5 m	3.5 m
20 m/s	3.5 m	1.0 m	1.5 m	6.0 m
30 m/s	8.0 m	1.0 m	1.5 m	10.5 m

Ablenkdammm ohne relevante Wirkung

Ein Ablenkdammm zeigt in der Regel keine relevante Wirkung, wenn mindestens einer der folgenden Punkte zutrifft:

- Die Dammhöhe ist nicht grösser als die extreme Schneehöhe gemäss der technischen Richtlinie.
- Der Ablenkwinkel beträgt mehr als 50° (Bemessung als Auffangdammm erforderlich).
- Der Ablenkdammm wird schon von kleinen, häufigen Schneerutschen erreicht.
- Es können grosse Staublawinen auftreten.

Durch Ablenkdamme kann in Richtung der abgelenkten Schneemassen eine Mehrgefährdung auftreten.



Abb. 3.3: Rund 5 m hoher Auffangdamm in einem Lawinenanrissgebiet. Wegen der geringen Höhe kann eine Lawine nicht gestoppt werden.



Abb. 3.4: Mit viel zu hoher Geschwindigkeit überflossene Auffangdämme. Praktisch kein Schnee wurde zurückgehalten.

Bremshöcker zeigen keine relevante Wirkung, wenn ihre Höhe kleiner als die Summe der extremen Schneehöhe und der Fliesshöhe ist.

Bremshöcker ohne relevante Wirkung

Schutzwald im Lawinenanbruchgebiet zeigt in der Regel keine relevante Wirkung, wenn mindestens einer der folgenden Punkte zutrifft:

Schutzwald ohne relevante Wirkung

- Der Wald bedeckt weniger als 20% des potentiellen Anrissgebietes (Abb. 3.5).
- Die Bäume sind kleiner als die 2-fache extreme Schneehöhe und haben einen Durchmesser von weniger als 8 cm (meist der Fall bei Legföhren und Sträuchern).
- Der Wald ist selber durch anbrechende Lawinen gefährdet (Abb. 3.6).



Abb. 3.5: Rechtes rotes Quadrat: Anrissgebiete oberhalb vom Wald und stark aufgelöster Wald: der Wald zeigt keine relevante Wirkung. Linkes grünes Quadrat: der Wald zeigt eine relevante Wirkung.



Abb. 3.6: Wald am Ende der Sturzbahn, der bei grösseren Lawinenabgängen zerstört werden kann (rote Quadrate) – es kann keine relevante Wirkung erwartet werden.

Wald in der Sturzbahn und im Auslauf von Lawinen zeigt in der Regel keine relevante Wirkung, wenn mindestens einer der folgenden Punkte zutrifft:

- Der Lawinendruck von Fließlawinen ist grösser als  $50 \text{ kN/m}^2$ .
- Der Lawinendruck von Staublawinen ist grösser als 3 bis  $5 \text{ kN/m}^2$ .

### **3.5 Fazit Grobbeurteilung**

Wenn von den Lawinenschutzmassnahmen relevante Wirkungen erwartet werden können, werden diese in den Schritten 2 und 3 vertieft untersucht.

Können keine relevanten Wirkungen erwartet werden oder bestehen nicht vertretbare Unsicherheiten (vgl. Grundsatz 2, Teil A) erfolgt ein Abbruch der Beurteilung. Die Resultate und Erkenntnisse werden in einem Bericht zusammengefasst. Die Gefahrenbeurteilung wird ohne Berücksichtigung der Massnahmen durchgeführt. Im Bericht können evtl. Vorschläge unterbreitet werden, was gemacht werden müsste, um die Wirkungen der Massnahmen berücksichtigen zu können.

Verursachen die Massnahmen gegenüber dem Ausgangszustand eine erhöhte Gefährdung, wird diese ebenfalls in den Schritten 2 und 3 quantifiziert.

## 4. Massnahmenbeurteilung

### 4.1 Übersicht

Ziel von Schritt 2 ist die Beurteilung der Zuverlässigkeit der einzelnen Massnahmen aufgrund von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. In diesem Schritt wird die Reaktion der Massnahmen in Funktion der bei den verschiedenen Szenarien auftretenden Einwirkungen betrachtet. Je nach Resultat kann bei der Wirkungsbeurteilung im Schritt 3 nicht mit der vollen Wirksamkeit der Massnahmen gerechnet werden. Zu beachten ist, dass beim Stützverbau und beim Wald die massgebenden Einwirkungen mehrheitlich unabhängig von den für die Gefahrenbeurteilung massgebenden Szenarien auftreten. So treten z.B. maximaler Schneedruck und maximale Lawinengefahr im Allgemeinen nicht gleichzeitig auf. Für den Stützverbau, die Dämme und den Wald werden die zu berücksichtigenden Einwirkungen anhand von Gefährdungsbildern aufgezeigt. Es wird zwischen typischen und untypischen Gefahrenbildern unterschieden:

Reaktion der Massnahmen in Abhängigkeit der Szenarien

- Typische Gefährdungsbilder können in allen Situationen auftreten und werden für die Bemessung der Massnahmen standardmässig berücksichtigt. Deshalb sind sie für die Massnahmen in der Regel unproblematisch (hohe Zulässigkeit) und bei Schritt 3 kann mit der vollen Wirkung der Massnahmen gerechnet werden. Mehrheitlich kann die Massnahmenbeurteilung pauschal durchgeführt werden.
- Untypische Gefährdungsbilder werden für die Bemessung einer Massnahme nicht standardmässig berücksichtigt und können problematisch sein. Es handelt sich um Sonderfälle. Wenn solche untypischen Gefährdungsbilder bei der Projektierung nicht berücksichtigt wurden, kann die Zuverlässigkeit gering oder eingeschränkt sein.

Typische Gefährdungsbilder

Untypische Gefährdungsbilder

Für zu beurteilende Massnahmen ist das mögliche Auftreten der aufgezeigten Gefährdungsbilder zu überprüfen. Die Erläuterungen über die Durchführung der Massnahmenbeurteilung erfolgt für die verschiedenen Massnahmen getrennt. Schritt 2 baut auf den im Schritt 1 zusammengestellten Unterlagen auf.

### 4.2 Stützverbau

#### 4.2.1 Prozessgrundlagen

Im Vergleich zu anderen Massnahmen, wie beispielsweise Steinschlagschutznetze, tritt die maximale Beanspruchung nur ausnahmsweise während der für die Gefahrenbeurteilung massgebenden Szenarien auf. Ein technisches Versagen einer Stützverbauung ist meist nicht direkt mit einem Lawinenanbruch verknüpft. Ist eine Stützverbauung hingegen vor dem Eintreten einer extremen Lawinensituation nicht mehr funktionstüchtig (z.B. zerstörte Stützwerke), kann es zu einem Lawinenanbruch kommen. Gefährdungsbild 1 „Schneedruck“ tritt immer auf und ist für die Bemessung der typengeprüften Stützwerke massgebend. Die Gefährdungsbilder 2 bis 4 treten nur in Ausnahmefällen auf.

Maximale Beanspruchung nur ausnahmsweise massgebendes Szenario

#### Gefährdungsbild 1 (typisch): Schneedruck

- Die Schneedruckeinwirkungen sind in der „Technischen Richtlinie für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet“ (Margreth 2007) beschrieben. Der Schneedruck hängt v.a. von der Schneehöhe  $H$  und dem Gleitfaktor  $N$  ab.

Schneehöhe

- Die Schneehöhe  $H_{ext}$  ist für die Szenarien 30 Jahre, 100 Jahre, 300 Jahre und für ein Extremereignis (~1000 Jahre) zu bestimmen. Die Schneehöhen können wie folgt erfasst werden:
  - Lokale Messungen und Beobachtungen
  - Extremwertstatistik eines repräsentativen, nahe gelegenen Messfeldes mit Umrechnung auf die Höhenlage der Verbauung (Schneehöhengradient gemäss Ziffer 3.5.4 der Technischen Richtlinie, falls erforderlich Anpassung infolge Treibschnee).
  - Gemäss Ziffer 3.5.4 der Technischen Richtlinie kann die 100-jährliche Schneehöhe für die Höhenlage und die Klimaregion der Verbauung ermittelt werden. Die Umrechnung auf die verschiedenen Wiederkehrdauern kann gemäss Tab. 4.1 schätzt werden.
  - Schneegleiten: Abschätzung resp. Verifizierung des Gleitfaktors  $N$  auf Grund der Erfahrungen (z.B. Bodenschurfspuren, Schäden) und den Bodeneigenschaften (gemäss Tab. 3.3 der Technischen Richtlinie).

Tab. 4.1: Berechnung der Schneehöhen  $H_{ext}$  für verschiedene Wiederkehrdauern (Mittelwerte über die gesamte Schweiz von Extremwertstatistiken ausgewählter Messstationen ohne Windeinfluss).

Wiederkehrdauer	Umrechnungsfaktor bezüglich einer Schneehöhe mit einer Wiederkehrdauer von 100 Jahren
30 Jahre	0.83
100 Jahre	1.0 (Ausgangswert gemäss Technischer Richtlinie)
300 Jahre	1.15
1000 Jahre (Extremereignis)	1.25

Schneegleiten

### Gefährdungsbild 2 (untypisch): Lawinenaufprall

Lawine bricht in Verbauung an

- Lawinendrucke von Anbrüchen innerhalb einer Verbauung sind bei richtliniengemässen Werkabständen vernachlässigbar. Bei zu grossen Werkabständen können jedoch so grosse Lawinendrucke auftreten, dass Stützwerke beschädigt werden.

Lawine bricht oberhalb Verbauung an

- Anrissgebiete oberhalb der Stützverbauung: Abklären, ob solche Anrissgebiete existieren und unter welchen Voraussetzungen die Stützverbauung erreicht werden kann (z.B. mit lawinentechnischen Berechnungen). Bestimmen der Lawinendrucke für die verschiedenen Szenarien in der Verbauung (Abb. 4.1).

Lawine bricht seitlich der Verbauung an

- Anrissgebiete seitlich der Stützverbauung: Festlegen der Lawinenflussrichtung im Gelände und auf Plänen, Abklären wie der seitliche Rand der Stützverbauung ausgebildet ist (Optimal: Werke zurückgestaffelt, verstärkte Randwerke, Randwerke stehen auf Geländerippe, Leitwände oder Kolktafeln vorhanden; Ungünstig: keine oder ungenügende Zurückstaffelung, keine Randverstärkungen, Randwerke befinden sich in Geländevertiefung). Bestimmen der Lawinendrucke für die verschiedenen Szenarien.



Abb. 4.1: Lawine zerstörte zahlreiche Stützwerke (Gefährdungsbild 2). Die Lawine ist oberhalb der Verbauung angebrochen.



Abb. 4.2: Durch Steinschlag weggerissene und zerstörte Stützwerke (Gefährdungsbild 3). Es handelt sich um einen lokalen Schaden.

### Gefährdungsbild 3 (untypisch): Stein- und Blockschlag

Hier muss abgeklärt werden, ob in- oder oberhalb der Stützverbauung potenzielle Anbruchgebiete von Stein- und Blockschlag vorhanden sind. Heikel sind Situationen, wo sich oberhalb der Verbauung grosse Felswände befinden. Der Absturz von grösseren Felspaketen kann mehrere Werkreihen zerstören (Abb. 4.2). Die zu erwartenden Intensitäten und Häufigkeiten lassen sich mit Steinschlagmodellierungen und der Interpretation von Beobachtungen/Schäden abschätzen. Je nach Situation ist die Durchführung einer geologischen Beurteilung erforderlich. Abb. 4.3 zeigt ein mögliches Vorgehen auf.

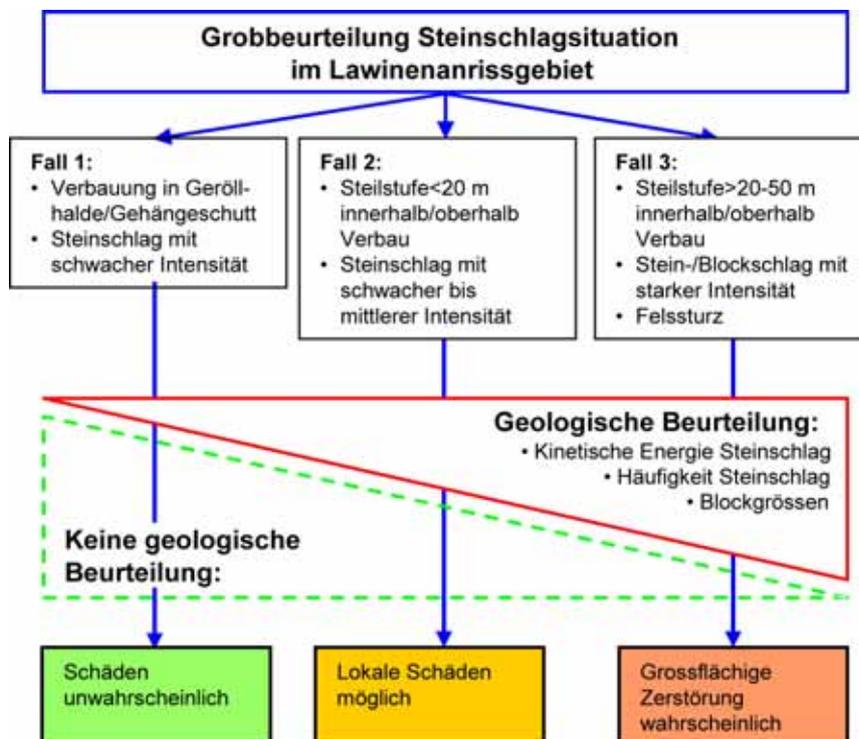


Abb. 4.3: Grobbeurteilung Steinschlagsituation in einem Lawinenanrissgebiet.

Geländeinstabilitäten

### Gefährdungsbild 4 (untypisch): Einwirkungen aus dem Baugrund

Geländeinstabilitäten können zu Deformationen von Stützwerken führen. Die Grösse der Verschiebungen kann mit Beobachtungen am Stützwerk (z.B. Geometrieränderungen) oder Baugrund (z.B. Risse) abgeschätzt werden.

#### 4.2.2 Grundlagen über die Stützverbauung

Die im Schritt 1 aufgeführten Unterlagen sind im Allgemeinen auch für Schritt 2 genügend. Wichtigste Grundlage ist ein nachgeführter Verbauungskataster.

Falls über den Zustand der Verbauung resp. der eingebauten Werktypen keine Aufzeichnungen vorliegen, empfiehlt es sich, diese im Feld zu erheben. Dies ist v.a. bei älteren Stützwerken notwendig (z.B. AIAG Aluminium Stützwerke), die flächenhaft eingesetzt wurden.

Wie sieht das Unterhaltskonzept der Verbauung mittel- und langfristig aus (z.B. kontinuierlicher Ersatz von VOBAG-Werken)? Es muss klar sein, ob die Verbauung langfristig erhalten wird (z.B. problematisch bei Steinmauern, die wegen hoher Kosten und schlechter Effizienz nicht mehr unterhalten werden).

Dokumentationen über die Bewährung der Verbauung (z.B. Fotos vom Lawinenwinter 1999, Schneeverteilung) liefern wichtige Informationen.

#### 4.2.3 Überprüfung der Tragsicherheit

##### Allgemeines

Stützverbauung ist als Gesamtsystem zu berücksichtigen

Die Tragsicherheit eines einzelnen Stützwerkes ist mit Blick auf das Funktionieren des Gesamtsystems Stützverbau im Allgemeinen unproblematisch, da die grösste Beanspruchung der Stützverbauung nicht direkt von der Grösse der Lawinengefahr abhängt. Stützwerke werden gemäss Margreth (2007) auf eine 100-jährliche Schneehöhe als veränderliche Einwirkung entsprechend Gefährdungsbild 1 bemessen. Da bei dieser Bemessung Sicherheiten von rund 1.6 berücksichtigt sind, wird beim Extremereignis (1000-jährliche Schneehöhe) die Tragsicherheit knapp erreicht. Ein lokales Versagen eines Einzelwerkes kann auftreten. Solange der Unterhalt gewährleistet ist, ist ein lokales Versagen eines Einzelwerkes für das Funktionieren der gesamten Verbauung nicht relevant. Deshalb muss im Allgemeinen nicht jedes Einzelwerk betrachtet werden, sondern die Stützverbauung kann als Gesamtsystem beurteilt werden. Die „untypischen“ Gefährdungsbilder 2 bis 4 werden bei der Projektierung einer Stützverbauung nur teilweise, oft aber gar nicht berücksichtigt. Da insbesondere die Gefährdungsbilder 2 (Lawinenaufprall) und 3 (Sturz) zu grossflächigen Schäden in einem Stützverbau führen können, ist ihr mögliches Auftreten immer zu prüfen.

##### Standardfall: Typengeprüfte Stützwerke

Pauschale Beurteilung bei typengeprüften Stützwerken

Eine pauschale Beurteilung ist genügend. Gefährdungsbild 1 wird in der Typenprüfung gemäss der technischen Richtlinie überprüft. Zu prüfen sind insbesondere die folgenden Punkte:

- Entsprechen die Standortfaktoren des eingebauten Werktyps (Rosthöhe  $D_k$ , Gleitfaktor  $N$ , Höhenfaktor  $f_c$ ) den lokalen Verhältnissen (Vergleich Projektierung – Realität)?
- Entspricht die Anordnung und Ausführung der Werke der technischen Richtlinie?
- Ist der Zustand der Werke „gut“ (vgl. Tab. 7 der technischen Richtlinie)?

- Können die Gefährdungsbilder 2 bis 4 ausgeschlossen werden?
- Ist der Unterhalt sichergestellt?

Im Normalfall können die Fragen positiv beantwortet werden und die Tragsicherheit ist erfüllt. Bei zu klein gewählten Standortfaktoren (v.a. Werkhöhe), bei nicht richtliniengemässer Anordnung resp. Ausführung oder falls die Gefährdungsbilder 2 bis 4 auftreten können, muss die Tragsicherheit gutachtlich oder mit statischen Nachweisen überprüft werden. In solchen Situationen dürfte die Tragsicherheit nur teilweise oder gar nicht erfüllt sein.

### Sonderfall: Alte und nicht typengeprüfte Werke

Eine statische Nachrechnung der Tragsicherheit ist wegen der oft fehlenden Eingangsgrössen (Materialeigenschaften, Querschnittswerte, Art der Fundierung) meist unverhältnismässig. Eine qualitative Beurteilung der Tragsicherheit steht im Vordergrund. Dazu muss der Zustand der Werke vor Ort auf verdächtige Mängel oder Schäden geprüft werden. Solche Angaben sind für die Beurteilung der Tragsicherheit aussagekräftig. Da es sich generell um ältere Massnahmen handelt, muss geprüft werden, ob grössere Schneedruckbelastungen gemäss Gefährdungsbild 1 bereits einmal aufgetreten sind. Sehr wichtig ist, dass ein Unterhaltskonzept resp. Ersatzprojekt für die Verbauung existiert und der Zustand der Werke bekannt ist. Bei den folgenden Werktypen ist bei der Beurteilung der Tragsicherheit Vorsicht geboten, da sich die Baumaterialien und die Konstruktionsart im Allgemeinen nicht bewährt haben:

Qualitative Beurteilung  
bei alten, nicht typen-  
geprüften Werken

- **VOBAG-Stützwerke** aus vorgespannten, vorgefertigten Betonelementen: Problematisch sind Rissbildungen (Abb. 4.4), Korrosion der Bewehrung, Deformationen und die seitliche Stabilität. Zusätzlich weisen VOBAG-Werke oft zu grosse Rostbalkenabstände auf, was bei der Wirkungsbeurteilung zu berücksichtigen ist.
- **Aluminiumwerke**: Problematisch sind insbesondere die Verbindungen (z.B. Stützenanschluss an Träger) und die Stabilität der einzelnen Bauteile. Oft haben Aluminiumwerke nur eine ungenügende Werkhöhe.
- **Schneenetze erstellt vor 1975**: Sie sind häufig zu schwach bemessen.



Abb. 4.4: VOBAG-Stützwerke mit Rissbildung im Träger. Mittelfristig ist die Tragfähigkeit nicht mehr gewährleistet.



Abb. 4.5: Durch Felssturz aufgefülltes Schneenetze. Die Wirkungshöhe ist reduziert.

Sofern der Zustand der Werke gut ist, ein Unterhaltskonzept resp. Ersatzprojekt für die Verbauung vorliegt, die Anordnung und Ausführung der Werke der Richtlinie entspricht und die Gefährdungsbilder 2 bis 4 ausgeschlossen werden können, kann die Tragsicherheit als erfüllt betrachtet werden.

Die Tragsicherheit wird als nicht gegeben betrachtet, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

- Mehr als 1/3 der Stützwerke ist „schadhaft“ oder „schlecht“ (vgl. Ziffer 5.4.2.3 Tab. 7 der technischen Richtlinie).
- Die Anordnung und Ausführung der Stützverbauung ist nicht richtliniengemäss (meist alte Verbauungen, die vor 1968 erstellt wurden).

#### 4.2.4 Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit

##### Allgemeines

Werkhöhe und Ausbildung der Stützfläche bestimmen Gebrauchstauglichkeit

Stützverbauungen haben die Aufgabe, die Schneedecke abzustützen und zwischen den Werkreihen anbrechende Schneemassen aufzufangen. Um diese Aufgabe an einem bestimmten Standort erfüllen zu können, muss die Verbauung bestimmten Anforderungen genügen. Wichtigste Punkte sind die effektiv vorhandene Werkhöhe (Abb. 4.5), die Ausbildung resp. Abdeckung der Stützfläche (eine geschlossene Stützfläche ist schneller hinterfüllt) und die Anordnung der Stützwerke. Bei der Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit wird untersucht, ob die Stützverbauung die gestellten Anforderungen im Gebrauch erfüllt. Mangelhafte Gebrauchstauglichkeit zeigt sich in der Regel in einer Abnahme der Wirkung auf den Prozess (z.B. Reduktion der erforderlichen Werkhöhe). Erfahrungsgemäss ist die Erfüllung der Gebrauchstauglichkeit bei einer Stützverbauung unproblematisch. Die Gebrauchstauglichkeit wird visuell geprüft. Wenn die Gebrauchstauglichkeit nicht oder nur teilweise erfüllt ist (z.B. wegen fehlendem Unterhalt eingestürzter Stützwerke), wird dies bei der Wirkungsbeurteilung von Schritt 3 berücksichtigt.

##### Standardfall: Gegliederte Stützverbauungen

Im Normalfall verändert sich die Gebrauchstauglichkeit im Laufe der Zeit nur unwesentlich und sie kann als erfüllt betrachtet werden. Problematisch können die folgenden Punkte sein:

- Auffüllen der Stützfläche durch kleine Hangrutsche/Steinschlag (Abb. 4.5), was die Wirkungshöhe der Verbauung reduziert (nur lokaler Effekt und einfach behebbar).
- Ungenügender Unterhalt, fehlende oder eingestürzte Werke. Die Gebrauchstauglichkeit ist nicht mehr gewährleistet.
- Vollständig abgedeckter Stützrost: In steinschlaggefährdeten Gebieten oder an Standorten, wo schon kleine Schneerutsche gestoppt werden müssen, wird die Stützfläche oft mit Holzbalken oder einem Drahtgeflecht abgedeckt. Ein abgedecktes Werk ist schneller hinterfüllt und die Funktion ist reduziert. Bei der Wirkungsbeurteilung ist die wirksame Werkhöhe um 25% zu reduzieren.

##### Sonderfall: Mauerterrassen und Steinmauern

Mauerterrassen und Steinmauern erfüllen die heutigen Anforderungen an Stützwerke in der Regel nicht. Ihre abstützende und auffangende Funktion ist wegen der kleinen wirksamen Werkhöhe und wegen der ausgefüllten Stützfläche im Vergleich zu gegliederten Stützwerken stark eingeschränkt. Bei der Wirkungsbeurteilung ist die wirksame Werkhöhe um 50% zu reduzieren (Abb. 4.6).

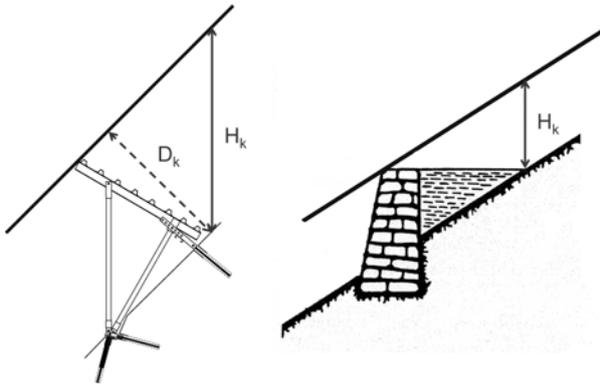


Abb. 4.6: Werkhöhe von gegliederten und massiven Stützwerken. Wenn bei gegliederten Stützwerken die Rostfläche abgedeckt ist, wird  $H_k$  um 25% reduziert. Bei Mauerterrassen wird  $H_k$  um 50% reduziert.

#### 4.2.5 Überprüfung der Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit wird hauptsächlich durch auftretende Umwelteinflüsse und evtl. Baumängel bestimmt. Sie kann gutachtlich auf Grund von Erfahrungen, von Zustandsaufnahmen und den im Kap. 4.2.1 definierten Gefährdungsbildern überprüft werden. Baumängel können meist durch eine visuelle Kontrolle erfasst werden.

Umwelteinflüsse und  
Baumängel bestimmen  
Dauerhaftigkeit

##### Standardfall

Falls nicht mit untypischen Umwelteinflüssen (Gefahrenbilder 2 bis 4) zu rechnen ist, ist die Dauerhaftigkeit im Allgemeinen gewährleistet. Bei älteren Verbauungen und nicht typengeprüften Stützwerken (z.B. VOBAG-Werke, Steinmauern), die sich in einem guten Zustand befinden, muss ein Unterhalts- und Ersatzkonzept vorliegen, damit die Dauerhaftigkeit als gewährleistet betrachtet werden kann.

##### Sonderfall

Muss in einer Stützverbauung mit dem Auftreten von untypischen Gefährdungsbildern gerechnet werden, müssen die möglichen Konsequenzen auf die Dauerhaftigkeit abgeschätzt werden:

- In einer Verbauung wird nur ein lokales Versagen einiger Stützwerke erwartet. Die Schäden (z.B. lokaler Steinschlag, lokales Überschneien) sind mit einem akzeptierbaren finanziellen Aufwand reparierbar. Die Wirkung der Verbauung ist nicht in Frage gestellt. Die Dauerhaftigkeit kann als gewährleistet betrachtet werden.
- Ein grossflächiges Versagen der Verbauung, kann nicht ausgeschlossen werden. Die Verbauung kann nur mit einem grossen finanziellen Aufwand wieder hergestellt werden. Eine erneute Zerstörung kann nicht ausgeschlossen werden (z.B. Verbauung steht in einem Rutschhang oder Felssturzgebiet, Lawine kann in die Verbauung eindringen). Die Dauerhaftigkeit der Verbauung ist fraglich, v.a. wenn zu den hohen Kosten noch bautechnische Probleme dazukommen. In solchen Situationen muss die Dauerhaftigkeit der Verbauung als nicht gewährleistet betrachtet werden.

### 4.2.6 Bestimmung der Zuverlässigkeit

In Tab. 4.2 sind Vorschläge für die Einschätzung der Zuverlässigkeit von Stützverbauungen zusammengestellt. Dabei wird die Zuverlässigkeit der gesamten Stützverbauung beurteilt. Ist in einer Verbauung z.B. bei 20% der Werke die Tragfähigkeit nicht erfüllt, wird sie als eingeschränkt zuverlässig eingeschätzt.

Tab. 4.2: Beispiele für die Einschätzung der Zuverlässigkeit von Stützverbauungen für ein bestimmtes Szenario.

Mögliche Gefährdungsbilder	Art der Verbauung	Bsp. für Kriterien				Tragsicherheit erfüllt	Gebrauchstauglichkeit erfüllt	Dauerhaftigkeit erfüllt	Zuverlässigkeit
		Richtlinienkonform	Unterhalts-/Ersatzkonzept	Lokale Schäden möglich	Grossflächige Schäden möglich				
<b>Typisch: Schneedruck</b>	Typengeprüfte Werke	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Hoch
	Nicht typengeprüfte Werke (z.B. VOBAG)	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Teilweise	Ja	Eingeschränkt
	Nicht typengeprüfte Werke (z.B. VOBAG)	Ja	Nein	Ja	Nein	Teilweise	Ja	Nein	Gering
<b>Typisch und untypisch: Schneedruck, Lawinenaufprall, Sturz etc.</b>	Typengeprüfte Werke	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Hoch
	Typengeprüfte Werke	Ja	Ja	Ja	Nein	Teilweise	Ja	Ja	Eingeschränkt
	Typengeprüfte Werke	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Gering

## 4.3 Ablenk-, Brems- und Auffangbauwerke

### 4.3.1 Prozessgrundlagen

Typische und untypische Gefährdungsbilder möglich

Ablenk-, Brems- und Auffangbauwerke werden in der Sturzbahn und im Auslaufgebiet von Lawinen erstellt. Oft handelt es sich um kombinierte Bauwerke gegen verschiedene Prozesse. Sie werden einerseits durch die für die Gefahrenbeurteilung massgebenden Lawinenszenarien beansprucht, andererseits können untypische Einwirkungen infolge anderer Prozesse wie Murgänge oder hydrostatischem Wasserdruck auftreten oder es können indirekte Einwirkungen auftreten, z.B. geotechnische Stabilitätsprobleme.

**Gefährdungsbild 1 (typisch): Lawinenaufprall**

Der Aufpralldruck ist von der Lawinengeschwindigkeit (senkrecht zur Dammachse), der Dichte des Lawinenschnees und dem Aufprallwinkel abhängig. Falls Fels- oder Eisblöcke von der Lawine mitgerissen werden, können lokal erhöhte Drücke auftreten.

**Gefährdungsbild 2 (untypisch): Einwirkungen von Steinschlag, Murgang, hydrostatischem Wasserdruck**

Je nach Standort kann das Bauwerk auch durch andere Prozesse beansprucht werden. Hydrostatischer Wasserdruck kann auftreten, wenn Abflusskanäle verstopft sind oder eine Entwässerung fehlt (z.B. Schneeschmelze).

**Gefährdungsbild 3 (untypisch): Stabilitätsprobleme**

Veränderungen der Geländeoberfläche wie Bodenerosion am Dammfuss oder erhöhte Porenwasserdrücke können zu einer Stabilitätsabnahme des Bauwerkes führen.

**4.3.2 Grundlagen über das Bauwerk**

Die im Schritt 1 aufgeführten Unterlagen sind im Allgemeinen auch für Schritt 2 genügend. Wichtigste Grundlagen sind der technische Bericht mit Angaben über die Bauart, Planunterlagen mit Abmessungen etc. Die Abmessungen sind im Gelände zu überprüfen. Weiter sind Angaben zum Unterhalt und zur Bewährung des Bauwerkes erforderlich.

Wichtigste Grundlage  
ist technischer Bericht

**4.3.3 Überprüfung der Tragsicherheit**

Abb. 4.7: Massiver Erddamm mit Blockwurf und durchgehender betonierter Abflusssektion (Trun, Kt. Graubünden).



Abb. 4.8 Lawinenauffangmauer aus Beton in Bleie, Ullensvang, Norwegen (Höhe 10 m, Wanddicke 0.35 m), Foto: T. Faug.

**Standardfall**

Wenn massive Erddämme geotechnisch richtig bemessen wurden, stellt Gefährdungsbild 1 in der Regel kein Problem dar und die Tragsicherheit ist erfüllt (Abb. 4.7).

Massive Erddämme  
normal problemlos

Bei Stahl- und Betonkonstruktionen Bemessungsunterlagen wichtig

Stahl- und Betonkonstruktionen werden teilweise für Ablenkwände, aber sehr selten für Auffangbauwerke verwendet (Abb. 4.8 und Abb. 4.9). Wenn keine Unterlagen über die Bemessung vorliegen, gestaltet sich die Überprüfung der Tragsicherheit als schwierig. Dann ist es empfehlenswert die Tragsicherheit durch eine statische Expertise abschätzen zu lassen. Die massgebenden Lawineneinwirkungen sind neu zu bestimmen (beim Lawinenberechnungsmodell AVAL-1D ergeben sich im Vergleich zum Voellmy-Salm Modell realistischere Fliessgeschwindigkeiten). Bei Ablenkbauwerken sind die Aufprallkräfte im Vergleich zum senkrechten Aufprall reduziert. Zu prüfen ist evtl., ob ein grösserer Ablenkwinkel möglich ist, als bei der Bemessung angenommen wurde und damit grössere Kräfte auftreten können.

### Sonderfall (untypische Gefährdungsbilder)

Je nach Situation müssen die untypischen Gefährdungsbilder 2 und 3 hinsichtlich der Tragsicherheit beurteilt werden.

### 4.3.4 Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit

Wirkungshöhe ist massgebender Faktor

Für das gute Funktionieren von Dämmen ist die Wirkungshöhe der massgebende Faktor. Gegenüber dem Ausgangszustand kann die Wirkungshöhe durch die folgenden Faktoren beeinträchtigt werden:

- Ablagerungen von anderen Prozessen (z.B. Murgang). Im Rahmen des Unterhaltes sind solche Ablagerungen zu entfernen.
- Lawinenablagerungen schmelzen in einem Sommer nicht (z.B. sehr grosse Höhenlage).
- Starke Setzungen, Erosion.
- Schneeverfrachtungen (z.B. in grossen Höhenlagen oder wenn Dammmachse senkrecht zur Hauptwindrichtung steht).

Im Normalfall ist die Gebrauchstauglichkeit erfüllt. Mögliche Konsequenzen von Mehrfachlawinen werden bei der Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) untersucht.



Abb. 4.9: Lawinenablenkwand aus Stahl auf dem Oberalppass. Nach einem grossen Lawinenniedergang mussten einzelne Stützen verstärkt werden.



Abb. 4.10: Oberflächenerosion an einem Lawinenablenkdamm auf dem Simplonpass. Falls langfristig kein Unterhalt erfolgt, werden die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit reduziert.

### 4.3.5 Überprüfung der Dauerhaftigkeit

Im Allgemeinen ist die Dauerhaftigkeit von Ablenk-, Brems- und Auffangbauwerken hinsichtlich Gefährdungsbild 1 unproblematisch, da es sich um robuste Konstruktionen handelt.

Dauerhaftigkeit bei Lawinenaufprall gegeben

Falls die Gefährdungsbilder 2 und 3 auftreten können, müssen die Konsequenzen geprüft werden, da die Dauerhaftigkeit beeinträchtigt sein kann. Insbesondere kann Erosion den Dammkörper beschädigen. Mit Unterhaltmassnahmen können solche Schäden meist behoben werden (Abb. 4.10).

Gefährdungsbilder 2 und 3 evtl. problematisch

### 4.3.6 Bestimmung der Zuverlässigkeit

In (Tab. 4.3) sind Vorschläge für die Einschätzung der Zuverlässigkeit von Dämmen und Bremsverbauungen zusammengestellt. Eine eingeschränkte Zuverlässigkeit kann auftreten, wenn z.B. die Wirkungshöhe eines Damms durch Murgangablagerungen reduziert ist, die nur aufwändig weggeräumt werden können. Bei der Wirkungsbeurteilung wird mit einer reduzierten Wirkungshöhe gerechnet. Eine geringe Zuverlässigkeit ist möglich, wenn eine Ablenkwand aus Stahl für ein bestimmtes Szenario unterbemessen ist oder wenn bei einem Damm grosse Stabilitätsprobleme auftreten.

Tab. 4.3: Beispiele für die Bestimmung der Zuverlässigkeit von Dämmen und Bremsverbauungen für ein bestimmtes Szenario.

Mögliche Gefährdungsbilder	Art der Verbauung	Bsp. für Kriterien			Tragsicherheit erfüllt	Gebrauchstauglichkeit erfüllt	Dauerhaftigkeit erfüllt	Zuverlässigkeit
		Unterhaltskonzept	Lokale Schäden	Totalschaden				
Typisch: Lawinenaufprall	Erddämme	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Hoch
	Beton-/Stahlwände	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Hoch
	Beton-/Stahlwände	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Gering
Typisch und untypisch: Lawinenaufprall, Murgangablagerung, Stabilitätsprobleme	Erddämme	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Hoch
	Erddämme	Ja	Ja	Nein	Ja	Teilweise	Ja	Eingeschränkt

## 4.4 Objektschutzmassnahmen

Die Zuverlässigkeit von Objektschutzmassnahmen kann in Analogie zum Kap. 4.3 bestimmt werden. Die Beurteilung der Dauerhaftigkeit ist von grosser Bedeutung. Eine Baute ausserhalb der Bauzone (z.B. im roten Gefahrengelände) kann nach einer Zerstörung nicht mehr aufgebaut werden, die Dauerhaftigkeit ist folglich nicht erfüllt. Bei Bauten ohne Objektschutz dürfte die Tragsicherheit bei seltenen Szenarien oft nicht erfüllt sein.

Dauerhaftigkeit oft massgebend

## 4.5 Wald

### 4.5.1 Prozessgrundlagen

Gefährdungsbilder  
ähnlich wie beim  
Stützverbau

Die Gefährdungsbilder für den Wald können ähnlich gewählt werden wie für die Beurteilung von Stützverbauungen. Bei Aufforstungen und jungen Waldbeständen im Lawinenanrissgebiet ist der Schneedruck häufig die massgebende Einwirkung. Wenn im Wald Öffnungen bestehen, Lawinen oberhalb vom Wald anbrechen können oder sich der Wald in der Sturzbahn oder im Auslaufgebiet befindet, ist der zusätzliche Lawinendruck infolge von Staub- oder Fließlawinen als Einwirkung zu berücksichtigen (Abb. 4.11).

#### Gefährdungsbild 1 (typisch): Schneedruck

Für eine grobe Abschätzung genügt es, nur die Schneehöhe zu betrachten. Die Schneehöhe  $H_{\text{ext}}$  ist für die Szenarien 30 Jahre, 100 Jahre, 300 Jahre und für ein Extremereignis (~1000 Jahre) zu bestimmen. Bei offenen Beständen muss die Möglichkeit von Schneegleiten abgeschätzt werden.

#### Gefährdungsbild 2 (typisch / untypisch): Lawinendruck

Anrissgebiete: Abklären ob Anrissgebiete oberhalb oder im Wald bestehen. Kritisch sind Distanzen in der Falllinie von der Anrisslinie zum Bestand von mehr als 30 m. Bestimmungen der Lawinendrücke.

Sturzbahn und Auslaufgebiet: Bestimmungen der Lawinendrücke für die verschiedenen Szenarien und Lawinenarten.

#### Gefährdungsbild 3 (untypisch): Störungen wie Sturm, Insekten, Schneebruch und Waldbrand.

Es können grossflächige Zerstörungen auftreten (Abb. 4.12). Die Auftretenswahrscheinlichkeit ist jedoch sehr klein.



Abb. 4.11: Waldschäden bei Klosters durch Fließlawine an den seitlichen Rändern der Lawinenbahn.



Abb. 4.12: Waldzerstörung oberhalb von Curaglia durch den Sturm Vivian im Jahr 1990. Kurzzeitig bieten die umgestürzten Bäume einen gewissen Schutz gegen Lawinenanbrüche. Mit permanenten und temporären Stützwerken wurde das Anrissgebiet gesichert.

#### 4.5.2 Grundlagen zum Wald

Die erforderlichen Grundlagen wie mittlere Baumgrösse, Alter des Bestandes, Verteilung, Kronendeckung, Öffnungen und Neigungsverhältnisse werden im Allgemeinen gutachtlich anhand von Photos, Übersichtsplänen, Bestandestypenkarten des Forstdienstes und den Resultaten der Begehung ermittelt. Weiter sind Angaben zu den waldbaulichen Pflegemassnahmen zu erheben.

Grundlagen können gutachtlich bestimmt werden

#### 4.5.3 Überprüfung der Tragsicherheit

##### Gefährdungsbild 1: Schneedruck

Wenn die Bäume bei einer regelmässigen Bestockung einen Kronendeckungsgrad von 50 bis 60% aufweisen und mindestens doppelt so hoch sind wie die extreme Schneehöhe beträgt (Brusthöhendurchmesser BHD > 8 cm), müssen keine Schneedruckschäden erwartet werden und die Tragfähigkeit ist erfüllt.

Tragsicherheit wird durch Schnee- und Lawinendruck bestimmt

##### Gefährdungsbild 2: Lawinendruck

Für die Erfüllung der Tragsicherheit ist der Lawinentyp sehr entscheidend, v.a. die Lawinenfliesshöhe und die Geschwindigkeit. Bei Fliesshöhen von weniger als 2 bis 3 m, die nur den Stamm erfassen, kann ein ausgewachsener Baum mit einem Stammdurchmesser von 30 cm eine Belastung von rund 50 kN/m<sup>2</sup> ertragen. Wird auch die Krone erfasst, tritt infolge der grösseren Angriffsfläche meist eine totale Zerstörung auf. Dies ist insbesondere bei Staublawinen mit Lawinendrücken von mehr als 3 bis 5 kN/m<sup>2</sup> der Fall.

#### 4.5.4 Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit

Die minimalen Anforderungen an einen Schutzwald wurden in der Wegleitung "Nachhaltigkeit im Schutzwald" (NaiS, Frehner et al., 2005) definiert. Die Lawinenverhindernde Wirkung eines Waldbestandes im Anrissgebiet hängt insbesondere von den Baumarten, dem Kronendeckungsgrad, der Stammzahl pro Hektar und der Grösse von Lücken ab. Ein Waldbestand wird als schutzwirksam bezeichnet, wenn er bei einer regelmässigen Bestockung einen Kronendeckungsgrad von 50 bis 60% aufweist und die Bäume mindestens doppelt so hoch sind wie die extreme Schneehöhe. Niedrige Bäume wie Legföhren können Lawinenanbrüche im Extremfall nicht verhindern. Bei einer Lückenbreite kleiner als 15 m in Nadelwäldern sollte bei einer Hangneigung von 35° die Lückenlänge kleiner als 50 m sein und bei einer Hangneigung von 45° kleiner als 30 m.

Gebrauchstauglichkeit insb. abhängig von Kronendeckungsgrad und Baumhöhe

#### 4.5.5 Überprüfung der Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit eines Waldbestandes kann im Allgemeinen als erfüllt betrachtet werden, wenn mittelfristig ein befriedigender Zustand erwartet werden kann und das Auftreten der Gefährdungsbilder 2 und 3 sehr unwahrscheinlich ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Schutzwirkung mit waldbaulichen und allenfalls technischen Massnahmen erhalten werden kann.

Bei normalem Zustand ist Dauerhaftigkeit erfüllt

Bei Gefährdungsbild 2 muss eine aussergewöhnliche Situation betrachtet werden, wo Lawinen etwa alle 50 Jahre auftreten und das Nachwachsen eines zerstörten Bestandes nicht gewährleistet ist. Solche Situationen treten insbesondere in der Lawinensturzbahn und teilweise im Auslaufgebiet auf. Die Dauerhaftigkeit ist meist nicht erfüllt.

Störungen gemäss Gefährdungsbild 3 werden bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit eines Waldbestandes in der Regel vernachlässigt. Sie haben eine sehr kleine Auftretenswahrscheinlichkeit. Neue Waldzustände sind nach deren Eintreten zu beurteilen und wenn notwendig in den Gefahrenkarten zu berücksichtigen oder mit Schutzmassnahmen zu kompensieren.

#### 4.5.6 Bestimmung der Zuverlässigkeit

In Tab. 4.4 sind Vorschläge für die Einschätzung der Zuverlässigkeit von Waldbeständen zusammengestellt.

- Ein hochstämmiger intakter Schutzwald im Anrissgebiet, der stabil ist und nur kleine Lücken aufweist (Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Lawinen erfüllt, NaiS, Frehner et al. 2005) kann als zuverlässige Massnahme beurteilt werden. Lawinenanbrüche müssen nicht erwartet werden.
- Eine eingeschränkte Zuverlässigkeit von Wald im Anrissgebiet kann auftreten, wenn es sich um einen gleichförmigen Bestand mit kleinen bis mittelgrossen Lücken handelt (Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Lawinen nicht erfüllt, NaiS, Frehner et al. 2005). Bei der Wirkungsbeurteilung können Lawinenanbrüche nicht ausgeschlossen werden. Je nach Situation kann es angezeigt sein, dass bei der Wirkungsbeurteilung mit grösseren Lücken gerechnet wird.
- Wenn an einem solchen Standort noch mit untypischen Einwirkungen (z.B. Störungen durch Insekten) zu rechnen ist, muss die Zuverlässigkeit als gering eingestuft werden. Bei der Wirkungsbeurteilung kann nicht mit einer zuverlässigen Wirkung gerechnet werden.
- Wald in der Sturzbahn von Grosslawinen ist keine zuverlässige Massnahme. Problematisch können mitgerissene Stämme sein, die lokal zu grossen Punktbelastungen führen und so eine zusätzliche negative Wirkung haben können.

Tab. 4.4: Beispiele für die Bestimmung der Zuverlässigkeit von Wald für ein bestimmtes Szenario.

Mögliche Gefährdungsbilder	Art des Bestandes	Kriterien			Tragsicherheit erfüllt	Gebrauchstauglichkeit erfüllt	Dauerhaftigkeit erfüllt	Zuverlässigkeit
		Waldpflege	stabiler Bestand	Lücken kleiner als gemäss NaiS				
Typisch: Schneedruck	Hochstämmiger, wintergrüner Schutzwald im Anrissgebiet	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Hoch
		Ja	Nein	Nein	Ja	Teilweise	Teilweise	Eingeschränkt
Typisch und untypisch: Schneedruck und Lawinenaufprall	Hochstämmiger, wintergrüner Schutzwald im Anrissgebiet	Nein	Nein	Nein	Teilweise	Teilweise	Nein	Gering
	Wald in der Sturzbahn von Grosslawinen	Nein	Ja	Nein	Nein	Teilweise	Nein	Gering

## 5. Wirkungsbeurteilung

Nachdem im Schritt 1 die Relevanz der Massnahmen und im Schritt 2 ihre Zuverlässigkeit basierend auf Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit untersucht wurde, wird nun darauf aufbauend im Schritt 3 die Wirkung der Massnahmen auf den Prozessablauf quantifiziert. Die Zuverlässigkeit muss bei der Szenarienbildung berücksichtigt werden. Liegt eine eingeschränkte Zuverlässigkeit vor, kann nicht mit der vollen Wirkung der Massnahmen gerechnet werden, d.h. die Wirkung der Massnahmen wird „künstlich“ reduziert. Diese Reduktion ist abhängig vom Grad der Zuverlässigkeit und von den lokalen Verhältnissen. Das Vorgehen ist in Tab. 5.1 aufgezeigt. Unsicherheiten im Gesamtsystem (Lawinensituation, Zuverlässigkeit und Wirkung der Massnahmen) sind bei der Szenarienbildung zu berücksichtigen. Grössere Unsicherheiten können beispielsweise mit der Erarbeitung der Intensitätskarten für ein optimistisches und ein pessimistisches Szenario aufgezeigt werden und in den Gefahrenkarten durch eine angemessene Abwägung berücksichtigt werden.

Massnahmenwirkung  
von Zuverlässigkeit  
abhängig

Tab. 5.1: Einschätzung der Wirksamkeit der Massnahmen für die Erarbeitung der massnahmenbeeinflussten Szenarien aufgrund der Zuverlässigkeit.

Zuverlässigkeit	Stützverbau	Dämme	Wald
Hoch	Volle Wirksamkeit und Berücksichtigung der Massnahme		
Eingeschränkt	Massnahme wirkt nur teilweise, Berücksichtigung durch: Reduktion der verbauten Fläche Reduktion der abbremsenden Wirkung Reduktion der Werkhöhe	Reduktion der Wirkungshöhe Reduktion des Auffangvolumens	Reduktion der Waldfläche Reduktion des Kronendeckungsgrades und der Stammzahl Reduktion der Holzfestigkeit
Gering	Massnahme wirkungslos, keine Berücksichtigung		

### 5.1 Stützverbau

#### 5.1.1 Übersicht

Bei einer Stützverbauung können die massnahmenbeeinflussten Szenarien auf der Basis der folgenden 3 Fälle (Abb. 5.1) aufgebaut werden:

- Fall 1: Lawinenanbruch ausserhalb der Stützverbauung
- Fall 2: Lawinenanbruch in der Stützverbauung
- Fall 3: Anbruch einer Oberlawine in der Stützverbauung

Einer diese 3 Fälle ist für die Szenarienbildung meistens massgebend. Zu beachten ist, dass je nach Situation diese 3 Fälle auch kombiniert auftreten können (z.B. Anbruch Oberlawine und Lawinenanbruch unterhalb der Stützverbauung).

Bestimmung der massnahmenbeeinflussten Szenarien

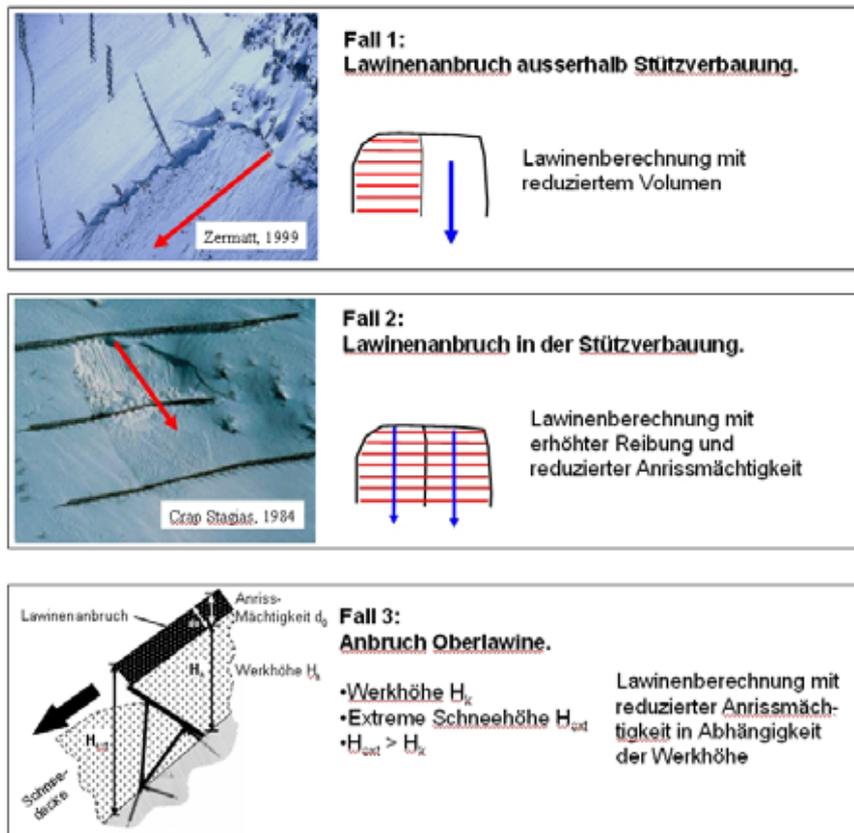


Abb. 5.1: Drei Fälle, um die Wirksamkeit einer Stützverbauung zu beurteilen.

### 5.1.2 Fall 1: Lawinenanbruch ausserhalb der Stützverbauung

Unverbaute  
Anrissgebiete  
massgebend

Ein Lawinenanbruch ausserhalb der Stützverbauung ist der am einfachsten zu behandelnde Fall mit den kleinsten Unsicherheiten. Für die nicht verbaute Anrissgebiete werden lawinentechnische Berechnungen durchgeführt. Bei der Berechnung der Lawinen aus den nicht verbaute Anbruchgebieten ergibt sich oft eine kleinere Lawinengrösse (z.B. mittelgross 25'000-60'000 m<sup>3</sup> anstelle von Grosslawine >60'000 m<sup>3</sup>) mit entsprechenden Reibungsparametern. Oft werden die am höchsten gelegenen, steilen Anrissgebiete verbaut und unterhalb der Verbauung verbleiben flachere, nicht verbaute Anrissgebiete. Die Anbruchwahrscheinlichkeit ist für die flacheren Gebiete im Vergleich zur Ausgangssituation reduziert (Tab. 5.2).

Tab. 5.2: Abhängigkeit der relativen Lawinenanbruchwahrscheinlichkeit von der Hangneigung. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um theoretisch abgeschätzte, grosse Durchschnittswerte, bei denen die Standortbedingungen (z.B. Triebsschnee, Bodenrauigkeit, Geländeform, Hangexposition) nicht berücksichtigt sind.

Hangneigung	Relative Anbruchwahrscheinlichkeit für Grosslawinen
45°	100%
40°	65 - 85%
35°	40 - 70%
30°	15 - 50%

**Beispiel:**

Im 45° steilen Hauptanrissgebiet, das verbaut wurde, traten gemäss dem Lawinenkataster etwa alle 50 Jahre grössere Lawinenabgänge auf. Unterhalb der Verbauung bestehen noch unverbaute Anrissgebiete mit einer Durchschnittsneigung von rund 35°.

Für ein 35° steiles Anrissgebiet beträgt gemäss Tab. 5.2 die relative Anbruchwahrscheinlichkeit 40 bis 70% im Vergleich zum 45° steilen Hauptanrissgebiet. Die Lawinenanbruchwahrscheinlichkeit ist folglich 1.4 - 2.5 Mal kleiner (70/100 bzw. 40/100). Die Wiederkehrdauer für einen Lawinenabgang aus dem unverbauten Anrissgebiet unterhalb der Verbauung dürfte etwa 70 bis 125 Jahre betragen.

**5.1.3 Fall 2: Lawinenanbruch in der Stützverbauung**

Bei einem Lawinenanbruch in einer Stützverbauung werden die Schneemassen durch den Aufprall auf der nächsten Werkreihe abgebremst und teilweise aufgefangen. Infolge der Abstützung der Schneedecke ist die Anbruchwahrscheinlichkeit gegenüber dem unverbauten Anrissgebiet reduziert. Die Brems- und Auffangwirkung der Stützwerte kann bei Lawinenberechnungen einerseits mit einem kleineren Faktor der turbulenten Reibung  $\xi$  und einer reduzierten Anrisshöhe berücksichtigt werden (Tab. 5.3). Um bspw. ein Szenario mit einer Wiederkehrdauer von 300 Jahren zu berechnen, können 30- bis 100-jährliche Anrissmächtigkeiten verwendet werden. Dadurch ergeben sich eine kleinere Durchflussmenge und kürzere Auslaufstrecken. Die Anrissfläche ist beim Fall 2 (Lawinenanbruch in der Stützverbauung) auf Grund der Topographie, der Grösse des Anrissgebietes, der Grösse der Verbauung und ihrer Zuverlässigkeit zu bestimmen. Bei kleinen Anrissgebieten, die vollständig verbaut sind, wird die Anrissfläche mit und ohne Verbau oft gleich gross gewählt.

Schneemassen durch  
Aufprall auf nächste  
Werkreihe abgebremst

Tab. 5.3: Lawinenanbruch in Stützverbauung. Die vorgeschlagenen Werte gelten für die Berechnung von Grosslawinen (>60'000 m<sup>3</sup>) und eine richtliniengemässen Anordnung der Stützwerte.

	Voellmy-Salm		Aval-1D	
	ohne Verbau	mit Verbau	ohne Verbau	mit Verbau
Anrissmächtigkeit $d_0$ für ein 300-jährliches Szenario	300 J.	30-100 J.	300 J.	30-100 J.
Reibungswert $\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]	1000	280	2500	400
Reibungswert $\mu$ [-]	unverändert			

Die Werte von Tab. 5.3 gelten für eine richtliniengemässe Stützverbauung, was die Anordnung, die Abstände und die Höhen der Stützwerte sowie die Ausbildung der Stützflächen betrifft. Sie müssen angepasst werden, wenn

- die Werkhöhe kleiner ist als 100-jährliche extreme Schneehöhe (insb. Mauerterrassen haben meist eine ungenügende Werkhöhe): Beim Aufprall wird weniger Schnee aufgefangen und die Schneemassen werden weniger abgebremst.
- Schneenetze ohne Abdeckung oder zu grosse Rostbalkenabstände gewählt wurden (z.B. ältere VOBAG-Werke): Nur kleine Bremswirkung, grösserer Reibungswert verwenden.
- es sich um aufgelöste Einzelwerke handelt: Werke können seitlich umflossen werden, kleineres Rückhaltevermögen.

### 5.1.4 Fall 3: Anbruch Oberlawine

#### Allgemeines

Lawinenanbruch über  
eingeschnelter  
Verbauung

Es wird angenommen, dass die gesamte Verbauung überschneit ist und Schneefälle einsetzen, die zum Anbruch einer Oberlawine führen (Abb. 5.1 und Abb. 5.3). Gemäss der technischen Richtlinie werden Stützwerke in der Regel auf eine 100-jährliche extreme Schneehöhe ausgelegt. Bei einem 300-jährlichen Szenario oder dem Extremszenario muss davon ausgegangen werden, dass die Stützwerke überschneit sind, und dass bei weiteren Schneefällen eine Lawine über den Stützwerken anbrechen kann. Normalerweise ist die Berücksichtigung des 300-jährlichen Szenarios und des Extremszenarios für den Fall 3 genügend. Für die Festlegung der Anrissmächtigkeiten von Oberlawinen gibt es keine abgesicherte Methodik. In der Praxis werden zwei Vorgehen für die Bestimmung der Anrissmächtigkeiten von Oberlawinen verwendet. Sie werden im Folgenden vorgestellt. Erfahrungsgemäss variieren die mittleren Anrissmächtigkeiten zwischen 0.3 und 0.5 m, vorausgesetzt die Werkhöhe wurde entsprechend der technischen Richtlinie gewählt.

#### Bestimmung der Wirkungshöhe der Verbauung

Anrissmächtigkeit der  
Oberlawine in Ab-  
hängigkeit von  
Werkhöhe und extremer  
Schneehöhe am  
Werkstandort

Die Anrissmächtigkeit einer Oberlawine hängt einerseits von der Wirkungshöhe der vorhandenen Stützwerke und andererseits von der am Werkstandort zu erwartenden extremen Schneehöhen ab. Wenn die Werkhöhe grosszügig bemessen wurde, muss eine kleinere Anrissmächtigkeit erwartet werden als bei einer knappen Bemessung. Weiter müssen windexponierte Verbauungen kritischer beurteilt werden. Die Werkhöhe  $H_k$  kann aus der Rosthöhe  $D_k$  unter Berücksichtigung einer mittleren Hangneigung berechnet werden ( $H_k = D_k / \cos \psi$ ). Liegen unterschiedliche Werkhöhen vor, kann entweder eine mittlere Rosthöhe berechnet werden oder es werden Flächen mit unterschiedlichen Anrissmächtigkeiten festgelegt. Stützwerke mit einem abgedeckten Stützrost oder Steinmauern verursachen einen stärkeren Schneesrückhalt und sind in der Folge schneller hinterfüllt. Die wirksame Werkhöhe  $H_{k,eff}$  kann in Abhängigkeit des Verbauungstyps wie folgt bestimmt werden (vgl. Abb. 4.6):

- Stahlschneebrücken, Schneenetze:  $H_{k,eff} = H_k$
- Stützwerke mit abgedecktem Rost:  $H_{k,eff} = 0.75 \cdot H_k$
- Steinmauern, Erdterrassen:  $H_{k,eff} = 0.50 \cdot H_k$

#### Bestimmen der Anrissmächtigkeit der Oberlawine

##### Vorgehen A: Pauschalansatz

Anrissmächtigkeit  
gemäss Pauschalansatz

Es wird pauschal angenommen, dass die Differenz  $\Delta H$  zwischen der wirksamen Werkhöhe  $H_{k,eff}$  und der extremen Schneehöhe  $H_{ext}$ , die im verbauten Anrissgebiet zu erwarten ist, gerade der mittleren Anrisshöhe entspricht. Die extreme Schneehöhe kann entweder gemäss Ziffer 3.5.4 der technischen Richtlinie für die Höhenlage der Verbauung bestimmt und gemäss Tab. 4.1 für die jeweilige Wiederkehrdauer des Szenarios umgerechnet, oder mit für den Standort repräsentativen Extremwertstatistiken bestimmt werden. Die Anrissmächtigkeit  $d_0$  kann aus der Differenz  $\Delta H$  in Abhängigkeit der Hangneigung nach der Anleitung für die Berechnung von Fließlawine (Salm et al., 1990) bestimmt werden.

**Beispiel für die Bestimmung der Anrissmächtigkeit einer Oberlawine für ein 300-jährliches Szenario in einer Verbauung in der Region Weissfluhjoch, Davos:**

- Mittlere Höhenlage der Verbauung: 2260 m
- Mittlere Hangneigung der Verbauung: 37°

- Mittlere Rosthöhe der Stützwerte (20% der Werke  $D_k=3.5$  m, 80% der Werke  $D_k=3.0$  m):  $D_k=3.1$  m
- Wirksame Werkhöhe:  $H_{k,eff} = 3.1/\cos 37^\circ = 3.9$  m = 388 cm
- 100-jährliche extreme Schneehöhe (gemäss Ziffer 3.5.4 der technischen Richtlinie):  
 $H_{ext,100} = 1.3 \cdot (0.15 \cdot 2260 - 20) = 415$  cm
- 300-jährliche extreme Schneehöhe (Wiederkehrdauer 300 J., gemäss Tab. 4.1):  
 $H_{ext,300} = 1.15 \cdot 415 = 477$  cm
- Differenz:  $\Delta H = H_{ext,300} - H_{k,eff} = 477 - 388 = 89$  cm
- Anrissmächtigkeit (nach Salm, 1990):  $d_{0,300} = \Delta H \cdot f(37^\circ) \cdot \cos 28^\circ = 89 \cdot 0.66 \cdot 0.88 = 52$  cm

### Vorgehen B: Extremwertstatistischer Ansatz

Um die verschiedenen Schneehöhen und Wahrscheinlichkeiten berechnen zu können, muss eine Extremwertstatistik eines nahe gelegenen, repräsentativen Messfeldes vorhanden sein (Abb. 5.2). Es wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit  $P_k$  für ein vollständig eingeschneites Stützwerk multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit  $P_\Delta$  für einen dreitägigen Schneehöhenzuwachs  $\Delta HS3$  gleich der Wahrscheinlichkeit  $P_L$  des betrachteten Szenarios ist (z.B. 1/300):

Anrissmächtigkeit  
gemäss extremwert-  
statistischem Ansatz

$$P_L = P_k \cdot P_\Delta \quad (1)$$

Je nach vorhandener wirksamer Werkhöhe werden für die Bestimmung des dreitägigen Schneehöhenzuwachses kürzere oder längere Wiederkehrdauern bzw. grössere oder kleinere Anrissmächtigkeiten verwendet, was grössere oder kleinere Kubaturen der abgleitenden Oberlawinen zur Folge hat. Die Schneehöhen am Verbauungsstandort müssen auf die Höhenlage des Messfeldes umgerechnet werden (Höhengradient der Schneehöhe: je nach Klimaregion zwischen 15 bis 30 cm pro 100 m; Höhengradient des Schneehöhenzuwachses: ca. 5 cm pro 100 m). Die Anrissmächtigkeit  $d_0$  kann dann aus dem Schneehöhenzuwachs  $\Delta HS3$  in Abhängigkeit der Hangneigung nach der Anleitung (Salm, 1990) bestimmt werden.

### Beispiel für die Bestimmung der Anrissmächtigkeit einer Oberlawine für ein 300 jährliches Szenario für eine Verbauung in der Region Weissfluhjoch, Davos:

- Mittlere Höhenlage der Verbauung: 2260 m
- Mittlere Hangneigung der Verbauung:  $37^\circ$
- Mittlere Rosthöhe der Stützwerte (20% der Werke  $D_k=3.5$  m, 80% der Werke  $D_k=3.0$  m):  $D_k=3.1$  m
- Wirksame Werkhöhe:  $H_{k,eff} = 3.1/\cos 37^\circ = 3.88$  m = 388 cm
- Umrechnung auf die Höhenlage vom Weissfluhjoch (2540 m), Gradient: 19.5 cm/100m:  
 $H_{k,eff,Wfj} = 390 + 2.8 \cdot 19.5$  cm = 445 cm
- Bestimmen der Wiederkehrdauer für eine Schneehöhe von 445 cm auf Weissfluhjoch gemäss Extremwertstatistik: 210 Jahre
- $P_\Delta = P_L / P_k = 210/300 = 0.7$ , dies entspricht einer Wiederkehrdauer  $T_\Delta$  von 1.4 Jahren. Der dreitägige Schneehöhenzuwachs  $\Delta HS3_{Wfj}$  wird für diese Wiederkehrdauer von 1.4 Jahren mit Abb. 5.2 bestimmt und ergibt 56 cm. Für die Höhenlage der Verbauung auf 2260 m (Gradient 5 cm, Höhendifferenz 280 m) ergibt sich  $\Delta HS3$  zu 42 cm.
- Anrissmächtigkeit (nach Salm, 1990):  $d_{0,300} = \Delta HS3 \cdot f(37^\circ) \cdot \cos 28^\circ = 42 \cdot 0.66 \cdot 0.88 = 25$  cm

Die Anrissmächtigkeit ist im Beispiel Weissfluhjoch beim Vorgehen A rund doppelt so gross wie beim Vorgehen B. Die Ursache liegt darin, dass die Schneehöhe gemäss der technischen Richtlinie für Weissfluhjoch rund 50 cm grösser als gemäss der Extremwertstatistik ist. In der technischen Richtlinie werden die Schneehöhen für den Standort Weissfluhjoch überschätzt. Wenn möglich sollen lokale Messungen berücksichtigt werden. Je nach Situation müssen bei den Anrissmächtigkeiten von Oberlawinen noch Triebschneeablagerungen berücksichtigt werden.

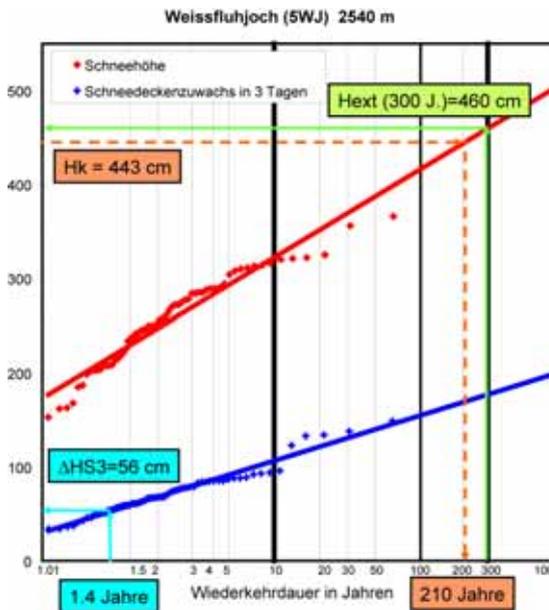


Abb. 5.2: Gumbel Extremwertstatistik für die Vergleichsstation Weissfluhjoch.

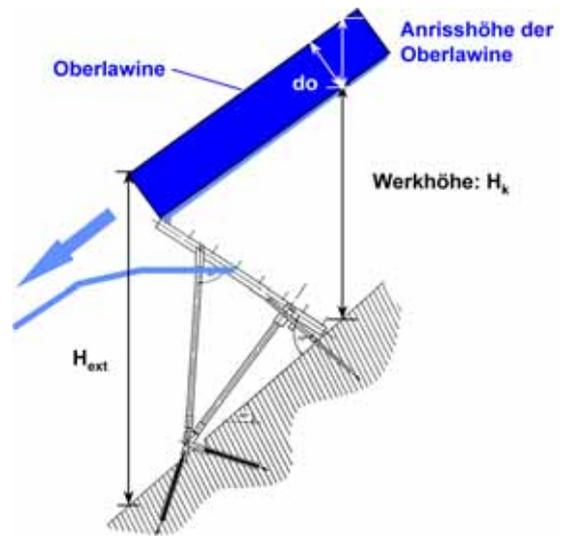


Abb. 5.3: Anbruch einer Oberlawine mit der Anrissmächtigkeit  $d_0$ .

### Bestimmen der Anrissfläche

Für die Bestimmung der Restgefährdung ist je nach Situation die gesamte verbaute Anrissfläche zu berücksichtigen. Falls nur ein Teil verbaut ist, muss die Anrissfläche eventuell auf die unverbauten Teilflächen ausgedehnt werden. Dies ist v.a. zutreffend, wenn unterhalb der Verbauung nicht verbaute Teilflächen bestehen.

## 5.2 Auffangdamm

### 5.2.1 Übersicht

Wirkung von Dammhöhe abhängig:

Die Wirkung eines Lawinenauffangdammes ist im Wesentlichen von der Dammhöhe abhängig. Die erforderliche Dammhöhe wiederum hängt von der berechneten Lawinengeschwindigkeit ab. Damit ein Auffangdamm eine Lawine vollständig aufhalten kann, müssen die folgenden zwei Bedingungen erfüllt sein:

Lawine darf nicht überfließen

**Bedingung 1:** Der Damm muss so hoch sein, dass kein Überfließen stattfindet. Die erforderliche Dammhöhe kann einerseits nach Salm et al. (1990) und andererseits nach der Anleitung zur Dimensionierung von Lawinenauffangdämmen (Baillifard et al., 2007) berechnet werden. Die Dammhöhe nach Salm et al. beträgt:

$$H = d_0 + d_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g \cdot \lambda} \tag{2}$$

$H$  = Dammhöhe (m)

$d_0$  = Schneehöhe am Dammfuss beim Eintreffen der Lawine (m)

$d_1$  = Fliesshöhe der Lawine am Dammfuss (m)

$v_1$  = Lawinengeschwindigkeit am Dammfuss (m/s)

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$\lambda$  = Faktor, der die Energiedissipation beim Aufprall beschreibt

**Bedingung 2:** Die gesamte Lawinenmasse muss vom Damm gestoppt werden. Je nach Situation müssen auch Mehrfachlawinen berücksichtigt werden. Das Auffangvolumen eines Dammes kann unter Berücksichtigung der Topographie des Dammes und einer Oberflächenneigung der Lawinenablagerung von  $5^\circ$  bis  $10^\circ$  grob abgeschätzt werden (Abb. 5.4). Bei grossen Absturzhöhen und bei tiefen Höhenlagen kann eine Verdichtung des Lawinenschnees um einen Faktor von 1.5 bis 2 angenommen werden.

Auffangvolumen  
grösser als  
Lawinenvolumen

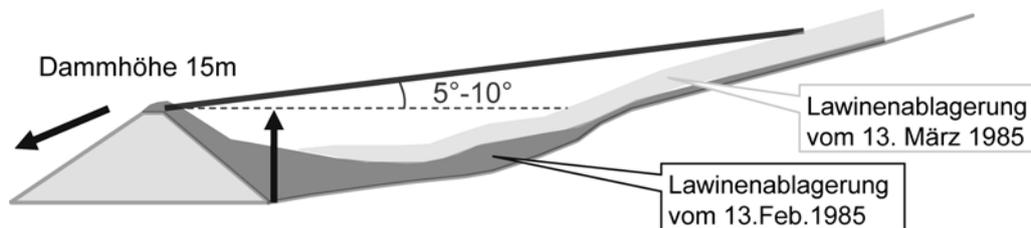


Abb. 5.4: Der Lawinauffangdamm in Ryggfonn (Norwegen) wurde von Lawinen mit zu grosser Geschwindigkeit überflossen. Der Stauraum wurde nur zu ca. 25% aufgefüllt (NGI).

Diese zwei Bedingungen müssen für alle Szenarien überprüft werden. Bei einem Auffangdamm können die massnahmenbeeinflussten Szenarien auf der Basis der folgenden 2 Fälle (Abb. 5.5) aufgebaut werden:

- Fall 1: Lawinenaufprall mit zu grosser Geschwindigkeit
- Fall 2: Ungenügendes Auffangvolumen

Sind sowohl Fall 1 wie Fall 2 nicht erfüllt, dürfte normalerweise Fall 1 für die Gefährdung massgebend sein, da die Lawinenfront die grösste Geschwindigkeit aufweist. Im Schutze eines Auffangdammes besteht immer eine Restgefährdung. Kleine Lawinenteile oder Staubanteile können die Dammkrone immer überfliessen. Die Unsicherheit bei der Festlegung der Dammhöhe ist direkt abhängig von den Unsicherheiten, die bei den Lawinenberechnungen bestehen. Sind die prozessspezifischen Unsicherheiten sehr gross, ist auch die Abschätzung der Wirkung eines Dammes sehr problematisch. Ausserdem bestehen Unsicherheiten bei der Festlegung der Aufprallwirkung. Die Hauptschwierigkeit liegt darin festzulegen, was für ein Energie- und Massenverlust erwartet werden kann, wenn z.B. eine 300-jährliche Lawine auf einen Auffangdamm aufprallt, der nur auf eine Wiederkehrdauer von 50 Jahren ausgelegt wurde.

Restgefährdung oft  
durch Lawinenaufprall  
mit zu grosser  
Geschwindigkeit  
bestimmt

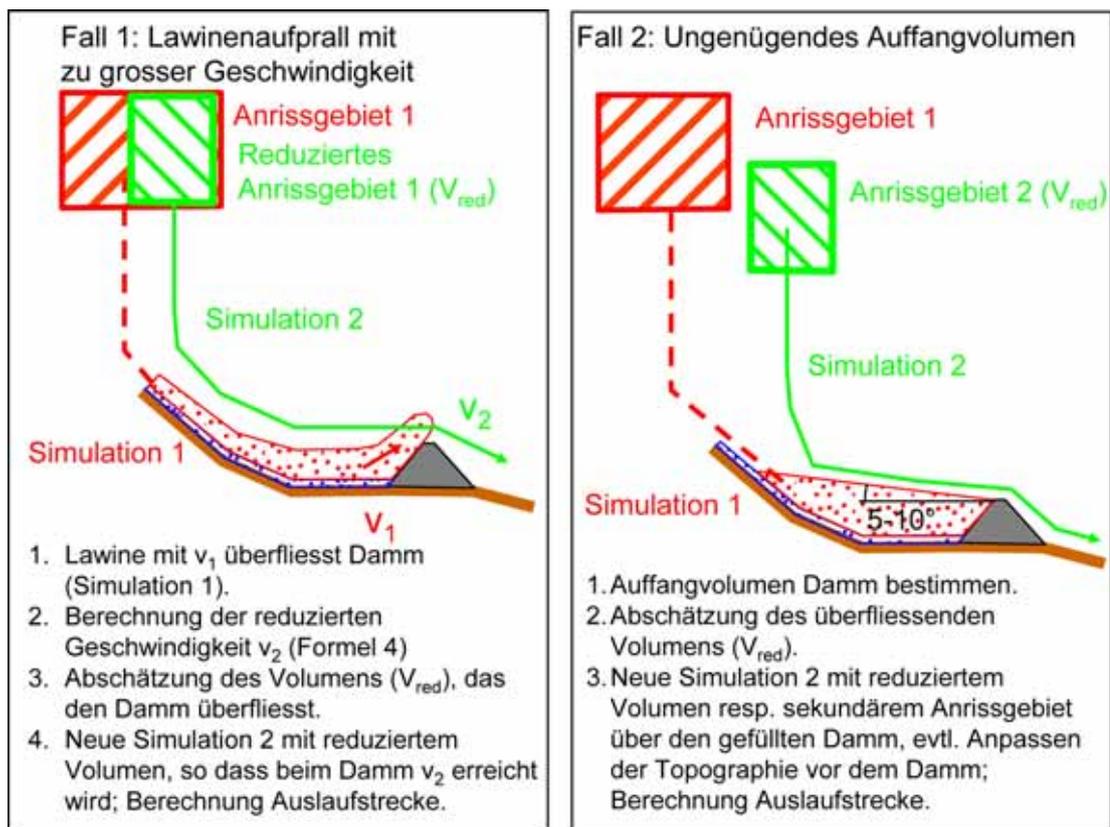


Abb. 5.5: Massgebende Fälle um die Wirkung eines Auffangdammes zu bestimmen.

### 5.2.2 Fall 1: Lawinenaufprall mit zu grosser Geschwindigkeit

Theoretisch erforderliche Dammhöhe grösser als vorhandene Dammhöhe

Für ein Szenario wird auf Grund der berechneten Lawinengeschwindigkeit  $v_1$ , Fließhöhe  $d_1$  und Schneehöhe  $d_0$  die theoretisch erforderliche Dammhöhe  $H$  ermittelt. Diese theoretisch erforderliche Dammhöhe ist grösser als die vorhandene Dammhöhe. Dieser Fall dürfte für die Quantifizierung der Wirkung resp. der verbleibenden Gefährdung sehr häufig massgebend sein, insbesondere beim 300-jährlichen Szenario und beim Extremszenario. Um den Energie- und Massenverlust beim Aufprall zu berechnen, gibt es keine gesicherte Methode sondern nur einfache Ansätze. Es kann nicht von einer kontinuierlichen Abnahme der Wirkung ausgegangen werden, da die Geschwindigkeit im Quadrat in die Berechnung der Dammhöhe eingeht. Ein konservativer Ansatz, der in der Praxis verwendet wird, beruht auf der Energieerhaltung (Kinetische Energie = potenzielle Energie). Die heutigen numerischen Lawinenberechnungsmodelle können die Wirkung eines Auffangdammes nur unvollständig berücksichtigen. Wird das Berechnungsprogramm AVAL-1D angewendet, kann das folgende Vorgehen gewählt werden (Abb. 5.5):

#### **Berechnung der Wirkung mit AVAL-1D**

##### **1. Durchführung einer Lawinenmodellierung ohne Damm**

Diese Modellierung führt für das jeweilige Szenario zur Bestimmung der Lawinengeschwindigkeit  $v_1$  und der Fließhöhe  $d_1$  am Dammstandort. Berechnung der erforderlichen Dammhöhe nach Salm et al. (1990) oder der Anleitung zur Dimensionierung von Lawinenauffangdämmen (Baillifard et al., 2007).

## 2. Bestimmung der effektiven Dammhöhe $H^*$

$$H^* = H - d_0 - d_1 \quad (3)$$

$H$  = Dammhöhe (gemessen oder gemäss Planunterlagen) (m)

$d_0$  = Schneehöhe am Dammfuss beim Eintreffen der Lawine (m)

$d_1$  = Fließhöhe der Lawine am Dammfuss (m)

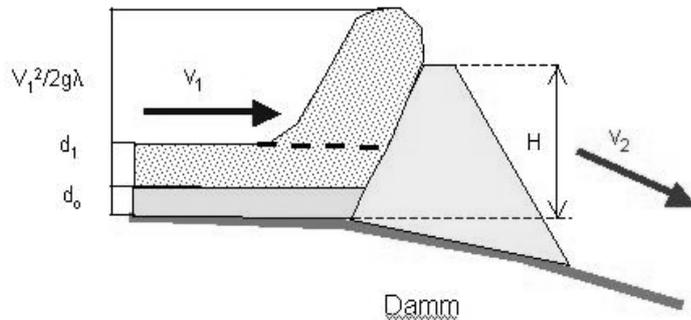


Abb. 5.6: Berechnung der Höhe eines Auffangdammes nach Salm et al. (1990).

## 3. Berechnung der reduzierten Geschwindigkeit $v_2$ mit der Wirkung des Dammes

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 - 2 \cdot g \cdot H^* \cdot \lambda} \quad (4)$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$\lambda = 1.5 \dots (2.5)$  Faktor, der den Energieverlust beim Aufprall beschreibt und von der Lawinenart und der Topographie abhängt. Bei steilen Dämmen und langsameren, feuchten Lawinen können grössere  $\lambda$ -Werte gewählt werden. Bei schnellen, trockenen Lawinen und flacheren Dammböschungen müssen kleinere  $\lambda$ -Werte gewählt werden. Neue Forschungsergebnisse zeigen (Baillifard et al. 2007), dass im Vergleich zur bisherigen Erfahrung  $\lambda$ -Werte eher kleiner gewählt werden sollte und in Funktion der bergseitigen Dammböschung  $\alpha$  ( $^\circ$ ) wie folgt berechnet werden kann:  $\lambda = 1.2 + 0.005 \cdot \alpha$ .

Abb. 5.7 zeigt, wie die vorhandene Dammhöhe mit den für die verschiedenen Szenarien erforderlichen Dammhöhen übersichtlich dargestellt werden kann. Die Dammhöhe beträgt 18 m. Beim 300-jährlichen Szenario würde eine Dammhöhe von 28 m benötigt, um die Lawine vollständig zu stoppen. Mit der effektiven Dammhöhe  $H^*$  von 11 m wird die Lawinengeschwindigkeit  $v_1$  von 25 m/s auf  $v_2$  von 17.5 m/s verzögert, was einer Reduktion von rund 30% entspricht.

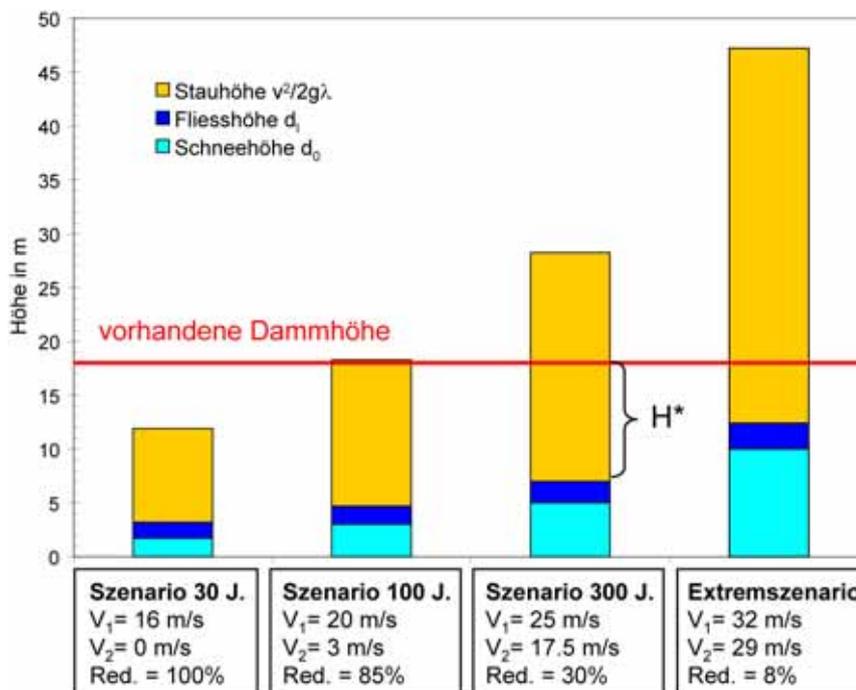


Abb. 5.7: Vergleich der für die verschiedenen Szenarien berechneten Dammhöhen mit der vorhandenen Dammhöhe. Weiter sind für die verschiedenen Szenarien die Schneehöhe (inkl. Lawinenablagerung), die Fließhöhe und die Stauhöhe dargestellt.

#### 4. Abschätzung der Lawinenmasse $V_{red}$ , die den Damm überfließt

Die überfließende Lawinemasse muss gutachtlich abgeschätzt werden. Allgemein gültige Regeln gibt es nicht, da die lokale Situation immer eine grosse Bedeutung ausübt. Die überfließende Lawinemasse hängt insbesondere ab

- vom Verhältnis  $v_1$  zu  $v_2$ : Je kleiner die Geschwindigkeitsabnahme ist, desto mehr Lawinenschnee dürfte über den Damm fließen. Erfahrungen zeigen, dass ein Damm, der mit viel zu hoher Geschwindigkeit überflossen wird, praktisch keinen Schnee zurückhält.
- vom Verhältnis Lawinenvolumen zum Rückhaltevolumen: Falls das Rückhaltevolumen viel kleiner ist als das Lawinenvolumen, überfließen grössere Schneemassen den Damm.

In einem konkreten Fall wurde bei einer Geschwindigkeitsreduktion durch den Damm von 50% das überfließende Lawinenvolumen bestimmt, indem das Rückhaltevolumen des Dammes vom totalen Lawinenvolumen subtrahiert wurde. Bei kleineren Geschwindigkeitsreduktionen wird weniger Schnee zurückgehalten (Abb. 5.4).

#### 5. Neue Lawinenberechnung entlang des ursprünglichen Profils (ohne Damm) mit der reduzierten Lawinenmasse $V_{red}$

- Das Anrissgebiet resp. die Anrissmächtigkeit so reduzieren, dass das neue Anrissvolumen  $V_{red}$  entspricht.
- Reibungswerte durch Iteration so wählen, dass am Dammstandort gerade  $v_2$  erreicht wird.
- Falls am Dammstandort bei der AVAL-1D Berechnung Schnee abgelagert wird, muss dies bei der Wahl von  $V_{red}$  berücksichtigt werden oder das Berech-

nungsprofil muss so angepasst werden, dass keine Ablagerung in der Simulation mehr auftritt. Allenfalls sind verschiedene Berechnungen durchzuführen.

- Anschliessend unterhalb vom Damm die Berechnung mit den Reibungswerten gemäss der AVAL-1D Anleitung durchführen. Berechnung der Auslaufstrecke.

### **Berechnung der Wirkung mit Voellmy-Salm Modell**

Bei der Anwendung vom Voellmy-Salm Modell kann  $v_2$  in Analogie gemäss den Punkten 1 bis 3 bestimmt werden. Da das Lawinenvolumen nicht direkt bei der Berechnung berücksichtigt wird, kann anstelle eines reduzierten Volumens mit einer reduzierten Durchflussmenge gerechnet werden. Um die Auslaufstrecke mit der Wirkung des Dammes zu berechnen, kann am Dammstandort die Rechnung mit der reduzierten Durchflussmenge  $Q_{\text{red}}$  und  $v_2$  weitergeführt werden.

### **5.2.3 Fall 2: Ungenügendes Auffangvolumen**

Dieser Fall tritt auf, wenn die Dammhöhe hinsichtlich des Lawinenaufpralls richtig bemessen wurde, der Auffangraum für das Auffangen der Bemessungslawine jedoch zu klein ist. Oft kann dieser Fall auftreten, wenn der Auffangdamm von verschiedenen Lawinen erreicht werden kann. Es können die folgenden Situationen auftreten:

Richtige Dammhöhe, zu kleines Auffangvolumen

#### **1. Auffangraum für das Stoppen von einer Lawine zu klein**

- Die aufgefangene Lawinenmasse wird vom Lawinenvolumen subtrahiert.
- Neue Lawinenberechnung mit reduziertem Lawinenvolumen.
- Beim Berechnungsmodell AVAL-1D kann die Topographie im Bereich des Dammes entsprechend angepasst und die verkürzte Auslaufstrecke berechnet werden.

#### **2. Auffangraum für das Stoppen von mehreren Lawinen zu klein**

- Bei Mehrfachlawinnenniedergängen kann oft angenommen werden, dass eine erste Lawine den Damm auffüllt und später eine zweite Lawine über die infolge der Lawinablagerung flachere Topographie fliesst.
- Beim Berechnungsmodell AVAL-1D kann die Topographie im Bereich des Dammes entsprechend angepasst und die verkürzte Auslaufstrecke berechnet werden.

### **5.2.4 Bremshöcker**

Oft werden im Vorfeld eines Auffangdammes Bremshöcker erstellt, die die Lawinengeschwindigkeit reduzieren. Für die Bestimmung der Geschwindigkeitsreduktion wird in der Praxis die folgende Formel gebraucht (Abb. 5.8):

Bremshöcker reduzieren Lawinengeschwindigkeit

$$v_2 = v_1 \cdot \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{2B} \right)^n \quad (5)$$

$v_1$  = Lawinengeschwindigkeit oberhalb Bremshöcker (m/s)

$v_2$  = Lawinengeschwindigkeit unterhalb Bremshöcker (m/s)

$B$  = Fließbreite der Lawine (m)

$\sum_1^i b_i =$  Gesamtbreite der Bremshöcker innerhalb der Fließbreite  $B$  der Lawine. Als Breite  $b_i$  eines einzelnen Bremshöckers ist der Mittelwert oberhalb der Schneedecke einzusetzen. Bei konusförmigen Bremshöckern ist die Breite sehr sorgfältig festzulegen, da infolge der runden Form der Bremsseffekt gegenüber einer rechteckförmigen Form reduziert ist.

$n =$  Anzahl Reihen mit Bremshöcker

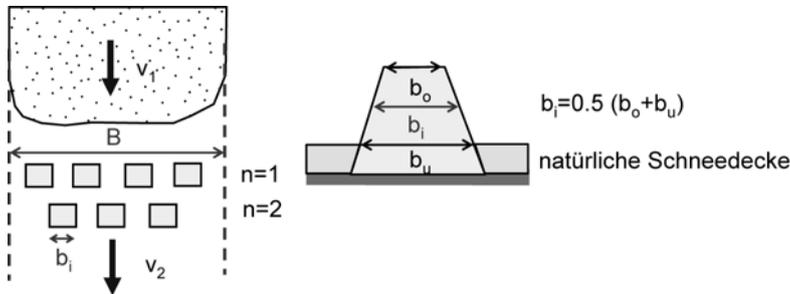


Abb. 5.8: Prinzipskizze von Bremshöchern.

Neuere Forschungsergebnisse zeigen (Hakonardottir et al., 2003), dass Formel (5) die Energievernichtung insbesondere für eine zweite Reihe Bremshöcker eher überschätzt. Sie schlagen vor, dass eine erste Reihe Bremshöcker die Lawinengeschwindigkeit um 20% reduziert und eine zweite Reihe Bremshöcker die Lawinengeschwindigkeit nur noch um 10% reduziert. Voraussetzungen für diese Annahmen sind:

- Höhe  $H$  des Bremshöckers oberhalb der Schneedecke entspricht 2- bis 3-mal die Fließhöhe der Lawine.
- Breite  $B$  des Bremshöckers entspricht etwa  $H$  ( $H/B \sim 1$ ).
- Distanz zwischen den Bremshöchern entspricht höchstens der Breite  $B$ .
- Steile, möglichst rechteckförmige Seite in Lawinenrichtung.

Die Wirkung von Bremshöchern kann nach ersten Lawinenniedergängen infolge Ablagerungen reduziert sein.

**Beispiel:**

- Lawinengeschwindigkeit oberhalb Bremshöcker:  $v_1 = 30 \text{ m/s}$
- Fließbreite der Lawine:  $B = 100 \text{ m}$
- Breite Bremshöcker:  $b_i = 10 \text{ m}$  (insgesamt 5 Bremshöcker pro Reihe)

- Gesamtbreite der Bremshöcker:  $\sum_1^i b_i = 50 \text{ m}$

- Geschwindigkeit nach Reihe 1:  $n=1$

$$v_2 = v_1 \cdot \left( 1 - \frac{\sum_1^i b_i}{2B} \right)^n = 30 \cdot \left( 1 - \frac{50}{2 \cdot 100} \right)^1 = 22.5 \text{ m/s}, \text{ Reduktion } 25 \%$$

- Geschwindigkeit nach Reihe 2:  $n=2$

$$v_2 = v_1 \cdot \left( 1 - \frac{\sum_1^i b_i}{2B} \right)^n = 30 \cdot \left( 1 - \frac{50}{2 \cdot 100} \right)^1 = 16.9 \text{ m/s}, \text{ Reduktion } 44 \%$$

### 5.3 Ablenkdamme

Die erforderliche Höhe eines Ablenkdammes hängt insbesondere von der Lawinengeschwindigkeit und dem Ablenkwinkel ab. Sie wird wie folgt berechnet:

$$H = d_0 + d_1 + \frac{(v_1 \cdot \sin \varphi)^2}{2 \cdot g} \quad (6)$$

H = Dammhöhe (gemessen oder gemäss Planunterlagen) (m)

$d_0$  = Schneehöhe am Dammfuss beim Eintreffen der Lawine (m)

$d_1$  = Fliesshöhe der Lawine am Dammfuss (m)

$v_1$  = Lawinengeschwindigkeit am Dammfuss (m/s)

$\varphi$  = Ablenkwinkel (°)

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Erforderliche Höhe ist von Lawinengeschwindigkeit und Ablenkwinkel abhängig

Wenn bei einem bestimmten Szenario die vorhandene Dammhöhe die Bedingung von Formel 6 erfüllt, kann angenommen werden, dass die Lawine umgelenkt wird. Die verlängerte Auslaufstrecke kann mit Lawinenberechnungen festgelegt werden. Zu beachten ist jedoch, dass ähnlich wie bei einem Auffangdamm kleine Lawinspritzer oder Staubanteile die Dammkrone immer überfliessen können. Direkt hinter einem Ablenkdamme besteht daher eine Restgefährdung.

Restgefährdung hinter Ablenkdamme

Falls die erforderliche Höhe des Ablenkdammes grösser ist als die vorhandene Dammhöhe, kann die Wirkung resp. die Geschwindigkeitsreduktion in Analogie zu einem Auffangdamm quantifiziert werden, indem die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zum Damm verwendet wird. Anstelle des aufgefangenen Volumens muss die abgelenkte resp. die überfliessende Lawinenmasse abgeschätzt werden. Die Auslaufstrecke der überfliessenden Schneemassen kann wiederum durch eine zweite Rechnung mit einem reduzierten Volumen und der am Dammstandort berechneten reduzierten Geschwindigkeit bestimmt werden. Bei kleineren Ablenkwinkeln kann die Wirkung des Dammes auch mit 2-dimensionalen Lawinensimulationen bestimmt werden, in dem der Damm in das Geländemodell eingebaut wird.

Berechnungsmöglichkeit, falls Ablenkdamme zu klein

Zu beachten sind die folgenden Punkte:

- Da Ablenkdamme oft in der Sturzbahn gebaut werden, erreichen schon kleine, häufigere Lawinen den Dammstandort. Das kann die effektive Dammhöhe reduzieren.
- Neue Untersuchungen zeigen (Johannesson et al., 2006), dass bei einem Ablenkwinkel von mehr als 50° keine eigentliche Umlenkung mehr stattfindet. Diese Ablenkdamme sind als Auffangdamme zu behandeln.

## 5.4 Leitdämme

Erforderliche Höhe ist von Fliess- und Ablagerungshöhe abhängig

Leitdämme verhindern eine seitliche Ausbreitung einer Lawine. Die Höhe eines Leitdamms hängt insbesondere von der Fliesshöhe und der Ablagerungshöhe (natürliche Schneedecke und Lawinenablagerung) ab. Die Höhe der Lawinenablagerung am Dammstandort kann direkt mit Lawinenberechnungen (z.B. AVAL-1D, wobei eher zu kleine Ablagerungshöhen berechnet werden) oder mit der folgenden Formel (7) abgeschätzt werden:

$$H = d_0 + d_1 + \frac{v_1^2}{4 \cdot g} \quad (7)$$

H = Höhe Leitdamm im Auslaufgebiet ( $\tan \phi < \mu$  mit  $\phi$ =Geländeneigung) (m)

$d_0$  = Schneehöhe am Dammfuss beim Eintreffen der Lawine (m)

$d_1$  = Fliesshöhe (m)

$v_1$  = Lawinengeschwindigkeit am Auslaufbeginn (Punkt P) (m/s)

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

in Hauptfliessrichtung verlängerte Auslaufstrecke

Wenn bei einem bestimmten Szenario die Leitdammhöhe genügend ist, kann angenommen werden, dass die Lawine den Damm nicht überfließt. Durch die verhinderte seitliche Lawinenausbreitung ergibt sich aber in der Hauptfliessrichtung eine verlängerte Auslaufstrecke.

Falls die Leitdammhöhe nicht genügt, können die Auslaufstrecken der überfließenden Schneemassen wie folgt abgeschätzt werden:

### **AVAL-1D (SLF, 2005)**

- Abschätzung der Fliessbreite im Bereich des Leitdamms.
- Berechnung der erforderlichen Leitdammhöhe H.
- Abschätzung der überfließenden Lawinenmasse in % auf Grund des Verhältnisses der vorhandenen zur erforderlichen Leitdammhöhe. Diese Abschätzung muss bei sehr grossen Anrissgebieten und in Situationen, wo mit grossen Lawinenablagerungen gerechnet werden muss, konservativ vorgenommen werden.
- Berechnung der überfließenden Schneemassen mit der Option „Lawinenarm“ (Export Simulation Data mit Angabe der Fraction of mass; SLF, 2005). Je nach Situation muss die Topographie angepasst werden und es ist zu prüfen, ob sich die Volumenkatgorie infolge des reduzierten Volumens ändert.

### **Voellmy-Salm (Salm, 1990)**

- Reduktion der Durchflussmenge Q.
- Berechnung der Auslaufstrecke mit der reduzierten Durchflussmenge.

Zu beachten sind die folgenden Punkte:

- Im Lawinenauslaufgebiet kann die Wirkung eines Leitdamms infolge von grossen Ablagerungshöhen, deren Bestimmung problematisch ist, sehr unsicher sein.
- Entlang der Fliessrichtung kann eine Verengung der Lawinenbreite zu grösseren Fliesshöhen führen.

## 5.5 Objektschutzmassnahmen

Die Wirkung von Objektschutzmassnahmen kann in Anlehnung an die Wirkungsbeurteilung von Bremshöckern (Kap. 5.2.4) durchgeführt werden.

Wirkungsbeurteilung  
wie bei Bremshöckern

## 5.6 Wald

### 5.6.1 Übersicht

Bei der Beurteilung der Wirkung von Wald wird meist ein pragmatisches Vorgehen gewählt. Mit Geländebegehungen, Luft- und insbesondere Winterphotos wird anhand des Deckungsgrades, der Baumhöhe, dem Stammdurchmesser, vorhandener Lücken, der Hangneigung sowie der heutigen und mittelfristig erwarteten Struktur des Bestandes eine gutachtliche Einschätzung der Wirksamkeit vorgenommen. Im Folgenden werden die wichtigsten Fälle aufgezeigt, wie die Wirksamkeit von Wald berücksichtigt werden kann (Abb. 5.9).

Gutachtliche  
Einschätzung der  
Wirksamkeit

### 5.6.2 Fall 1: Dichter Wald

In einem dichten, geschlossenen Wald (Abb. 5.10), der das gesamte Anbruchgebiet umfasst und dessen Zuverlässigkeit im Schritt 2 als hoch eingestuft wurde, können Lawinenanbrüche in der Regel ausgeschlossen werden. Bei einer eingeschränkten Zuverlässigkeit ist die Schutzwirkung des Waldes zu reduzieren. Dies kann geschehen, indem beispielsweise mit kleinen Lücken oder reduzierten Stammzahlen gerechnet wird.

Keine Lawinenanbrüche  
im dichten Wald

### 5.6.3 Fall 2: Dichter Wald mit kleinen Lücken

Sind in einem geschlossenen Bestand Lücken mit einer Breite von mehr als 15 m und einer Länge von mehr als 30 m vorhanden, können kleine Lawinen anbrechen. In der Lawinenbahn unterhalb der Lücke kann bei Lawinenberechnungen die Bremswirkung der Bäume durch eine Anpassung des  $\xi$ -Wertes berücksichtigt werden. Beim Voellmy-Salm wird ein  $\xi$  von 400 verwendet. Beim AVAL-1D gibt es für die Berücksichtigung von Wald keine gesicherten Werte. In der Praxis wird dies mit einer Anpassung des Lawinenbahntyps berücksichtigt (Tab. 5.4).

Kleine Lawinen in  
lückigem Wald möglich

Am Ende der Lücke und entlang der bewaldeten Lawinenbahn ist zu prüfen, ob die Lawinendrucke kleiner als rund 50 kN/m<sup>2</sup> sind, da sonst mit Waldschäden gerechnet werden muss.

Tab. 5.4: Wahl der Reibungsparameter für Wald mit AVAL-1D.

Waldtyp	Reibungsparameterkategorie AVAL-1D für verschiedene Lawinenbahntypen
Kein Wald	Flächige Lawinenbahn
Mittlere Walddichte (Kronendeckungsgrad 40-70%, Stammdurchmesser > 30 cm)	Kanalisiert
Dichter Wald (Kronendeckungsgrad >70%, Stammdurchmesser > 30 cm)	Runse

### 5.6.4 Fall 3: Lawinenanbruch oberhalb vom Wald, Wald in der Sturzbahn

Wald in der Sturzbahn wird vernachlässigt

Wird der Wald selbst durch Lawinen bedroht oder befindet sich der Wald in oder am Ende der Sturzbahn, wird seine Bremswirkung im Allgemeinen vernachlässigt. Der Wald kann zerstört werden. Eine Bremswirkung kann nur bei kleinen Lawinen angenommen werden.

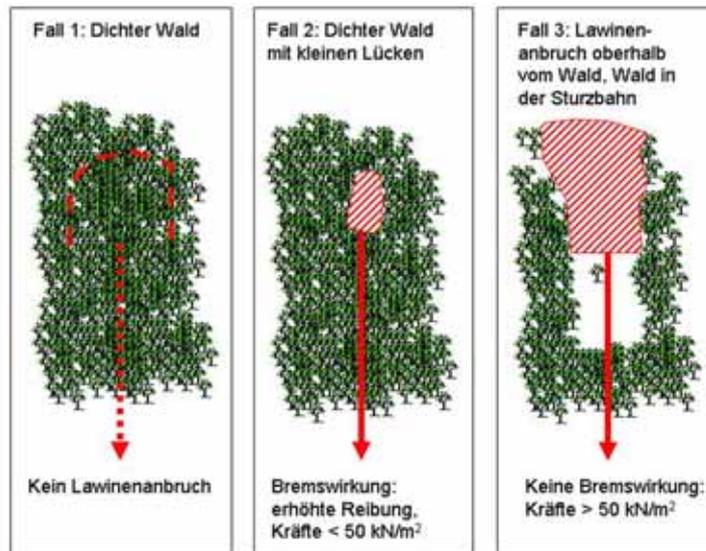


Abb. 5.9: Wirkung von Wald anhand dreier typischer Fälle.

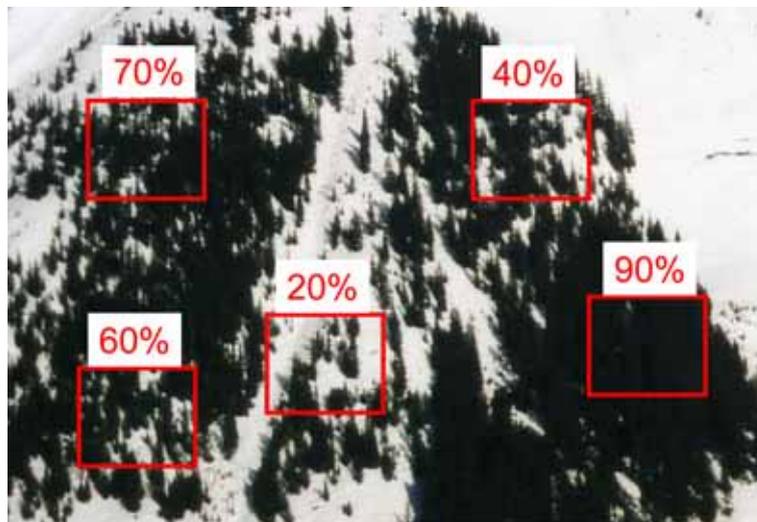


Abb. 5.10: Abschätzung des Kronendeckungsgrades.

## 6. Fallbeispiel Stützverbau

Mit dem Beispiel der Eggigrabenlawine in Wengen wird das prinzipielle Vorgehen anhand des Beispiels einer Stützverbauung erläutert. 1974 wurde für Wengen eine erste Lawinengefahrenkarte erstellt. Anschliessend wurde das Anrissgebiet durch den Verbau einer Geländekammer unterteilt. 1991 wurde die Gefahrenkarte auf Grund der erstellten Verbauung angepasst. Nach dem Lawinenwinter 1999 wurde die Gefahrenkarte erneut überprüft, wobei sich keine Änderungen ergaben.

Beispiel  
Eggigrabenlawine  
in Wengen

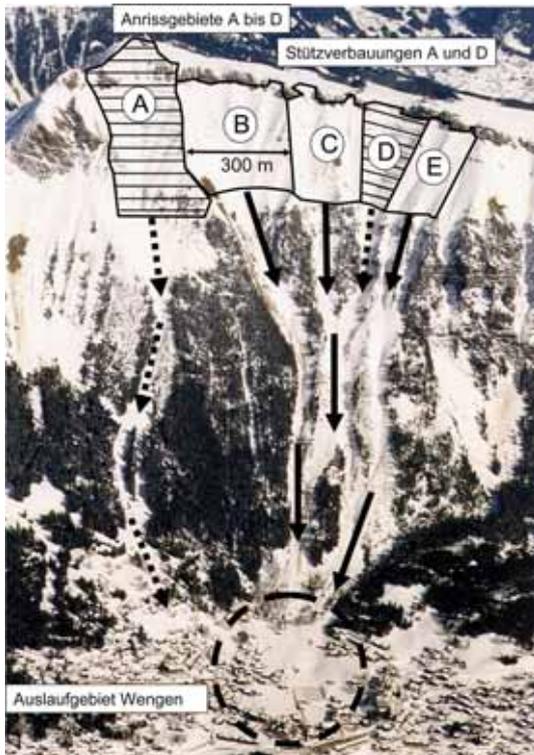


Abb. 6.1: Übersicht über die Westflanke des Männlichen mit der Eggigrabenlawine und Wengen.

Abb. 6.2: Ereigniskataster Eggigrabenlawine (Quelle: KAWA, Abt. Naturgefahren, Interlaken).

### Schritt 1: Grob beurteilung

Die Gefahrensituation und die Verbauung sind sehr gut dokumentiert. Die folgenden Unterlagen standen für die Beurteilung zur Verfügung:

- Gefahrensituation:
  - Übersichtspläne mit Anrissgebieten und Lawinenbahn
  - Ereigniskataster (9 grosse Abgänge in den letzten 230 Jahren)
  - Lawinengefahrenkarte 1974
  - Technischer Bericht mit Berechnungen zur Lawinengefahrenkarte
- Stützverbauung:
  - Technischer Bericht über das Verbauungsprojekt
  - Werkdispositionsplan mit Werktypen und Standortfaktoren
  - Verbaukataster mit Aufzeichnungen über Schäden und deren Behebung
  - Aufzeichnungen von Winterbeobachtungen (insb. 1999)

Grobanalyse der  
Gefahrensituation

Das rund 39° steile und 1 km breite Anrissgebiet der Eggigrabenlawine liegt in der Westflanke des Männlichen zwischen rund 2200 und 2000m ü. M. (Abb. 6.1). Das über 40 ha grosse Anbruchgebiet wird durch markante Kreten in verschiedene Teilgebiete unterteilt, die zum Teil über eigene Sturzbahnen verfügen. Ein gleichzeitiges Anbrechen der ganzen Flanke kann als eher unwahrscheinlich beurteilt werden. Unterhalb von 1450m ü. M. vereinigen sich die verschiedenen Sturzbahnen, bevor das flachere Auslaufgebiet von Wengen erreicht wird, das sich auf der Geländeterrasse hoch über dem Lauterbrunnental befindet. Mit zahlreichen Beobachtungen ist das Lawinengeschehen der Eggigrabenlawine sehr gut dokumentiert. 1770 durchfloss die Eggigrabenlawine die Geländeterrasse von Wengen und hatte 8 Todesopfer zur Folge (Abb. 6.2). Diese Lawine soll auf der gesamten Breite (Anrissgebiete B+C+D+E; Abb. 6.1) angebrochen sein. Die Wiederkehrdauer einer Lawine für das Erreichen des Siedlungsgebietes beträgt rund 25 Jahre. Die ursprüngliche Lawinengefahrenkarte von 1974 (Abb. 6.3) wurde auf der Grundlage von Lawinenkataster, Geländebeobachtungen und lawinentechnischen Berechnungen erstellt, wobei dem Lawinenkataster die grösste Bedeutung beigemessen wurde.

Grobanalyse der  
Schutzmassnahmen

Bei den lawinentechnischen Berechnungen für die Erarbeitung der Gefahrenkarte wurde vom Szenario ausgegangen, dass die 3 Teilanrissgebiete C+D+E mit einer Breite von rund 550 m gleichzeitig anbrechen (Tab. 6.1). Das rote Gefahrengebiet erstreckt sich bis zur Dorfstrasse, das blaue Gebiet bis zum Bahnhof von Wengen. Zusätzlich wurde ein gelbes Gebiet angeführt, das sich über die gesamte Geländeterrasse von Wengen erstreckt. Mit der gelben Zone wurde die Restgefährdung bezeichnet, die vom theoretisch möglichen Anbruch des gesamten Anrissgebietes ausgeht. 20 Gebäude befinden sich im roten und 19 Gebäude im blauen Gefahrengebiet.

In der vorliegenden Situation besteht die grösste Unsicherheit in der Wahl des Anbruchszenarios: Welche Teilflächen brechen gleichzeitig an? Infolge der vorhandenen Lawinenaufzeichnungen ist es möglich diese Unsicherheit einzugrenzen.

Zwischen 1979 und 1986 wurde das rund 4 ha grosse Teilanrissgebiet der mittleren Eggigrabenlawine (Anrissgebiet D) mit rund 1870 m Stahlschneebrücken permanent verbaut. Die Verbauung wurde richtliniengemäss erstellt. Es wurden typengeprüfte Werktypen (Voest-Alpine und Fromm) mit einer Werkhöhe von 3.5 m eingebaut. Die Baukosten betragen 3.8 Mio. Franken. Zusätzlich wurde aufgeforstet. Das Hauptziel der Verbauung besteht darin, einen für das Siedlungsgebiet von Wengen katastrophalen Absturz der Eggigrabenlawine auf maximaler Breite zu verhindern. Winterbeobachtungen zeigten, dass die Werkgrösse genügend ist. Von der als massgebend angesehenen Anbruchfläche C+D+E wurde mit der Fläche D rund 30% verbaut, dadurch konnten die Anrissflächen C und E voneinander getrennt werden, was sich in bedeutend kleineren Lawinenkubaturen äusserte.

In der vorliegenden Situation ergibt die Grobbeurteilung, dass von einem wirkungsvollen Gesamtkonzept ausgegangen werden kann. Es kann eine relevanten Wirkung erwartet werden.

## Schritt 2: Massnahmenbeurteilung

Das Lawinenverbauungs- und Aufforstungsprojekt ist mit dem technischen Bericht, Werkdispositionsplan und nachgeführten Verbaukataster gut dokumentiert. Es findet eine regelmässige Kontrolle und Unterhalt statt. Bei den eingebauten Stützwerken handelt es sich um homologierte permanente Stahlschneebrücken des Typs Voest-Alpine und Fromm. Die Werkanordnung entspricht den technischen Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet (Margreth 2007). Die Foundationen bestehen aus Betonsockeln sowie Mikropfählen und Anker.

Die Tragsicherheit der eingebauten Stützwerke ist erfüllt. Es handelt sich um homologierte Standardwerktypen. Der Tragwiderstand ist für eine Überlast mit einer 0.5 m mächtigen Schneedecke ausreichend. Nach den Wintern 1995 und 1999 traten infolge oberflächlicher Bodenbewegungen in der Verbauung Gratlücke rund 30 Ankerbrüche auf. Diese Schäden wurden saniert und haben zu keiner Zeit die Wirksamkeit der Verbauung als Gesamtsystem beeinträchtigt.

Tragsicherheit ist erfüllt

Für die Gebrauchstauglichkeit steht bei Stützwerken insbesondere die wirksame Werkhöhe im Vordergrund. Die vorhandene Rosthöhe von 3.5 m deckt eine Schneehöhe von rund 4.5 m ab. In der Verbauung muss mit einer Schneehöhe von rund 4.0 m bei einer Wiederkehrdauer von 100 Jahren gerechnet werden. Die Wahrscheinlichkeit für eine grossflächige Überschneidung der Verbauung schätzen wir auf weniger als 1/300. Seit ihrer Erstellung hat sich die Verbauung bewährt und eine gute Wirkung gezeigt. Winterbeobachtungen zeigten keine bedeutenden Schneebewegungen in der Verbauungsfläche. Auch im schneereichen Lawinenwinter 1999 hat sich die Werkhöhe als genügend gross erwiesen. Die Gebrauchstauglichkeit ist erfüllt.

Gebrauchstauglichkeit  
in Abhängigkeit der  
Werkhöhe

Die Verbauung steht in stabilem Baugrund und sie ist nicht durch Felssturz oder Lawineneinwirkungen gefährdet. Der Verbauungszustand kann als gut eingestuft werden. Die Gemeinde bestätigte im Rahmen der Bauerklärung, die Verbauung in gutem Zustand zu erhalten. In der vorliegenden Situation erwarten wir eine Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren. Die Dauerhaftigkeit ist erfüllt. Da alle drei Kriterien erfüllt sind, kann von einer hohen Zuverlässigkeit der Massnahme ausgegangen werden.

Dauerhaftigkeit erfüllt  
und hohe  
Zuverlässigkeit

### Schritt 3: Wirkungsbeurteilung

In der vorliegenden Situation, wo verbaute und unverbaute Anrissgebiete direkt nebeneinander liegen und die extreme Schneehöhe durch die Stützwerke abgedeckt wird, steht ein Lawinenanbruch neben der verbauten Fläche im Vordergrund (Fall 1). Ein gleichzeitiger Anbruch in den verbauten und unverbauten Flächen wird als unwahrscheinlich betrachtet.

Szenarienbildung

Tab. 6.1: Anbruchszenarien Eggigrabenlawine mit und ohne Verbauung (vgl. Abb. 6.1).

Ohne Verbauung				Mit Verbauung Gratlücke (Anrissgebiet D)			
Szenario	Anrissfläche	Bewertung	Wahrscheinlichkeit	Szenario	Anrissfläche	Bewertung	Wahrscheinlichkeit
B	10 ha	nicht massgebend	1/300	B	10 ha	massgebend	1/300
C+D+E	15 ha	massgebend	1/300	C+0.5D	8 ha	nicht massgebend	<1/300
B+C+D+E	25 ha	Restgefährdung	<1/300	B+C	17 ha	Restgefährdung	<1/300

Das im Ausgangszustand als massgebend erachtete Szenario eines gleichzeitigen Lawinenanbruches in den Flächen C+D+E ist nicht mehr massgebend. Als massgebend wird ein Anbruch in der Fläche B betrachtet. Der gleichzeitige Anbruch der Flächen B+C wird wiederum als Restgefährdung betrachtet (Wahrscheinlichkeit <1/300).

Die reduzierten Gefahrengebiete werden mit lawinentechnischen Berechnungen quantifiziert. Infolge der kleineren Lawinenkubaturen ergeben sich kürzere Auslaufstrecken. Die Anbruchkubatur reduzierte sich mit dem Verbau vom Gebiet D von

Gefahrenbeurteilung

rund 175'000 m<sup>3</sup> auf rund 115'000 m<sup>3</sup>, was bei der Berechnung mit dem Lawinenmodell AVAL-1D eine rund 80 m kürzere Auslaufstrecke ergibt. Die in der Schweiz für die Abgrenzung des roten Gefahrengebietes verwendete 30 kN/m<sup>2</sup> Grenze verschiebt sich um rund 90 m. Die Resultate sind in der Gefahrenkarte in Abb. 6.3 dargestellt.

Unsicherheiten

Die grössten Unsicherheiten bestehen in der Wahl des massgebenden Anbruchszenarios. Zu beachten ist jedoch, dass diese Unsicherheiten auch im Ausgangszustand ohne Verbauung bestanden. Diese Unsicherheiten werden im Vergleich zur Unsicherheit bei der Wirkung der Verbauung als bedeutend grösser eingestuft.

Erarbeitung  
Gefahrenkarte

Wegen dieser Unsicherheiten wurde ehemaliges rotes und blaues Gebiet nicht mit weiss sondern mit gelb bezeichnet.

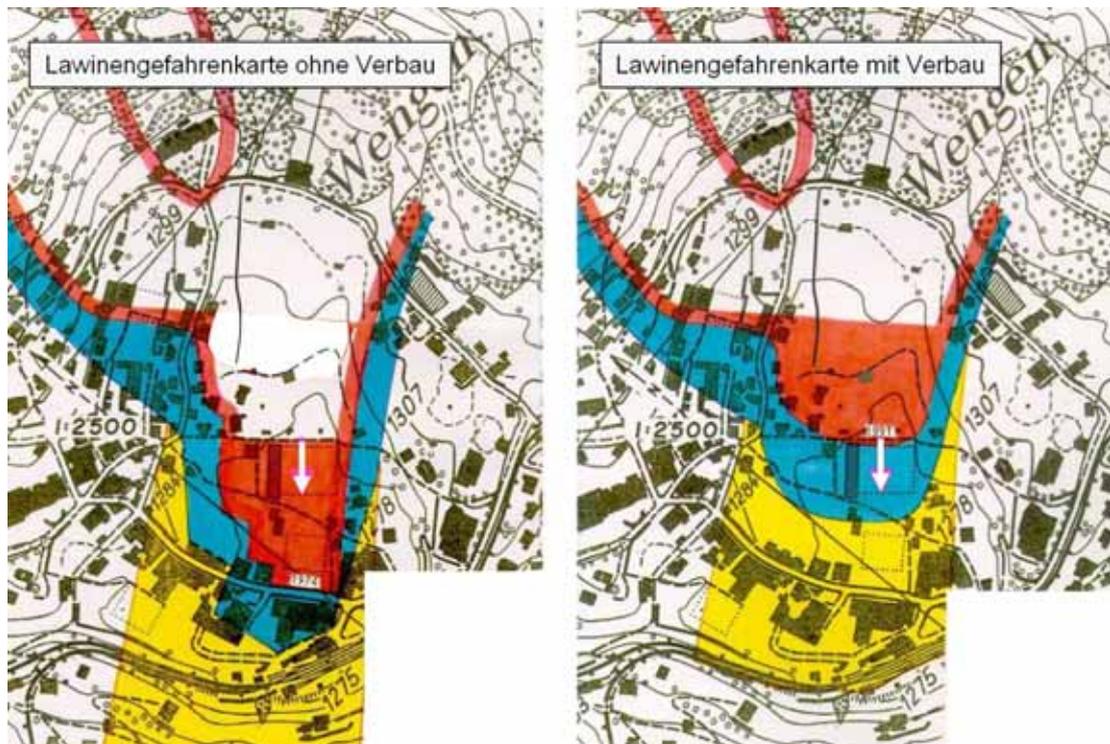


Abb. 6.3: Lawinengefahrenkarte mit und ohne Verbauung (Quelle: KAWA, Abt. Naturgefahren, Interlaken).

## 7. Fallbeispiel Auffangdamm

Die Beurteilung der Wirkung eines Auffangdammes wird mit dem Beispiel der Dorfbachlawine Davos dargestellt (Abb. 7.1 und Abb. 7.2). Die geometrischen Daten wurden im Feld erhoben, da keine aktuellen Planunterlagen verfügbar waren. Es wurde nur der Schritt 3 Wirkungsbeurteilung für ein Szenario mit einer Wiederkehrdauer von 300 Jahren behandelt. Die eingesetzten Werte wurden für das Beispiel leicht angepasst.

Beispiel Dorfbachlawine Davos

Daten Auffangdamm:

- Dammhöhe (lawinenseitig): 16 m (gemäss Plan 19 m!, Abb. 7.2)
- Dammneigung (lawinenseitig):  $37^\circ$
- Neigung Dammvorfeld:  $0^\circ$  über eine Distanz von 20 m
- Auffangvolumen (Neigung Schneeoberfläche  $5^\circ$ )  $70'000 \text{ m}^3$

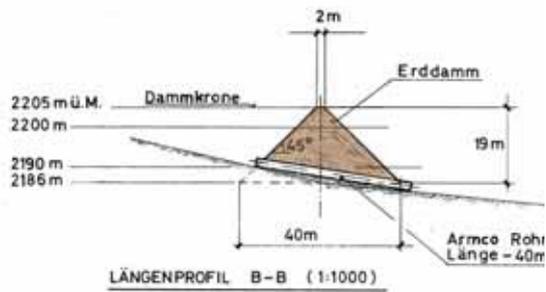


Abb. 7.1: Auffangdamm Dorfbach, im Vorfeld des Auffangraumes gibt es Bremshöcker, die wegen ihrer kleinen Höhe und konusförmigen Form nur eine kleine Wirkung zeigen dürften.

Abb. 7.2: Querschnitt durch den Auffangdamm. Eine Überprüfung im Gelände hat ergeben, dass der Damm lawinenseitig nur 16 m hoch ist und die Neigung nur rund  $37^\circ$  beträgt.

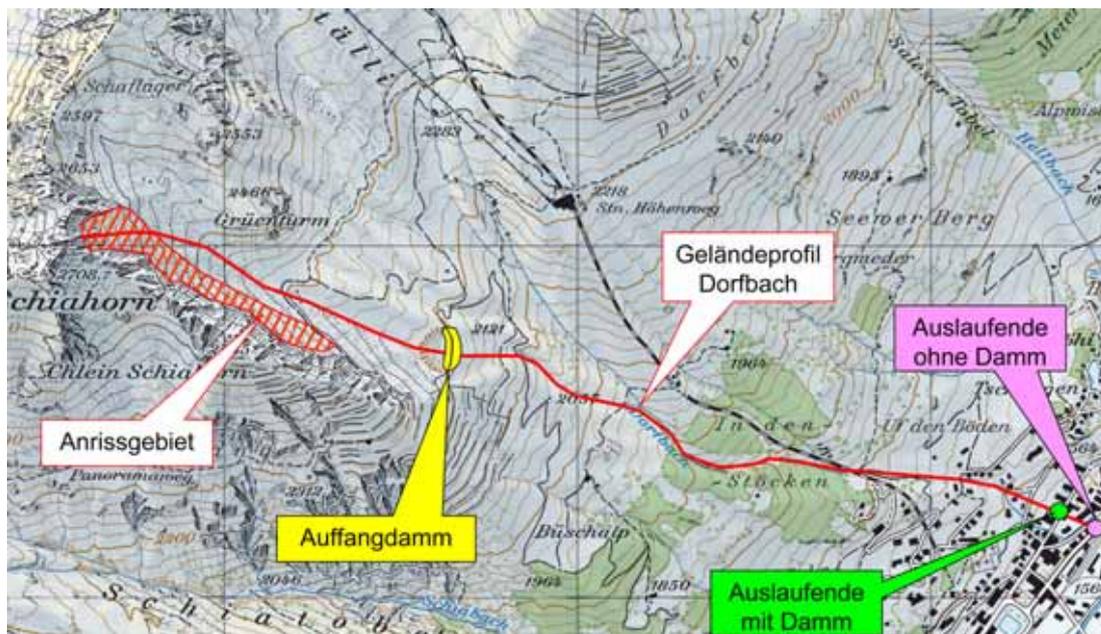


Abb. 7.3: Übersichtsplan Schiachorn mit dem Anrissgebiet der Dorfbachlawine (gelbe Fläche).

Lawinenberechnung  
mit AVAL-1D

## 1. Lawinenberechnung ohne Damm

Simulation 1, Anrissmächtigkeit 1.3-1.2 m, Anrissvolumen 116'000 m<sup>3</sup>, Reibungswerte für eine 300-jährliche Grosslawine, im Bereich der Bremshöcker vor dem Dammvorfeld wird mit den Reibungswerten für kanalisierte Lawinenbahn gerechnet (Abb. 7.3 und Tab. 7.1).

- Dammstandort: Lawinengeschwindigkeit  $v_1 = 20.5$  m/s (Abb. 7.4), Fliesshöhe  $d_1 = 3.2$  m
- Schneehöhe am Dammfuss:  $d_0 = 4.0$  m (nat. Schneedecke und kleine Lawinenablagerung, Abschätzung)

## 2. Überprüfung der vorhandenen Dammhöhe

Fall 1: Lawinenaufprall:

$$H = d_0 + d_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g \cdot \lambda} = 4 + 3.2 + \frac{20.5^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 1.5} = 21.5 \text{ m}$$

$H$  = Dammhöhe (m)

$d_0$  = Schneehöhe am Dammfuss vor Eintreffen der Lawine (m)

$d_1$  = Fliesshöhe der Lawine am Dammfuss (m)

$v_1$  = Lawinengeschwindigkeit am Dammfuss (m/s)

$g = 9.81$  m/s<sup>2</sup>

$\lambda = 1.5$  (hoch gelegener Dammstandort: trockene, schnelle Lawinen, eher flache Dammböschung)

erforderliche  
Dammhöhe grösser als  
vorhandene Dammhöhe

Die erforderliche Dammhöhe von 21.5 m ist grösser als die vorhandene Dammhöhe von 16 m. Die Lawine überfließt den Damm.

Fall 2: Auffangvolumen

- Volumen der 300 jährlichen Lawine: 116'000 m<sup>3</sup>
- Vorhandenes Auffangvolumen: 70'000 m<sup>3</sup>

Auffangvolumen  
zu klein

Der Auffangraum ist zu klein, um die gesamte Lawine zu stoppen. Sowohl Fall 1 wie Fall 2 sind nicht erfüllt. Wir erachten Fall 1 (Lawinenaufprall mit zu grosser Geschwindigkeit) als massgebend, da die Lawinengeschwindigkeit an der Front der Lawine am grössten ist. Beim Extremszenario müsste die Situation geprüft werden, wo zwei grosse Lawinen im gleichen Winter auftreten.

## 3. Bestimmung der effektiven Dammhöhe $H^*$

$$H^* = H - d_0 - d_1 = 16 - 4 - 3.2 = 8.8 \text{ m}$$

$H$  = Dammhöhe (gemessen oder gemäss Planunterlagen) = 16 m

$d_0$  = Schneehöhe am Dammfuss vor Eintreffen der Lawine = 4.0 m

$d_1$  = Fliesshöhe der Lawine am Dammfuss = 3.2 m

#### 4. Berechnung der reduzierten Geschwindigkeit $v_2$ mit der Wirkung des Dammes

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 - 2 \cdot g \cdot H \cdot \lambda} = \sqrt{20.5^2 - 2 \cdot 9.81 \cdot 8.8 \cdot 1.5} = 12.7 \text{ m/s}$$

#### 5. Abschätzung der Lawinenmasse $V_{\text{red}}$ , die den Damm überfließt

- Das totale Auffangvolumen beträgt ca. 70'000 m<sup>3</sup>.
- Der Auffangraum kann von kleinen Lawinen erreicht werden. Unter der Annahme, dass der Auffangraum vor Eintreffen der 300-jährlichen Lawinen zu 40% gefüllt ist, verbleiben 40'000 m<sup>3</sup>.
- Der Damm bewirkt eine Geschwindigkeitsreduktion von knapp 40%. Unter der Annahme, dass die 300-jährliche Lawine den Auffangraum vollständig füllt und 40'000 m<sup>3</sup> ablagert. Infolge der Höhenlage sind trockene Fließlawinen massgebend. Eine Verdichtung des Lawinenschnees beim Aufprall wird vernachlässigt. Folglich fließen rund 76'000 m<sup>3</sup> ( $V_{\text{red}}$ ) über die Dammkrone und werden nicht gestoppt.

#### 6. Neue Lawinenberechnung (Simulation 2) entlang des ursprünglichen Profiles (ohne Damm) mit der reduzierten Lawinenmasse $V_{\text{red}}$

- Die Anrissmächtigkeit wird von 1.3 m auf 1.0 m reduziert, so ergibt sich das neue Anrissvolumen  $V_{\text{red}}$  zu 93'000 m<sup>3</sup>. Das Volumen wurde bewusst zu gross gewählt, weil in der Berechnung mit AVAL-1D im Bereich des Dammes Schnee abgelagert wird. (Wird nur mit einem Anrissvolumen von 76'000 m<sup>3</sup> gerechnet, ist die Lawinenmasse unterhalb des Dammes zu klein, weil die Lawine bei der Verflachung am Dammstandort Masse verliert. Die Auslaufstrecke wäre folglich zu kurz.)
- Im Bereich der Bremsböcker und der Lawinenablagerung wird mit den Reibungsbeiwerten für eine runsenförmige Lawinenbahn gerechnet, um eine künstliche Abbremsung zu erreichen, damit die Geschwindigkeit auf  $v_2=12.7$  m/s reduziert wird.
- Am Dammstandort berechnet sich eine Lawinengeschwindigkeit  $v = 12.9$  m/s (Abb. 7.4) und eine Fließhöhe  $d_1 = 1.0$  m.
- Es kann empfehlenswert sein, mehrere Varianten durchzurechnen, um auf die reduzierte Geschwindigkeit zu kommen (z.B. unverändertes Anbruchvolumen, dafür erhöhte Reibung oberhalb des Dammes oder reduziertes Anbruchvolumen und nur wenig erhöhte Reibung etc.). Je nach gewählter Variante können sich unterschiedliche Auslaufstrecken ergeben.
- Die Lawinenberechnung wird bis ins Auslaufgebiet durchgeführt. Da die Kubatur der überfließenden Lawinenmassen grösser als 60'000 m<sup>3</sup> ist, wird unterhalb des Dammes mit den Reibungswerten für Grosslawinen gerechnet.
- Ohne Damm berechnet sich eine Auslaufstrecke ab der Kote 1620 m von 380 m und mit dem Damm von 217 m. Durch die Wirkung des Dammes hat sich die Auslaufstrecke um rund 160 m reduziert. In der vorliegenden Situation gibt es noch sekundäre Anrissgebiete, die nicht durch den Damm abgedeckt sind. Es muss geprüft werden, ob mit der Wirkung des Dammes eines dieser Anrissgebiete massgebend wird.

Dammes bewirkt eine Verkürzung der Auslaufstrecke um 160 m

Tab. 7.1: Lawinenberechnung mit AVAL-1D, Dorfbachlawine bis Damm.

Element	Simulation 1 (Ohne Damm): 110'000m <sup>3</sup>			Simulation 2 (mit Damm): 70'000m <sup>3</sup>			Neigung °	Distanz (m)	
	μ	ξ	d <sub>0</sub> (m)	μ	ξ	d <sub>0</sub> (m)			
0	0.16	2500	1.30	0.16	2500	0.8	33.7	108	
1	0.16	2500	1.30	0.16	2500	0.8	32.0	189	
2	0.16	2500	1.20	0.16	2500	0.7	29.1	103	
3	0.16	2500	1.20	0.16	2500	0.7	28.0	107	
4	0.16	2500	0.00	0.16	2500	0.00	20.6	171	
5	0.16	2500	0.00	0.16	2500	0.00	9.1	127	
6	0.16	2500	0.00	0.16	2500	0.00	13.2	87	
7	0.16	2500	0.00	0.16	2500	0.00	13.0	133	
8	0.2	1750	0.00	0.2	1750	0.00	15.3	114	Bremshöcker
9	0.2	1750	0.00	0.2	1750	0.00	21.8	27	
10	0.16	2500	0.00	0.2	1750	0.00	2.6	65	Dammfuss
11	0.16	2500	0.00	0.16	2500	0.00	27	213	
Volumen	116'083 m <sup>3</sup>			93'061 m <sup>3</sup>					
Dammfuss	v=20.5m/s, d=3.2m			v=12.9m/s, d=1.0m					
Kote 1620m	v=13.6m/s, d=0.8m			v=8.9m/s, d=0.5m					

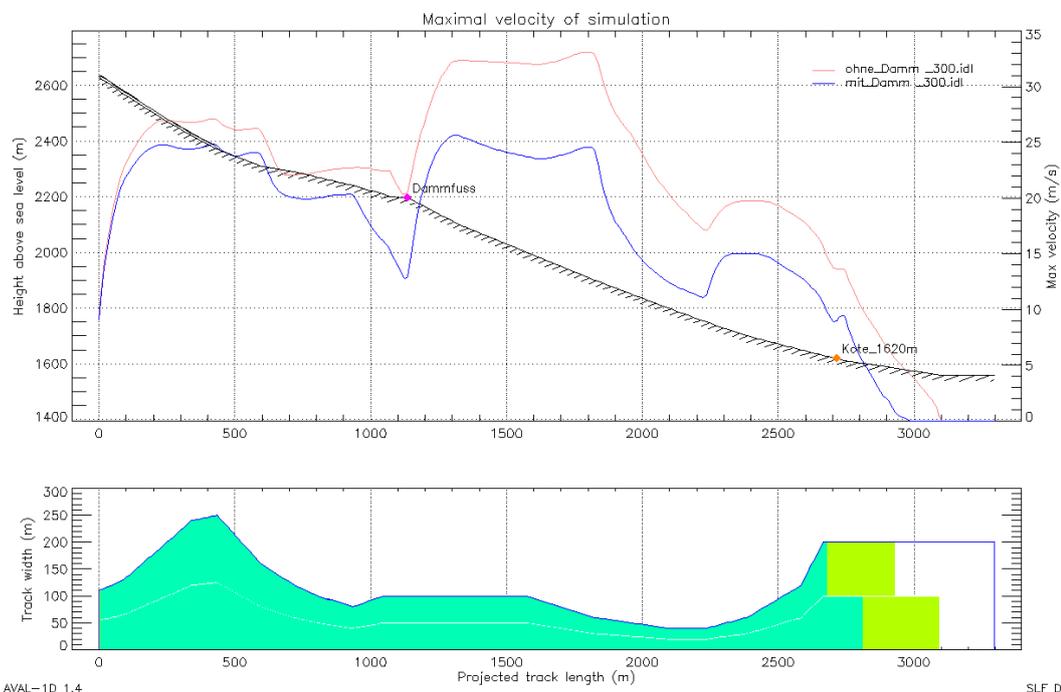


Abb. 7.4: Lawinengeschwindigkeit entlang der Lawinenbahn gemäss AVAL-1D mit (blau) und ohne Damm (rot).

## Literatur

Amt für Wald, Graubünden, 2007: Kontrolle und Unterhalt forstlicher Infrastruktur: Handbuch Version 2.2 (April 2007), (<http://www.wald.gr.ch/aufgaben/index-kontrolle.htm>).

Baillifard M.A., Kern M., Margreth S., 2007: Anleitung zur Dimensionierung von Lawinenauffangdämmen.

Frehner M., Wasser B., Schwitter R., 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NAIS). Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S., (<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/>).

Salm B., Burkard A., Gubler H., 1990: Berechnung von Fliesslawinen. Eine Anleitung für den Praktiker mit Beispielen, Mitteilung Nr. 14, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch/Davos.

Margreth S., 2007: Lawinenverbau im Anbruchgebiet. Technische Richtlinie als Vollzugshilfe. Umwelt-Vollzug Nr. 0704. Bundesamt für Umwelt, Bern, WSL Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos. 136 S., (<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/>).

SLF, 2005: AVAL-1D - Numerische Berechnung von Fliess- und Staublawinen (Lawinenberechnungsprogramm).

SLF, 2007: Rapid Mass Movements (RAMMS) - Ein Modellierungssystem für Naturgefahrenforschung und Praxis. (Lawinenberechnungsprogramm).

Hákonardóttir K.M., Hogg A., Jóhannesson T., Tómasson G.G., 2003: A laboratory study of the retarding effects of braking mounds on snow avalanches. *Journal of Glaciology*, 49, 165, 190-200.

BFF, SLF, 1984: Richtlinie zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Bundesamt für Forstwesen, EDMZ, Bern.

Jóhannesson T., 2006: The design of avalanche protection dams. Recent practical and theoretical developments. 1-Draft, 25.7.2006. ([http://www.leeds.ac.uk/satsie/docs/satsie\\_d14.pdf](http://www.leeds.ac.uk/satsie/docs/satsie_d14.pdf))





Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

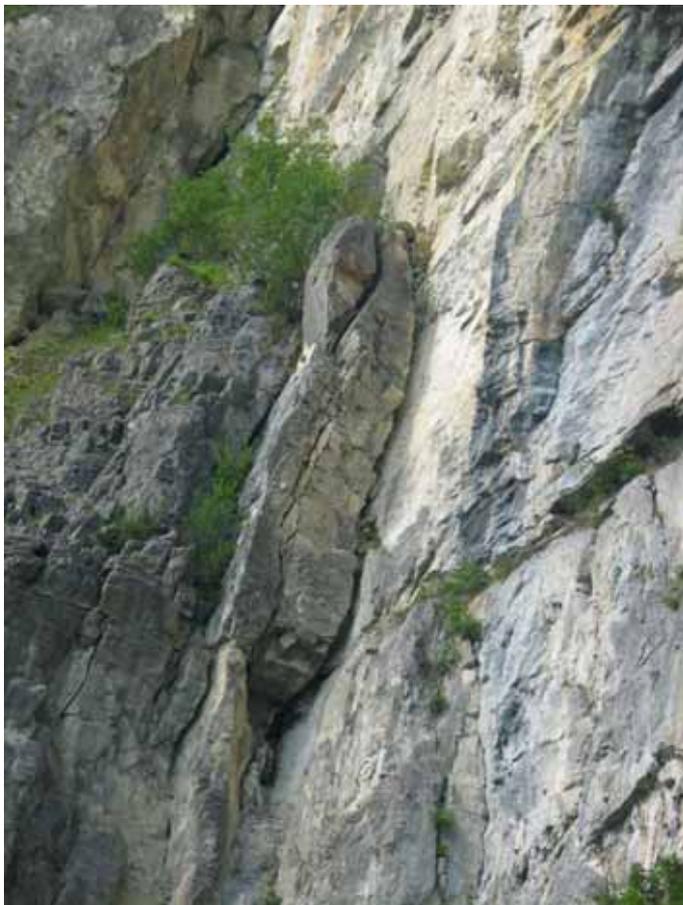
Swiss Confederation

**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 C: STURZPROZESSE

Hansruedi Keusen, Werner Gerber, Hermann Rovina



Absturzgefährdete Felsoberfläche an der Axenstrasse bei Sisikon UR (Foto: W. Gerber, WSL)

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
1.1	Übersicht	1
1.2	Besonderheiten des Prozesses, Szenarien	2
1.3	Stand der Beurteilungsmethoden	2
1.4	Unsicherheiten bei der Prozessbeurteilung	3
2.	Übersicht Schutzmassnahmen	5
3.	Grobbeurteilung	7
3.1	Gefahrenpotential Sturz	7
3.2	Grobanalyse Schutzmassnahmen	7
3.3	Feststellung de Relevanz der Schutzmassnahme	8
4.	Massnahmenbeurteilung	9
4.1	Prozesskenntnisse	9
4.2	Beurteilung der Zuverlässigkeit	10
4.3	Die Zuverlässigkeit der Massnahme Schutzwald	18
5.	Wirkungsbeurteilung	21
5.1	Vorgehen	21
5.2	Neue Szenarien nach wirksamen Massnahmen	24
5.3	Unsicherheiten des Gesamtsystems	25
6.	Nachvollziehbarkeit	25
7.	Fallbeispiel Steinschlagnetz Gersau LU	26
7.1	Grobbeurteilung	26
7.2	Massnahmenbeurteilung	29
7.3	Wirkungsbeurteilung	32
8.	Fallbeispiel Steinschlagdamm Weggis LU	34
8.1	Grobbeurteilung (Schritt 1)	34
9.	Fallbeispiel Steinschlagschutzdamm St. Niklaus VS	36
	Literatur	36



# 1. Charakteristik der Prozesse

## 1.1 Übersicht

Sturzprozesse sind in der Schweiz als Alpenland geologisch bedingt sehr häufig. Sie gefährden vielerorts Siedlungen und Verkehrswege und verlangen damit nach Schutzmassnahmen.

Bei den Sturzprozessen sind

- Stein- und Blockschlag (Einzelkomponenten bis mehrere  $m^3$ )
- Felsstürze (Ausbruchvolumen Hunderte bis Tausende  $m^3$ )
- Bergstürze (Ausbruchvolumen  $> 1$  Mio.  $m^3$ )

auseinander zu halten. Da Bergstürze mit technischen Schutzmassnahmen kaum beherrschbar sind, werden sie im vorliegenden Bericht nicht behandelt.

Stein- und Blockschläge wie auch Felsstürze erzeugen isolierte Sturzbewegungen (Fallen, Springen, Rollen) von Einzelkomponenten unterschiedlicher Grösse. Diese Bewegungen gehorchen physikalischen Gesetzen. Sturzprozesse umfassen drei räumlich aufeinander folgende Prozessbereiche: Ausbruchgebiet, Transitstrecke und Ablagerungsgebiet.

Isolierte Sturzbewegungen von Einzelkomponenten

Die Geschwindigkeiten und Energien der Einzelkomponenten werden durch mehrere Faktoren massgeblich beeinflusst:

- Geländetopographie (Relief, Hangneigung, Bruchkanten, Aufprallwinkel)
- Blockgrösse, Blockform (Masse, Rotationsfähigkeit)
- Dämpfung des Untergrundes (Fähigkeit des Untergrundes, sich zu verformen mit entsprechender Energievernichtung)
- Rauigkeit der Oberfläche im Verhältnis zur Blockgrösse
- Wald

In Abb. 1.1 sind die Faktoren und ihre Wirkung dargestellt.

Energieverluste durch:

- weichen Untergrund (Dämpfung)
- grossen Aufprallwinkel
- Reibungseffekte in Folge Rauigkeit des Untergrundes

Vergrösserung des Absprungwinkels durch:

- hohe Rotationsgeschwindigkeit
- Blöcke mit grossen Achsenverhältnissen
- ausgeprägtes Mikrorelief

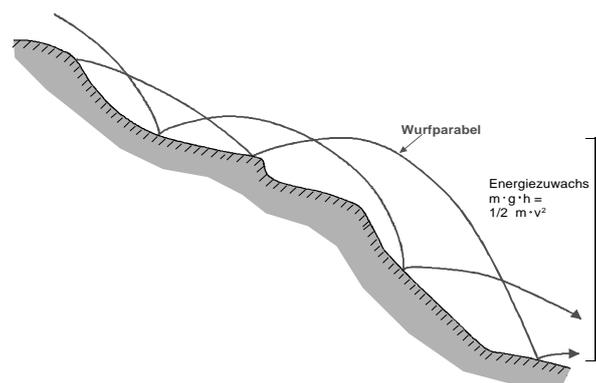


Abb. 1.1: Massgebliche Faktoren, welche die Sturzbahn von Einzelkomponenten beeinflussen.

## 1.2 Besonderheiten des Prozesses, Szenarien

Kleine Komponenten  
häufiger als grosse

Geologisch bedingt zeichnen sich Sturzprozesse in der Regel durch spezifische Blockgrössen mit entsprechender Einwirkung aus. Sturzereignisse mit kleineren Komponenten sind dabei meist häufiger als Blockschläge oder Felsstürze (Tab. 1.1).

Tab. 1.1: Sturzscenarioen am Beispiel Sargans, Passati.

Blockgrösse	Auftreten	Eintretenswahrscheinlichkeiten
Volumen bis ca. $\frac{1}{4}$ m <sup>3</sup>	Auftreten häufig, vielfach frisch	0 - 30 Jahre
Volumen > $\frac{1}{4}$ - 2 m <sup>3</sup>	deutlich weniger häufig, z.T. frisch, z.T. überwachsen	30 - 100 Jahre
nicht existent	nicht existent	100 - 300 Jahre
Volumen > 2 - 5 m <sup>3</sup>	sehr selten, meist überwachsen, Extremereignis	> 300 Jahre

Intensitätskarte als  
Grundlage

Grundlage für die Planung von Schutzmassnahmen sind Intensitätskarten für jedes Szenario. Schutzmassnahmen können auf die Beherrschung aller oder aber einzelner Szenarien, z.B. auf das risikoreichste, ausgerichtet werden.

## 1.3 Stand der Beurteilungsmethoden

Für Modellierung sind  
Feldbegehungen  
notwendig

Es gibt zahlreiche Modelle, mit welchen Sturzprozesse simuliert und die für Schutzmassnahmen entscheidenden Grössen wie Geschwindigkeit, Energie und Flughöhe bestimmt werden können. Entscheidend für die Qualität der Sturzbahnberechnungen ist neben einem adäquaten Modellierungsansatz auch die richtige Erfassung der massgeblichen Faktoren. Hierzu sind detaillierte Felduntersuchungen erforderlich. Die Blockgrössen werden in der Regel aufgrund der vorhandenen stummen Zeugen oder anhand gefügetektonischer Kriterien im Ausbruchgebiet ermittelt. Auch Dämpfung, Rauigkeit und Waldeigenschaften müssen im Feld erhoben werden.

Energien und Flughöhen sind gut  
bestimmbar

Mit sauberen Geländeuntersuchungen und guten Modellen können heute qualitativ befriedigende Bestimmungen der Energien (Translations- und Rotationsenergie) und der Flughöhen erreicht werden. Diese unterliegen jedoch einer Streubreite bedingt durch örtlich stark wechselnde Aufprallbedingungen. Gute Programme generieren deshalb eine grössere Anzahl von möglichen Flugbahnen, womit statistische Häufigkeitsverteilungen von Flughöhen und Energien ermittelt werden können (Abb. 1.2).

Solche Ansätze stellen gute Grundlagen für die Dimensionierung von Rückhaltewerken dar. Im Weiteren gibt es 3D-Programme, mit welchen Trajektorien in einer Geländetopographie räumlich generiert werden können.

Pauschalgefälleansätze  
sind ungenügend

Pauschalgefälleansätze, wie sie teilweise noch für Gefahrenhinweiskarten angewendet werden, sind für die Beurteilung von Schutzmassnahmen ungenügend.

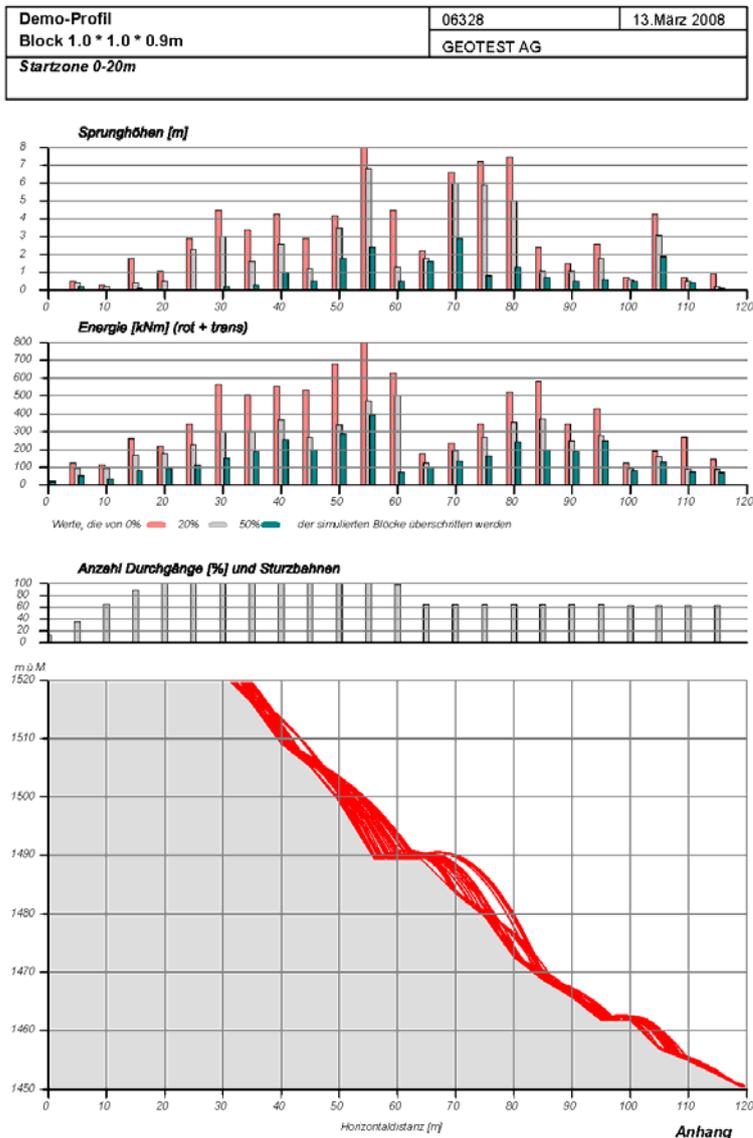


Abb. 1.2: Beispiel einer Sturzbahnberechnung.

### 1.4 Unsicherheiten bei der Prozessbeurteilung

Obwohl die gängigen Simulationsprogramme auf ähnlichen physikalischen Ansätzen aufbauen, zeigen Quervergleiche in Testgebieten meist erhebliche Unterschiede in den Resultaten. Der Grund dafür liegt einerseits in einer unterschiedlichen Einschätzung und Kartierung der massgeblichen gebiets- und programm-spezifischen Faktoren wie Topographie, Wald, Blockgrösse sowie Dämpfung und Rauigkeit des Untergrundes, andererseits in der unterschiedlichen Implementierung dieser Faktoren ins Modell.

Unterschiedliche Programme erzeugen unterschiedliche Ergebnisse

Es ist daher unumgänglich, die Sturzbahnberechnung auf ihre Plausibilität zu prüfen. Dies kann durch einen Vergleich mit früheren Ereignissen und der im Gelände vorhandenen stummen Zeugen erfolgen.

Sturzbahnberechnung plausibilisieren

Wichtig ist, dass die auf der Prozessseite erkennbaren Unsicherheiten beschrieben werden. Diese sind sowohl für die einzurechnenden Sicherheiten bei der Bemess-

Unsicherheiten beschreiben

sung der Schutzmassnahmen, wie auch für die Berücksichtigung der Schutzmassnahme (Rückstufung) von Bedeutung.

Bei zu grossen Unsicherheiten keine Berücksichtigung

Unsicherheiten ergeben sich in der Prognose der Szenarien sowie in der Sturzbahnberechnung selbst. Unsicherheiten müssen transparent beschrieben werden. Sind diese unverhältnismässig hoch im Vergleich zur Wirkung der Schutzmassnahmen, müssen die Prozessabklärungen vertieft werden. Bleiben die Unsicherheiten zu gross, muss auf die Berücksichtigung der Massnahmen bei der Gefahrenbeurteilung verzichtet werden.

Parameterwahl offen legen

Tab. 1.2 informiert über die wichtigsten Unsicherheiten bei Sturzprozessen und deren Bedeutung. Es zeigt sich, dass bei Sturzereignissen die meisten Kriterien eine grosse Bedeutung haben. Unsicherheiten können damit erhebliche Konsequenzen haben. Deshalb müssen die eingesetzten Parametergrössen nachvollziehbar offen gelegt werden (z.B. bei Sturzbahnberechnungen).

Tab. 1.2: Abschätzung der Bedeutung von Unsicherheiten von Sturzprozessen (Bedeutungsfaktor 3 = gross, 2 = mittel, 1 = klein, 0 = keine Unsicherheit).

Ort	Kriterium	Schwierigkeit	Bedeutungsfaktor (= maximale Unsicherheitspunktzahl)
Allg.	Ereigniskataster, stumme Zeugen, Beobachtungen	Beim Fehlen von Ereignissen grosse Unsicherheiten, Szenarienbildung	3
Ausbruchsort	Geologie, Gebirgsverhältnisse	Zugänglichkeit für geologische Aufnahmen	1
	Grosse Instabilitäten (Felssturz)	Abschätzen Extremereignis	3
Transitbereich	Topographie, Mikrorelief	Erkennen von Bruchkanten	3
	Rauhigkeit	Einschätzung der Rauhigkeitswirkung für verschieden grosse Komponenten	2
	Dämpfung	Einschätzung der Dämpfungswirkung des Untergrundes. Wechsel Fels-Lockergestein. Wirkung von gefrorenem Boden	3
	Wald	Vorhandene Informationen über den Waldtyp. Auswirkungen von Überalterung und Sturmschäden	3
Auslaufbereich	Geländeeigenschaften	Abschätzen von Ausrollbereichen und Reichweiten (häufig schwierig zu modellieren) Wirkung von gefrorenem Boden. Seitliche Streuung der Sturzbahn	3

Als Anhaltspunkt für die Abschätzung der Unsicherheit können folgende Bewertungen dienen:

- Unsicherheit sehr gross:  $\geq 15$  Punkte
- Unsicherheit gross: 10 - 15 Punkte
- Unsicherheit mässig: 5 - 9 Punkte
- Unsicherheit gering:  $< 5$  Punkte

## 2. Übersicht Schutzmassnahmen

Schutzmassnahmen können ansetzen:

- im Ausbruchgebiet durch Verhinderung von Ausbrüchen,
- im Transitbereich durch Rückhalten oder Ablenken der Sturzkomponenten,
- am Objekt durch lokale Massnahmen (Bewehrung).

In Tab. 2.1 sind die bei Sturzgefahren möglichen Schutzmassnahmen aufgeführt. Die Zusammenstellung zeigt, welche Schutzmassnahmen bei der Gefahrenbeurteilung grundsätzlich nicht berücksichtigt werden können. Auf diese wird nachfolgend nicht weiter eingegangen. Viele der Massnahmen bedürfen aus verschiedenen Gründen einer differenzierten Betrachtung.

Selektion  
Schutzmassnahmen

Tab. 2.1: Übersicht über mögliche Schutzmassnahmen und Berücksichtigung ihrer Wirkung.

Bezeichnung	Ort	Massnahme	Berücksichtigung der Wirkung bei Gefahrenbeurteilung	Bemerkung
SA1	Massnahmen im Ausbruchgebiet	Felsreinigung, teilweise oder vollständige Elimination der Gefahr	nein	neue Gefahrenbeurteilung
SA2		Abdeckungen mit Netz oder Spritzbeton, Vernagelung	differenzierte Betrachtung erforderlich	Problem Dauerhaftigkeit, Unterhalt
SA3		Verankerungen, Pfeiler	differenzierte Betrachtung erforderlich	Problem Dauerhaftigkeit
SA4		Wald	nein	keine genügende Wirkung im Ausbruchbereich
ST1	Massnahmen im Transitgebiet	nicht flexible Netze mit starren Stützen, typengeprüft	ja	Typenprüfung gemäss BUWAL (2001)
		Steinschlagzäune, Pali-saden, starre Werke aus Holz, Stahl, Beton ohne Werkangaben	nein	Ungenügende Trag-sicherheit und Gebrauchstauglichkeit
ST2		flexible Steinschlagnetze, typengeprüft	ja	Typenprüfung gemäss BUWAL (2001)
		flexible Steinschlagnetze mit Werkangaben	differenzierte Betrachtung notwendig	Bauausführung beachten
		flexible Steinschlagnetze ohne Werkangaben	nein	Werke meist älter als 2001, unbekanntes Trag-sicherheit und Gebrauchstauglichkeit
ST3		Erddämme mit bergseitiger Böschung steiler 40 - 45°	ja	
	Erddämme mit bergseitiger Böschung flacher 40°	differenzierte Betrachtung notwendig	Gefahr des Überrollens beachten	
ST4	Wald	differenzierte Betrachtung notwendig	Nachweis der Wirkung mit Modellierung	
SO1	Objekt-schutz	Verstärkung Hausmauern	differenzierte Betrachtung notwendig	nur bei flächenhafter Wirkung (bei nur lokalem Effekt: nein)

## Strategien von Schutzmassnahmen

Häufig Restrisiken

Im Idealfall wird man einen möglichst umfassenden Schutz gegen die vorhandenen Sturzgefahren anstreben, d.h. Beherrschung aller Szenarien mit ihrer vollumfänglichen Streubreite. Dies ist in der Praxis häufig nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zweckmässig. Es verbleiben meist Restrisiken durch seltenere Ereignisse mit hoher Intensität.

Massnahmenkombinationen

Beim Steinschlagschutz können Massnahmen sinnvoll kombiniert werden, z.B. durch Massnahmen am Ausbruchsort und ergänzende Rückhaltewerke im Transitbereich.

Kontrolle grosser Volumina am Entstehungsort

Durch geeignete Massnahmen am Entstehungsort von Felsstürzen (Verankerung, Sprengung) kann der Ausbruch grosser Volumina, welche im Transitbereich nicht beherrschbar wären, verhindert werden (Abb. 2.1). Wald, welcher häufig in Transitgebieten von Sturzgefahren vorhanden ist, kann als ergänzende oder unter Umständen als alleinige wirksame Massnahme betrachtet werden.

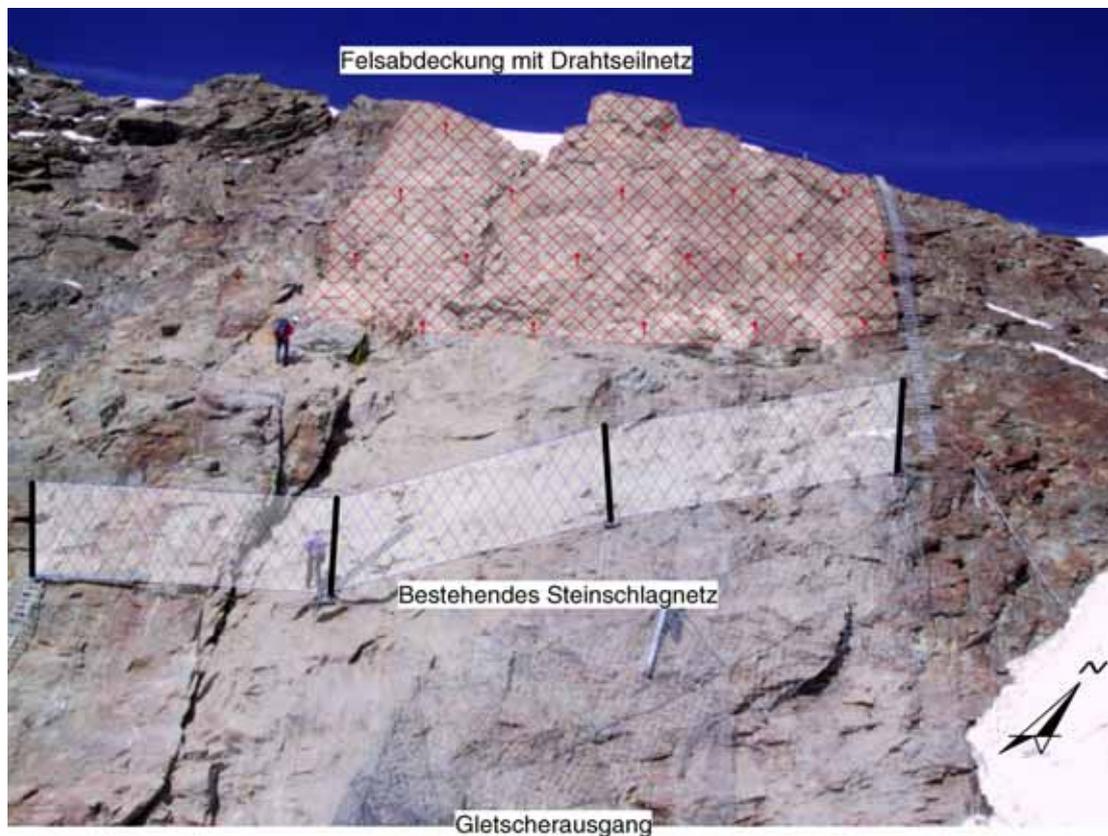


Abb. 2.1: Gletscherausgang Jungfrauoch. Der oberste Teil der Felswand wurde mit Abdecknetz und Anker gegen Ausbrüche gesichert. Hier ausbrechende Steine könnten durch das Steinschlagnetz nicht vollumfänglich (Flughöhe) beherrscht werden. Dieses fängt die in tieferen Lagen ausbrechenden Steine auf.

Beurteilung in vier Schritten

Das generelle Vorgehen bei der Beurteilung von Schutzmassnahmen in vier Schritten ist im allgemeinen Teil A beschrieben. Dort sind auch die massgebenden Kriterien Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit definiert.

### 3. Grobbeurteilung

Bei der Grobbeurteilung soll erkannt werden, ob die Schutzmassnahmen überhaupt relevant sind und für die weitere Abklärung berücksichtigt werden können. Hierzu muss eine Reihe von Bedingungen erfüllt sein (Abb. 3.1). Andernfalls kann die Untersuchung bereits in diesem 1. Schritt abgebrochen werden. Die in der Übersicht gemäss Tab. 2.1 bereits als ungenügend eingestuften Schutzmassnahmen werden nicht weiterverfolgt. Im Weiteren müssen die Grundsätze gemäss Kapitel 2 in Teil A erfüllt sein.

Klärung der Relevanz

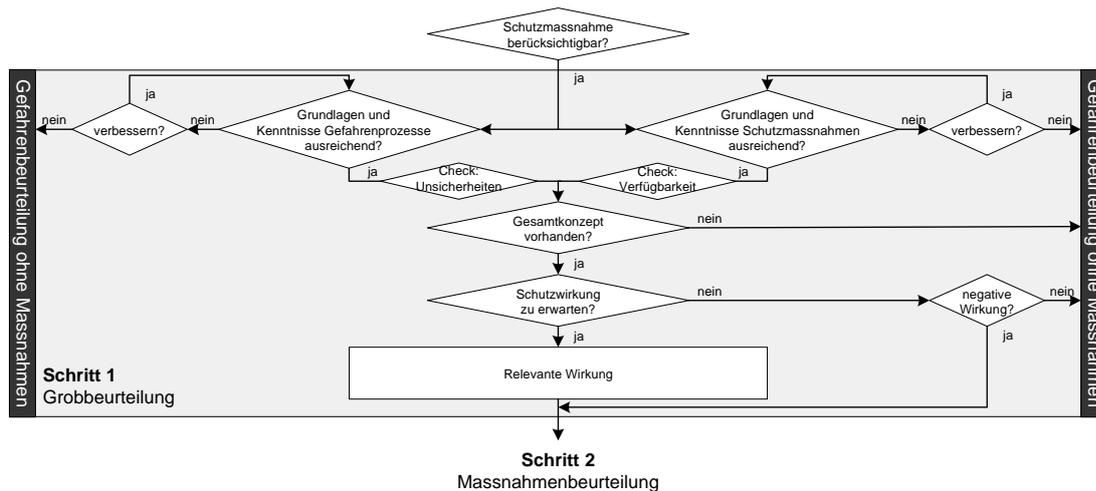


Abb. 3.1: Schrittweises Vorgehen bei der Grobbeurteilung mit Minimalanforderungen und Feststellung der Relevanz der Schutzmassnahme.

#### 3.1 Gefahrenpotential Sturz

Als Grundlage für die Grobbeurteilung müssen folgende Informationen vorliegen:

- Lage und Eigenschaften des Ausbruchsgebietes
- Ereigniskataster, stumme Zeugen, evtl. Karte der Phänomene
- Szenarien der Sturzprozesse
- Prozessraum, Wirkungsraum

Minimal erforderliche Informationen

Die Unsicherheiten des Prozesses werden in Schritt 2 berücksichtigt.

In vielen Fällen werden Karte der Phänomene, Sturzsimulationen, Intensitätskarten und sogar Gefahrenkarte vorhanden sein. Diese Unterlagen sind für die Grobbeurteilung nützlich aber noch nicht zwingend. Beim nachfolgenden Schritt 2 müssen dann vertiefte Prozessbeschreibungen vorliegen.

#### 3.2 Grobanalyse Schutzmassnahmen

Bei neueren Schutzmassnahmen kann für einen ersten Überblick meistens auf die vorhandenen Unterlagen wie Projektdossier, Schutzbautenkataster, Schutzzielbeschreibung und Angaben zu Kontrolle und Unterhalt zurückgegriffen werden. Daneben können weitere spezifische Kriterien von Bedeutung sein (Tab. 3.1). In der Regel genügen hier pauschale Einschätzungen basierend auf den vorhandenen Unterlagen. Wo diese fehlen, was bei den älteren Schutzbauten die Regel sein dürfte, ist eine Feldbegehung mit Erhebung der wichtigsten Kriterien notwendig.

Bei neueren Massnahmen oft gute Unterlagen

Eine wichtige Information ist immer die Bewährung der Massnahme bei früheren Ereignissen (Beschrieb im Ereigniskataster, Gefahrenkarte).

Bei negativer Wirkung  
Neubeurteilung der  
Gefahrensituation

Negative Wirkungen von Schutzmassnahmen können durch Werkmängel, schlechten Unterhalt aber auch durch negative Einflüsse auf andere Prozesse (Beispiel Steinschutzmauer in Gondo als Mitursache für Rückstau von Wasser und nachfolgende Rutschung) entstehen. Die Schutzmassnahme Wald kann eine negative Wirkung auf andere Prozesse haben, z.B. durch Stöcke und Stämme in Gerinnen. Im Weiteren können Bäume eines Schutzwaldes nahe gelegene Anlagen durch Windfall gefährden. Hier ist von Fall zu Fall zu entscheiden. In den meisten Fällen werden erkannte negative Wirkungen zu einer Neubeurteilung der Gefahrensituation Anlass geben. Je nach Ergebnis kann die Schutzmassnahme weiterverfolgt (Schritt 2 und 3) oder die Untersuchung hier abgebrochen werden.

Tab. 3.2: Wichtigste Kriterien zur generellen Beurteilung von Schutzmassnahmen bei Sturzprozessen.

Massnahme	Kriterium, Information
Verbau im Anrissgebiet	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Werktyp (Anker, Netz, Spritzbeton, Betonpfeiler)</li> <li>- Verbaute Fläche</li> <li>- Baulicher Zustand</li> <li>- Stabilitätsprobleme</li> <li>- Bewährung</li> </ul>
Dämme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Topographie am Standort</li> <li>- Dammhöhe, Dammlänge, Dammgeometrie (Böschungsneigung)</li> <li>- Auffangvolumen</li> <li>- Geotechnische Stabilität</li> <li>- Bewährung bei früheren Ereignissen</li> </ul>
Auffangnetze	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Werktyp</li> <li>- Netzlänge, -höhe</li> <li>- Zustand</li> <li>- Bewährung bei früheren Ereignissen</li> </ul>
Wald	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausdehnung der bewaldeten Fläche</li> <li>- Lückenlängen, Stammzahlen</li> <li>- Verjüngungsangaben</li> <li>- Liegenlassen von Stämmen</li> <li>- Zustand (Käfer, Sturm)</li> <li>- Spuren früherer Ereignisse</li> <li>- Gefährdung des Bestandes durch Sturz, Lawinen, Rutschungen</li> </ul>

### 3.3 Feststellung de Relevanz der Schutzmassnahme

Relevant bei Milderung  
der Sturzfolgen

Die Beurteilung einer relevanten Wirkung wird gutachtlich bestimmt. Sie ist dann gegeben, wenn die Schutzmassnahme auf die Sturzgefahr ausgerichtet ist und deren Folgen zumindest teilweise zu mildern vermag. Kann keine relevante Wirkung erwartet werden, oder bestehen zu grosse Unsicherheiten auf der Massnahmen- wie Prozessseite, kann die Gefahrenbeurteilung mit Berücksichtigung der Massnahmen abgebrochen und dies in einem Bericht begründet werden. Gefährdungen, welche von den Schutzmassnahmen selbst ausgehen, müssen deklariert werden.

## 4. Massnahmenbeurteilung

Ziel der Massnahmenbeurteilung ist die Bestimmung der Zuverlässigkeit der Schutzmassnahme unter Berücksichtigung der Prozesswirkungen aller Szenarien. Die Zuverlässigkeit der Schutzmassnahmen ergibt sich aus Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Das Vorgehen bei der Massnahmenbeurteilung ist aus Abb. 4.1 ersichtlich.

Ziel = Zuverlässigkeit der Schutzmassnahmen

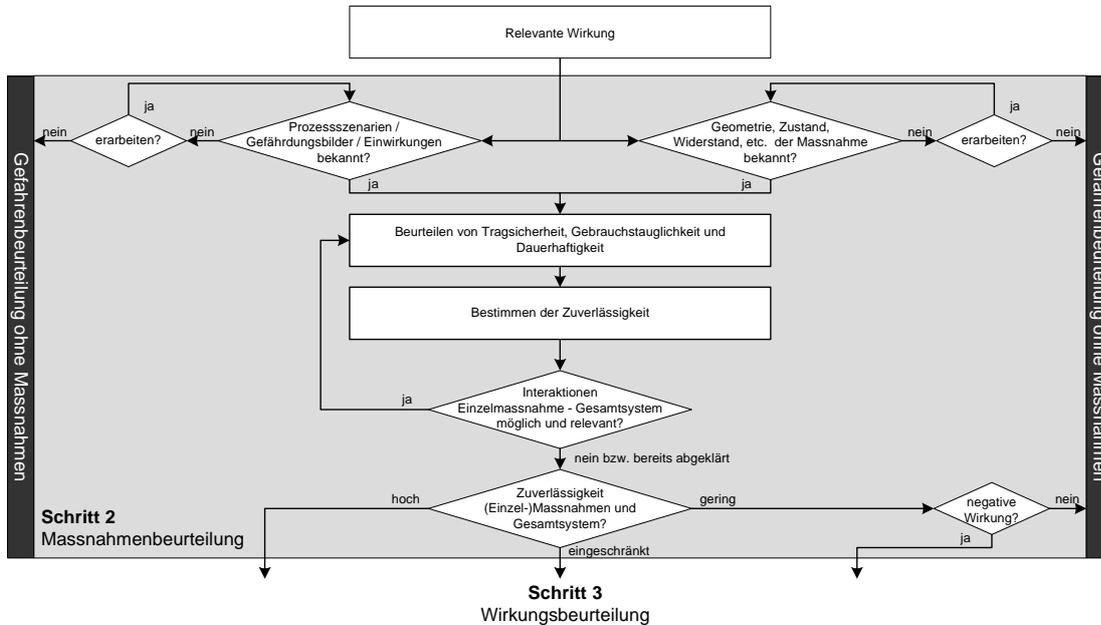


Abb. 4.2: Vorgehen bei der Massnahmenbeurteilung. Nähere Erläuterungen im Text.

### 4.1 Prozesskenntnisse

Entstehung und Ablauf der möglichen Sturzprozesse müssen verstanden sowie die Unsicherheiten im Prozessverständnis bekannt sein. Die erforderlichen Prozessinformationen und deren Bedeutung für die Schutzmassnahmen sind in Tab. 4.1 dargestellt.

Tab. 4.1: Erforderliche Prozesskenntnisse im Hinblick auf die Typen von Schutzmassnahmen.

Prozesskenntnis	Grundlagen	Bedeutung für Schutzmassnahmen		
		Verbau am Ausbruch	Rückhaltewerke im Transit	Wald im Transit
Potentielles Ausbruchgebiet (Lage, Grösse)	Kartierung, geologische Feldaufnahmen	entscheidend	entscheidend	entscheidend
Geologische Verhältnisse am Ausbruchsort	Geologische Verhältnisse am Ausbruchsort, Trennflächen, Gebirgsqualität, Stabilität	entscheidend	wichtig	wichtig
Grösse Sturzkomponenten	Ereigniskataster, stumme Zeugen, Ausbruchsanalyse	wichtig	entscheidend	entscheidend
Flughöhe, Geschwindigkeit, Energien	Flugbahn-Simulationen, Untergrundeigenschaften, Waldparameter	nicht wichtig	entscheidend	entscheidend

Sturzbahnsimulationen mit mehreren Flugbahnen

Im Idealfall liegen Karte der Phänomene, Intensitätskarten aller Szenarien sowie eine Gefahrenkarte (ohne Massnahmen) vor. Unabdingbar sind Sturzbahnsimulationen mit Angabe von Flughöhen und Energien (Abb. 1.2). Gute Programme generieren eine grössere Anzahl von Flugbahnen in Abhängigkeit von kleinen Unterschieden in der Geländetopographie mit einer Häufigkeitsstatistik der ermittelten Energien und Flughöhen. Solche Berechnungen müssen für alle Szenarien inklusive das mögliche Extremereignis durchgeführt sein.

## 4.2 Beurteilung der Zuverlässigkeit

Einschätzung der Zuverlässigkeit

In diesem Schritt sollen die zu beurteilenden Schutzmassnahmen auf ihre Zuverlässigkeit gegenüber möglichen Gefährdungsbildern und Einwirkungen untersucht werden. Die Zuverlässigkeit einer Schutzmassnahme ergibt sich aus der Einschätzung der drei Kriterien Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Die allgemeinen Definitionen gemäss SIA sind im Teil A zu finden.

Kriterien für Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit

In Tab. 4.2 sind die spezifisch bei Schutzmassnahmen gegen Sturzgefahren vorhandenen Elemente von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit zusammengestellt. Bei der Gebrauchstauglichkeit sollen hier allgemein wirkungsmindernde Faktoren sowie klar ersichtliche Schwächen bei der Dimensionierung (nicht zurückgehaltene Ereignisse) erkannt werden. Die eigentliche Funktionalität im Sinne der gefahrenmindernden Wirkung wird in Schritt 3 untersucht.

Tab. 4.2: Elemente und Kriterien, welche Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit bei Schutzmassnahmen gegen Sturzgefahren beeinflussen.

Schutzmassnahmen	Gefährdungsbilder, Einwirkungen	Tragsicherheit	Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit
Verbauungen im Ausbruchbereich. Netzabdeckungen, Verankerungen, Spritzbeton	<ul style="list-style-type: none"> <li>- instabile Felsverhältnisse</li> <li>- Einwirkung von Wasser und Frost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tragende Teile</li> <li>- Stabilitätsnachweis</li> <li>- oberirdisch: Netze, Ankerköpfe, Betonpfeiler, Spritzbeton</li> <li>- unterirdisch: Anker, Unterfangungen, Fundamente von Verankerungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Richtig bemessene Rückhalte- resp. Stützfunktion gegenüber allen Einwirkungen (Wasser, Frost)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verwitterung des Spritzbetons, Korrosion von Netz und Ankern</li> </ul>
Flexible und starre Netze	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impakt durch Sturzkomponenten (Einzel- und Mehrfachereignis)</li> <li>- grösserer Felssturz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- oberirdische Teile: Trag- und Rückhalteseile, Stützen, Netz</li> <li>- Übertragung der auftretenden Kräfte in den Untergrund</li> <li>- unterirdische Teile: Verankerungen der Seile, Foundation und Verankerung der Stützen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verminderung der Nutzhöhe nach Ereignis (Restnutzhöhe)</li> <li>- Verminderung der Nutzhöhe in Folge Verfüllung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Korrosion der Anker. Verwitterung des Ankermörtels</li> </ul>

Schutzmassnahmen	Gefährdungsbilder, Einwirkungen	Tragsicherheit	Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit
Erddämme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impakt durch Sturzkomponenten (Einzel- und Mehrfachereignis)</li> <li>- Auffüllung Rückhalteraum</li> <li>- grösserer Felssturz</li> <li>- Erosion, Dammfanken</li> <li>- instabiler Untergrund</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stabilität des Dammes (Tragfähigkeit Untergrund, Dammstabilität in sich)</li> <li>- Widerstandsfähigkeit gegen das Durchschlagen von Sturzkomponenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gefahr des Überrollens bei zu flachen bergseitigen Böschungen (<math>&lt; 40^\circ</math>)</li> <li>- Verminderung der Höhe des Dammes durch Auffüllung</li> <li>- eingeschränkte Funktion nach Sturztrefen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erosion der Dammfanken</li> <li>- Nachgiebigkeit des Untergrundes</li> </ul>

Abb. 4.3 bis Abb. 4.5 zeigen die Tragelemente von flexiblen und starren Netzen, Abb. 4.6 illustriert die Lage der Trageile nach einer Belastung. Die Darstellungen geben Hinweise, welche Tragelemente zu prüfen sind.

Tragelemente von Steinschlagnetzen

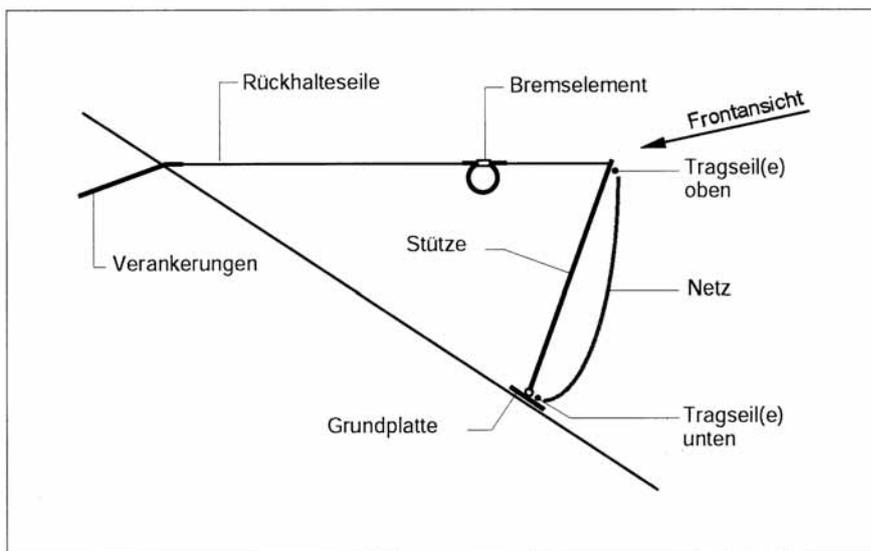


Abb. 4.3: Schematische Ansicht eines rückverankerten flexiblen Schutznetzes mit seinen Tragelementen (BUWAL, 2001).

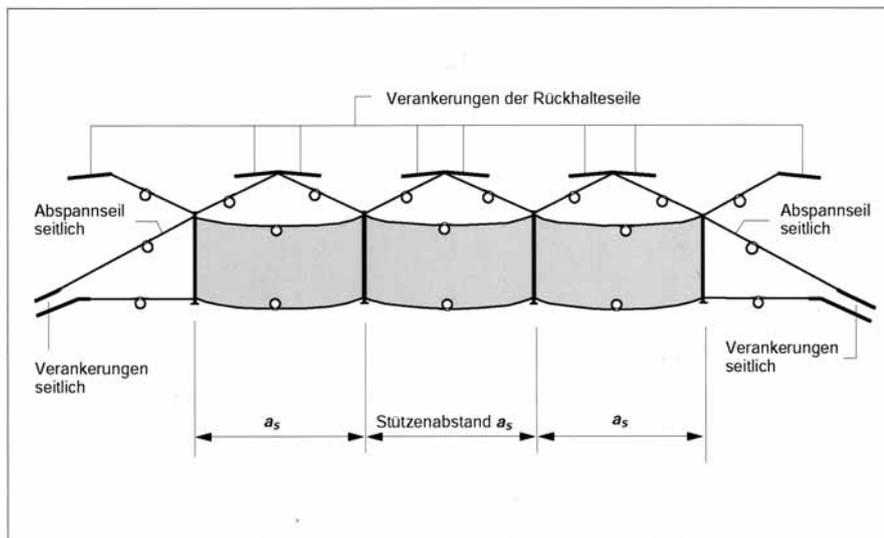


Abb. 4.4: Schematische Frontansicht eines flexiblen Netzes (BUWAL, 2001).

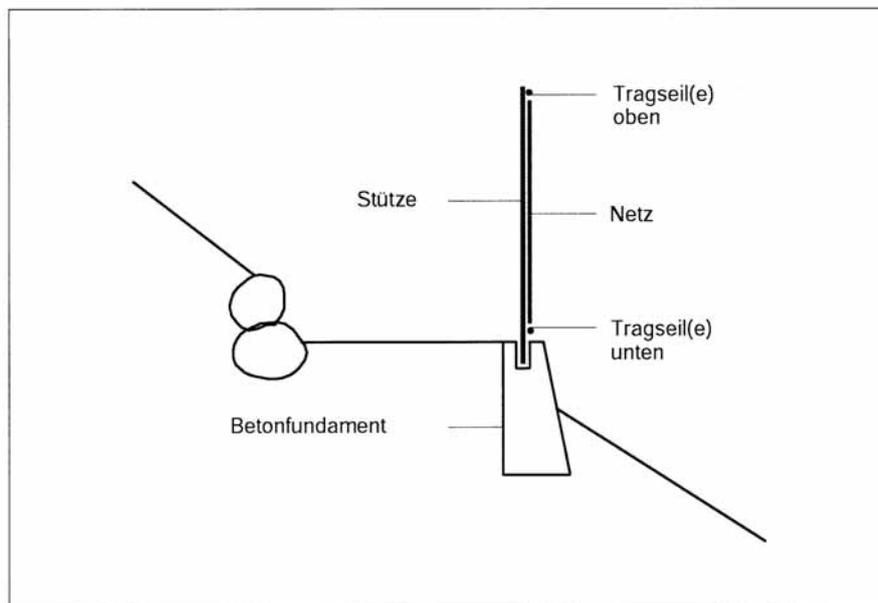


Abb. 4.5: Schematische Ansicht eines Schutznetzes mit eingespannten Stützen (BUWAL, 2001).

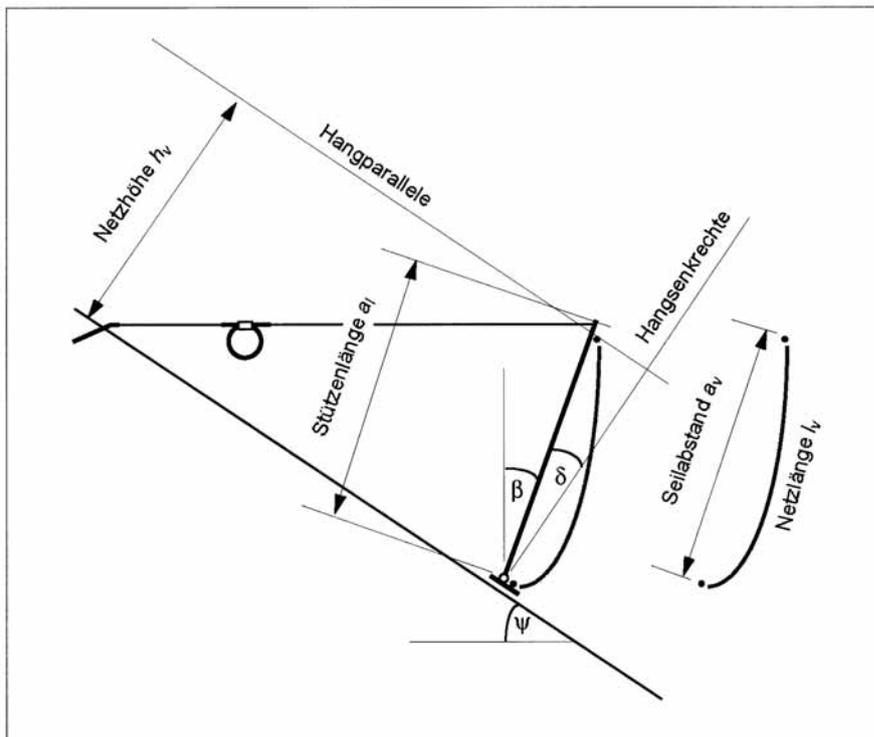


Abb. 4.6: Deformation eines flexiblen Netzes nach Treffer (BUWAL, 2001).

In Tab. 4.3 und Tab. 4.4 wird die Zuverlässigkeit von Schutzmassnahmen an Hand massgebender Kriterien abgeleitet. Dabei werden in der Praxis häufig auftretende Fälle berücksichtigt. Weitere Fälle können sinngemäss behandelt werden. Der Bearbeiter kann an Hand der Kriterien die Zuverlässigkeit bestimmen. Dabei sind Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit stärker zu gewichten als die Dauerhaftigkeit. Es können allenfalls weitere Kriterien eingeführt werden. Tab. 4.3 und Tab. 4.4 zeigen die in der Praxis häufigsten Fälle, sind aber nicht abschliessend.

Tragfähigkeit und  
Gebrauchstauglichkeit  
stärker als Dauer-  
haftigkeit gewichtet

Tab. 4.3: Bestimmung der Zuverlässigkeit von Rückhaltewerken im Transitbereich für ein bestimmtes Szenario unter Berücksichtigung der häufigsten, in der Praxis relevanten Kriterien (nr = nicht relevant für die Massnahme; ? = je nach Situation ja/nein)

Werk	Kriterien										Erfüllung von			
	Unterhalt	gute Bauausführung	Verankerung i. O. (vgl. Tab. 4.5)	Geotechn. Stabilität erfüllt	Keine Schäden (Erosion)	Keine Schäden an Bauteilen	Restnutzhöhe gewährleistet	Überrollgefahr gering	keine nicht-zurückgehaltenen Ereignisse bekannt	genügend Lichtraumprofil	Tragsicherheit	Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit	Zuverlässigkeit
flexibles Netz	ja	ja	ja	nr	nr	ja	ja	nr	ja	nr	ja	ja	ja	hoch
typengeprüft	ja	ja	?	nr	nr	ja	ja	nr	ja	nr	teilweise	teilweise	teilweise	eingeschränkt
flexibles Netz mit Werkangaben	ja	ja	?	nr	nr	ja	nein	nr	ja	?	teilweise	teilweise	ja	eingeschränkt
starre Netze	ja	ja	ja	nr	nr	ja	ja	nr	ja	ja	ja	ja	ja	hoch
typengeprüft	ja	ja	?	nr	nr	ja	?	nr	ja	?	teilweise	teilweise	ja	eingeschränkt
flexible oder starre Netze ohne Werkangaben, nicht typengeprüft	ja	?	?	nr	nr	ja	nein	nr	ja	?	nein	teilweise	teilweise	gering
Erdämme mit bergseitiger Böschung > 40°	ja	ja	nr	ja	ja	ja	nr	nr	nr	ja	ja	ja	ja	hoch
	ja	ja	nr	nein	nein	ja	nr	ja	nr	ja	teilweise	ja	ja	eingeschränkt
Erdämme mit bergseitiger Böschung < 40°	ja	ja	nr	ja	ja	ja	nr	nr	nr	?	ja	teilweise	ja	eingeschränkt

Tab. 4.4: Bestimmung der Zuverlässigkeit von Verbaumasnahmen im Ausbruchbereich unter Berücksichtigung der häufigsten, in der Praxis relevanten Kriterien  
(nr = nicht relevant für die Massnahme; ? = je nach Situation ja/nein)

Werk (häufig auch kombiniert)	Kriterien							Erfüllung von			
	Unterhalt	Gute Bauausführung	keine Bauausfälle an Bauteilen, keine Sackbildungen	Nägels i. O. (vgl. Tab. 4.5)	Verankerung i. O. (vgl. Tab. 4.5)	keine Ausbrüche bekannt	Tragsicherheit	Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit	Zuverlässigkeit	
Netzabdeckungen - PVC - Stahl	ja	ja	ja	?	nr	?	teilweise	teilweise	teilweise	eingeschränkt bis gering	
	ja	ja	ja	?	nr	?	teilweise	teilweise	teilweise	eingeschränkt	
Netz + Nägel + Gunit	ja	ja	ja	?	nr	ja	ja	ja	ja	hoch	
Verankerung von grossen Felsmassen, Unterfangungen mit Beton	ja	ja	ja	nr	ja	ja	ja	ja	ja	hoch	

Wartung, Unterhalt, Ersatz vorausgesetzt	Wartung und Unterhalt werden gemäss Grundsatz 6 vorausgesetzt. Dies bedeutet, dass nach Sturzereignissen Reparaturen kurzfristig vorgenommen werden und dass die Dauerhaftigkeit durch Ersatz korrodierter oder verwitterter Teile einigermaßen gewährleistet wird. Die Netze neueren Datums, d.h. ca. ab 2001, sollten typengeprüft gemäss BUWAL (2001) sein. In der Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag wurde ein standardisierter Prüfungsablauf veröffentlicht.
Typengeprüfte Werke i.d.R. mit hoher Zuverlässigkeit	Bei typengeprüften Werken kann in der Regel von einer hohen Zuverlässigkeit ausgegangen werden, immer vorausgesetzt dass das Schutznetz auf das massgebende Szenario resp. Gefährdungsbild ausgerichtet ist. Vor Einführung der Typenprüfung arbeiteten gute Lieferfirmen z. T. mit eigenen Tests und strengen Anforderungen (Werkangaben). Auch hier kann häufig eine befriedigende Zuverlässigkeit erwartet werden. Alte Werke ohne jegliche Werkangaben müssen sehr zurückhaltend eingestuft werden. Hier dürften die Anforderungen häufig nicht erfüllt sein.
Verankerung muss auftretende Kräfte aufnehmen können	Die bei Netzen bei der Foundation und bei den Abspannseilen eingesetzten Anker sind ein wichtiger Bestandteil der Anlagen. Ein qualitativ noch so gutes Schutznetz kann seine Aufgaben nur erfüllen, wenn die Verankerungen die auftretenden Kräfte aufnehmen können. Es kommt hier immer wieder zu Schäden in Folge ungenügender Tragfähigkeit. Dieses wichtige Element ist zudem verborgen und nicht einfach zu beurteilen. Die Ergänzung zur Typenprüfung 2001 betreffend Verankerung und Fundierung von Schutzbauten gegen Steinschlag (Entwurf 2008) gibt hierzu wichtige Ansätze. In Tab. 4.5 sind die massgebenden Kriterien dargestellt.
Schutznetze häufig mit Unsicherheiten verbunden	Flexible Schutznetze sind heute die am häufigsten eingesetzte Schutzmassnahme bei Sturzgefahren. Netze bergen aber häufig Unsicherheiten, welche die Zuverlässigkeit einschränken können. Fachmännisch erstellte Erddämme sind diesbezüglich wesentlich sicherer einzustufen.
Erfahrungen aus Ereignissen	<p>Ein weiteres, unter Umständen sehr aussagekräftiges Kriterium ist das Verhalten der Schutzmassnahme bei Ereignissen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Hat das Werk früheren Sturzereignissen standgehalten?</li> <li>– Haben Komponenten das Werk übersprungen oder überrollt?</li> <li>– Welche Schäden sind entstanden?</li> </ul> <p>Antworten auf diese Fragen können Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit bestätigen, in Zweifel ziehen oder gar als ungenügend einstufen.</p> <p>Schutzmassnahmen im Ausbruchbereich sind oft aufwendiger als Rückhaltewerke im Transitbereich. Ausbruchsicherungen können aber eine wichtige oder sogar notwendige Ergänzung zu Rückhaltewerken sein, vor allem in folgenden Fällen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Ausbrechende Komponenten sind so gross, dass sie im Transitbereich energetisch nicht beherrscht werden können.</li> <li>– Die Topographie hat zur Folge, dass grosse, nicht beherrschbare Flughöhen im Transitbereich entstehen (Beispiel Jungfraujoch, Abb. 2.1).</li> </ul>

Tab. 4.5: Kriterien zur Beurteilung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Ankern. Bewertung: Bei mehr als 5 Nein Antworten muss die Tragsicherheit der Anker als ungenügend eingestuft werden.

Thema	Kriterium	Fragen	Antwort Ja / Nein
Allgemein	Plangrundlagen Berechnungen, Protokolle	Sind gute und vollständige Unterlagen vorhanden? (Situationsplan mit Ankernummern, Bemessung, Bohr- und Injektionsprotokolle etc.)	
	Identifikation	Kann der zu beurteilende Anker eindeutig den Unterlagen zugeordnet werden?	
	Abmessungen	Stimmen die vorhandenen Abmessungen mit den Unterlagen überein?	
Tragsicherheit	Projekt	Stimmen die Berechnungen für den Tragsicherheitsnachweis?	
	Versuche	Sind zur Bestimmung der Ankerlänge Ausziehversuche durchgeführt worden?	
	Ausführung	Sind in den Bohr- und Injektionsprotokollen keine Unregelmässigkeiten festzustellen?	
		Sind nach dem Einbau an einzelnen Ankern Zugproben durchgeführt worden?	
	Zustand	Ist der sichtbare Teil des Ankers schadenfrei?	
Sind keine Verformungen sichtbar?			
Gebrauchstauglichkeit	Zustand	Kann eine hohe Zuverlässigkeit vermutet werden? (Sind keine Bodenbewegungen, Bodenerosionen vorhanden?)	
Dauerhaftigkeit	Korrosionsschutz	Ist der Anker mit Korrosionsschutzstufe 1 geschützt?	
	Korrosionsschutz	Ist der Anker mit Korrosionsschutzstufe 2 geschützt?	

Die Bestimmung der Zuverlässigkeit von Schutzmassnahmen im Ausbruchbereich (Tab. 4.4) kann nach ähnlichen Kriterien erfolgen wie bei den Rückhaltewerken (Tab. 4.3). Die Beurteilung von nicht einsehbaren Vernagelungen und Verankerungen ist aber auch hier schwierig (Tab. 4.5).

Schutzmassnahmen im Ausbruchbereich ähnlich beurteilbar

Aus der Bestimmung der Einzelmassnahmen resp. des Gesamtsystems bei Kombinationen ergibt sich das weitere Vorgehen. Für die Wirkungsbeurteilung sollen nur noch Massnahmen mit eingeschränkter bis hoher Zuverlässigkeit berücksichtigt werden. Massnahmen mit geringer Zuverlässigkeit (meist in Folge von verminderter Tragfähigkeit resp. Gebrauchstauglichkeit) sollen nicht weiterverfolgt werden.

Massnahmen geringer Zuverlässigkeit nicht weiterverfolgen

### 4.3 Die Zuverlässigkeit der Massnahme Schutzwald

Gute Wirkung im  
Transitbereich

Obschon Wald durch die Natur bereitgestellt wird, kann diese ähnlich wie eine technische Massnahme beurteilt werden. Wald hat bei Sturzgefahren häufig eine wichtige Schutzfunktion, sei es allein oder im Verband mit ergänzenden technischen Massnahmen. Schutzwald entfaltet seine Wirkung gegen Steinschlag im Transitbereich und hier im grösseren Verbund. Im Ausbruchbereich des Steinschlages hat Wald praktisch keine oder sogar eine negative Wirkung, indem er selbst Steinschlag auslösen kann.

Zuverlässigkeit  
qualitativ beurteilbar

Die Anforderungen des Waldes bezüglich Steinschlag können NaiS (Frehner et al., 2005) entnommen werden (Tab. 4.6). Dank den Vorgaben von NaiS kann die Zuverlässigkeit und damit die Versagenswahrscheinlichkeit von Wald vorwiegend qualitativ beurteilt werden. Bei Steinschlagprozessen, wo die Schutzwirkung des Waldes durch zahlreiche Interaktionen Stein-Baum erreicht wird, sind Stammzahlen und -durchmesser (Baumholz) wichtig.

Tab. 4.6: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Steinschlag (NaiS, Frehner et al., 2005).

Ort	Potentieller Beitrag des Waldes	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr minimal	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr ideal
<b>Entstehungsgebiet</b>	<b>Mittel</b>	<b>Stabilitätsträger</b> Keine instabilen, schweren Bäume	
<b>Transitgebiet</b>	<b>Gross</b> Steine bis 0.05 m <sup>3</sup> (Durchmesser etwa 40 cm)	<b>Gefüge horizontal:</b> Mind. 400 Bäume/ha mit BHD > 12 cm	<b>Gefüge horizontal:</b> Mind. 600 Bäume/ha mit BHD > 12 cm
		evt. auch Stockausschläge	
		<b>Gefüge vertikal</b> Zieldurchmesser <sup>2</sup> angepasst	
	Steine 0.05 bis 0.20 m <sup>3</sup> (Durchmesser etwa 40 bis 60 cm)	<b>Gefüge horizontal:</b> Mind. 300 Bäume/ha mit BHD > 24 cm	<b>Gefüge horizontal:</b> Mind. 400 Bäume/ha mit BHD > 24 cm
		<b>Gefüge vertikal</b> Zieldurchmesser <sup>2</sup> angepasst	
	Steine 0.20 bis 5.00 m <sup>3</sup> (Durchmesser etwa 60 bis 180 cm)	<b>Gefüge horizontal:</b> Mind. 150 Bäume/ha mit BHD > 36 cm	<b>Gefüge horizontal:</b> Mind. 200 Bäume/ha mit BHD > 36 cm
	<b>Zusätzliche für alle Steingrössen:</b>	<b>Gefüge horizontal:</b> Bei Öffnungen <sup>1</sup> in der Fallinie Stammabstand < 20 m Liegendes Holz und hohe Stöcke: als Ergänzung zu stehenden Bäumen, falls keine Sturzgefahr	
		Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt
<b>Auslauf- und Ablagerungsgebiet</b>	<b>Gross</b> Der wirksame Mindestdurchmesser der Bäume ist deutlich geringer als im Transitgebiet und liegendes Holz ist immer wirksam	<b>Gefüge horizontal</b> Mind. 400 Bäume/ha mit BHD > 12 cm	<b>Gefüge horizontal</b> Mind. 600 Bäume/ha mit BHD > 12 cm
		<b>Gefüge horizontal:</b> Bei Öffnungen <sup>1</sup> in der Fallinie Stammabstand < 20 m evt. auch Stockausschläge	
		<b>Gefüge vertikal</b> Zieldurchmesser angepasst liegendes Holz und hohe Stöcke: als Ergänzung zu stehenden Bäumen	
		Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt

Bei den meisten Schutzwäldern wird die Tragsicherheit wie auch die Dauerhaftigkeit durch ihre Existenz über lange Zeit belegt. Schwieriger zu beurteilen sind gestörte Waldflächen, sei es durch Käferbefall oder Windwurf. Hier sind die Erfahrungen noch gering.

gestörte Waldfläche  
schwer beurteilbar

Die hier vorgenommene qualitative Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit wird sich in Schritt 3 durch quantitative Analysen konkretisieren.

Die Dauerhaftigkeit eines Waldes kann im Allgemeinen als erfüllt betrachtet werden, sofern mittelfristig ein befriedigender Zustand erwartet werden kann. Die Schutzwirkung kann hier mit waldbaulichen Massnahmen aufrechterhalten werden. Eine Störung durch das Gefährdungsbild Sturm und Käferbefall kann gemäss NaiS vernachlässigt werden, weil solche Ereignisse relativ selten sind. Das Gefährdungsbild der möglichen partiellen Zerstörung des Waldes durch Felssturz, Lawine oder Rutschung muss aber berücksichtigt werden. Ein solches Gefahrenpotenzial kann die Dauerhaftigkeit in Frage stellen. Tab. 4.7 illustriert bei Schutzwäldern häufig vorkommende Fälle.

Schutzwald i.d.R.  
dauerhaft

Tab. 4.7: Häufige Fälle bezüglich der Zuverlässigkeit von Wald.

	Tragfähigkeit	Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit	Zuverlässigkeit
Anforderungsprofil NaiS erfüllt				
- mit Waldpflege	ja	ja*	ja	hoch
- ohne Waldpflege	ja	ja*	nein	eingeschränkt
Lücken im Schutzwald durch Schäden	nein	nein**	nein	gering**
Überalterter Wald mit geringer Stammzahl und schwieriger Verjüngung	ja	nein**	nein	eingeschränkt
Zerstörung durch Grossereignis möglich (Lawine, Felssturz, Rutschung)	nein	nein	nein	gering

\* zu quantifizieren in Schritt 3

\*\* vorübergehend, Resilienz möglich

Das Resultat der Bestimmung der Zuverlässigkeit der Schutzmassnahmen besteht in einer Deklaration einer hohen, eingeschränkten und geringen Zuverlässigkeit gemäss Abb. 4.7. Bei einer hohen Zuverlässigkeit können die Massnahmen als voll wirksam betrachtet werden. Hier sind die Anforderungen an Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit erfüllt. Bei einer eingeschränkten Zuverlässigkeit besteht eine reduzierte Wirkung der Massnahme. Dies muss bei der Wirkungsbeurteilung entsprechend berücksichtigt werden.

Resultat: hohe,  
eingeschränkte und  
geringe Zuverlässigkeit

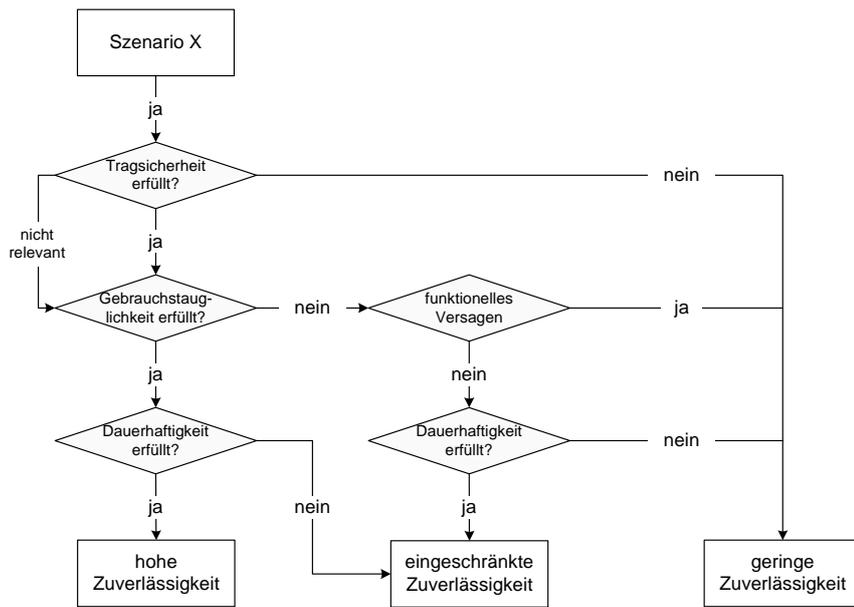


Abb. 4.7: Bestimmung der Zuverlässigkeit aufgrund von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

Geringe Zuverlässigkeit: Versagen zu erwarten

Bei einer geringen Zuverlässigkeit muss ein Versagen der Schutzmassnahmen erwartet werden. Es besteht keine reduzierende Wirkung auf das Gefahrenpotenzial. Die Schutzmassnahme wird nicht weiter verfolgt. Es muss vielmehr überprüft werden, ob die Massnahme nicht sogar negative Auswirkungen auf den Prozessablauf haben kann. In diesem Fall ist dies zu deklarieren.

## 5. Wirkungsbeurteilung

### 5.1 Vorgehen

Das Vorgehen bei der Wirkungsbeurteilung ist schematisch im Diagramm Abb. 5.1 dargestellt.

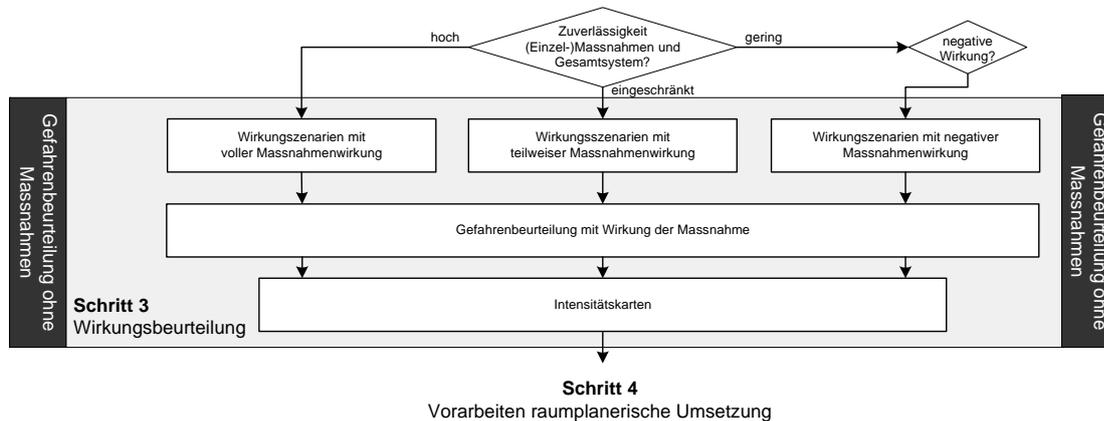


Abb. 5.1: Beurteilung der Wirkung einer Schutzmassnahme.

Die Schutzmassnahmen mit Berücksichtigung der Zuverlässigkeit (evtl. Reduktion der Funktionstüchtigkeit) greifen in bestehenden Ereignisablauf in die Szenarien ein. Ist eine Kette von Schutzmassnahmen vorhanden, entsteht nach jeder Massnahme eine neue Situation bezüglich der Szenarien. Dabei ist auch ein mögliches Versagen einer Massnahme zu beurteilen. Am Ende resultieren Szenarien nach wirksamen Massnahmen.

Bei mehreren Massnahmen jeweils neue Szenarien bilden

Bei den Szenarien muss auch das Extremereignis berücksichtigt werden. Das Extremereignis kann als Überlastfall auf die Massnahme wirken.

Extremereignis berücksichtigen

Bei einer hohen Zuverlässigkeit der Schutzmassnahme wird die Gefahr unter Berücksichtigung der vollen Wirksamkeit der Massnahme beurteilt. Es resultieren Intensitätskarten nach Massnahmen. Dabei können Sturzmodellierungen unter Einbezug der Massnahme eingesetzt werden (Abb. 5.4). In der Praxis wird gerade bei Rückhaltewerken gegen Sturzgefahren die Gebrauchstauglichkeit häufig nicht vollumfänglich erfüllt sein, d.h. für bestimmte Szenarien ist ein funktionelles Versagen infolge ungenügender Werkhöhe oder Energieaufnahme möglich. Auch die partielle Wirkung der Massnahme kann aber eine Reduktion des Gefahrenpotenzials zur Folge haben, welches auch hier mit den entsprechenden Intensitätskarten abgebildet werden kann.

Hohe Zuverlässigkeit führt zu voller Berücksichtigung

Bei der Schutzmassnahme Wald ist dies besonders augenfällig. Da dieser erst im grösseren Verbund seine Wirkung entfaltet, ist seine Gebrauchstauglichkeit massgeblich auch von der Waldstrecke abhängig. Mit guten Steinschlagprogrammen kann die Gebrauchstauglichkeit resp. die Schutzwirkung von Wald quantifiziert werden.

Gebrauchstauglichkeit bei Wald von Strecke abhängig

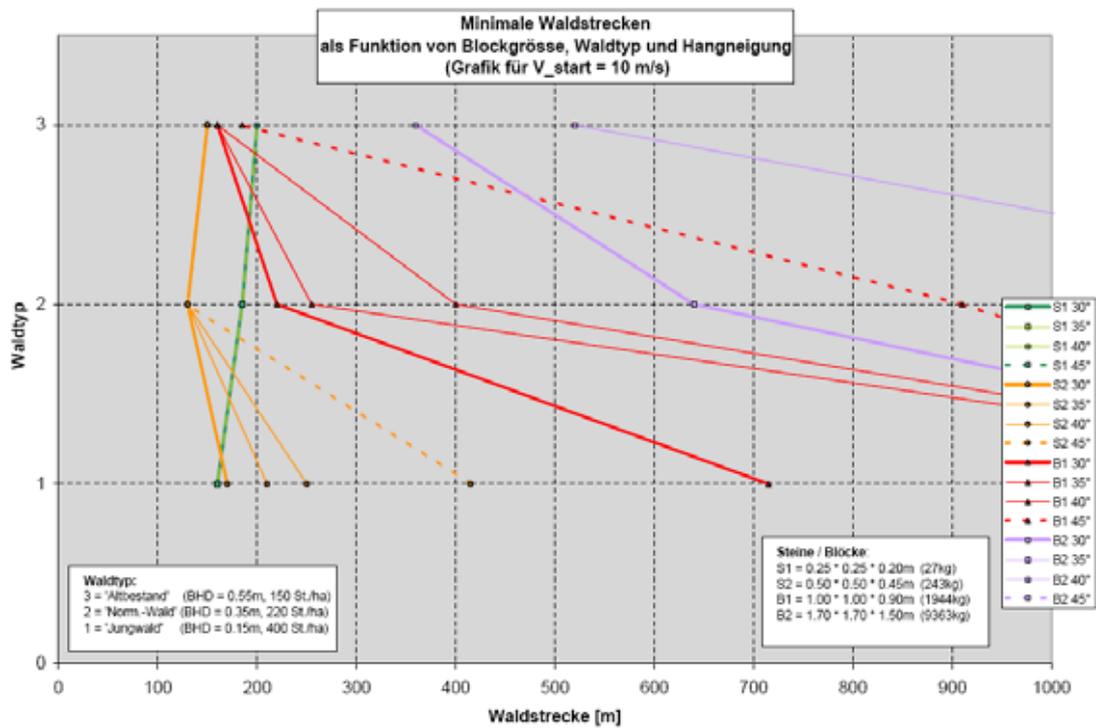


Abb. 5.2: Beispiel einer Steinschlagmodellierung zur Ermittlung minimaler Waldstrecken zum Rückhalt von Sturzkomponenten als Funktion von Blockgröße, Waldtyp und Hangneigung (Eintrittsgeschwindigkeit 10 m/s). Quelle: GEOTEST.

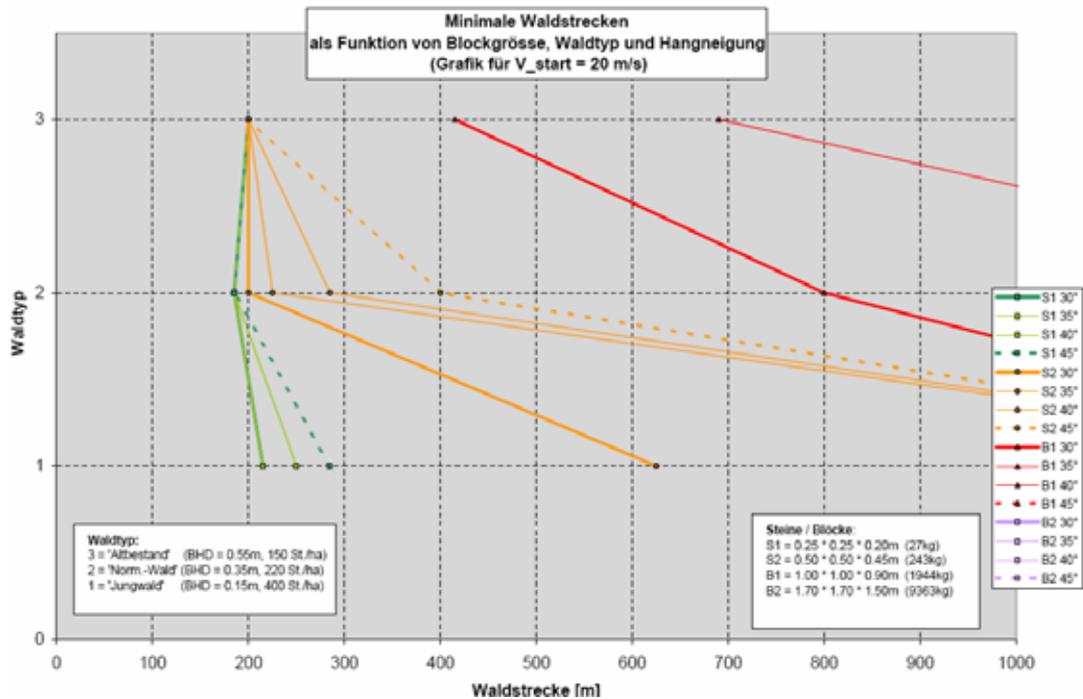


Abb. 5.3: Beispiel einer Steinschlagmodellierung zur Ermittlung minimaler Waldstrecken zum Rückhalt von Sturzkomponenten als Funktion von Blockgröße, Waldtyp und Hangneigung (Eintrittsgeschwindigkeit 20 m/s). Quelle: GEOTEST.

Abb. 5.2 und Abb. 5.3 zeigen beispielhaft Ergebnisse von Steinschlagmodellierungen in Waldgebieten unter verschiedenen Randbedingungen (Waldtyp, Hangneigung, Eintrittsgeschwindigkeit, Blockgrösse). Dabei ist zu erkennen, dass je nach Bedingung eine minimale Waldstrecke vorhanden sein muss, um eine genügende Schutzwirkung zu erreichen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass je nach Blockgrösse erst mehrere bremsende Interaktionen Block-Baum zu einem Rückhalt des Blockes führen. Aus diesem Grunde ist es unerlässlich, die in Schritt 2 qualitativ bestimmte Gebrauchstauglichkeit des Waldes durch eine Modellierung zu quantifizieren, wobei aktuellste Fachgrundlagen (WSL, 2004, Jonsson 2007) und Modelle anzuwenden sind.

Bei Schutzwald  
minimale Strecke nötig

In der Praxis wird häufig der Fall auftreten, dass die von Natur aus bestehende Schutzmassnahme Wald durch technische Massnahmen ergänzt werden. Hier ist es zweckmässig, vorerst die Wirkung des Waldes zu bestimmen und in einem 2. Schritt die Wirkung der technischen Massnahmen. Es resultieren Intensitätskarten vor und nach technischen Massnahmen. In gleicher Weise wird bei Verbauungen des Ausbruchgebietes verfahren, welche das Gefahrenpotenzial mehr oder weniger reduzieren und dann z.T. mit nachgeschalteten Massnahmen im Transitbereich kombiniert werden.

Bei Kombination zuerst  
Waldwirkung  
bestimmen

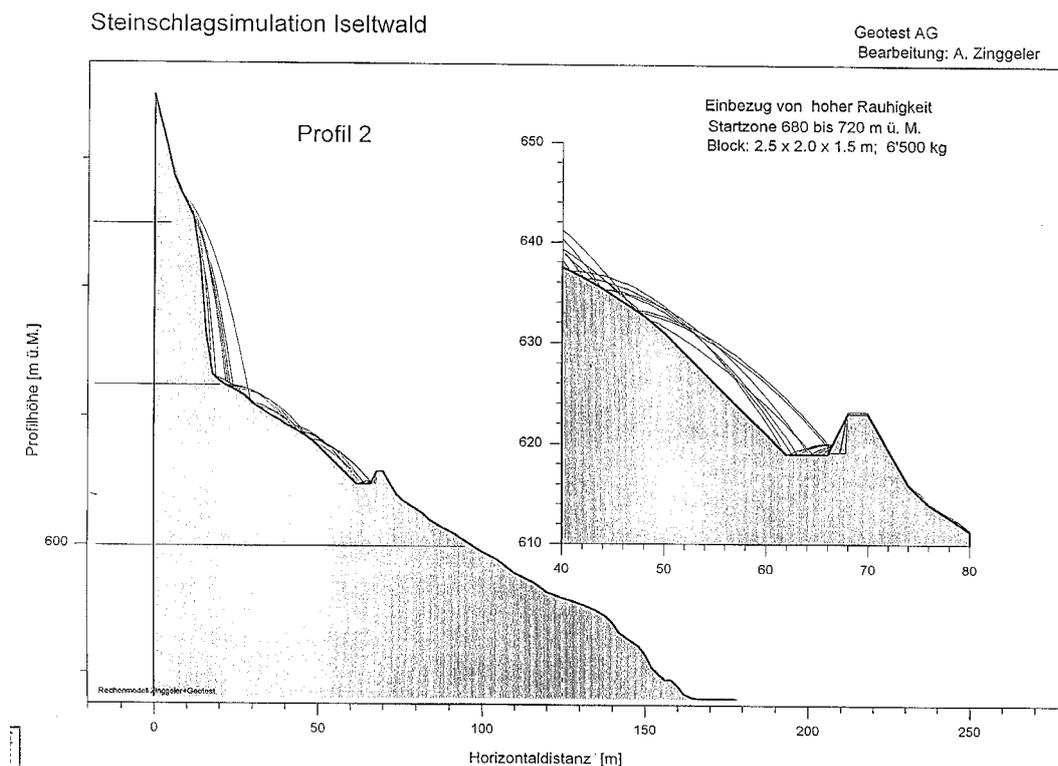
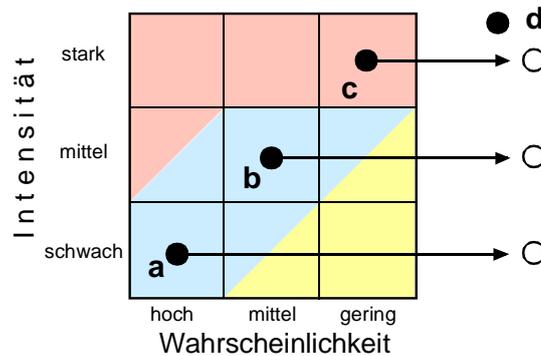


Abb. 5.4: Beispiel einer Blockschlagmodellierung mit Wirkung der Massnahme Damm.

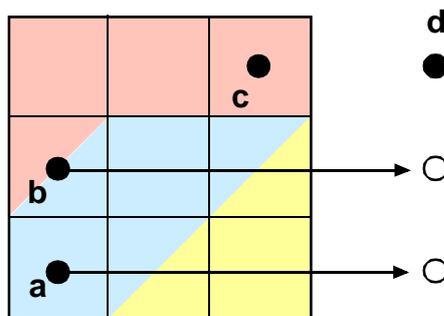
## 5.2 Neue Szenarien nach wirksamen Massnahmen

Beispiele

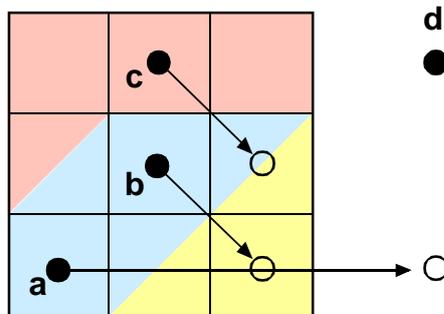
Nachfolgend sind denkbare Ergebnisse einer solchen Analyse dargestellt. a, b, c, d stehen für Sturzsznarien 30, 30 - 100, 100 - 300 Jahre und Extremereignis (ausgefüllte Kreise: Ausgangslage, leere Kreise: Situation nach Massnahme).



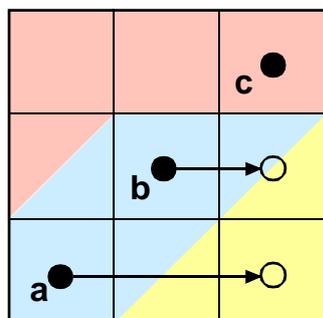
**Beispiel 1:**  
Schutzmassnahme beherrscht Szenarien a – c vollumfänglich.  
Sehr seltenes Extremereignis wird nicht beherrscht. Ein solches würde die Wirkung der Massnahme bezüglich Szenarien a, b, c beeinträchtigen.



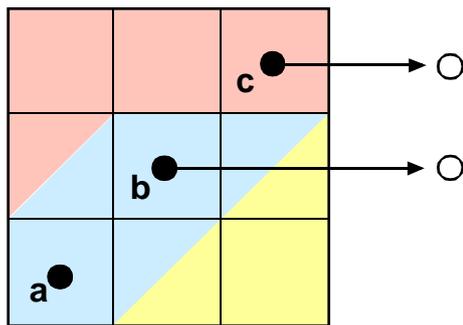
**Beispiel 2:**  
Schutzmassnahme wirkt voll gegen Szenarien a und b, jedoch nicht gegen c und d. Energie von c und d zu hoch.



**Beispiel 3:**  
Schutzmassnahme wirkt voll gegen Szenarium a und teilweise durch Verminderung der Intensität und Eintretenswahrscheinlichkeit von b und c. Der Damm kann in seltenen Fällen mit Verminderung der Energie überrollt werden.



**Beispiel 4:**  
Ein Teil der Sturzkomponenten wird durch das Werk zurückgehalten. In seltenen Fällen überspringen Blöcke von a und b das Werk (= geringere Eintretenswahrscheinlichkeit). c wird nicht beherrscht.



**Beispiel 5:**  
 Durch einen Verbau im Abbruchgebiet wird die Gefahr von b und c eliminiert. Kleine Steine können weiterhin ausbrechen (a).

Dies ist nur eine beispielhafte Auswahl einiger Fälle. In der Praxis sind weitere Möglichkeiten denkbar. Extremereignisse liegen nicht immer ausserhalb des I / W-Diagramms.

### 5.3 Unsicherheiten des Gesamtsystems

Unsicherheiten ergeben sich sowohl von der Prozess- wie von der Massnahmen-seite. Sie liegen in der Natur der Sache und sind unvermeidlich. Tab. 5.1 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Quellen der Unsicherheiten. Der Gutachter muss diese Unsicherheiten deklarieren und transparent machen. Im Weiteren kann er sie - nachvollziehbar - bei der Gefahrenbeurteilung nach Massnahmen berücksichtigen. Fälle mit hohen Unsicherheiten auf der Prozessseite und einer geringen Zuverlässigkeit bzw. einer geringen Wirkung im Überlastfall sollen nicht weiter verfolgt werden.

Unsicherheiten deklarieren

Tab. 5.1: Unsicherheiten im Gesamtsystem, Prozess- und Massnahmensseite.

Prozessseite			
Unsicherheit	gering	mässig	hoch
Unsicherheiten Prozess	gemäss	gemäss Tab. 1.2	gemäss Tab. 1.2
Unsicherheiten Extremereignis	Gefahrenpotential bekannt und quantifizierbar	Gefahrenpotential mit Unsicherheiten behaftet gemäss Tab. 1.3, teilweise quantifizierbar	Gefahrenpotential nicht quantifizierbar
Massnahmensseite			
Wirkung	hoch	eingeschränkt	gering
Zuverlässigkeit	gemäss Tab. 4.3 und Tab. 4.4	gemäss Tab. 4.3 und Tab. 4.4	gemäss Tab. 4.3 und Tab. 4.4
Überlastfall	Beherrschung des Extremereignisses durch Massnahme gewährleistet	Beherrschung des Extremereignisses durch die Massnahme mit Unsicherheiten	Extremereignis kann Massnahme zerstören oder stark beschädigen

## 6. Nachvollziehbarkeit

Die Berücksichtigung von Schutzmassnahmen soll transparent und nachvollziehbar erfolgen. Die Ergebnisse der Analysen sollen gemäss den 3 Schritten sauber dokumentiert werden. Die neue Gefahrenkarte muss den geforderten allgemeinen Qualitätskriterien genügen.

Saubere Dokumentation

## 7. Fallbeispiel Steinschlagnetz Gersau LU

### 7.1 Grob beurteilung

#### 7.1.1 Gefahrensituation und Prozesskenntnisse

Mehrere Häuser  
gefährdet

In Bezirk Gersau sind im Gebiet „Tal“ mehrere Häuser durch Stein- und Blockschlag gefährdet. Einige steile direkt darüber liegende Felsbänder des Gersauer Stocks sind intensiv zerklüftet und von einem wirksamen Trennflächengefüge zerlegt. Dies bewirkt Abbrüche von unterschiedlicher Grösse und Reichweite.

2005 Erstellung  
Schutznetze

1999 wurde ein geologisches Gutachten in Auftrag gegeben mit dem Ziel die Intensität der Gefährdung der Häuser aufzuzeigen und Massnahmen zur Sanierung vorzuschlagen. Die Massnahmen sahen mehrere, verschiedene Schutznetze vor. Die Schutznetze sind im Jahr 2005 erstellt worden. Im Folgenden wird nun auf diese Steinschlagschutznetze eingegangen und ihre Wirkung als Grundlage für die Berücksichtigung in der Raumplanung beurteilt. Abb. 7.1 zeigt die einzelnen Sturzbahnen der Steine und Blöcke und die Lage der Schutznetze.

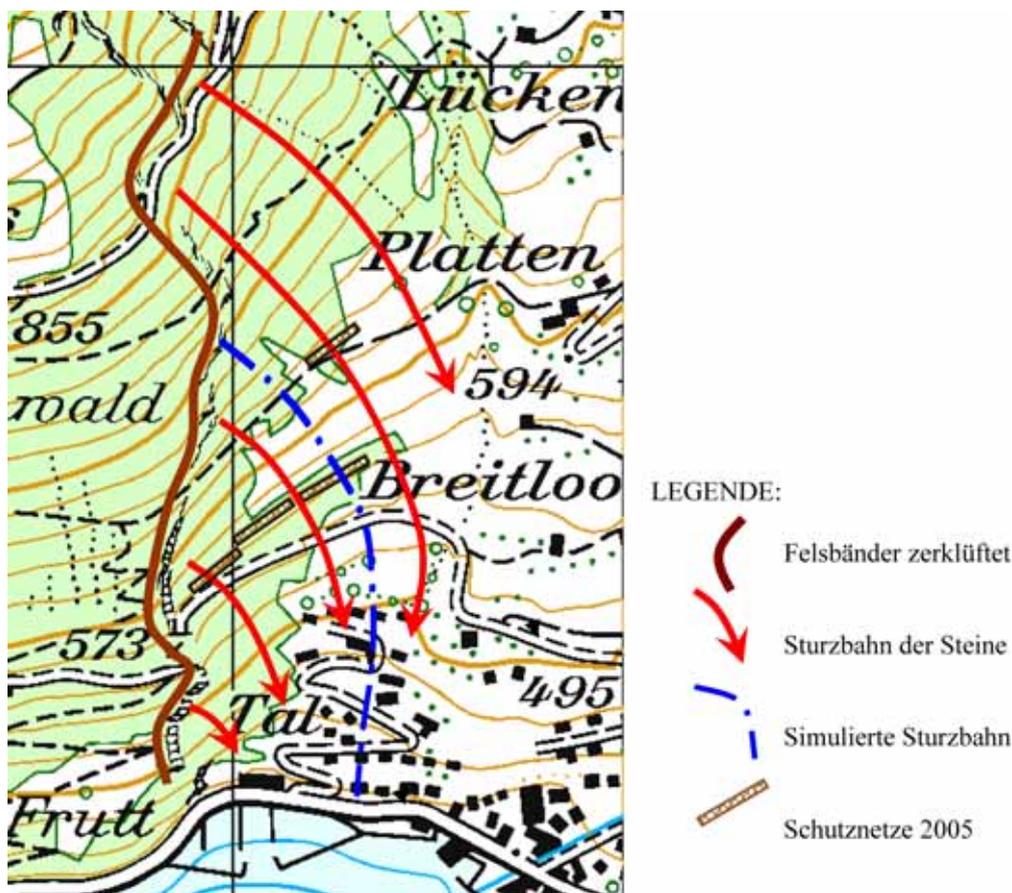


Abb. 7.1: Sturzbahnen der Steine und Lage der Schutznetze im Gebiet Tal.

Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie (Ja082265).

### 7.1.2 Schutznetz und Verfügbarkeit

Die Grundsätze zur Berücksichtigung von Schutzmassnahmen sehen vor, dass diese permanent verfügbar und ihre Dauerhaftigkeit mit üblichen Unterhalt mindestens 50 Jahre betragen soll. Die Verfügbarkeit von Schutznetzen ist, streng genommen, generell nicht dauernd gewährleistet. Sobald eine mittlere oder grössere Belastung stattfindet, wird die Nutzhöhe der Netze reduziert und nachfolgende Steine oder Blöcke können die Netze an der betroffenen Stelle passieren, ohne, dass sie in ihrer Bewegung gehindert werden.

Nach Belastung  
Schutzhöhe reduziert

Je nach Auslegung des beschriebenen Grundsatzes könnte die weitere Bearbeitung dieser Beurteilung hier abgebrochen werden, weil diese Schutzmassnahme nicht permanent verfügbar ist.

Daher keine permanente Verfügbarkeit

Auch die geforderte Dauerhaftigkeit von 50 Jahren ist bei Schutznetzen generell in Frage gestellt. In den aktiven Steinschlagzonen finden dauernd Prozesse mit häufigen Ereignissen statt. Diese füllen im Laufe der Zeit die Netze und es bedarf grosser Unterhaltsanstrengungen damit die Netze frei von Ablagerungen bleiben. Sind Ablagerungen im Netz vorhanden, wird die Funktion des Netzes eingeschränkt und die Dauerhaftigkeit ist nicht mehr gegeben.

Keine 50 jährige Dauerhaftigkeit

Trotz diesen eher negativen Voten werden die im Jahr 2005 erstellten Schutznetze einer Grobbeurteilung unterzogen. Dazu müssen eine Reihe von Bedingungen erfüllt werden.

### 7.1.3 Raumwirksamkeit

Den erstellten Schutznetzen kann durch ihre spezifische Anordnung und Grösse eine räumliche Wirkung attestiert werden. Prinzipiell schützen die Netze auf einer Breite von zirka 150 m das darunter liegende Wohngebiet vor Steinschlag.

Räumliche Wirkung gegeben

### 7.1.4 Gesamtkonzept

Ein weiterer Grundsatz ist, dass jede Schutzmassnahme in ein Gesamtkonzept eingebunden ist. In diesem Beispiel wird der Schutz des Wohngebietes durch die linienförmige Anordnung der Schutznetze gewährleistet. Bei diesem linienförmigen Konzept, kann nicht von einem Gesamtkonzept gesprochen werden. Ein Gesamtkonzept enthält verschiedene Schutzstufen und nachfolgende Schutzmechanismen. Sobald ein Werk ausfällt oder überlastet wird, tritt eine andere Massnahme in Aktion, um ein allfälliger Schaden trotzdem zu verhindern oder mindestens zu begrenzen.

Kein Gesamtkonzept

### 7.1.5 Lebensdauer

Abgesehen von der oben beschriebenen Problematik mit dem Hinterfüllen der Netze im Verlaufe der Zeit ist die geforderte Lebensdauer der Massnahme mit 50 Jahren sehr hoch. Das Baumaterial für Schutznetze ist Stahl in verschiedenen Ausführungen. Dieser Stahl ist trotz Korrosionsschutz einem Alterungsprozess unterworfen. Millimeterdünne Einzelteile sind mit zentimeterdicken Seilen verbunden und diese werden filigran und flexibel über die Stützen in den Fundamentpunkten verankert. Diese Konstruktionsart ist nicht so robust wie beispielsweise stählerne Lawinerverbauungen. Die ältesten Lawinerverbauungen aus Stahl sind heute zirka 50 jähig und bei solchen Werken kann abgeschätzt werden, was eine Lebensdauer von 50 Jahren bedeutet.

Stahl ist Alterungsprozess unterworfen

Netze nach 25 ersetzen

Heute sind die ältesten Schutznetze gegen Steinschlag höchstens 30 Jahre alt und sie werden alle und ohne Ausnahme ersetzt. Es ist also ein sehr ehrgeiziges Ziel den eingebauten Schutznetzen mit den Stahlteilen eine Lebensdauer von 50 Jahren zu attestieren. Viel eher müssen auch diese neuen Schutznetze nach 25 Jahren wieder ersetzt werden. Ein teilweiser Ersatz von einzelnen Tragelementen kommt aus unserer Sicht eher weniger in Frage. Aus diesen Gründen kann der geforderten Lebensdauer von 50 Jahren nicht ohne weiteres zugestimmt werden.

### 7.1.6 Kontrolle und Unterhalt

Ablagerungen  
periodisch räumen

Die Kontrolle der Schutznetze und der Unterhalt sind für die Funktionstüchtigkeit zentrale Elemente. Bei einer Belastung wird nicht nur die Wirkungshöhe eingeschränkt sondern auch die wichtigsten Tragelemente beansprucht. Wichtige Tragelemente sind Netz, Tragseile und Bremsen. Die Bremsen nehmen einen grossen Teil der kinetischen Energie der einfallenden Steine auf und müssen beim Erreichen der Kapazitätsgrenzen ersetzt werden. Sie dürfen aber auch nicht unter Steinablagerungen hinter dem Netz „versinken“, sondern müssen jederzeit voll funktionsfähig bleiben. Dies bedingt, dass Ablagerungen hinter Schutznetzen periodisch geräumt werden müssen. Zusätzlich sollte die aufkommende Vegetation, vor allem Sträucher und Bäume, zurück geschnitten werden. Ohne diesen periodischen Unterhalt kann ein Schutznetz nicht die geforderte Energie abbauen. Jedes Tragwerksteil muss voll funktionsfähig bleiben. Fällt ein Tragwerksteil aus, werden die Kräfte verlagert oder steigen übermässig an und es kann zum vorzeitigen Bruch des Schutznetzes kommen. Dabei kann der einfallende Stein nicht abgebremst werden und er wird seinen Sturz unterhalb des Netzes fortsetzen.

Hauseigentümer  
beteiligen sich an  
Genossenschaft

Die Schutznetze in diesem Fallbeispiel sind im Jahr 2005 nach dem neusten Stand der Technik gebaut und erstellt worden. Als Trägerschaft für diese Schutznetze ist eigens eine Flurgenossenschaft gegründet worden. Die Flurgenossenschaft Tal hat in ihren Statuten auch die Kontroll- und Unterhaltsarbeiten geregelt. Jeder Eigentümer von Grundstücken im gefährdeten Perimeter ist per Grundbucheintrag verpflichtet in der Genossenschaft mitzumachen. Es kann also davon ausgegangen werden, dass diese Arbeiten längerfristig ausgeführt werden.

### 7.1.7 Negative Wirkungen

Bei Ablagerungen  
Funktionstauglichkeit  
unterbunden

Negative Wirkungen von Schutznetzen müssen beschrieben werden, sofern sie zusätzliche Gefährdungen darstellen oder andere Einflüsse auf den Prozess bewirken. Auch kann es vorkommen, dass Schutznetze gegen Steinschlag in temporär Wasser führende Runsen gebaut werden. In solchen Runsen können auch Geschiebetransporte stattfinden und das Netz belasten. Solche Ablagerungen bewirken eine Abminderung der Wirkungshöhe des Netzes und die Funktionstauglichkeit für die vorgesehene Belastung wird unterbunden.

Bei den zu beurteilenden Schutznetzen sind keine negativen Wirkungen bekannt.

### 7.1.8 Relevanz

Eingeschränkte  
Relevanz dieser  
Schutznetze

Die zu beurteilenden Schutznetze haben einen Einfluss auf den Prozessraum. Sie wirken bis zu einer bestimmten Grössenordnung der kinetischen Energie der Steine entgegen. Allerdings ist die permanente Verfügbarkeit nach einem ersten Einschlag eines grösseren Blockes kurzfristig nicht mehr gegeben. Nachfolgende kleinere Steine können beim gleichen Ereignis das Schutznetz überspringen. Die linienförmige Anordnung der Schutznetze in nur einer einzelnen Reihe erlaubt nicht von

einem wirkungsvollen Gesamtkonzept zu sprechen. Daher kann diesen Schutznetzen nur eine eingeschränkte Relevanz zugestanden werden. Dennoch wird an diesem Fallbeispiel die Detailbeurteilung der Massnahme durchgeführt.

## 7.2 Massnahmenbeurteilung

### 7.2.1 Grundlagen zum Prozess

Im technischen Bericht zum geologischen Gutachten (Louis, 1999) sind die Ausbruchgebiete als zerklüftete Felsbänder beschrieben. Dabei variieren die Kluftabstände je nach Felsbeschaffenheit und Schichtmächtigkeit von wenigen Dezimetern bis zu Metern. Die Ereignisdokumentation zeigt denn auch viele abgelagerte Steine die kleiner als  $1 \text{ m}^3$  sind. Es ist aber auch schon vorgekommen, dass ein  $5 \text{ m}^3$  grosser Block das Wohngebiet erreicht hat. Mit verschiedenen Simulationen konnte gezeigt werden, dass einzelne Häuser im Wohngebiet einer erheblichen Gefährdung ausgesetzt sind. Weiter unten stehende Häuser weisen noch eine geringe Gefährdung auf (Abb. 7.2).

Häufige Steine  $1 \text{ m}^3$



Abb. 7.2: Gefahrenkarte im Gebiet Tal ohne Schutzmassnahmen.

Im Bereich der heutigen Schutznetze (Kote 580 m ü. M.) sind Simulationen auf einer mittleren Sturzbahn durchgeführt worden. Diese Sturzbahn zeigt im Allgemeinen höhere Werte als die Sturzbahnen westlich oder östlich davon. Den einzelnen Ereignissen sind Stein- und Blockvolumina von  $0.1-10 \text{ m}^3$  zugeordnet worden. Die Berechnungen zeigen, dass Geschwindigkeiten zwischen 15 und 25 m/s auftreten, wobei die Sprunghöhen 1.5-5 m betragen. Die kinetische Energien (Translation + Rotation) der Steine und Blöcke liegen zwischen 30 und 2'000 kJ. Für den Überlastfall mit einer Wiederkehrperiode grösser als 300 Jahre liegt die Energie bei 10'000 kJ. Aus den Resultaten sind diejenigen Werte in Tab. 7.1 dargestellt, die in etwa der 80%-Fraktile entsprechen.

Tab. 7.1: Gefahrenszenarien der mittleren Sprungbahn im Bereich der Netze.

Szenario	a	b	c	d
Wiederkehrperiode	< 30 Jahre	30-100 Jahre	100-300 Jahre	> 300 Jahre
Ereignisse	häufige	mittlere	seltene	extreme
Wahrscheinlichkeit	hoch	mittel	gering	sehr gering
Stein- Blockgrösse (m)	0.5	1.1	1.5	2.5
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.1	1.0	2.5	10
Masse (kg)	250	2'700	7'000	27'000
Geschwindigkeit (m/s)	15	20	22	25
Sprunghöhe (m)	1.5	2.5-3.5	3-4	4-5
Kinetische Energie (kJ)	30	650	2'000	10'000
Intensität	schwach	stark	stark	sehr stark

Unsicherheiten in  
normalem Rahmen

Die Unsicherheiten bei diesen Szenarien liegen in normalem Rahmen. Sie stützen sich auf die Ereignisdokumentation, die 20 Jahre zurück reicht. In diesen Jahren sind mehrere Blöcke mit einem Volumen von 1 m<sup>3</sup> bis ins Wohngebiet vorgedrungen und haben entsprechende Schäden verursacht. Auch wird von einem 20 Tonnen Block gesprochen, der einen Swimmingpool zerstört hat.

### 7.2.2 Grundlagen zum Schutznetz

Bemessungsereignis  
30-100 Jahre

Für die Bemessung der Schutznetze ist von einem mittleren Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von 30-100 Jahren ausgegangen worden. Die Sprunghöhen sind dabei mit 2.5 - 3.5 m berechnet worden. Das Schutznetz in der mittleren Sprungbahn weist eine Bauhöhe von 4 m und eine Kapazität von 1'000 kJ auf. Westlich und östlich liegende Schutznetze sind 3 m hoch und für eine Energie von 500 kJ ausgelegt (Abb. 7.1). Die Netze sind im Jahr 2005 erstellt worden. Dies bedeutet, dass sie nach der Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag zertifiziert worden sind (BUWAL, 2001).

### 7.2.3 Überprüfung des Netzes

Hohe Zuverlässigkeit  
zu erwarten

Die Zertifizierung der Netze bedeutet eine gute Qualität des Konstruktionsmaterials. Die einzelnen Tragwerksteile sind aufeinander abgestimmt und weisen eine gute Tragfähigkeit aus. Das Material als solches und die Konstruktion als Ganzes lässt eine hohe Zuverlässigkeit erwarten.

Oberbau und Verankerungen getrennt beurteilen

Um die Tragsicherheit des Netzes im Feld beurteilen zu können, müssen aber weitere Punkte beurteilt werden. Ein Punkt ist die Qualität der Installation zu beurteilen. Diese wird getrennt für den Oberbau und die Verankerungen durchgeführt. Weiter müssen längerfristig auch die Fragen mit dem Unterhalt und der Kontrolle der Netze beurteilt werden.

### Qualität des Oberbaus

Die Beurteilung der Installation setzt voraus, dass die Montagevorschriften des Herstellers des Netzes bekannt sind. Werden diese nicht eingehalten, können dadurch Fehler eingebaut werden, die ein korrektes Funktionieren der Anlage verhindern. Im vorliegenden Fall kann nur die obere Hälfte des Netzes und der tragenden Teile beurteilt werden. Die untere Hälfte ist von einer Krautschicht überwachsen und kann nicht beurteilt werden (Abb. 7.3). Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Installation der Schutznetze nach den Vorgaben des Herstellers (Isofer AG, Knonau) erfolgt ist. Auch ist das Netz vom Hersteller nach der Installation überprüft und von der Bauherrschaft abgenommen worden. Spontan sind keine Fehler aufgefallen aber die Krautschicht lässt die Frage nach dem Unterhalt aufkommen.

Wegen Krautschicht  
untere Hälfte nicht  
beurteilbar



Abb. 7.3: Schutznetz mit 4 m Höhe und Krautschicht in der unteren Hälfte.

### Unterhalt und Kontrollen

Die Unterhaltsarbeiten werden durch die Flurgenossenschaft Tal vertraglich geregelt. Dazu ist eigens ein Reglement verfasst worden, welches an der Generalversammlung von 12.9.2006 genehmigt wurde. Unterdessen sind erste Unterhaltsarbeiten, wie zurückschneiden von aufkommenden Bäumen und Sträuchern ausgeführt worden.

Unterhaltsarbeiten  
vertraglich geregelt

### Qualität der Verankerungen

Bei der Beurteilung der Verankerungen müssen zwei Bereiche betrachtet werden. Es sind dies einerseits die Qualität der Bauausführung und andererseits der aktuelle Zustand. Beim Bau von Verankerungen ist eine gute Dokumentation des Bauablaufes notwendig. Dazu gehören auch Bohr- und Injektionsprotokolle der einzelnen Anker. Zudem sind zur Bemessung der Tragsicherheit von Ankern Ausziehversuche durchzuführen. Sind solche gemacht worden und stimmen die geforderten Bemessungswerte mit den protokollierten Verankerungslängen überein, kann eine hohe Zuverlässigkeit der Verankerung erwartet werden. Detaillierte Kriterien zur Beurteilung der Verankerung sind in Tab. 4.2 aufgeführt.

Gute Dokumentation  
bei Verankerungen  
notwendig

Für die Verankerungen in unserem Fallbeispiel kann auf Grund der beantworteten Fragen eine hohe Zuverlässigkeit attestiert werden.

### 7.2.4 Zuverlässigkeit des Netzes

Hohe Zuverlässigkeit  
des Netzes

Insgesamt kann diesem Netz eine hohe Zuverlässigkeit attestiert werden. Dies stützt sich auf die Zuverlässigkeit des Konstruktionsmaterials, die gute Bauausführung des Oberbaus und der Verankerung und die vertragliche Regelung des Unterhaltes des Schutznetzes.

## 7.3 Wirkungsbeurteilung

### 7.3.1 Prozessbeurteilung

Durch die Erstellung der Schutznetze werden die in Tab. 7.1 dargestellten Szenarien beeinflusst. Die Szenarien a, b und c werden für die Gefahrenbeurteilung verwendet. Das Szenario d wird als Überlastfall bezeichnet und fällt ausserhalb der angegebenen Grenzen aus. Unterhalb der Netze treten infolge der Wirkung der Netze andere Intensitäten und Eintretenswahrscheinlichkeiten von Ereignissen auf. Je nach dem betrachteten Schutznetz (500 kJ oder 1'000 kJ) ist der Einfluss grösser oder kleiner. In der mittleren Sturzbahn ist ein Netz mit 1'000 kJ montiert und wir betrachten lediglich diesen Einfluss.

Wiederkehrperiode  
< 30 Jahre

Die Ereignisse a mit einer hohen Eintretenswahrscheinlichkeit sollten mit dem Schutznetz unterbunden werden. Sowohl die Intensität als auch die Wahrscheinlichkeit werden noch geringer werden. In Abb. 7.4 ist das Szenario der Ausgangslage (ohne Netz) und das Szenario mit Berücksichtigung der Netze dargestellt.

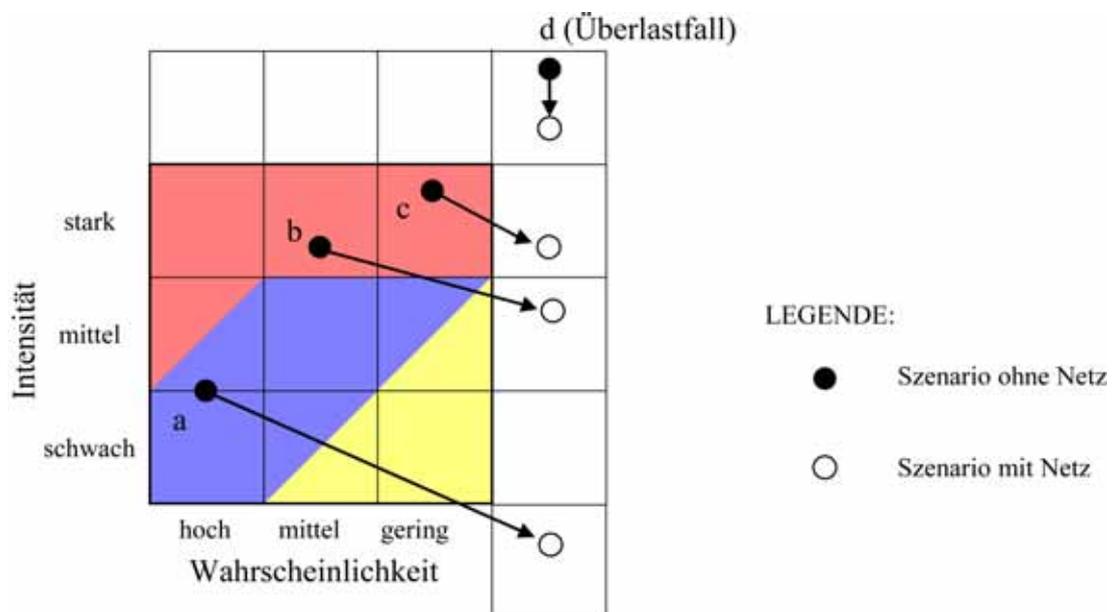


Abb. 7.4: Einfluss der Massnahme auf Intensität und Wahrscheinlichkeit.

Wiederkehrperiode  
30-100 Jahre

Die Ereignisse b mit einer mittleren Eintretenswahrscheinlichkeit sollten mit dem Schutznetz ebenfalls unterbunden werden. Die Eintretenswahrscheinlichkeit wird geringer und die Intensität fällt unter einen Wert von 300 kJ. Dies weil angenommen wird, dass die Hauptbelastung vom Netz aufgenommen wird, aber dennoch kleinere Steine das Netz mit der reduzierten Nutzhöhe überspringen und weiteren Schaden verursachen können.

Das Ereignis c mit geringer Wahrscheinlichkeit und hoher Intensität wird durch das Schutznetz nur noch geringfügig beeinflusst. Die Intensität bleibt stark und auch die Wahrscheinlichkeit bleibt gering.

Wiederkehrperiode  
100-300 Jahre

Ähnlich verhält es sich beim Ereignis d dem Überlastfall. Dieser wird durch das Netz nur unwesentlich beeinflusst. Die kleineren Netze (500 kJ) können auf Grund der grossen Sprunghöhen sogar übersprungen werden. Das 1'000 kJ - Netz wird die Sturzbahn eines Blockes mit hoher Geschwindigkeit nur unmerklich stören. Im besten Fall wird sich die Geschwindigkeit eines solchen Blockes um 2-3 m/s reduzieren.

Wiederkehrperiode  
< 300 Jahre

### 7.3.2 Intensitätskarte

Die Intensitätskarten sind für die Ereignisse respektive die Szenarien a bis d und den verschiedenen Sturzbahnen noch nicht erstellt worden. Um die Schutznetze in der Raumplanung zu berücksichtigen, sind diese notwendig.

Intensitätskarte noch  
nicht erstellt

### 7.3.3 Unsicherheiten

Zudem sind die Unsicherheiten bei dieser Beurteilung zu deklarieren. Vor allem bei der Prozessanalyse sind sowohl die Stein- und Blockgrössen als auch die Eintretenswahrscheinlichkeiten der Szenarien für jede Sturzbahn einzeln zu beschreiben und die Variationen anzugeben.

Unsicherheiten einzeln  
beschreiben

### 7.3.4 Gefahrenkarte

Die Gefahrenkarte für den Bezirk Gersau ist noch nicht erstellt. Ob sie infolge dieser Schutznetze abgeändert wird, ist ebenfalls noch nicht festgelegt worden.

Änderung der  
Gefahrenkarte unklar

Für das Gebiet Tal wurde eine Gefahrenkarte nach Einbau der Netze erstellt (Louis, 2005). Diese geht von einer deutlich reduzierten Gefährdung aus, was der Bauherrschaft auch mitgeteilt wurde.

## 8. Fallbeispiel Steinschlagdamm Weggis LU

### 8.1 Grobbeurteilung (Schritt 1)

#### 8.1.1 Gefahrensituation und Prozesskenntnisse

Über 100 potenzielle  
Sturzkörper

Im Gebiet Laugneri - Horloui in der Gemeinde Weggis ist mit der Vorstudie (2004) über die Gefahrenabklärung ein Schutzdefizit festgestellt worden. Verschiedene Bauzonen und Strassenabschnitte sind durch Sturzprozesse erheblich gefährdet. Über 100 potenzielle Sturzkörper mit unterschiedlicher Disposition gefährden die unterliegenden Gebiete. Aufgrund der hohen Intensitäten der Einwirkungen mussten die Gebiete der roten Gefahrenzone zugeordnet werden.

In der Vorstudie wird detailliert auf die Gefährdungen und die möglichen Schutzmassnahmen in den einzelnen Gebieten eingegangen. Im Gebiet Laugneri war vorgesehen, mit einem Auffangdamm und Schutznetzen der Gefährdung zu begegnen.

Neubeurteilung der  
Gefahren nach  
Hochwasser 2005

Beim Unwetter August 2005 wurden im Gebiet Laugneri 3 Wohnhäuser durch Hangmuren zerstört. In der Folge mussten die Gefahren neu beurteilt und eine solche Gefährdung zusätzlich berücksichtigt werden. Dies hatte sehr direkte Auswirkungen auf das Bauprojekt und die in der Zwischenzeit ausgeführten Schutzbauten.

Sammler und  
Auffangdämme erstellt

Hauptsächlich sind Auffangdämme und Sammler für Hangmuren erstellt worden. Ein Auffangdamm dient dabei aber primär als Schutz gegen Steinschlag und ist dementsprechend auch geplant und gebaut worden. Im Folgenden wird nun nur auf diesen Steinschlagschutzdamm eingegangen (Abb. 8.1).



Abb. 8.1: Steinschlagschutzdamm Laugneri Weggis.

### 8.1.2 Schutzdamm und Verfügbarkeit

Der Schutzdamm ist 2007 nach den gültigen bautechnischen Normen erstellt worden und es kann vermutet werden, dass eine Wirkung für die nächsten 50 Jahre gewährleistet ist. Dies bedeutet, dass keine Materialien oder Werkstoffe verwendet worden sind, die eine kürzere Lebensdauer aufweisen oder sonst wie einem Alterungsprozess unterworfen sind.

Wirkung 50 Jahre  
gewährleistet

### 8.1.3 Negative Wirkungen

Durch den Bau des Schutzdammes sind im Boden die Druckbelastungen partiell erhöht worden. Es muss gewährleistet sein, dass der Boden auch mit dieser zusätzlichen Last stabil bleibt. Die August-Unwetter haben gezeigt, dass der Boden in der Umgebung durch die Infiltration von Wasser oder durch die Erhöhung des Porenwasserdruckes aus dem Gleichgewicht geraten kann und einzelne Stellen abrutschen.

Boden kann aus  
Gleichgewicht geraten

### 8.1.4 Gesamtkonzept und Relevanz

Der Schutzdamm wirkt nicht nur gegen Steinschlag sondern es werden damit auch zukünftige Hangmuren in die mit dem Damm verbundenen Sammler abgeleitet. Diese Prozesse sind aber untergeordnet und beanspruchen den Damm nicht so stark. Sie beeinflussen die Wirkung gegen Steinschlag nur unwesentlich.

Wirkung gegen Hang-  
muren und Steinschlag

### 8.1.5 Fazit

Auf Grund dieser ersten Grobbeurteilung kann diesem Damm eine gute Wirkung gegen Steinschlag attestiert werden und er wird damit als relevante Schutzmassnahme eingestuft, die permanent und über längere Zeit verfügbar ist. Damit sind die Voraussetzungen erfüllt, um den Schritt 2 die Massnahmenbeurteilung einzuleiten.

Gute Wirkung gegen  
Steinschlag

## 9. Fallbeispiel Steinschlagschutzdamm St. Niklaus VS

Nach Vorliegen der Bewilligung wird dieses Fallbeispiel hier ergänzt.

### Literatur

BUWAL 2001: Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, 39 S.

Flurgenossenschaft Tal, 2003: Statuten der Flurgenossenschaft „Steinschlagschutz Tal“, Gersau, 6442 Gersau.

Frehner M., Wasser B., Schwitter R., 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NAIS). Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S., (<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/>).

Flurgenossenschaft Tal GENOSSENSCHAFT TAL, 2004: Bauprojekt „Steinschlagschutz Tal“ und weitere Unterlagen zur Ausführung, 6442 Gersau.

Jonsson M.J.O., 2007: Energy absorption of trees in a rockfall protection forest. Dissertation ETH Zürich. <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:29858>

Louis, K. 1999: Gefahrenkartierung Sturzereignisse im Gebiet „Tal“, Gemeinde Gersau. Technischer Bericht mit 5 Beilagen. Kantonsforstamt Schwyz, Fachbereich Naturgefahren, 6430 Schwyz.

Louis, K. 2005: Gefahrenkarte Sturzereignisse nach Massnahmen, Tal / Gersau, Bezirk Gersau. Kantonsforstamt Schwyz, Fachbereich Naturgefahren, 6430 Schwyz.

WSL (Hrsg.) 2004: Schutzwald und Naturgefahren. Forum für Wissen 2004.



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 D: RUTSCHUNGEN

Daniel Bollinger, Christophe Bonnard, Hansruedi Keusen



Rutschung Feldweid, Gemeinde Entlebuch im August 2005 (Foto: Schweizer Luftwaffe)

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
1.1	Übersicht	1
1.2	Besonderheiten	1
1.3	Notwendige Prozessangaben	3
2.	Massnahmenübersicht	5
3.	Grobbeurteilung	11
3.1	Grundlagen/Informationen zu den Prozessen	11
3.2	Grundlagen/Informationen zu den Massnahmen	11
3.3	Negative Wirkungen	12
3.4	Gesamtkonzept und Relevanz	12
4.	Massnahmenbeurteilung	15
4.1	Grundlagen/Informationen zu den Prozessen	15
4.2	Grundlagen/Informationen zu den Massnahmen	15
4.3	Gefährdungsbilder	17
4.4	Tragsicherheit	17
4.5	Gebrauchstauglichkeit	18
4.6	Dauerhaftigkeit	18
4.7	Zuverlässigkeit	19
4.8	Hinweise zur Beurteilung der einzelnen Massnahmenkategorien	19
4.9	Gesamtsystem Massnahmen	24
5.	Wirkungsbeurteilung	27
5.1	Permanente und spontane Rutschungen: Ansatz Stabilitätsberechnungen	27
5.2	Alternativer Ansatz für permanente Rutschungen	30
5.3	Methodischer Ansatz für Hangmuren	30
5.4	Umsetzung in der Gefahrenkarte	31
6.	Fallbeispiel Flamatt/Wünnewil	33
6.1	Allgemeine Angaben	33
6.2	Beurteilung der Massnahmen	35
6.3	Wirkungsbeurteilung	37
7.	Fallbeispiel „grosse Rutschung“	38
	Literatur	38



# 1. Charakteristik der Prozesse

## 1.1 Übersicht

Rutschungen sind komplexe Phänomene, da sie – mehr als andere Naturgefahren – eine dritte Dimension aufweisen. Als dreidimensionale Körper sind sie in ihrem raum-zeitlichen Verhalten oft nur grob zu erfassen. Der Tiefgang der Rutschungen ist sehr unterschiedlich und es können sich verschiedene Bewegungen überlagern. Ebenso sind die Interaktionen zwischen Massnahme(n) und Prozess(en) vielfältig. Eine Quantifizierung der Kräfte und Bewegungen ist schwierig und setzt umfangreiche Sondierungen und Analysen, plausible geologisch-geotechnische Modelle sowie Modellrechnungen voraus, wozu Bonnard (2006) Ansätze liefert. Der Bearbeiter eines Rutschprozesses sieht sich oft mit verschiedenen Unsicherheiten konfrontiert.

Vielfältige und komplexe Abläufe

Mit Berechnungen oder Modellierungen (z.B. 2D, 3D) lassen sich zwar Resultate erzielen, die beim Ergreifen von Massnahmen rechnerisch eine Veränderung der Stabilität ergeben ( $\Delta$  Zustand vor/Zustand nach Massnahmen). Die Berechnungen basieren aber auf Inputgrössen, welche in der Regel schwierig zu erheben und hinsichtlich ihrer effektiven Repräsentativität nicht einfach zu beurteilen sind. Generell ist die Erfassung repräsentativer Daten bei Rutschprozessen schwieriger als bei den anderen relevanten Naturgefahren. Im Umgang mit Naturgefahren wird immer wieder die Frage: „Wie sicher ist sicher?“ gestellt. Bei der Erhebung der Parameter für die Quantifizierung von Rutschprozessen muss sich auch gefragt werden: „Wie repräsentativ ist repräsentativ?“. Diese Unsicherheiten setzen voraus, dass bei Rutschungen vermehrt auf Sensitivitätsanalysen der verwendeten Parameter abzustützen ist. Zudem müssen vorhandene Unsicherheiten klar dargelegt werden.

Erfassung repräsentativer Daten schwierig

Auch die Wirkung einer Massnahme ist schwierig zu quantifizieren, sowohl bei rückhaltenden Massnahmen (Scherwiderstände etc.), als auch bei Massnahmen, welche den Wasserhaushalt und -druck beeinflussen. Bei Rutschungen können die Grundsätze zur Berücksichtigung von Schutzmassnahmen (Teil A, Kap. 2) möglicherweise nicht immer einwandfrei erfüllt werden. Besonders heikel ist der Grundsatz 2 (Unsicherheiten), denn „ist die Auswirkung der Massnahme auf den Prozess kleiner als die Unsicherheiten bei der Prozessbeurteilung, wird sie nicht berücksichtigt.“ Die nachfolgenden Ausführungen sind als Hilfsmittel zur Beurteilung der Massnahmenwirkung bei Rutschungen und Hangmuren zu betrachten. Dabei ist zu beachten, dass jeder konkrete Fall seine spezifischen Eigenheiten hat, welche in angemessener Weise in die Beurteilung einzufließen haben.

Massnahmenwirkung schwierig zu quantifizieren

## 1.2 Besonderheiten

Rutschungen im weiteren Sinn umfassen ein breites Spektrum von Rutschtypen und -mechanismen, einschliesslich Kombinationen davon. Wie Abb. 1.1 und Abb. 1.2 zeigen, ist bei Rutschungen den räumlich und zeitlich variablen Bewegungsmustern Rechnung zu tragen. Die Bewegungen können sowohl vertikal als auch lateral graduell oder sprunghaft variieren.

Räumlich und zeitlich variable Bewegungsmuster

Wesentlich ist die Unterscheidung zwischen kontinuierlichen (permanenten) und spontanen Rutschprozessen. Letzteren werden auch die Hangmuren zugeordnet, deren Auslösung durch äusserst starke Durchnässung hervorgerufen wird. Dabei spielt Wasser als treibende Kraft eine entscheidende Rolle (z.B. Porenwasserüberdrücke, Sickerströmungen, innere Erosion). Bei Hangmuren fehlen dann auch oft eigentliche Gleitflächen. Hingegen bestehen Anzeichen zu Phänomenen, welche

Kontinuierliche und spontane Rutschungen

mit einem hydraulischen Grundbruch vergleichbar sind. Bei Hangmuren sind mögliche Folgeereignisse wie Sturzprozesse oder Murgänge (bei Einmündung in ein Fließgewässer) speziell zu beachten. Solche Sekundäreffekte werden hier nicht weiter behandelt.

Profundes Prozessverständnis notwendig

Die Planung von Massnahmen gegen Rutschungen setzt ein profundes Prozessverständnis voraus. Die von der AGN (Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN, 2004) realisierten Studien liefert in Ergänzung zu den Empfehlungen des Bundes (BRP et al., 1997) standardisierte Ansätze zur Berücksichtigung der Unterschiede zwischen den verschiedenen Rutschtypen.

Flach-, mittel- und tiefgründige Rutschungen

Gestützt auf die Empfehlungen des Bundes wird bei den Rutschungen zwischen flach- (Gleitfläche bis 2 m u. T.), mittel- (2-10 m u. T.) und tiefgründigen (> 10 m u. T.) Rutschungen unterschieden. Hinsichtlich der Beurteilung von Schutzmassnahmen ist die Klasse tiefgründiger Rutschungen jedoch differenzierter zu betrachten. Eine Unterscheidung in tiefgründige (bis 20-30 m u. T.) und sehr tiefgründige (> 30 m u. T.) Rutschungen ist notwendig, weil die Einsatzmöglichkeiten baulich-technischer Massnahmen bei sehr tiefgründigen Rutschungen in vielen Fällen v.a. aus technischen und wirtschaftlichen Gründen stark eingeschränkt sind. Zudem kann die Beherrschbarkeit sehr tiefgründiger Rutschungen technisch äusserst anspruchsvoll werden.

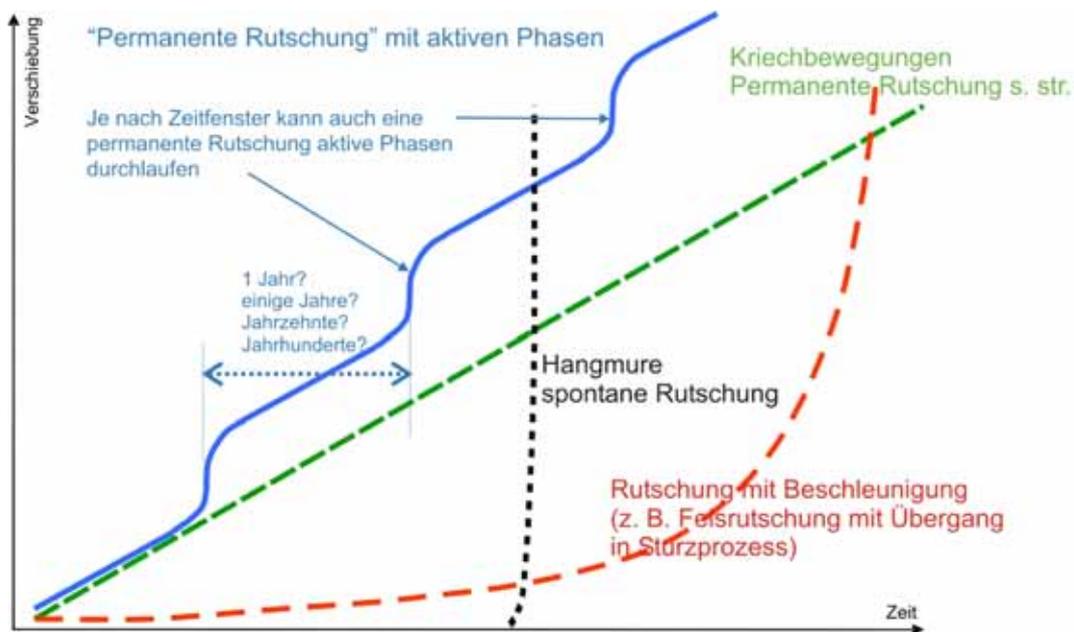


Abb. 1.1: Beispiele raum-zeitlichen Bewegungsverhaltens von Rutschungen (schematisch).

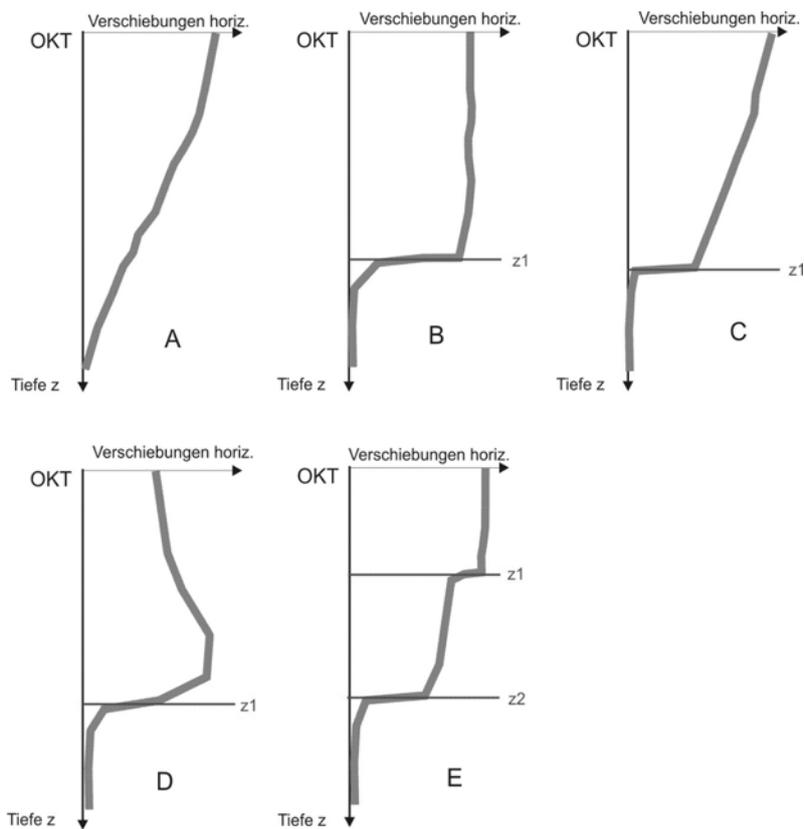


Abb. 1.2: Beispiele möglicher Bewegungsbilder in Vertikalschnitten instabiler Hänge:

A) gleichförmige Kriechbewegungen;

B) gleichmässige Bewegungen oberhalb deutlich ausgebildeter Gleitfläche in Tiefe  $z_1$ ;

C) wie B, aber überlagert durch Kriechbewegungen;

D) unregelmässige Bewegungen oberhalb einer Gleitfläche in Tiefe  $z_1$  mit Bewegungsmaxima unterhalb der Terrainoberfläche;

E) Rutschkörper mit zwei deutlich ausgebildeten Gleitflächen  $z_1, z_2$ ;

(OKT = Oberkante Terrain).

### 1.3 Notwendige Prozessangaben

Ein Rutschkörper bzw. ein Rutschgebiet, das sich aus mehreren, sich unter Umständen mehr oder weniger individuell verhaltenden Rutschkörpern zusammensetzt, muss ausreichend genau erfasst sein, primär hinsichtlich folgender Punkte:

Zu erfassende  
Parameter

- Lage der Gleitfläche ( $\rightarrow$  Gründigkeit, wie bestimmt? Bohrungen mit Inklinometern, Seismik, Profilkonstruktion oder nur Vermutung?);
- Verlauf/Geometrie der Gleitfläche ( $\rightarrow$  Translation, Rotation, Mischformen; Verlauf auf der Felsoberfläche, im Lockergestein?);
- Geologisches Modell mit den relevanten Bodenkennwerten der verschiedenen Schichten;
- Teilkörperidentifikation (Teilrutschungen, Sekundärrutschungen, tiefe stabilisierte Zonen, überlagerte Prozesse);
- Hangwasserverhältnisse (Lage Hangwasserspiegel; Porenwasserdruck bei normalen und ausserordentlichen Bedingungen [Krisen]; unterirdische Fliesswege; Zu- und Abflüsse, inkl. möglicher Zuflüsse aus anderen Einzugsgebieten, vgl. Campo Vallemaggia, Triesenberg);

- f. Interaktionen mit anderen Prozessen (v. a. Bachprozesse → Erosion; Infiltration, Kollaps von Bachverbauungen möglich, in welchem Ausmass? Kann sich ein benachbartes Rutschgebiet auf das zur Diskussion stehende ausweiten? etc.);
- g. Historie des Rutschverhaltens (→ Ereignisdokumentation, wodurch wurde das Rutschverhalten in der Vergangenheit bestimmt? → Niederschläge, Schneeschmelze, Erosion, Waldschäden, Erdbeben, anthropogene Faktoren (Bauten) etc.);
- h. Frühere Bewegungen (→ Verschiebungsmessungen, Geodäsie, Photogrammetrie, Lidar und Satellitenbildanalysen, evtl. Radarinterferometrie);
- i. Frühere Massnahmen (deren Wirkung, Funktionstüchtigkeit, Unterhalt, Kontrolle);
- j. Historie der Landnutzung;
- k. Möglichkeiten eines kurz- oder langfristigen Systemwechsels.

Umfassende Untersuchung notwendig

Diese Punkte müssen umfassender untersucht und erfasst sein, als dies bei der Ausarbeitung einer Gefahrenkarte in der Regel der Fall ist. Sie müssen ausreichend Informationen hinsichtlich der Erfassung von Intensität, Wahrscheinlichkeit und Szenarien liefern (→ Bandbreite möglicher Entwicklungen des Systems, inkl. Extremfall):

- Die Punkte a – e sind massgebend für den Aufbau eines plausiblen Modells, anhand dessen der Ist-Zustand und die Wirkung von Massnahmen berechnet/modelliert werden kann. Das System muss durch Variation der Parameter (z.B. Änderung der Gleitfläche, Bodenkennwerte, Lage des Hangwasserspiegels) hinsichtlich seiner Sensitivität ausgelotet werden.
- Die Punkte f – k liefern Hinweise für Szenarien und Wahrscheinlichkeiten. Hier sind auch Ereignisbaumanalysen denkbar, damit die Variabilität des Systems (inkl. Wahrscheinlichkeiten für das Zutreffen einer bestimmten Entwicklung) abgeschätzt werden kann. Bei Interaktionen mit Gerinneprozessen ist beispielsweise auch das Szenario eines Kollapses wasserbaulicher Massnahmen oder eines temporären Dammes in der Folge einer Rutschreaktivierung oder Rutschablagerungen im Gerinne in Betracht zu ziehen.

Die Berücksichtigung von Massnahmen kann erst dann abgeklärt werden, wenn diese Punkte ausreichend untersucht sind. Die Vorgehensweisen zur Klärung dieser Sachverhalte sind verschiedenartig.

## 2. Massnahmenübersicht

Mögliche Massnahmen zur Stabilisierung von Rutschungen können folgendermassen charakterisiert werden:

Charakterisierung  
Massnahmen

1. Massnahmen zielen auf die Veränderung des Verhältnisses zwischen treibenden und bremsenden Kräften. Diese sollen die Bewegungen während einer Krise signifikant reduzieren.
2. Es gibt verschiedene Massnahmen und Massnahmenkombinationen. Im Folgenden werden nur jene berücksichtigt, welche direkt Einfluss auf die Beschaffenheit der Rutschmasse haben.
3. Die wesentlichen Massnahmenkategorien sind: a) Veränderung der Hangwasserverhältnisse (Drainagetechniken s.l.); b) Einbringen von Kräften, welche der treibenden Kraft entgegen gesetzt sind (z.B. Scherwiderstand) und die Bewegungen reduzieren; c) Massenveränderungen (Änderungen in Profil und Materialien).
4. Prinzipiell lässt sich die Hangstabilität durch eine Massenveränderung grundlegend beeinflussen. Für eine Berücksichtigung muss die Wirkung der Massnahme rechnerisch geprüft sein (2D: an mindestens einem repräsentativen Hangprofil), unter Variation der Parameter und unter Beachtung von worst case-Szenarien.
5. Die Massnahmen werden oft kombiniert eingesetzt. Bei Massnahmenkombinationen bilden Entwässerungen fast immer einen Bestandteil davon.
6. Massnahmen können auch zeitlich gestaffelt erfolgen. Unter dem Aspekt der Optimierung kann es sinnvoll sein, im Rahmen eines Gesamtkonzeptes die Wirkung einer Massnahmen-Etappe abzuwarten, bevor eine weitere realisiert wird (z.B. Arveyes VD, drei Etappen).

Tab. 2.1 vermittelt eine Übersicht über die wichtigsten Massnahmen zur Stabilisierung von Rutschungen. Die verwendeten Kürzel stehen für folgende Massnahmenkategorien:

Übersicht  
Massnahmen

- H = Veränderungen der Hangwasserverhältnisse
- W = Einbringen von Kräften oder Widerständen, welche der treibenden Kraft entgegen gesetzt sind;
- M = Massenveränderungen
- V = Massnahmen, bei denen die Vegetation eine Wirkung ausübt.

Massenveränderungen (Materialabtrag im treibenden Teil, Auflast im bremsenden Teil) werden hier nicht weiter im Detail behandelt. Nicht beurteilt werden die punktuell wirkenden Objektschutzmassnahmen. Massnahmen zur Stabilisierung/Sicherung künstlicher Böschungen werden hier nicht behandelt. Die Tabelle liefert eine Einschätzung, inwieweit die Massnahmen bei der Gefahrenbeurteilung berücksichtigt werden können. Sie ersetzt aber nicht die detaillierte Beurteilung. Die folgenden Ausführungen fokussieren sich prinzipiell auf die am häufigsten angewandten Massnahmenkategorien H1 und W1/W2.

Auswahl der hier  
behandelten  
Massnahmen

Tab. 2.1: Übersicht wichtigste Massnahmenkategorien bei Rutschungen und Hangmuren. Oft werden Kombinationen davon angewendet.

Die Tabelle ist als eine stark verallgemeinernde Übersicht über die Eignung einer Massnahme zu betrachten. Bei jeder Massnahme sind indes Ausnahmen möglich, die im begründeten Einzelfall einer speziellen Prüfung unterzogen werden können (auch bei Massnahmen, deren Eignung hier verneint wird).

Massnahmen	Berücksichtigung bei der Gefahrenbeurteilung <sup>1</sup>					Bemerkungen
	HM	RO	RM	RT	RXT	
						RO flachgründige Rutschung (bis 2 m u.T.) RM mittelgründige Rutschung (2-10 m u.T.) RT tiefgründige Rutschung (10-30 m u.T.) RXT sehr tiefgründige Rutschung (>30 m u.T.) HM Hangmure
<b>H1a: Absenkung Hangwasserspiegel im Rutschgebiet</b>						
freie Entwässerung in Drainagegräben (offen, geschlossen)						- mit/ohne Sohlenabdichtung - diverse Typen - anfällig auf differenzielle Bewegungen, aber Zustand visuell gut kontrollierbar - oft wichtige komplementäre Massnahme zu den meisten anderen Massnahmen
freie Entwässerung in überdeckten Drainagen unter der Terrainoberfläche („Tiefendrainage“)						- bei Tiefendrainagen oft nicht Gewähr, dass die relevanten Wasserfliesswege oder -horizonte erfasst werden - infolge Rutschbewegungen (diff. Bewegungen) können Undichtigkeiten entstehen - bei RO evtl. unverhältnismässig - bei HM nicht tiefer als potenzielle Ausbruchtiefe (Mächtigkeit mobilisierbare Schicht)
freie Entwässerung in subhorizontalen Bohrungen						- bei Aktivierungen können Bohrungen abgesichert werden - Versinterungsgefahr beachten - bei RO unverhältnismässig - bei HM unverhältnismässig; nicht tiefer als potenzielle Ausbruchtiefe
Entwässerung mittels Pumpen (aus Schächten, Schlitzten, Bohrungen, parois drainantes, drains siphons);						- bei Aktivierungen können Bohrungen abgesichert werden - v.a. bei Bohrungen Versinterungsgefahr beachten - bei RO evtl. unverhältnismässig - bei HM evtl. unverhältnismässig; nicht tiefer als potenzielle Ausbruchtiefe
Entwässerung durch Drainagestollen						- mit/ohne Entlastungsbohrungen - bei Aktivierungen können Bohrungen abgesichert werden - bei Bohrungen Versinterungsgefahr beachten - bei RO und HM unverhältnismässig

<sup>1</sup> Unter Wirkung sind hier nur stabilisierende Effekte gemeint. Vor allem die Massnahmen H1/H2 können Beeinträchtigungen mit sich bringen, in Form von Setzungen an der Oberfläche. In besiedelten Gebieten ist solchen Nebeneffekten Beachtung zu schenken.

Massnahmen	Berücksichtigung bei der Gefahrenbeurteilung <sup>1</sup>					Bemerkungen
	HM	RO	RM	RT	RXT	
						RO flachgründige Rutschung (bis 2 m u.T.) RM mittelgründige Rutschung (2-10 m u.T.) RT tiefgründige Rutschung (10-30 m u.T.) RXT sehr tiefgründige Rutschung (>30 m u.T.) HM Hangmure
<b>H1b: Abbau Porenwasserdruck im Rutsch selbst oder unter der Gleitfläche</b>						
Entlastungsbohrungen						- bei Aktivierungen können Bohrungen abgesichert werden - bei RO und HM unverhältnismässig
<b>H2: Absenkung Hangwasserspiegel ausserhalb (oberhalb, seitlich) Rutschmasse</b>						
Ableiten von zuströmendem Hangwasser (Drainagen, Drainagegräben)						- Einflüsse auf Rutschgebiet teils schwierig zu erfassen - oft notwendig oder sinnvoll als komplementäre Massnahme
Verhindern von Zuflüssen aus Oberflächenwasser (v.a. aus Bächen, stehenden Gewässern) durch Ableitung, Abdichtung						
<b>W1: Einbringen von Scherwiderständen in der Gleitfläche</b>						
Vernagelung, Pfähle, Mikropfähle, Schächte						- diverse Einsatzmöglichkeiten - langjährige praktische Erfahrungen - Normen beachten - bei RT und v.a. RXT stossen die Massnahmen an Grenzen (Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit) - in Kombination mit Materialabtrag können die Einsatzmöglichkeiten erhöht werden - bei HM enger Raster erforderlich oder Ergänzung mit Netzabdeckung
Injektionen in Gleitfläche, „claquage“						- Verfahren wenig erprobt - Wirkung sehr schwierig zu erfassen - keine Kontrollierbarkeit - bei Aktivierung Abscherungen und Versagen möglich
<b>W2: Einbringen negativer treibender Kräfte unterhalb der Gleitfläche</b>						
Anker, verankerte Stützkonstruktion						- diverse Typen und Konstruktionsweisen - langjährige praktische Erfahrungen - Normen beachten - bei RT und v.a. RXT stossen die Massnahmen an Grenzen (Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit) - in Kombination mit Materialabtrag können die Einsatzmöglichkeiten erhöht werden - bei HM evtl. Ergänzung mit Netzabdeckung erforderlich

Massnahmen	Berücksichtigung bei der Gefahrenbeurteilung <sup>1</sup>					Bemerkungen
	HM	RO	RM	RT	RXT	
						RO flachgründige Rutschung (bis 2 m u.T.) RM mittelgründige Rutschung (2-10 m u.T.) RT tiefgründige Rutschung (10-30 m u.T.) RXT sehr tiefgründige Rutschung (>30 m u.T.) HM Hangmure
<b>W3: Veränderung Materialeigenschaften</b>						
Injektionen zur Verbesserung der Bodenkennwerte im bremsenden Teil						- wirkt auch als M1 - Verfahren wenig erprobt - Wirkung schwierig zu erfassen - schlechte Kontrollierbarkeit - keine sinnvolle Massnahme bei HM - allg. grosse Unsicherheiten
Injektionen zur Verbesserung der Bodenkennwerte angrenzend an eine Rutschmasse						- Präventive Massnahme zur Verhinderung einer Ausbreitung des Rutschgeschehens auf noch stabiles Gebiet - keine Fälle bekannt - keine sinnvolle Massnahme bei HM
Materialersatz (Bsp. Sickerbetongräben mit zusätzlicher Drainagewirkung H1a)						- wirkt auch als H1a - nur bei RO und (flachen) RM und HM sinnvoll
<b>M1: Auflast bremsender Teil (Belastung am Rutschfuss)</b>						
Schergewichtsmauer, Stützmauer (wirken auch als W1)						- langjährige praktische Erfahrungen - Normen beachten - bei RT und v.a. RXT stossen die Massnahmen an Grenzen (Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit)
Aufschüttung Bodenmaterial (evtl. mit drainierendem Material)						- bei RT und v.a. RXT stossen die Massnahmen an Grenzen (Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit) - keine sinnvolle Massnahme bei HM
<b>M2: Entlastung treibender Teil</b>						
Materialabtrag im Rutschkopf						- bei RT und v.a. RXT stossen die Massnahmen an Grenzen (Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit) - keine sinnvolle Massnahme bei HM
<b>M3: Schutz vor Entlastung am Rutschfuss infolge Erosion</b>						
Sicherung des Rutschfusses durch offenen oder geschlossenen Bachverbau						- evtl. Anstieg Wasserspiegel am Hangfuss beachten (z.B. bei Sperrentreppe) - mögliche Interaktionen mit Bach- und Flussprozessen berücksichtigen - keine sinnvolle Massnahme bei HM
<b>V1: Wald</b>						
Beeinflussung Wasserhaushalt						- Beeinflussung Wasserhaushalt ist sehr schwierig zu quantifizieren - Bei RO und HM kann eine Berücksichtigung geprüft werden - Eine Rutschmasse kann durch Wald oder Nichtwald ausserhalb des eigentlichen Rutschgebietes beeinflusst sein → Zuordnung rele-

Massnahmen	Berücksichtigung bei der Gefahrenbeurteilung <sup>1</sup>					Bemerkungen
	HM	RO	RM	RT	RXT	
						RO flachgründige Rutschung (bis 2 m u.T.) RM mittelgründige Rutschung (2-10 m u.T.) RT tiefgründige Rutschung (10-30 m u.T.) RXT sehr tiefgründige Rutschung (>30 m u.T.) HM Hangmure
						vante Waldfläche zu Rutschfläche sehr schwierig
Armierung durch Wurzelwerk						- Nur bei RO und HM potenziell wirksam
<b>V2: Ingenieurbiologische Massnahmen</b>						
Beeinflussung Wasserhaushalt						- Beeinflussung Wasserhaushalt ist sehr schwierig zu quantifizieren - Bei RO und HM kann eine Berücksichtigung geprüft werden
Armierung, Erosionsschutz						- Nur bei RO und HM potenziell wirksam, eine Berücksichtigung kann dort geprüft werden
Legende:		nein		Differenzierte Betrachtung erforderlich		ja

Die Massnahmen W sind vorwiegend bei mittel- und flachgründigen Rutschungen wirtschaftlich, kommen aber auch bei tiefgründigen Rutschungen zum Einsatz. Bei tiefgründigen Rutschungen stehen die Massnahmen H im Vordergrund. Die Massnahmenkategorie M ist vorab bei mittel- und flachgründigen Rutschungen angezeigt, kann aber auch bei tiefgründigen Bedeutung haben.

Bei Massnahmen mit Bohrungen zur Absenkung des Porenwasserdrucks und/oder des Hangwasserspiegels ist bei der Beurteilung der Chemismus des Wassers zu beachten (Versinterungsgefahr). Die regelmässige Kontrolle der Massnahmen ist wichtig. Ebenso sind die Massnahmen so zu konzipieren, dass sie im Bedarfsfall gut saniert werden können.

### Waldwirkung

Wald kann als Einzelmassnahme vor allem bei flachgründigen Rutschungen und Hangmuren eine wesentliche Wirkung entfalten, bedarf aber einer differenzierten Betrachtung. Bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen ist die Waldwirkung schwierig zu quantifizieren. Generell bildet der Wald eine wichtige komplementäre Massnahme zu den meisten anderen Massnahmenkategorien. Flachgründige Rutschungen und Hangmuren befinden sich im Einflussbereich des Wurzelraumes der Bäume. Hier kann der Wald seine stabilisierende Wirkung entfalten, einerseits dank Armierung des Bodens durch das Wurzelwerk, andererseits durch eine positive Beeinflussung des Untergrundes dank Interzeption, Transpiration und durch Verbesserung der Bodendurchlässigkeit. Besonders bei flachgründigen Rutschungen wirkt er auch als Last (treibend oder bremsend).

Besonders bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen kann ein Infiltrationsgebiet definiert werden. Dieses umfasst dasjenige Gebiet, in welchem das dem Rutschkörper unterirdisch zufließende Wasser in den Untergrund versickert. Dieses Wasser wird teilweise durch die Wirkung des Waldes zurückgehalten. Oftmals ist es allerdings wegen fehlender Kenntnisse der unterirdischen Wasserfließwege sehr schwierig, das Infiltrationsgebiet tatsächlich bestimmen zu können. Die diesbe-

Waldwirkung schwierig zu quantifizieren

Unterirdische Wasserfließwege schwer zu bestimmen

züglichen Unsicherheiten sind in der Regel zu gross (Grundsatz 2), als dass der Wald bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen als Einzelmassnahme berücksichtigt werden könnte.

Wald kann durch Sturm  
oder Käfer beschädigt  
werden

Beim Wald als Massnahme ist ausserdem zu beachten, dass er infolge von Sturm oder Brand innert Stunden zerstört oder derart beschädigt werden kann, dass seine Wirkung stark beeinträchtigt wird (z.B. Wegfallen der Interzeption, etc.). Auch Käferbefall oder Krankheiten können ihn substantiell schwächen. Deshalb kann nicht von einer permanenten Verfügbarkeit des Waldes ausgegangen werden. Mit Ausnahme der flachgründigen Rutschungen und Flächen mit Disposition zur Entstehung von Hangmuren ebenfalls unberücksichtigt bleiben ingenieurbio-logische Massnahmen, da deren Wirkung schwierig zu quantifizieren ist.

Weitere Einzelheiten zur Waldwirkung liefern Frehner et al. (2005).

### 3. Grobbeurteilung

Die Grobbeurteilung (Schritt 1) soll einen ersten Überblick über die Situation liefern, einerseits die Prozesskenntnisse, andererseits die Schutzmassnahmen betreffend (Tab. 3.1). Auf dieser Basis soll abgeschätzt werden können, ob von der Massnahme eine relevante Wirkung hinsichtlich der Gefahrensituation erwartet werden kann. Die Prozesskenntnisse müssen an dieser Stelle mindestens so weit erfasst sein, dass abgeschätzt werden kann, ob der Grundsatz 1 erfüllt ist.

#### 3.1 Grundlagen/Informationen zu den Prozessen

Die üblicherweise vorhandenen Prozessgrundlagen wie Ereigniskataster, Gefahrenhinweiskarte und Gefahrenkarte sind für Rutschprozesse in der Regel nicht ausreichend, um Grundsatz 1 beantworten zu können. Auf der Basis dieser Standardgrundlagen kann keine Beurteilung der Massnahmenwirkung vorgenommen werden. Mittel- und vor allem tiefgründige Prozesse bedürfen wesentlich umfangreicherer Abklärungen. Grundlagen, die gewisse Mindestvoraussetzungen nicht erfüllen, sind zurückhaltend oder allenfalls auch nicht zu verwenden.

Umfangreiche Grundlagenabklärungen nötig

Aufgrund der Komplexität von Rutschungen sind auf Stufe der Grobbeurteilung bereits umfassende Abklärungen zum Prozessverständnis vorauszusetzen. Folgende Unterlagen müssen in ausreichender Qualität vorhanden sein:

Notwendige Unterlagen

- Karte der Phänomene (erweiterte Legende) oder vergleichbare Grundlage;
- Das Gesamtsystem ist mitsamt seiner Teilprozesse und möglichen Interaktionen erfasst;
- Das Spektrum möglicher Prozesswirkungen ist mittels Szenarien erfasst. Dabei ist auch das Extremereignis betrachtet worden;
- Geologisch-hydrogeologisches Modell, mit entsprechenden Hangprofilen;
- Gefahrenbeurteilung basierend auf den Empfehlungen des Bundes<sup>2</sup> und der AGN-Methode.

#### 3.2 Grundlagen/Informationen zu den Massnahmen

Die vorhandenen Schutzbautengrundlagen (v.a. Projektunterlagen, z.B. Daten über bestehende Anker) enthalten möglicherweise Angaben, welche über die üblichen Gefahrengrundlagen hinausgehen. So machen beispielsweise Verankerungen keinen Sinn, wenn nicht Angaben bzw. konkrete Vorstellungen über den Verlauf der Gleitfläche(n) bestehen. Ebenso setzt die räumliche Platzierung einer Massnahme ein räumliches Gesamtbild des Prozesses voraus. Hingegen setzt das Erstellen von Drainagegräben nicht zwangsläufig ein vertieftes Prozessverständnis voraus. Dank solcher Unterlagen kann auch das Gefahrenpotenzial besser eingegrenzt werden.

Infos aus Schutzbautengrundlagen zum Gefahrenpotenzial

Verschiedene Massnahmen zur Stabilisierung von Rutschungen beinhalten verborgene Teile oder sie entziehen sich einer direkten visuellen Kontrolle (gemäss Tab. 2.1 besonders: H1a ausser Oberflächendrainagen, H1b, W1, W2, z.T. W3). In diesen Fällen sind ein umfassendes Projektdossier und Ausführungspläne unabdingbar. Durch nachträgliche Feldbegehungen lassen sich die fehlenden Unterlagen in der Regel kaum mehr zweifelsfrei rekonstruieren.

Projektdossier und Ausführungspläne bei verborgenen Teilen unabdingbar

<sup>2</sup> Die Empfehlungen des Bundes werden momentan überarbeitet. Teile der AGN-Methode werden integriert.

### 3.3 Negative Wirkungen

Bei negativer Wirkung  
Weiterbearbeitung

Wird bei einer Massnahme ein Mangel festgestellt oder vermutet, welcher eine gefahrenverschärfende Wirkung zur Folge haben kann, so ist die Massnahme weiter zu bearbeiten, unter speziellem Fokus auf mögliche Versagensszenarien (Wirkungsanalyse, Schritt 3).

Beispiel A: Nicht unterhaltene Drainagen haben einen verstärkten Wassereintrag in den Untergrund und eine Erhöhung des Hangwasserspiegels zur Folge. Es besteht die Gefahr einer Aktivierung der Rutschmasse.

Beispiel B: Eine nicht kontrollierte und nicht unterhaltene Ankerwand kann ihre Funktionstüchtigkeit verlieren und kollabieren. Vormalig durch die Ankerwand zurück gehaltene Hangbereiche können in Bewegung geraten.

### 3.4 Gesamtkonzept und Relevanz

Massnahmen im  
Gesamtkonzept  
bewerten

Die **Wirkung von Massnahmen** kann nur im Gesamtkontext eines Gefahrenpotenzials beurteilt werden. Die Relevanz einer Massnahme ist deshalb im Gesamtkontext zu bewerten. Dabei stellen sich besonders folgende Fragen:

- Fokus der Massnahme, z.B. Stabilisierung einer Teilrutschung oder Gesamtlösung? Eine Teillösung – beispielsweise die Stabilisierung einer aktiven Sekundärrutschung innerhalb eines Rutschhanges – kann eine sinnvolle, risikoorientierte Lösung sein, auch wenn dadurch nicht der gesamte Hang stabilisiert wird (Abb. 3.1).

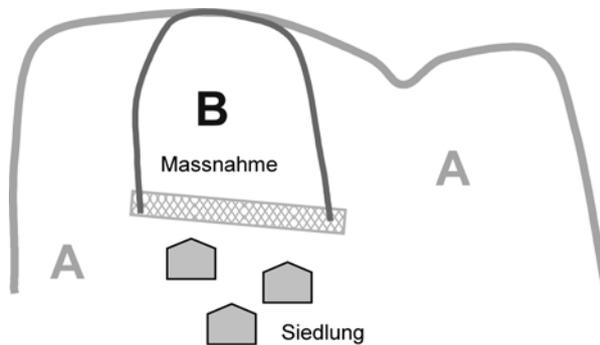


Abb. 3.1: Bezogen auf das Schadenpotenzial Siedlung kann die Stabilisierung einer Teilrutschung B innerhalb eines grösseren Rutschgebietes A zweckmässig sein. Die Wirkung der Massnahme ist dann bezogen auf die Teilrutschung und unter Beachtung möglicher Einflüsse aus dem Gesamtsystem A zu beurteilen.

- Wenn die Massnahme auf eine Gesamtlösung fokussiert: Wurde das Gefahrenpotenzial in seinem gesamten räumlichen Ausmass akkurat erfasst?
- Ist die Ausdehnung der Massnahme ausreichend gross, um der Gefährdung wirksam zu begegnen (z.B. nur lokale Entwässerungsgräben in einem Rutschhang lassen vermuten, dass die Wirkung lokal begrenzt ist)?
- Sind Interaktionen mit anderen Rutschungen und/oder anderen Prozessen (z.B. Hangfusserosion durch Wildbach) möglich?
- Kann sich die Wirkung der Massnahme im Laufe der Zeit verändern?
- Ist die Wirkung der Massnahme auf einen Prozess grösser als die Unsicherheiten bei der Beurteilung desselben (Grundsatz 2)?

Tab. 3.1: Ablauf der Grobbeurteilung (Minimalanforderungen). Nein = Abbruch (die Massnahme wird nicht berücksichtigt).  = Die Beurteilung muss ergänzt und von vorne begonnen werden.

	Anforderungen/Kriterien	Ja	Nein	Bemerkungen
<b>Prozesskenntnisse, Gefahrensituation</b>				
0	Es liegen folgende Unterlagen in ausreichender Qualität vor: - a. Karte der Phänomene (erweiterte Legende) oder vergleichbare Grundlagenkarte; - b. Das Gesamtsystem ist mitsamt seiner Teilprozesse und möglichen Interaktionen erfasst; - c. Das Spektrum möglicher Prozesswirkungen ist mittels Gefährdungsbildern (Szenarien) erfasst. Dabei ist auch das Extremereignis betrachtet worden; - d. Geologisch-hydrogeologisches Modell, mit entsprechenden Hangprofilen; - e. Gefahrenbeurteilung basierend auf den Empfehlungen des Bundes und der AGN-Methode.	→1	Abbruch 	Nein = Abbruch oder: die Grundlagen müssen zuerst erarbeitet werden.   Abbruch auch dann, wenn die Prozessunsicherheiten zu gross sind.  AGN-Methode bei neueren Gefahrenbeurteilungen (ab 2005).
<b>Massnahme (Verfügbarkeit, Lebensdauer)</b>				
1	Die Massnahme ist auf eine lange Lebensdauer ausgelegt (mindestens 50 Jahre).	→2	Abbruch +8	Ja = Grundsatz 5 erfüllt. Bei Abbruch spezielle Abklärungen auf negative Wirkung.
2	Kontrollen, Unterhalt und Reparaturen sind - langfristig geregelt. Es besteht eine Trägerschaft, vorteilhafterweise auch ein Grundbucheintrag. - können verbindlich und dauerhaft geregelt werden.	→3	Abbruch + 8	Bei Abbruch spezielle Abklärungen auf negative Wirkung.
<b>Gesamtkonzept und Relevanz</b>				
3	Der Fokus der Massnahme ist auf den gesamten Prozessraum ausgerichtet.	→4	→6 oder Abbruch	Nein = Die lokale Wirkung kann unter 6 weiter geprüft werden.
4	Die Massnahmenwirkung kann unter Berücksichtigung mindestens der folgenden Aspekte beurteilt werden: - a. Interaktionen bekannt; - b. Absicht der Massnahme bekannt/kann vermutet werden; - c. Massnahmenstandort wirksam; - d. Ausreichende Ausdehnung der Massnahme im Hinblick auf die Absicht der Massnahme; - e. Erfahrungen in ähnlichen Fällen.	→5	Abbruch oder 	Nein = ist einer der Aspekte nicht bekannt, sind die entsprechenden Abklärungen nachzuholen. Andernfalls Abbruch.
5	Es besteht eine bestimmbar, relevante Wirkung oder eine solche kann mit guten Gründen vermutet werden.	→9	Abbruch + 8	Ja = Grundsätze 1 und 2 erfüllt. Weiter mit Schritt 2.
6	Der Fokus der Massnahme ist nur auf einen Teil des gesamten Prozessraumes ausgerichtet. Die örtliche Massnahmenwirkung kann analog Ziffer 4 und 5 beurteilt werden unter Berücksichtigung mindestens der folgenden Aspekte: - a. Interaktionen bekannt, speziell mit angrenzendem Prozessraum;	→7	Abbruch oder   Abbruch + 8	Teillösung kann lokal berücksichtigt werden, aber max. bis auf Gefahrenstufe des Gesamtprozesses. Voraussetzung: Das ganze Beurteilungsprozedere ergibt für die Teillösung ein positives

	<b>Anforderungen/Kriterien</b>	<b>Ja</b>	<b>Nein</b>	<b>Bemerkungen</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- b. Absicht der Massnahme bekannt/kann vermutet werden;</li> <li>- c. Massnahmenstandort wirksam;</li> <li>- d. Ausreichende Ausdehnung der Massnahme im Hinblick auf die Absicht der Massnahme;</li> <li>- e. Erfahrungen in ähnlichen Fällen.</li> </ul>			Resultat. Abbruch auch dann, wenn das Problem „falsch“/unzureichend erfasst wurde.
7	Es besteht eine bestimmbar, relevante Wirkung oder eine solche kann mit guten Gründen vermutet werden.	→9	Abbruch + 8	Ja = Grundsätze 1 und 2 lokal erfüllt. Weiter mit Schritt 2.
<b>Negative Wirkung</b>				
8	Es besteht die Möglichkeit einer negativen Wirkung, welche sich im Laufe der Zeit gefahrenverschärfend auswirken kann.	→vgl. Kap. 3.3	Abbruch	Ja = Spezielle Abklärungen (vgl. Kap. 3.3).

## 4. Massnahmenbeurteilung

Beurteilt wird die Zuverlässigkeit der einzelnen Massnahme unter Berücksichtigung verschiedener Prozesswirkungen (Szenarien; Gefährdungsbilder). Hinsichtlich der Prozesswirkungen sind bei den Rutschungen aufgrund ihrer Komplexität (dreidimensionaler Charakter, Interaktionen, Teilrutschungen, Raum-Zeit-Verhalten) strenge Anforderungen an den Detaillierungsgrad der Bearbeitung zu stellen.

Strenge Anforderungen an Datenbearbeitungsgrad

### 4.1 Grundlagen/Informationen zu den Prozessen

Die Grundlage für die Massnahmenbeurteilung bildet die szenarienbezogene Quantifizierung der Prozesse. Es sind konkrete Angaben zu folgenden Punkten erforderlich:

Szenarienbezogene Quantifizierung der Prozesse

- Geologisch-hydrogeologisches Modell (geotechnisches Modell), möglichst auf der Basis von Sondierungen (Bohrungen, Seismik, Geoelektrik, Sondierschlitz);
- Geologische Hangprofile (ohne/mit Massnahme[n]), möglichst auf der Basis von Sondierungen (wie oben);
- Quantifizierte Bodenparameter;
- Stabilitätsberechnungen mit Sensitivitätsanalysen (2D in diversen Schnitten oder 3D);
- Für bekannte Krisen (Phasen mit Potenzial zu einer Rutschaktivierung) liegt eine Ursachenanalyse vor;
- Ausreichend lange Messreihen (Geodäsie, Inklinometer, Extensometer);
- Die Geschichte der Rutschung ist bekannt bzw. rekonstruierbar.

Für neu entstandene, spontane Rutschungen und Hangmuren in zuvor nachweislich unverrutschtem Terrain sind die beiden letztgenannten Punkte irrelevant.

Verbleiben die Unsicherheiten auf dieser Bearbeitungsstufe zu gross, so ist die Beurteilung abzubrechen (Grundsatz 2). Die Massnahme kann nicht berücksichtigt werden.

Bei zu grossen Unsicherheiten Abbruch

### 4.2 Grundlagen/Informationen zu den Massnahmen

Für die Beurteilung der Massnahmenwirkung auf den Untergrund sind ausführliche Informationen erforderlich, speziell bei Massnahmen mit verborgenen Teilen. Die Mehrheit der in Tab. 2.1 aufgeführten Massnahmen wirkt aufgrund von Teilen, die verborgen und oft nicht direkt kontrollierbar sind. Nachstehende Massnahmenangaben sind unerlässlich. Es sind mindestens jene Angaben zu liefern, welche für 2D-/3D-Berechnungen nötig sind. Diese Angaben sind den Projekt- bzw. Ausführungsunterlagen zu entnehmen. Bei Oberflächen-Drainagen sind Feldaufnahmen zweckmässig, wobei gleichzeitig die Zustandsanalyse durchgeführt werden kann. Dasselbe gilt für Wald bzw. ingenieurbioologische Massnahmen. Injektionen W1, W3 werden als Einzelmassnahme nicht berücksichtigt (Tab. 2.1), sind aber allenfalls im Verbund mit anderen Massnahmen zu beachten. Die Informationen zu den Massnahmen sollten über folgende Eigenschaften Auskunft geben:

Angaben für 2D-/3D-Berechnungen notwendig

Unterirdische Ausdehnung (vertikal, horizontal) bei den Massnahmenkategorien:

- Tiefendrainagen (H1a)
- Drainagestollen (H1a)
- Bohrungen (H1a, H1b)
- Pfähle, Schlitzte, Schächte (H1a, W1)
- Anker (W2)
- Hangwasserentwässerung bei Stützkonstruktionen (W2, M1)

Tiefe (Foundationstiefe, Tiefe des Materialersatzes) bei den Massnahmenkategorien:

- Ankerwand, Stützkonstruktionen allg. (W2)
- Schwergewichtsmauern (M1)
- Materialersatz (W3)
- Auflasten, Schüttungen (M1)
- Schutz vor Entlastung am Rutschfuss (M3)

Verwendete Materialien, deren Eigenschaften und Dimensionen:

- Filterrohre aus PVC oder Stahl (H1a, H1b)
- Durchmesser Bohrungen, Filter, Schlitzte, Schächte (H1a, H1b)
- Filtermaterial (H1a, H1b)
- Typus Scherwiderstand, Quantifizierung des Scherwiderstandes (W1)
- Ankertyp, Lastaufnahmefähigkeit (W2)
- Korrosionsschutz bei Komponenten aus Stahl (W1, W2)
- Armierungen (W2, M1)
- Raumgewicht bei Auflasten (M1)
- Raumgewicht bei Entlastungen (M2)

Angaben zu den Ausmassen betreffend:

- Anzahl Bohrungen, Drainagen, Schächte etc.
- Anzahl Anker, Scherwiderstände etc.
- Laufmeter Drainagegräben
- Volumen Materialersatz
- Volumen Entlastung, Auflast

Bei allen Massnahmen ist eine Zustandsanalyse durchzuführen. Dazu ist in der Regel eine Feldbegehung nötig (Ausnahme: ganz neue Massnahmen).

### 4.3 Gefährdungsbilder

Unter Gefährdungsbildern sind schleichende oder plötzliche Einwirkungen auf die Massnahme zu verstehen, welche zu einer Verringerung von deren Zuverlässigkeit führen können. In nachfolgender Tab. 4.1 sind einige typische Gefährdungsbilder und Einwirkungen aufgeführt, welche bei der Massnahmenbeurteilung zu beachten sind.

Typische  
Gefährdungsbilder

Tab. 4.1: Beispiele typischer Gefährdungsbilder (Liste nicht abschliessend).

Gefahrenbilder	Einwirkungen
Verstärkte Hangbewegungen, räumlich konzentrierte Differenzialbewegungen, Stabilitätsprobleme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abscheren von oberflächlichen Entwässerungsgräben → Infiltration von Oberflächenwasser</li> <li>- Undichtigkeiten bei Tiefendrainagen → Anstieg Hangwasserspiegel, Porenwasserdruck</li> <li>- Abscheren von Drainagebohrungen → Anstieg Hangwasserspiegel, Porenwasserdruck</li> <li>- Abscheren von Scherwiderständen → Verlust an Scherwiderstand</li> <li>- Überschreiten der Bruchlast von Ankern → Verlust an negativer treibender Kraft</li> <li>- Versagen von Stützkonstruktionen → Verlust an rückhaltenden Kräften</li> </ul>
Chemisch-physikalische Einflüsse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Versinterung oder Kolmatierung von Drainagerohren, Entwässerungsbohrungen → Anstieg Hangwasserspiegel, Porenwasserdruck</li> <li>- Korrosion von Stahlteilen bei Scherwiderständen, Ankern → Reduktion Materialeigenschaften bis hin zu Versagen, v.a. bei verstärkten Hangbewegungen</li> </ul>
Einwirkung von Naturgefahrenprozessen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Naturgefahrenprozesse können verschiedenartig auf vorhandene Massnahmen einwirken (Aufprall, Druckwirkung, Erosion). Solche Interaktionen sind szenarienbezogen im Gesamtsystem zu betrachten.</li> </ul>

### 4.4 Tragsicherheit

Der Begriff Tragsicherheit im engeren Sinne kann bei Schutzmassnahmen gegen Rutschungen nur bei Massnahmen mit einer statischen Funktion verwendet werden (Tab. 2.1: W1 ohne Injektionen, W2, M1 ohne Aufschüttung, M3). Bei Massnahmen zur Absenkung des Hangwasserspiegels ist die Verwendung des Begriffes Tragsicherheit im engeren Sinne weniger geeignet, obschon ein Hang als Ganzes betrachtet ein System darstellt, dessen Zustand im weitesten Sinn auch unter dem Aspekt der Tragsicherheit betrachtet werden kann. Dasselbe gilt für jene Massnahmen, bei denen durch Veränderungen der Geländeformen eine Verbesserung der Stabilität erzielt wird (Tab. 2.1: Aufschüttung unter M1, M2).

Nur bei Massnahmen  
mit statischer Funktion

Im Folgenden wird der Begriff Tragsicherheit im Sinne der SIA-Normen auf Massnahmen und Bestandteile von Massnahmen mit statischer Funktion angewendet. Für die anderen Massnahmen wird der Begriff „Funktionalität“ verwendet. Die Funktionalität ist die Fähigkeit einer Massnahme, für die anzunehmenden Einwirkungen eine ausreichende Stabilisierung zu erzielen.

Funktionalität

Eine pauschale Beurteilung von Tragsicherheit und Funktionalität ist aufgrund der Komplexität von Rutschprozessen nicht angezeigt. Eine qualitative oder quantitative Beurteilung ist daher unabdingbar. Da auf Stufe der Massnahmenbeurteilung bei

Szenarienbezogene  
Berechnungen

den Unterlagen zu Rutschprozessen ohnehin Stabilitätsberechnungen erforderlich sind, wird die Festlegung der Funktionalität in den meisten Fällen durch szenarienbezogene Berechnungen (v.a. 2D) erfolgen. Die Funktionalität kann als gegeben betrachtet werden, wenn folgende Bedingung erfüllt ist<sup>3</sup>:

$$\frac{\Sigma \text{bremsende Kraft}}{\Sigma \text{treibende Kraft}} \geq 1.05 \dots 1.10 \quad (1)$$

Bei einer ausschliesslich qualitativen Beurteilung muss die begründete Vermutung vorliegen, dass diese Bedingung gegeben ist.

#### 4.5 Gebrauchstauglichkeit

Funktionsfähigkeit  
gewährleisten

Die Gebrauchstauglichkeit ist die Fähigkeit einer Massnahme und ihrer Bauteile, die Funktionsfähigkeit entsprechend den festgelegten Gebrauchsgrenzen zu gewährleisten. Bei Rutschungen können wegen der grossen Massnahmenpalette und den oft komplexen Verhältnissen diesbezüglich keine generellen Angaben gemacht werden. Hinweise zu den einzelnen Massnahmentypen (Tab. 2.1) liefert Kap. 4.8.

Auswertung visuell  
oder mit Messreihen

Die Bestimmung der Gebrauchstauglichkeit erfolgt visuell oder durch Auswertung von Messreihen (z. B. kontinuierlich abnehmende Schüttung von Drainagen unabhängig vom Witterungsverlauf als Indikator für Versinterung, Verstopfung oder Undichtigkeit). Bei neuen Massnahmen kann sie als erfüllt betrachtet werden.

#### 4.6 Dauerhaftigkeit

Unterhalten, erneuern,  
ersetzen

Die Dauerhaftigkeit einer Massnahme kann als gewährleistet betrachtet werden, wenn deren Nutzungsdauer im Rahmen eines „normalen“ Unterhalts von mindestens 50 Jahren erwartet werden kann (Grundsatz 5). Bei den Rutschungen werden hier unter Unterhalt explizit auch Erneuerungen und der Ersatz von Anlageteilen verstanden (z.B. Ersatz von Drainagebohrungen durch Austausch von Pumpen).

Dauerhaftigkeit nur bei  
kontrollierbaren  
Massnahmen

Sie kann bei allen Massnahmentypen bestimmt werden, bei denen eine Kontrollierbarkeit besteht. Dass Teile des Schutzwerkes oder gar das Ganze nicht sichtbar sind, ist manchmal erschwerend, schliesst eine Kontrolle aber nicht grundsätzlich aus. Die Kontrolle kann direkt visuell (z. B. Entwässerungsgräben, Ankerwand) oder indirekt (z.B. Messung an Kontrollankern, Hangwasserspiegelmessungen, Porenwasserdrücke, Sonden, Kameras) erfolgen. Die Massnahmen W3 sind hingegen kaum zuverlässig zu prüfen. Bei den biologischen Massnahmen (v.a. V1) kann nicht von einer gesicherten Dauerhaftigkeit ausgegangen werden, da sie innert kurzer Zeit ihre Wirkung verlieren können (z. B. Sturmschaden am Wald).

Angepasstes  
Kontrollsystem

Das Kontrollsystem muss für das geologisch-geotechnische Modell konfiguriert sein, damit die Prognosen über das Verhalten des Systems nach Massnahmen verifiziert werden können. Beispielsweise ist bei einem zur Absenkung des Hangwasserspiegels ausgelegten Massnahmenpaket die dauernde Kontrollierbarkeit des Hangwassers zwingend nötig.

<sup>3</sup> Für die Verwendung geotechnischer Kennwerte sind die Bestimmungen SIA 267, Kap. 5.3.2, zu den Partialfaktoren zu berücksichtigen.

## 4.7 Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit einer Massnahme wird durch die Verknüpfung von Tragsicherheit / Funktionalität, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit bestimmt (Abb. 5.2, Teil A).

Eine Besonderheit bei Rutschungen ist, dass Massnahmen oft kombiniert eingesetzt werden (z.B. Verankerung kombiniert mit Drainagen). In welchem Ausmass ein einzelner Teil eines Massnahmenpaketes zur Stabilisierung beiträgt, ist nicht einfach zu beurteilen. Die Zuverlässigkeit des Gesamt-Schutzsystems hat durch Prüfung der einzelnen Massnahmen zu erfolgen.

Massnahmen häufig kombiniert

Je grösser die Unsicherheiten des geologisch-geotechnischen Modells, umso kleiner ist die Zuverlässigkeit von Massnahmen einzustufen. Die Unsicherheiten müssen nicht zwangsläufig mit der Gründigkeit und dem involvierten Volumen des Prozesses zunehmen, denn ein homogener tiefgründiger Rutschkörper kann unter Umständen besser bestimmbar sein als eine heterogene mittelgründige Rutschung. Wesentlich ist, dass die Schutzmassnahme auf einem Modell basiert, das der möglichen Überlagerung verschiedener Teilprozesse Rechnung trägt (z.B. phänomenologisch deutlich feststellbare flach- oder mittelgründige Rutschungen, welche tiefgründige Bewegungen überlagern und verbergen, vgl. Abb. 1.2).

Überlagerung verschiedener Prozesse möglich

## 4.8 Hinweise zur Beurteilung der einzelnen Massnahmenkategorien

Zur Stabilisierung von Rutschungen gibt es keine Standardlösungen. Die Massnahmen müssen fallweise beurteilt werden. Die nachfolgenden Angaben liefern allgemeine Hinweise, die bei der Beurteilung der Massnahmen zu beachten sind. Dabei wird zwischen permanenten und spontanen Rutschprozessen unterschieden. Die Kriterien betreffend ist anzumerken, dass die Aufzählungen nicht abschliessend sind und die Bedeutung der Kriterien von Fall zu Fall verschieden sein kann.

Keine Standardbeurteilung möglich

### 4.8.1 Permanente Rutschungen

#### H1a/H1b: Absenkung Hangwasserspiegel/Abbau Porenwasserdruck

Der Massnahmentyp H1 zielt auf die Absenkung des Hangwasserspiegels und der Porenwasserdrücke innerhalb des Rutschkörpers. Ein Abbau der Porenwasserdrücke kann auch unterhalb der Gleitfläche als stabilisierende Massnahme wirkungsvoll sein. Die Funktionalität solcher Massnahmen ist in der Regel einigermassen bestimmbar. Bei Aussagen bezüglich der Porenwasserdrücke sind die Unsicherheiten etwas grösser.

Funktionalität einigermassen bestimmbar

Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit sind einigermassen bestimmbar, wenn Einrichtungen vorhanden sind, welche eine dauerhafte Überwachung der Hangwasserverhältnisse erlauben (Piezometer, Porenwasserdruckgeber, Schüttungsmessstellen). In heiklen Situationen können Überwachungen automatisiert und permanent verfügbar gemacht werden. Generell ist ein Kontroll-/Unterhaltsplan erforderlich. Vor allem in komplexeren Situationen kann es vorteilhaft sein, Kontrollen, Unterhalt und Auswertungen durch ein beauftragtes Büro vornehmen zu lassen. Augenmerk ist der Funktionstüchtigkeit der Messeinrichtungen zu schenken. So kann ein Piezometer beispielsweise abgesichert sein, die Resultate verfälschen und Anlass zu Fehlinterpretationen geben.

Dauerhafte Überwachung nötig

Ersatz von Mass-  
nahmenteilen

Für die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit muss ein möglicher Ersatz von Massnahmenteilen beachtet werden (z. B. Drainagebohrung).

### **Wichtigste Kriterien**

Gebrauchstauglichkeit nicht/teilweise<sup>4</sup> erfüllt:

- Verstopfte Entwässerungsgräben oder -kännel (oft wegen mangelndem Unterhalt);
- Unterirdische Entwässerungsleitungen oder Drainagebohrungen sind versintert oder verstopft (H1);
- Pumpen in Entwässerungsbohrungen funktionieren nicht (H1).

Dauerhaftigkeit nicht/teilweise erfüllt:

- Keine geeigneten Einrichtungen zur Messung des Hangwasserspiegels vorhanden;
- Keine Ersatzmöglichkeiten von Entwässerungsmassnahmen;
- Es besteht kein geregelter Kontroll-/Unterhaltsplan mit klaren Zuständigkeiten/Verantwortlichkeiten.

### **H2: Absenkung Hangwasserspiegel ausserhalb Rutschmasse**

Stabilisierende Wirkung  
zu erwarten

Die Absenkung des Hangwasserspiegels ausserhalb des zu sanierenden Rutschkörpers lässt eine stabilisierende Wirkung erwarten, die aber schwierig zu erfassen ist. Es gibt aber Fälle, wo die Massnahme eine hohe Wirkung erzielen kann. Als komplementäre Massnahme ist dieser Typ stets ins Auge zu fassen.

Funktionalität nur bei  
kontrollierbaren Mass-  
nahmen zu beurteilen

Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Massnahme sind im Allgemeinen bestimmbar. Für den einigermaßen gesicherten Nachweis der Funktionalität müssten im Rutschkörper selbst Messeinrichtungen vorhanden sein, aufgrund welcher die Wirkung der Massname(n) beurteilt und kontrolliert werden kann. Ist dies nicht der Fall, muss die Funktionalität als nicht erfüllt betrachtet und von einer geringen Zuverlässigkeit ausgegangen werden.

### **Wichtigste Kriterien: analog H1a/H1b**

### **W1/W2: Einbringen von Scherwiderständen/negativen treibenden Kräften**

Gute Wirkung bei flach-  
und mittelgründigen  
Rutschungen

Das Einbringen von Scherwiderständen (W1) oder von negativen treibenden Kräften (W2) kann vor allem bei flach- und mittelgründigen Rutschungen als wirksame Massnahme betrachtet werden. Bei tiefgründigen und besonders sehr tiefgründigen Rutschungen kann die Wirtschaftlichkeit den Einsatz der Massnahme limitieren. Grundsätzlich ist es denkbar, durch Materialabtrag die Distanz zur Gleitfläche zu verringern, um somit Scherwiderstände oder negative treibende Kräfte besser einbringen zu können. Bei Materialabtrag ist zu prüfen, ob dadurch nicht neue Instabilitäten hervorgerufen werden können (Ausbildung neuer Gleitflächen). Zudem wirken auch hier Wirtschaftlichkeitsüberlegungen limitierend. Die Tragsicherheit ist quantitativ gut, qualitativ mit Einschränkungen (tiefgründige Rutschungen) bestimmbar. Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Massnahmen können erfüllt werden. Einschränkungen sind zu machen, wenn die Kontrollierbarkeit der Massnahme nicht gegeben ist.

<sup>4</sup> Das Ausmass der Nichterfüllung ist fallweise zu beurteilen

**Wichtigste Kriterien**

Gebrauchstauglichkeit nicht/teilweise erfüllt:

- Scherwiderstände oder Anker sind abgeschert;
- Anker sitzen nicht fest oder sind ausgerissen;
- Scherwiderstände (z.B. Nägel, Mikropfähle) sind stark korrodiert;
- Fehlender Verbund (z.B. Riegel, Longarine) zwischen den Köpfen von Ankern, Nägeln, Mikropfählen etc.

Dauerhaftigkeit nicht/teilweise erfüllt:

- Keine geeigneten Kontrollmöglichkeiten (visuell/messtechnisch) der wirkenden Lasten/Kräfte vorhanden;
- Keine Möglichkeiten für den Ersatz von Massnahmenteilen;
- Es besteht kein geregelter Kontroll-/Unterhaltsplan mit klaren Zuständigkeiten/Verantwortlichkeiten.

**W3: Veränderung Materialeigenschaften**

Die Veränderung der Materialeigenschaften, z.B. durch Materialersatz, kann bei flachgründigen und flachen mittelgründigen Rutschungen eine Wirkung entfalten.

Wirkung bei flachgründigen Rutschungen

Die Wirkung dieser Massnahmenkategorie ist allerdings schwierig zu erfassen bzw. die Funktionalität kaum zuverlässig zu quantifizieren. Bei tiefgründigen Rutschungen sind die Unsicherheiten dieser Massnahme zu gross. Wegen der schwierigen Erfassbarkeit der Massnahme ist die Zuverlässigkeit durchwegs als gering zu bezeichnen. Eine Ausnahme bei flach- und mittelgründigen Rutschungen können Sickerbetongräben bilden, welche zusätzlich auch eine Drainagewirkung entfalten (Kriterium Gebrauchstauglichkeit nicht/teilweise erfüllt: Sickerbetongräben sind wegen differenzieller Bewegungen in sich zerschert und/oder die Hohlräume kolmatiert).

Bei tiefgründigen Rutschungen zu grosse Unsicherheiten

**M1/M2/M3: Auflast und Entlastung**

Durch Veränderungen der Massenbilanz kann grundsätzlich eine hohe Zuverlässigkeit erzielt werden. Mit steigender Prozesstiefe kann die Wirtschaftlichkeit den Einsatz der Massnahme zunehmend limitieren. Die Funktionalität kann relativ gut quantifiziert werden. Eine qualitative Beurteilung beinhaltet zu grosse Unsicherheiten. Die Anforderungen bzgl. Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit sind in der Regel erfüllbar.

Hohe Zuverlässigkeit möglich

Der Schutz vor Entlastung des Rutschfusses durch Erosion (M3) ist primär bei flach- und mittelgründigen Rutschungen wirksam. Bei tiefgründigen Rutschungen sind dieser Massname eher Grenzen gesetzt.

**Wichtigste Kriterien**

Gebrauchstauglichkeit nicht/teilweise erfüllt:

- Eine als Fusslast wirkende Aufschüttung ist stark erodiert oder es besteht die Gefahr, dass sie erodiert werden kann (→ Massenverlust);
- Bei einem durch Materialabtrag entlasteten Rutschkopf ist durch nachrutschendes Material eine neue Zusatzlast entstanden.

Dauerhaftigkeit nicht/teilweise erfüllt:

- Es besteht kein geregelter Kontrollplan.

## V1/V2: Wald und ingenieurbioologische Massnahmen

Nur bei flachgründigen Rutschungen zu berücksichtigen

Wald und ingenieurbioologische Massnahmen können lediglich bei flachgründigen Rutschungen als Massnahme berücksichtigt werden (siehe Kap. 2). Der Wald fliesst jedoch bei den in der Wirkungsanalyse verwendeten Szenarien ein. Beim Wald ist die Dauerhaftigkeit nicht gegeben, denn er kann infolge von Sturm, Brand oder gravitativen Naturprozessen innert Kürze zerstört oder derart stark beschädigt werden, dass seine Wirkung weitgehend entfällt. Auch Käferbefall oder Krankheiten können ihn substanziell schwächen. Deshalb kann nicht von einer permanenten Verfügbarkeit des Waldes ausgegangen werden (Grundsatz 3). Im Gegensatz beispielsweise zur Lawinengefahr, wo bei einem geschädigten Wald mittels temporärem Stützverbau eine Schutzwirkung erzielt werden kann, bestehen bei Rutschungen keine vergleichbaren Möglichkeiten.

Wald wirkt auch ausserhalb des Standortes stabilisierend

Beim Wald kommt erschwerend hinzu, dass er seine Wirkung hinsichtlich Rutschungen nicht einzig an seinem Standort selbst entfaltet. Dank seiner Regulierung der Hangwasserverhältnisse kann sich der Wald auch stabilisierend auf weiter hangabwärts liegende Bereiche auswirken.

### 4.8.2 Spontane Rutschungen (inkl. Hangmuren)

Häufig an substabilen Hängen

Spontane Rutschungen und Hangmuren ereignen sich vielfach an Stellen, an denen keine offensichtlichen Hanginstabilitäten in Form von aktiven Rutschungen vorhanden waren. Bei näherer Betrachtung zeigt es sich allerdings oft, dass die betroffenen Hänge Anzeichen geringfügiger Kriechbewegungen oder früherer Bewegungen aufweisen und der Rutschterminologie entsprechend als substabil zu bezeichnen wären. Spontane Rutschungen aus vollkommen stabilen Hängen oder Böschungen kommen seltener vor. Diesbezüglich häufiger sind Hangmuren, bei denen aber oft eine anthropogene Beeinflussung hinzukommt (siehe AGN, 2004).

Bei der Beurteilung der Massnahmenwirkung bei spontanen Rutschprozessen sind folgende Fälle zu unterscheiden:

Frontpartien oder steile Geländeabschnitte aktiver Rutschkomplexe

- Spontane Rutschungen und/oder Hangmuren aus Frontpartien oder steileren Geländeabschnitten aktiverer Rutschkomplexe: Deren Entstehung ist eine Folge der zunehmenden Versteilung von Hangpartien infolge permanenter Hangbewegungen. Je stärker die Bewegungsraten einer permanenten Rutschung mittels der erwähnten Massnahmen reduziert werden können, umso geringer wird in der Regel die Wahrscheinlichkeit solcher spontanen Folgeprozesse. Rutschbereiche, welche besonders zu spontanen Sekundärprozessen neigen, können durch gezielte Massnahmen entschärft werden (v.a. H1a/H1b). Im Wesentlichen gelten auch hier die unter Kap. 4.8.1 gemachten Hinweise.

Mutmasslich stabile Hänge

- Spontane Rutschungen und/oder Hangmuren aus mutmasslich stabilen Hängen oder Böschungen: Recht häufig sind solche Ereignisse anthropogen beeinflusst (siehe Förderfaktoren in AGN 2004). Deshalb geht es primär darum, anthropogene Förderfaktoren zu eliminieren, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses bereits reduziert werden kann. Erst in einem zweiten Schritt sind gezielte Schutzmassnahmen in Betracht zu ziehen. Hierzu sind die folgenden Hinweise zu beachten.

### H1a/H1b: Absenkung Hangwasserspiegel/Abbau Porenwasserdruck

Grundsätzlich gefahrenmindernde Wirkung

Grundsätzlich lassen Entwässerungsmassnahmen eine gefahrenmindernde Wirkung vermuten, entscheidend ist aber deren Dimensionierung. Da Hangmuren

und spontane Rutschungen meist mit einer extremen Durchnässung des Bodens einhergehen, müssten die Entwässerungsmassnahmen auf solche Verhältnisse ausgelegt sein. Die Dimensionierung ist mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, da oberirdische wie auch unterirdische Spitzenzuflüsse quantifiziert werden müssten. Wenn Entwässerungsmassnahmen versagen bzw. eine unzureichende Wirkung aufweisen, können sie selber zu einem Trigger werden, indem sie z. B. örtlich überlaufen, eventuell verbunden mit Erosion (v.a. offene Entwässerungskanal), zum Aufbau einer hohen Wassersättigung und/oder hoher Wasserdrücke beitragen oder eine Längsdrainage entlang von Leitungen begünstigen. Solche Versagensmöglichkeiten müssen szenarienbezogen abgeschätzt werden. Im Gegensatz zu permanenten Rutschungen, wo Entwässerungsmassnahmen direkt am Stand der Hangwasserspiegellage kontrolliert werden können, dürfte diese Kontrollmöglichkeit speziell bei Entwässerungsmassnahmen zur Verhinderung von Hangmuren meist fehlen, da sich ein hoher, kritischer Hangwasserspiegel erst bei extremen Witterungsverhältnissen einstellt.

Die Unsicherheiten bei der Massnahmenbeurteilung sind insgesamt als erheblich, die Versagenswahrscheinlichkeit als gross einzustufen.

Unsichere Beurteilung

## H2: Absenkung Hangwasserspiegel ausserhalb Rutschmasse

Die Auslösung von spontanen Rutschungen und Hangmuren betreffend lässt diese Massnahmenkategorie ebenfalls eine gewisse Wirkung vermuten, die aber äusserst schwierig zu erfassen und zu kontrollieren ist. Die Unsicherheiten sind gross.

Wirkung zu vermuten  
aber schwer zu  
erfassen

## W1/W2: Einbringen von Scherwiderständen/negativen treibenden Kräften

Hänge mit einer Disposition zum Ausbruch von Hangmuren können durch den Verbau mit Widerständen gesichert werden. Da Hangmuren selbst auf kleiner Fläche (ca. 1 Are) entstehen können, wäre dazu ein relativ enges Verbauraster nötig, gegebenenfalls mit einer flächenhaften Netzabdeckung ergänzt, welche den Verbund zwischen den Widerstandselementen (z.B. Köpfe von Mikropfählen) sicherstellt und einen Erosionsschutz bildet. Die Unsicherheiten bei der Dimensionierung eines solchen Hangverbau können dank der heutigen Untersuchungsmethoden stark eingeschränkt werden. Eine optimale Wirkung ist dann zu erwarten, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Enges Verbauraster  
notwendig

- Widerstände müssen bis unter die potenziell mobilisierbare Lockergesteinsschicht reichen, bei untiefem Fels (Förderfaktor) bis in den Fels;
- Die Widerstände müssen in einem relativ engen Raster angeordnet sein, um das Ausbrechen von Hangmuren aus den Zwischenräumen zu verhindern (oder evtl. Ausfachung der Zwischenräume mit Netzabdeckung).

Nachteilig ist die erschwerte Kontrollierbarkeit einer flächigen Hangsicherung, was Fragen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Massnahme aufwirft. Grundsätzlich könnte ein solcher Hang auch durch eine systematische, durch einen Geologen/Geotechniker konzipierte und begleitete, geschlossene Überbauung mit Häusern gesichert werden. Die Unsicherheiten sind in diesem Fall gering und die Frage der Kontrollierbarkeit kaum relevant, so dass diese Massnahme als wirksam bezeichnet werden kann.

Dauerhaftigkeit  
schwierig zu  
kontrollieren

## W3: Veränderung Materialeigenschaften

Ein Materialersatz in Form von Sickerbetongräben kann die Entstehung spontaner Rutschungen und auch das Ausbrechen von Hangmuren erschweren. Neben der

Wirkung schwierig zu  
beurteilen

Wirkung als Widerstand ist dabei auch der Drainageeffekt zu beachten. Die Beurteilung der Massnahmenwirkung ist schwierig zu erfassen.

**M1/M2/M3: Auflast und Entlastung**

Bei tiefgründigen Rutschungen ungeeignet

Diese Massnahmen können zur Verhinderung spontaner, v.a. flach- und mittelgründiger Rutschungen wirkungsvoll und zuverlässig sein. Zur Verhinderung von Hangmuren sind sie weniger geeignet.

**V1/V2: Wald und ingenieurbioologische Massnahmen**

Dauerhaftigkeit nicht sichergestellt

Wald und ingenieurbioologische Massnahmen können bei spontanen flachgründigen und flachen mittelgründigen Rutschungen sowie bei Hangmuren als Massnahme berücksichtigt werden. Wie bereits aus Kap. 2 hervorgeht, ist die Wirkung schwierig zu beurteilen und beim Wald ist die Dauerhaftigkeit nicht sichergestellt.

**4.9 Gesamtsystem Massnahmen**

Einzelmassnahme wirkt auf Gesamtsystem

Unter dem Gesamtsystem wird der Verbund mehrerer Einzelmassnahmen verstanden. Das Versagen einer Einzelmassnahme kann eine Beeinträchtigung des Gesamtsystems zur Folge haben. Bei einer Kombination von Massnahmen, wie dies bei Rutschungen oft der Fall ist, sind die Auswirkungen jeder einzelnen Massnahme zu beurteilen. Beispielsweise werden Stützkonstruktionen meist mit Entwässerungen kombiniert. Wenn die Entwässerung versagt, dann wirken auch auf die Stützkonstruktion andere Kräfte.

Tab. 4.2: Ablauf der Massnahmenbeurteilung (Minimalanforderungen, Fortsetzung von Tab. 3.1). Die Beurteilung hat szenarienbezogen zu erfolgen. Der Ablauf bezieht sich auf bestehende Massnahmen, ist aber auch bei projektierten Massnahmen anzuwenden (dabei fallen verschiedene Beurteilungspunkte weg). Hinweis: In der Spalte „Nein“ ist unter verschiedenen Ziffern „Schritt 3“ aufgeführt. Was darunter zu verstehen ist, geht aus den jeweiligen Bemerkungen hervor.

	Anforderungen/Kriterien	Ja	Nein	Bemerkungen
<b>Grundlagen Prozess</b>				
9	Um die Wirkung der Massnahme mit ausreichender Genauigkeit bestimmen zu können, liegen umfassende <b>quantitative Grundlagen</b> vor, insbesondere: <ul style="list-style-type: none"> <li>- a. Ausreichend lange Messreihen (Geodäsie, Inklinometer, Extensometer);</li> <li>- b. Die Geschichte der Rutschung ist bekannt bzw. rekonstruierbar;</li> <li>- c. Für bekannte „Krisen“ liegt eine Ursachenanalyse vor;</li> <li>- d. Geologisch-hydrogeologisches Modell (geotechnisches Modell), möglichst auf der Basis von Sondierungen (Bohrungen, Seismik, Geoelektrik, Sondierschlitze);</li> <li>- e. Geologische Hangprofile (ohne/mit Massnahme[n]), möglichst auf der Basis von Sondierungen (wie oben);</li> <li>- f. Quantifizierte Bodenparameter;</li> <li>- g. Stabilitätsberechnungen mit Sensitivitätsanalysen (2D in diversen Schnitten oder 3D).</li> <li>-</li> </ul>	→10	Abbruch oder 	Rein qualitative oder nur punktuell-quantitative Beurteilungen sind unzureichend.   = Falls einer der Punkte nebenstehenden nicht erfüllt ist, sind die entsprechenden Abklärungen nachzuholen. Andernfalls erfolgt Abbruch.  Eine Ausnahme bilden Spontanrutschungen, für welche a, b und c nicht zutreffen.

	Anforderungen/Kriterien	Ja	Nein	Bemerkungen
<b>Grundlagen Massnahme</b>				
10	Die vorhandenen Werksangaben sind umfassend. Sie informieren ausreichend über das Werk (Erstellungszeitpunkt, z.B. Ausführungsprojekt).	→11	Abbruch oder ⬆	Weitere Abklärungen, wenn ungenügende Angaben vorliegen. Sind keine genügenden Angaben eruierbar → Abbruch und spezielle Abklärungen auf negative Wirkung (Kap. 3.3).
11	Der Ist-Zustand ist erfasst. Es können Aussagen gemacht werden zu allfällig reduzierten Wirkungen.	→12	Abbruch oder ⬆	Weitere Abklärungen, wenn ungenügende Angaben vorliegen. Sind keine genügenden Angaben eruierbar → Abbruch und spezielle Abklärungen auf negative Wirkung (Kap. 3.3).
<b>Bestimmung Tragsicherheit/Funktionalität</b>				
12	Tragsicherheit/Funktionalität sind gegeben. Sie können szenarienbezogen entweder <b>qualitativ</b> oder <b>quantitativ</b> ausreichend genau abgeschätzt oder bewertet werden. Bei qualitativer Betrachtung gilt insbesondere: - a. Das Bauwerk zeigt keine verdächtigen Mängel; - b. Es ist zu vermuten, dass Punkt a. auch für verborgene, nicht kontrollierbare Massnahmenteile gilt.	→13	Schritt 3 +21 oder: Abbruch	Nein = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit geringer Zuverlässigkeit. oder: Abbruch, falls Tragsicherheit/Funktionalität völlig unzureichend. Spezielle Abklärungen auf negative Wirkung (vgl. Kap. 3.3).
13	Die Massnahme hat in der Vergangenheit erheblichen Belastungen („Krisen“) bereits erfolgreich widerstanden, was als Hinweis für eine genügende Tragsicherheit/Funktionalität betrachtet werden kann.	→16	→14	
14	Es kann quantitativ oder semi-quantitativ nachgewiesen werden, dass die Tragsicherheit/Funktionalität der Massnahme auch bei einer „Krise“ gegeben ist.	→16	→15	
15	Aus ungenügender Tragsicherheit/Funktionalität ist resultiert <b>keine</b> Verschärfung der Gefahrensituation.	Schritt 3 +21	Abbruch	Ja = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit geringer Zuverlässigkeit. Nein = Abbruch und spezielle Abklärungen auf negative Wirkung (vgl. Kap. 3.3).
<b>Bestimmung Gebrauchstauglichkeit</b>				
16	Die Schutzmassnahme ist neu. Die Gebrauchstauglichkeit kann bezogen auf Szenario X als erfüllt betrachtet werden.	→18	→17	Ja = Gebrauchstauglichkeit erfüllt.
17	Die Schutzmassnahme zeigt <b>keine</b> Schwachstellen, welche bezüglich Szenario X ein funktionelles Versagen vermuten lassen.	→18	Schritt 3 +21 oder Abbruch	Ja = Gebrauchstauglichkeit teilweise/bedingt erfüllt. Nein = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit geringer Zuverlässigkeit.

	Anforderungen/Kriterien	Ja	Nein	Bemerkungen
				sigkeit. oder: Bei erheblichen Schwachstellen Abbruch und spezielle Abklärungen auf negative Wirkung (Kap. 3.3).
<b>Bestimmung Dauerhaftigkeit</b>				
18	Die Schutzmassnahme hat <b>keine</b> nicht direkt kontrollierbaren Bauteile. oder: Die Wirkung verborgener Bauteile kann indirekt über Messungen kontrolliert werden.	→19	Schritt 3 +21	Nein = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit Zuverlässigkeit eingeschränkt (falls Ziffern 16 oder 17 bejaht).
19	Es kann angenommen werden, dass die Massnahme auf längere Zeit den möglichen Einwirkungen standhält und in gutem Zustand bleibt. oder: Das System ist so ausgelegt, dass bei Bedarf kurzfristig gleichwertige Ersatzmassnahmen vorgenommen werden können (z.B. Ersatz eines defekten Ankers).	→20	Schritt 3 +21	Nein = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit eingeschränkter Zuverlässigkeit .
20	Kontrollen und Unterhalt sind auf längere Zeit durch Institutionen der öffentlichen Hand (ggf. Flurgenossenschaften) gewährleistet.	Schritt 3 +21	Schritt 3 +21	Ja = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit hoher Zuverlässigkeit . Nein = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit eingeschränkter Zuverlässigkeit .
<b>Betrachtung im Massnahmen-Gesamtsystem</b>				
21	Die Massnahme ist isoliert zu betrachten. Sie ist nicht Bestandteil eines Gesamtsystems von Massnahmen.	Schritt 3	→22	Ja = Gesamtbetrachtung.
22	Es bestehen weitere, direkt rutschbezogene Massnahmen.	→23	→24	
23	Die Zuverlässigkeit des Massnahmen-Gesamtsystems ist aufgrund der Zuverlässigkeit der einzelnen Massnahmen überprüft. oder: Es existieren nachweislich Redundanzen (das Versagen der einzelnen Massnahme beeinträchtigt das Gesamtsystem nicht oder nur geringfügig).	→24	⬆	Nein = jede einzelne Massnahme ist im Ablauf bis zu Ziffer 20 zu beurteilen.
24	Es bestehen weitere Massnahmen im Bereich eines anderen Gefahrenprozesses (z. B. Wildbach), welche sich auf das System auswirken können. Deren Wirkung ist bekannt.	Schritt 3	Schritt 3	Ja = Wirkungsbeurteilung des Gesamtsystems unter Berücksichtigung der Massnahmen des anderen Gefahrenprozesses. Falls deren Wirkung nicht bekannt → Beurteilung derselben bis zu Ziffer 20. Nein = Wirkungsbeurteilung des Gesamtsystems „Rutschung“.

## 5. Wirkungsbeurteilung

Es wird die szenarienbezogene Wirkung der Massnahme(n) auf den Prozessablauf quantifiziert. Die Resultate werden direkt in Gefahrenkarten umgesetzt.

### 5.1 Permanente und spontane Rutschungen: Ansatz Stabilitätsberechnungen

Die Quantifizierung der Massnahmenwirkung ist auf Verfahren zur Berechnung der Stabilität abzustützen (2D oder 3D). Solche Stabilitätsberechnungen machen keine Aussagen zur Aktivität einer Rutschung. Sie unterscheiden sich darin zu Hochwasser-, Lawinen- oder Sturzmodellierungen, welche konkrete Aussagen zu Intensitäten und Wirkungsräumen liefern. Da Stabilitätsberechnungen jedoch vereinfachender rechnerischer Ausdruck eines Systemzustandes bzw. von dessen Sensitivität sind, müssen sie als bestmöglicher quantifizierender Ansatz zur Gefahren- bzw. Wirkungsbeurteilung bei permanenten und spontanen Rutschungen betrachtet werden.

Stabilitätsberechnungen bestmöglicher quantitativer Ansatz

Vor allem 2D-Stabilitätsberechnungen werden in der Praxis von zahlreichen Fachspezialisten angewandt. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass mögliche Anwender in genügender Zahl vorhanden sind. Bei 3D-Stabilitätsberechnungen hingegen ist der Kreis der Anwender auf hochspezialisierte Institutionen (v.a. Hochschulen) beschränkt. Das prinzipielle Vorgehen bei Stabilitätsberechnungen betreffend wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (z.B. Lang et al., 2003).

2D-Stabilitätsberechnungen häufiger

Die Stabilitätsberechnungen müssen der möglichen Variation der relevanten Parameter ausreichend Rechnung tragen und auf einem plausiblen geologisch-hydrogeologischen Modell basieren (Anforderungen siehe Kap. 1.3). Unsicherheiten im Modell sind durch entsprechende Parametervariation zu berücksichtigen, woraus ein „Ensemble“ errechneter Stabilitätswerte resultiert.

Parametervariationen bei Stabilitätsberechnungen

Prozesseitig bezieht sich die Parametervariation v.a. auf:

- Bodenkennwerte  $\varphi'$ ,  $c'$
- Lage der Gleitfläche(n)
- Geometrie der Gleitfläche [polygonal, kreisförmig]
- Möglichkeit der Bildung neuer Gleitflächen
- Lage des/der Hangwasserspiegel
- Porenwasserdrücke
- evtl. Erosion im bremsenden Teil
- Bildung möglicher Auflasten im treibenden Teil (z.B. Einflüsse aus angrenzenden Rutschungen)
- Mögliche Lastfälle

Die Komplexität von Rutschungen bedingt unter Umständen einen erheblichen Untersuchungsaufwand, insbesondere bei grossen Rutschungen. Dadurch kann die Bandbreite möglicher Parametervariationen besser eingegrenzt werden. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass bei zu grossen Unsicherheiten in der Bildung des geologisch-geotechnischen Modells ein Abbruch der Beurteilung zu erwägen ist

Erheblicher Untersuchungsaufwand insbesondere bei grossen Rutschungen

Parametervariationen  
bei Scherwiderständen  
und negativ treibenden  
Kräften

Massnahmenseitig betrifft die Parametervariation v.a. die effektiven Werte für Scherwiderstände und negativ treibende Kräfte (Ankerkräfte). Variationen sind besonders dann erforderlich, wenn die Zuverlässigkeit von Massnahmen nur eingeschränkt oder gering ist. Spezieller Fokus ist dabei auf die Tragsicherheit/Funktionalität (Kap. 4.4) und die Gebrauchstauglichkeit (Kap. 4.5) zu richten. Bei einer Absenkung des Hangwasserspiegels könnte die Frage beispielsweise lauten: Wie verändert sich die Stabilität des Systems, wenn die Entwässerungsleistung durch Versinterung oder Verstopfung abnimmt?

Verwendung geotechnischer  
Grössen  
gemäss SIA 260

Die Geotechniknorm (SIA 260) liefert die Grundsätze zur Verwendung von geotechnischen Grössen. In den Berechnungen und bei den verwendeten Parametern ist zwischen totalen und effektiven Spannungen zu unterscheiden.

Grundsätze, Annahmen, Vorgehen:

- a) Eine Massnahme bewirkt eine verringerte Wahrscheinlichkeit, dass eine substanzielle Beschleunigung/Aktivierung („Krise“) eintritt (permanente Rutschungen) oder ein Bruchvorgang stattfindet (spontane Rutschungen). Die Wirkung einer Massnahme kann anhand der Resultate von Stabilitätsberechnungen beziffert werden. Als Mass wird der Sicherheitsfaktor FS verwendet. Als Sicherheitsgewinn wird die prozentuale Veränderung der Stabilität zwischen dem Ausgangszustand und dem Zustand nach Massnahmen bezeichnet.
- b) Die Stabilität ist vorteilhaft entlang verschiedener Profile zu berechnen. Dabei ist für die Beurteilung der Wirksamkeit jeweils das ungünstigste Profil zu verwenden.
- c) Die Zuverlässigkeit bzw. Versagenswahrscheinlichkeit einer Massnahme wird szenarienbezogen über die Modellparameter berücksichtigt. So hat beispielsweise eine eingeschränkt zuverlässige Entwässerung einen Anstieg des Hangwasserspiegels zur Folge, was sich in einem geringeren Sicherheitsfaktor niederschlägt. Defekte Anker haben einen Verlust an negativen treibenden Kräften zur Folge. Je geringer die Zuverlässigkeit der Massnahme, umso mehr nähern sich die Modellparameter dem Ausgangszustand an (vor Massnahmen). Die Steuerung der Modellparameter hat fallspezifisch zu erfolgen. Es gibt dazu keine allgemein gültigen Regeln. Speziell zu beachten sind mögliche verschärfende Auswirkungen nicht funktionierender Massnahmen. Die Überlegungen zur Variation der Modellparameter müssen textlich klar dargelegt werden.
- d) Für die Zustände vor und nach Massnahmen sind dieselben szenarienabhängigen Randbedingungen zu verwenden.
- e) Bei den Berechnungen ist eine Variation der Modellparameter erforderlich, welche der Komplexität der Gefahrensituation sowie den jedem Untergrund immanenten Inhomogenitäten und Anisotropien ausreichend Rechnung trägt. Die Parametervariation hat innerhalb eines vernünftigen Wahrscheinlichkeitsbereichs stattzufinden, der im Einklang steht mit den bei der Erarbeitung von Gefahrenkarten üblichen Standards des Bundes (also keine extrem unwahrscheinlichen Szenarien wählen).
- f) Aus der Variation der Parameter gehen verschiedene Sicherheitsfaktoren hervor, welche letztlich ein Mass für die Sensitivität des Systems sind. Die Streuung wird durch den Quotienten  $FS_{\max.}/FS_{\min.}$  zum Ausdruck gebracht.  $FS_{\max}$  entspricht dem besten,  $FS_{\min}$  dem schlechtesten realistischen Systemzustand. Je umfangreicher eine sinnvolle Parametervariation möglich ist (z.B. grosse Zahl von Hangwasserspiegelmessungen), umso mehr ergeben sich Möglichkeiten einer statistischen Auswertung der erreichten Sicherheits-

faktoren (Standardabweichung  $\mu \pm 2\sigma = 95\%$  der Fälle. Anmerkung: geotechnische Parameter sind oft nicht normal verteilt).

Dabei wird von folgenden Überlegungen ausgegangen:

- Je grösser der Sensitivitätsquotient desto grösser sind die Unsicherheiten.
- Bei einem sensiblen/unsicheren System muss der prozentuale Sicherheitsgewinn gegenüber dem Zustand vor Massnahmen grösser sein als bei einem weniger sensiblen, um die Wirkung einer Massnahme berücksichtigen zu können.

g) Der Sensitivitätsquotient ( $FS_{\max.}/FS_{\min.}$ ) wird dem prozentualen Sicherheitsgewinn gegenüber gestellt, wie in Abb. 5.1 anhand eines Beispielen erläutert wird.

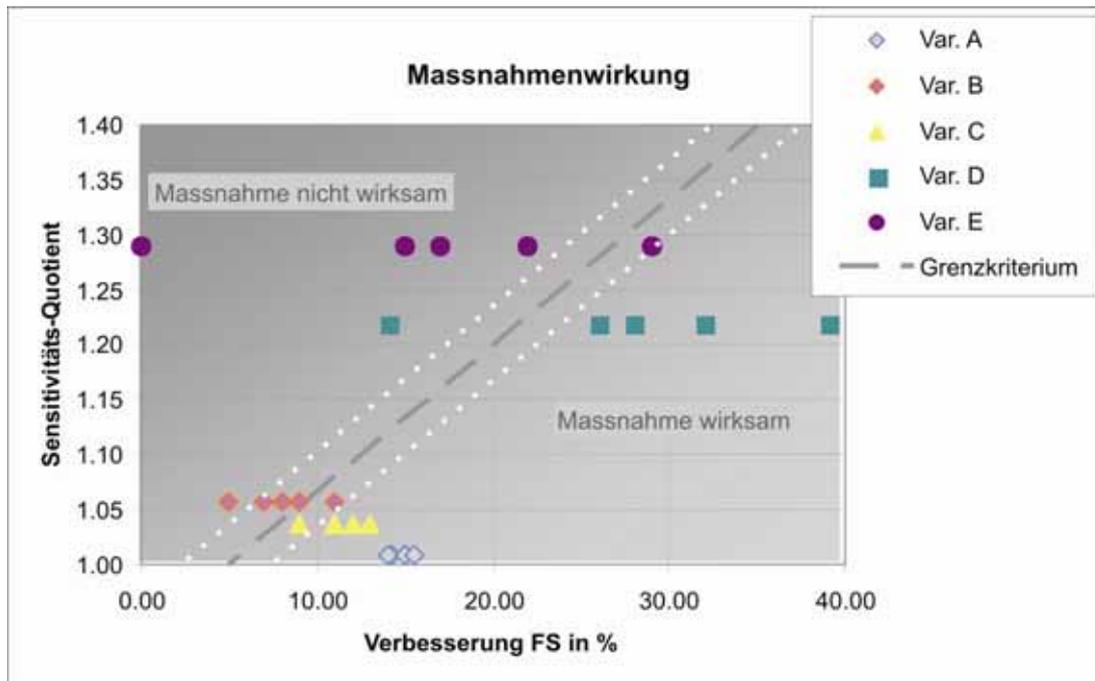


Abb. 5.1: Beurteilung der Massnahmenwirkung. Datengrundlage Massnahmen: Bericht F0725.5, GEOTEST, 18.12.2007.

In Abb. 5.1 sind als Beispiel die Sicherheitsfaktoren für fünf Systemzustände mit Massnahmen dargestellt (Var. A, B, C, D, E). Jeder Fall ist durch Parametervariationen ( $\phi'$ ,  $c'$ , Hangwasserspiegel) und verschiedene Lastannahmen charakterisiert, woraus unterschiedliche Sicherheitsfaktoren resultieren. Die Variation der Sicherheitsfaktoren wird durch den Quotienten (y-Achse, „Sensitivitätsquotient“) ausgedrückt. Der Sicherheitsgewinn (x-Achse) ist die prozentuale Veränderung gegenüber dem Ausgangszustand (vor Massnahme). Das Grenzkriterium (graue Gerade) unterteilt das Diagramm in zwei Felder (Massnahme wirksam vs. nicht wirksam). Es ist nicht als scharfe Grenze zu verstehen, sondern als ein Übergangsbereich (hell gepunktete Geraden). Bei erfüllter Massnahmenwirkung ist eine Reduktion der Gefahrenstufe möglich, bei schlechter Wirksamkeit nicht. Im vorliegenden Fall erweisen sich Varianten A und C als weitgehend wirksam. Bei den Varianten B, D und E existieren verschiedene Parameterkombination, bei denen die Massnahmenwirkung ungenügend ist.

Sicherheitsgewinn =  
prozentuale Veränderung gegenüber  
Ausgangszustand

## 5.2 Alternativer Ansatz für permanente Rutschungen

Nach langer Beobachtungszeit Wirksamkeit ohne Berechnungen zu beurteilen

Es gibt einzelne Fälle permanenter Rutschungen, in denen die Massnahmenwirkung nicht mittels 2D- oder 3D-Modellierungen geprüft wurde, wo aber lange Messreihen (v.a. Bewegungsraten, Hangwasserspiegel) vorliegen (z.B. Lehnenviadukt A2 Beckenried NW, Arveyes VD). In solchen Fällen kann die Wirksamkeit als gegeben betrachtet werden, wenn die Beobachtungszeit ausreichend lang ist (ca. 10 Jahre) und die Rutschung dabei auch witterungsmässig kritische Situationen schadlos überstanden hat (z.B. Starkniederschläge Frühjahr 1999, August 2005).

Bei geologischen Unsicherheiten lange Beobachtungen sinnvoll

Generell sind längere Beobachtungsphasen äusserst wertvoll, um die Wirkung einer Massnahme zu verifizieren. Dies gilt speziell dort, wo die Unsicherheiten im geologischen Modell relativ gross sind.

## 5.3 Methodischer Ansatz für Hangmuren

Wirkungsbeurteilung auf Stabilitätsberechnungen abstützen

Bei Hangmuren bestehen graduelle Übergänge zu flachgründigen spontanen Rutschungen. Inwieweit der Prozess durch einen Bruchvorgang im engeren Sinne oder durch Verflüssigungsphänomene (z.B. hydraulischer Grundbruch, Liquefaktion, Überschreiten Fließgrenze) initiiert wurde, ist im Einzelfall indes schwierig zu beurteilen. Obschon Stabilitätsberechnungen nur Aussagen zum Bruchverhalten des Untergrundes machen, ist bei der Wirkungsbeurteilung von Massnahmen gegen Hangmuren auf dieses Hilfsmittel abzustützen. Es erlaubt einerseits den Einfluss des Wassers (Hangwasserdruckhöhe bei der Auslösung von Hangmuren oft höher als die Terrainoberfläche), andererseits die kritischen Gleitflächen (Tiefe) und involvierten Volumina abzuschätzen. Den Unsicherheiten im Modell ist durch Variation der Parameter Rechnung zu tragen. Zusätzlich ist eine Massnahme zwingend hinsichtlich ihrer Flächenwirkung zu beurteilen, denn der Ausbruch von Hangmuren erfolgt oft sehr kleinräumig (Ausbrüche auf einer Fläche von 1 Are sind keine Seltenheit) und ist in der Regel durch nicht lokalisierbare Diskontinuitäten oder Inhomogenitäten im Untergrund vorgezeichnet. Durch eine wirksame Massnahme müssen auch kleinflächige Ausbrüche unterbunden werden.

Die Wirkungsbeurteilung umfasst somit zwei Schritte:

1. Stabilitätsberechnungen (analog Kap. 5.1) → wirksam/nicht wirksam;
2. Beurteilung der Flächenwirkung einer Massnahme bzw. des Massnahmenrasters (vgl. Hinweise Kap. 4.8.2) bezüglich der minimal noch möglichen Ausbruchflächen. Verhindert der Verbau das Ausbrechen von Hangmuren < 1-2 Are, so kann die Massnahme als wirksam (++) betrachtet werden.

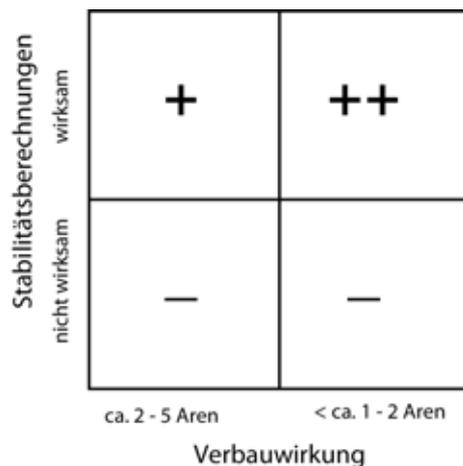


Abb. 5.2: Beurteilung der Massnahmenwirkung bei Hangmuren aufgrund der Kriterien Stabilität und Verbauraster (++ = weitgehend wirksam, + = bedingt wirksam → kleine Ausbrüche sind noch möglich; - = unwirksam).

#### 5.4 Umsetzung in der Gefahrenkarte

Die Beurteilung der Wirksamkeit von Massnahmen bei Rutschungen ist sehr anspruchsvoll. Im Gegensatz zu den anderen gravitativen Naturgefahren kann nicht einfach eine neue Modellierung beispielsweise auf der Basis der Existenz eines Schutzdammes (z.B. Sturz, Lawinen) gerechnet und anschliessend analysiert werden, wie viel Material zurückgehalten wird. Bei Rutschungen muss stets geprüft werden, wie sich das ganze System mit und ohne Massnahmen verhält. Dabei müssen alle Unsicherheiten bezeichnet werden, und zwar auf folgenden Ebenen:

- Prozess (Unsicherheiten geologisch-hydrogeologisches Modell);
- Massnahme (Unsicherheiten bezüglich Zuverlässigkeit);
- Wirkung der Massnahme (inkl. Abschätzung Extremereignis).

System mit und ohne  
Massnahmen  
überprüfen

##### Permanente Rutschungen

Massnahmen wirken in der Regel auf die Intensität bzw. Aktivität, das Aktivierungspotenzial und das Potenzial zu Differenzialbewegungen (z.B. Hangbewegungen werden durch eine Ankerwand stark reduziert oder gestoppt) sowie etwas untergeordnet auch hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit (Eintretenswahrscheinlichkeit einer „Krise“ oder Aktivierung).

Wirkung auf Intensität,  
Aktivierungspotenzial,  
Differenzialbewegung,  
Wahrscheinlichkeit

Die Umsetzung der ausgewiesenen Massnahmenwirkung erfolgt durch eine Reduktion der Gefahren- bzw. Aktivitätsstufe, ausgehend von der Gefahren- bzw. Aktivitätsstufe vor der Massnahme.

Umsetzung durch  
Reduktion der  
Gefahrenstufe

##### Spontane Rutschungen und Hangmuren

Massnahmen können sowohl die Wahrscheinlichkeit, als auch die Intensität/Aktivität beeinflussen. Es ist von Fall zu Fall zu beurteilen, welches Kriterium eine stärkere Verringerung erfährt.

Wirkung auf Wahr-  
scheinlichkeit, Aktivität

Tab. 5.1: Umsetzung von wirksamen Massnahmen in die Gefahrenkarte.

	Verfahren/Kriterien			Rückstufung um max.
	Stabilitätsberechnungen (Modellierungen 2D)	Lange Beobachtungsreihe	Verbauraster Bei Massnahmentyp W1, W2	
				Wegen den bei Rutschungen vorhandenen Unsicherheiten kann keine Rückstufung nach weiss erfolgen. Es ist stets mind. Restgefährdung auszuscheiden (gelb-weiss).
<b>Permanente Rutschungen</b>	ja	nein	Verbauungen sind bei den Stabilitätsberechnungen zu berücksichtigen	1 Gefahrenstufe
	nein	ja		1 Gefahrenstufe
	ja	ja		2 Gefahrenstufen
<b>Spontane Rutschungen innerhalb von permanenten Rutschgebieten<sup>1</sup></b> (9-Felder-Diagramm)	ja	nein		1 Gefahrenstufe <sup>2</sup>
	nein	ja		1 Gefahrenstufe <sup>2</sup>
	ja	ja		2 Gefahrenstufen <sup>2</sup>
<b>Spontane Rutschungen in total unverrutschtem Terrain<sup>3</sup></b> (9-Felder-Diagramm)	ja	nicht relevant		1 Stufe auf Intensitäts- und/oder Wahrscheinlichkeitsachse
			mit engem Verbauraster <sup>4</sup>	2 Stufen auf Intensitäts- und/oder Wahrscheinlichkeitsachse
<b>Hangmuren s. str.</b> (9-Felder-Diagramm)	ja	nicht relevant	Verbauraster ca. 2-5 Aren	1 Stufe auf Intensitäts- und/oder Wahrscheinlichkeitsachse
			Verbauraster < ca. 1-2 Aren	2 Stufen auf Intensitäts- und/oder Wahrscheinlichkeitsachse
<sup>1</sup> Z.B. spontaner Abgang aus Front einer permanenten Rutschung. <sup>2</sup> Max. bis auf Gefahrenstufe des Grundprozesses (= permanente Rutschung). <sup>3</sup> Gebiete ohne Anzeichen früherer oder rezenter Hangbewegungen. <sup>4</sup> Verhindert den Ausbruch von kleinräumigen Teilrutschungen.				

Rückstufungen werden generell nur auf Basis einer umfassenden Beurteilung gemäss der vorgestellten Methode und unter Berücksichtigung der Unsicherheiten vorgenommen. Rückstufungen um 2 Stufen sind zudem immer als Spezialfälle anzusehen und erfordern eine gründliche Überprüfung.

Vor Umsetzung in Gefahrenkarte mehrere Jahre Bewegungsmessungen

Bei permanenten Rutschungen ist bei neuen Massnahmen zu prüfen, vor der Umsetzung in die Gefahrenkarte und insbesondere in die Raumplanung eine Frist von mehreren Jahren anzusetzen, um die Wirkung der Massnahmen anhand von Bewegungsmessungen zu verifizieren. Dies gilt speziell für jene Massnahmen, die einzig auf die Beeinflussung der Hangwasserverhältnisse wirken (Bsp. Rutschkomplex Hohberg FR).

## 6. Fallbeispiel Flamatt/Wünnewil

### 6.1 Allgemeine Angaben

Das Beispiel repräsentiert nicht den Fall einer konkreten Anwendung auf der Basis einer vorhandenen Gefahrenkarte. Es ist aber gut geeignet, das Vorgehen gemäss Protect anhand eines räumlich klar begrenzten, gut untersuchten Falls aufzuzeigen.

#### 6.1.1 Ereignis vom 10. August 2007

In der Folge der ergiebigen Niederschläge zwischen dem 7. und 9. August 2007 kam es an der zweispurigen Bahnstrecke Fribourg-Bern zu Hangbewegungen. Der Bahnverkehr musste daraufhin für mehrere Tage unterbrochen werden, um den betroffenen Bahndamm mittels Sofortmassnahmen zu stabilisieren.

Hangbewegung durch  
ergiebige  
Niederschläge

Die starken Niederschläge (5-Tageswerte: 126.4 mm [Tafers], 127.7 mm [Laupen]) fielen auf einen bereits wassergesättigten Untergrund, was einen ausserordentlich starken Oberflächenabfluss in Richtung der Bahngleise zur Folge hatte.

Ausserordentlich  
starker Oberflächen-  
abfluss

#### 6.1.2 Geologie, Hydrogeologie

Der Felsuntergrund wird aus Molasseschichten (weiche Sandsteine und Mergel) gebildet. Die Mergel bilden Stauschichten und Quellhorizonte. Das ins Rutschen geratene Lockergestein besteht aus dem Verwitterungsschutt der Molasse, Moränenmaterial und glazigenen Kiesen.

Der Felsuntergrund ist geklüftet. Bergwasserzirkulation erfolgt entlang von Klüften (Kluftwasserleiter). Das Niederschlagsereignis dürfte von einem raschen Anstieg des Kluftwasserspiegels begleitet gewesen sein. Es ist denkbar, dass daraus Wasser in die Lockergesteinsdecke übertrat, eventuell unter Druck.

Anstieg des Kluft-  
wasserspiegels durch  
Niederschlag

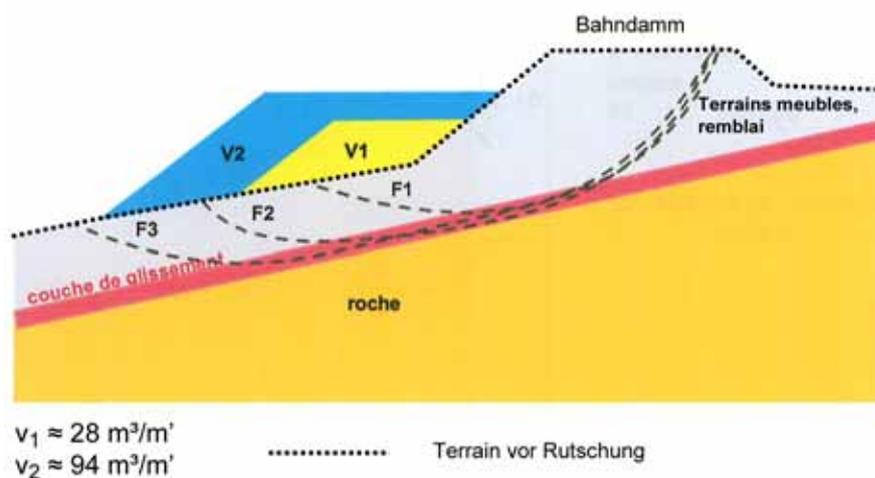


Abb. 6.1: Eines von verschiedenen Querprofilen durch den instabilen Hang mit Lage der Felsoberfläche und der Molasse-Verwitterungsschicht als prädestiniertem Gleithorizont. Dargestellt sind rechnerisch analysierte potenzielle Gleitkreise (F1, F2, F3) sowie künstliche Aufschüttungen V1, V2 (Fusslast) zur Stabilisierung. V1 wurde als Sofortmassnahme realisiert, V2 als Variante für weiter reichende Massnahmen geprüft.

### 6.1.3 Geologisches Modell

Das geologische Modell geht von spontanen mittelgründigen Rutschungen auf der Molassefelsoberfläche aus (verwitterte Mergel geringer Scherfestigkeit). Bei Wassersättigung wirken Strömungsdrücke und vertikale Kluftwasserdrücke.

### 6.1.4 Sofortmassnahmen

- Tiefendrainage bergseits des Trasses
- Ableitung des zufließenden Oberflächenwassers
- Belastung des Rutschfusses durch Aufschüttung von 13'000 m<sup>3</sup> Lockermaterial
- Überwachung: Ausführung von Bohrungen mit Piezometern zwecks Hangwasserspiegelmessungen; Inklinometer; automatisierte, permanente geodätische Überwachung

### 6.1.5 Definitive Massnahmen

- Hangstabilisierung: Verankerte Pfähle ( $\varnothing$  130 cm, Länge 16.5 m, Pfahlabstand 2.6 m, Ankerlast 500kN)
- Gleisinfrastruktur: Unterbau mit Betonplatte

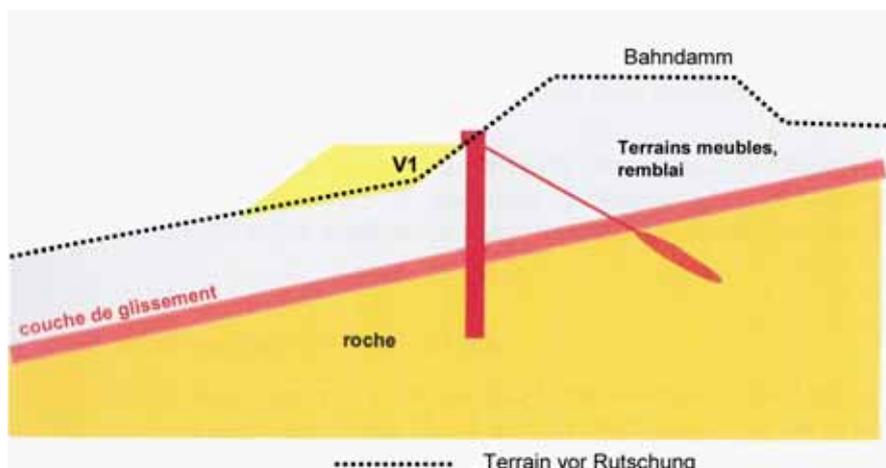


Abb. 6.2: Definitives Sicherungskonzept als Ergänzung zur Aufschüttung V1 (Sofortmassnahme). Die rückverankerten Pfähle bieten ausreichend Sicherheit. Pfähle wie auch Anker reichen bis in den Fels und verhindern dadurch jegliche Ausbildung von Gleitkreisen wie in Abb. 6.1 dargestellt.

### 6.1.6 Übersicht Untersuchungen

- Sondierbohrungen bis in den Felsuntergrund
- Entnahme von Bohrproben zwecks geotechnischer Analyse im Labor
- Setzen von Piezometern und Inklinometern
- Stabilitätsberechnungen 2D zur Ereignisanalyse und für die Massnahmenplanung. Inverse Berechnung (FS = 1) unter folgenden Annahmen:
  - Hangwasserspiegel beim Ereignis an der Terrainoberfläche;
  - Gleithorizont auf der Felsoberfläche (was die Inklinometermessungen nachträglich bestätigten);
  - Zwei Zustände: Drainierter und undrainierter Zustand.

## 6.2 Beurteilung der Massnahmen

Tab. 6.1: Schritt 1: Grobbeurteilung.

	Anforderungen/Kriterien	Ja	Nein	Bemerkungen
<b>Prozesskenntnisse, Gefahrensituation</b>				
0	<p>Es liegen folgende Unterlagen in ausreichender Qualität vor:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- a. Karte der Phänomene (erweiterte Legende) oder vergleichbare Grundlagenkarte;</li> <li>- b. Das Gesamtsystem ist mitsamt seiner Teilprozesse und möglichen Interaktionen erfasst;</li> <li>- c. Das Spektrum möglicher Prozesswirkungen ist mittels Gefährdungsbildern (Szenarien) erfasst. Dabei ist auch das Extremereignis betrachtet worden;</li> <li>- d. Geologisch-hydrogeologisches Modell, mit entsprechenden Hangprofilen;</li> <li>- e. Gefahrenbeurteilung basierend auf den Empfehlungen des Bundes und der AGN-Methode.</li> </ul>	→1 ✓	Abbruch ⬆	<p>Ausgeführt wurden 13 Bohrungen mit 7 Piezometern und 8 Inklinometern. Zudem wurde ein Pluviometer mit Fernablesung installiert. An Bohrspalten wurden Laborversuche durchgeführt (Wassergehalt, Granulometrie, Konsistenzgrenzen).</p> <p>Eine Grundlagenkarte (Situation 1:10'000) liegt als Arbeitsgrundlage vor.</p> <p>Das Gesamtsystem wurde analysiert. Das geologisch-hydrogeologische Modell ist aufgrund der zahlreichen Bohrresultate erstellt und zuverlässig. Es wurden verschiedene Systemzustände (Szenarien) erfasst, inkl. Extremereignis.</p> <p>Eine Gefahrenkarte wurde nicht erstellt, da nicht erforderlich (Vor dem Ereignis: keine Gefährdung).</p>
<b>Massnahme (Verfügbarkeit, Lebensdauer)</b>				
1	Die Massnahme ist auf eine lange Lebensdauer ausgelegt (mindestens 50 Jahre).	→2 ✓		Die vorgeschlagene Massnahme (verankerte Pfähle) ist langlebig. Für eine Lebensdauer von 80 Jahren ist ein 2- bis 3-maliger Ersatz der Anker eingeplant.
2	<p>Kontrollen, Unterhalt und Reparaturen sind</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- langfristig geregelt. Es besteht eine Trägerschaft, evtl. ein Grundbucheintrag.</li> <li>- können verbindlich und dauerhaft geregelt werden.</li> </ul>	→3 ✓		Die SBB als Bauherrin sind Garant für langfristig geregelte Kontrollen, Unterhalt und Sanierungen.
<b>Gesamtkonzept und Relevanz</b>				
3	Der Fokus der Massnahme ist auf den gesamten Prozessraum ausgerichtet.	→4 ✓		
4	<p>Die Massnahmenwirkung kann unter Berücksichtigung mindestens der folgenden Aspekte beurteilt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Interaktionen bekannt;</li> <li>- Absicht der Massnahme bekannt/kann vermutet werden;</li> <li>- Massnahmenstandort wirksam;</li> <li>- Ausreichende Ausdehnung der Massnahme im Hinblick auf die Absicht der Massnahme;</li> <li>- Erfahrungen in ähnlichen Fällen.</li> </ul>	→5 ✓		Massnahmenwirkung ist für verschiedene Lastfälle bestimmbar. Die Schutzzielvorgabe ist hoch (Verfügbarkeit SBB-Strecke).
5	Es besteht eine bestimmbare, relevante Wirkung oder eine solche kann mit guten Gründen vermutet werden.	→9 ✓		Rechnerisch nachweisbar.

Tab. 6.2: Schritt 2: Massnahmenbeurteilung

	Anforderungen/Kriterien	Ja	Nein	Bemerkungen
<b>Grundlagen Prozess</b>				
9	<p>Um die Wirkung der Massnahme mit ausreichender Genauigkeit bestimmen zu können, liegen umfassende <b>quantitative Grundlagen</b> vor, insbesondere:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- a. Ausreichend lange Messreihen (Geodäsie, Inklinometer, Extensometer);</li> <li>- b. Die Geschichte der Rutschung ist bekannt bzw. rekonstruierbar;</li> <li>- c. Für bekannte „Krisen“ liegt eine Ursachenanalyse vor;</li> <li>- d. Geologisch-hydrogeologisches Modell (geotechnisches Modell), möglichst auf der Basis von Sondierungen (Bohrungen, Seismik, Geoelektrik, Sondierschlitze);</li> <li>- e. Geologische Hangprofile (ohne/mit Massnahme[n]), möglichst auf der Basis von Sondierungen (wie oben);</li> <li>- f. Quantifizierte Bodenparameter;</li> <li>- g. Stabilitätsberechnungen mit Sensitivitätsanalysen (2D in diversen Schnitten oder 3D).</li> </ul>	<p>→10</p> <p>✓</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- a. Irrelevant, da spontanes Ereignis.</li> <li>- b. dito.</li> <li>- c. Für das Ereignis liegt eine Ursachenanalyse vor.</li> <li>- d. Modell abgestützt auf zahlreiche Sondierungen.</li> <li>- e. Mehrere Hangprofile erstellt auf der Basis der Sondierbohrungen.</li> <li>- f. Bodenparameter quantifiziert anhand von Laborversuchen an Bohrkernen und aufgrund von Erfahrungswerten.</li> <li>- g. durchgeführt (Ansatz: inverse Berechnungen mit FS=1). Parametervariationen zur Bestimmung der Sensitivität des Systems. Ebenfalls berücksichtigt wurden die Lastfälle seitens der Bahn (Einspur-, Doppelspurbelastung). Berechnungen ohne und mit Massnahmen.</li> </ul>
<b>Grundlagen Massnahme</b>				
10	Die vorhandenen Werksangaben sind umfassend. Sie informieren ausreichend über das Werk (Erstellungszeitpunkt, z.B. Ausführungsprojekt).	<p>→11</p> <p>✓</p>		Neue Massnahme, die umfassend dokumentiert ist. Der Ist-Zustand ist somit erfasst.
11	Der Ist-Zustand ist erfasst. Es können Aussagen gemacht werden zu allfällig reduzierten Wirkungen.	<p>→12</p> <p>✓</p>		
<b>Bestimmung Tragsicherheit/Funktionalität</b>				
12	<p>Tragsicherheit/Funktionalität sind gegeben. Sie können szenarienbezogen entweder <b>qualitativ</b> oder <b>quantitativ</b> ausreichend genau abgeschätzt oder bewertet werden. Bei qualitativer Betrachtung gilt insbesondere:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- a. Das Bauwerk zeigt keine verdächtigen Mängel;</li> <li>- b. Es ist zu vermuten, dass Punkt a. auch für verborgene, nicht kontrollierbare Massnahmenteile gilt.</li> </ul>	<p>→13</p> <p>✓</p>		Aufgrund obiger Ausführungen gegeben.
13	Die Massnahme hat in der Vergangenheit erheblichen Belastungen („Krisen“) bereits erfolgreich widerstanden, was als Hinweis für eine genügende Tragsicherheit/Funktionalität betrachtet werden kann.	<p>→16</p> <p>→14</p> <p>✓</p>		Nein: Massnahme ist ganz neu und hat noch keine „Krise“ erlebt.
14	Es kann quantitativ oder semi-quantitativ nachgewiesen werden, dass die Tragsicherheit/Funktionalität der Massnahme auch bei einer „Krise“ gegeben ist.	<p>→16</p> <p>→15</p>	<p>✓</p>	Die Tragsicherheit ist aufgrund umfassender Analysen rechnerisch nachgewiesen.

	Anforderungen/Kriterien	Ja	Nein	Bemerkungen
<b>Bestimmung Gebrauchstauglichkeit</b>				
16	Die Schutzmassnahme ist neu. Die Gebrauchstauglichkeit kann bezogen auf Szenario X als erfüllt oder mindestens teilweise erfüllt betrachtet werden.	→ 18 ✓		
<b>Bestimmung Dauerhaftigkeit</b>				
18	Die Schutzmassnahme hat <u>keine</u> nicht direkt kontrollierbaren Bauteile. oder: Verborgene Bauteile können indirekt über Messungen kontrolliert werden.	→ 19 ✓		Die Bauteile der Massnahme sind kontrollierbar (Ankerkräfte). Daneben finden auch geodätische Kontrollmessungen statt.
19	Es kann angenommen werden, dass die Massnahme auf längere Zeit den möglichen Einwirkungen standhält und in gutem Zustand bleibt. oder: Das System ist so ausgelegt, dass bei Bedarf kurzfristig gleichwertige Ersatzmassnahmen vorgenommen werden können (z.B. Ersatz eines defekten Ankers).	20 ✓		Die Bauteile der Massnahmen sind ersetzbar (Bohrpfähle, Anker). Die gewählten Massnahmen sind zudem erprobt und für den Langzeiteinsatz geeignet .
20	Kontrollen und Unterhalt sind auf längere Zeit durch Institutionen der öffentlichen Hand (ggf. Flurgenossenschaften) gewährleistet.	Schritt 3 +21 ✓		Die SBB als Bauherrin sind Garant für langfristig geregelte Kontrollen, Unterhalt und Sanierungen.
<b>Betrachtung im Massnahmen-Gesamtsystem</b>				
21	Die Massnahme ist nicht Bestandteil eines Gesamtsystems von Massnahmen und ist somit isoliert zu betrachten.	Schritt 3 ✓		Massnahmenkonzept in sich geschlossen. Keine Beeinflussung durch andere Massnahmen oder andere Randbedingungen.

### 6.3 Wirkungsbeurteilung

Im unten stehenden Diagramm sind Systemzustände nach den Sofortmassnahmen (Fusslast V1 gemäss Abb. 6.1) dargestellt. Die Stabilitätsberechnungen zeigen, dass diese Aufschüttung V1 im Fall einer maximalen Belastung (Var. B: Bahnverkehr zweigleisig) keinen umfassend ausreichenden Sicherheitsgewinn bewirkt. Deshalb wurde als definitive Massnahme das in Abb. 6.2 schematisch dargestellte Konzept verankerter Pfähle gewählt, zusätzlich zu den bereits bestehenden Aufschüttungen. Dieses bildet auch die Grundlage für die oben aufgeführte tabellarische Beurteilung. Dank dieser verankerten Pfähle lässt sich eine ausreichende Sicherheit für die relevanten Zustände erzielen, was im Diagramm durch den Pfeil angedeutet wird.

Sofortmassnahmen  
ohne ausreichenden  
Sicherheitsgewinn

Die gewählten Massnahmen wirken umfassend. Sie können auf einer Gefahrenkarte als voll wirksam berücksichtigt werden (Darstellung als Restgefährdung).

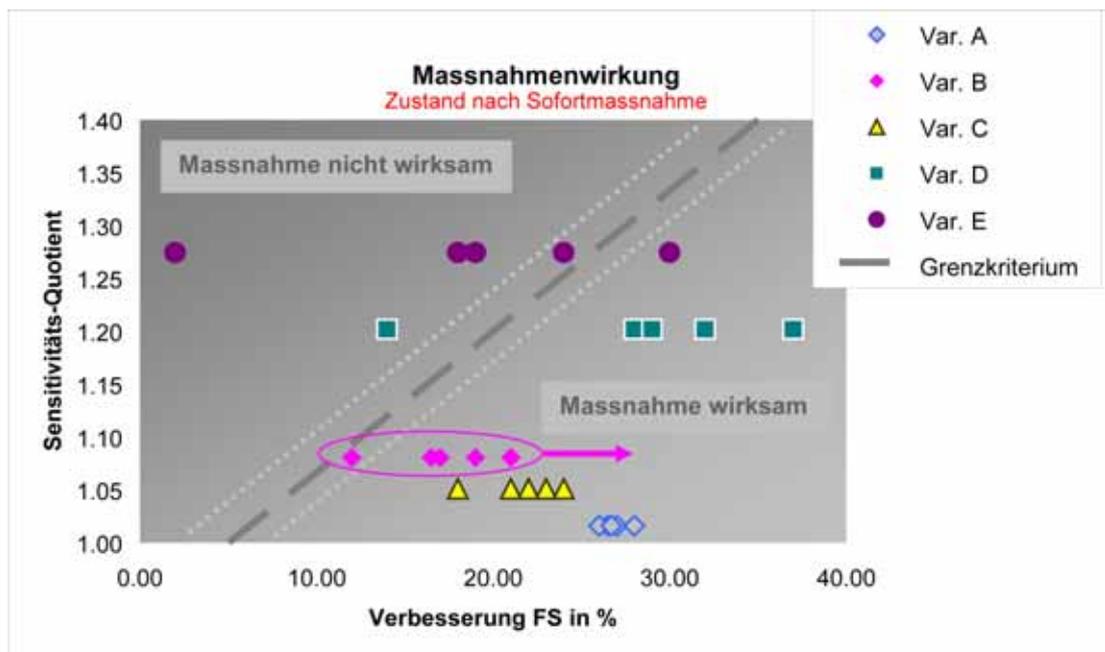


Abb. 6.3: Massnahmenwirkung.

## 7. Fallbeispiel „grosse Rutschung“

Ein Fallbeispiel zur Beurteilung von Schutzmassnahmen bei einer grossen Rutschung wird zu einem späteren Zeitpunkt hier ergänzt.

## Literatur

Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN 2004: Gefahreinstufung Rutschungen i.w.S.: Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren. – Bericht, 24. März 2004.

Bonnard, Ch. 2006: Evaluation et prédiction des mouvements des grands phénomènes d'instabilité de pente. Bull. angew. Geol., 11/2, 89-100.

BRP, BWW, BUWAL 1997: Naturgefahren - Empfehlungen zur Berücksichtigung von Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten.

Frehner, M., Wasser, B. & Schwitter, R. 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion (NaiS). Vollzug Umwelt. BUWAL, Bern, 564 S.

H.J. Lang, J. Huder & P. Amann 2003: Bodenmechanik und Grundbau – Das Verhalten von Boden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte. 7. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Turner, A.K. & Schuster, R.L. (Eds.) 1996: Landslides, Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Academy Press, Special Report N° 247.



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 E: WILDBÄCHE

Albert Böll, Hans Kienholz, Hans Romang



Val da l'Era, Valchava, GR (H. Romang, SLF)

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
1.1	Übersicht	1
1.2	Besonderheiten	2
1.3	Stand der Beurteilungsmethodik	2
2.	Übersicht Schutzmassnahmen	4
3.	Sperren und Sperrentreppen	7
3.1	Grobbeurteilung	7
3.1.1	Zielsetzung und Abgrenzung	7
3.1.2	Gefahrensituation und Prozesskenntnisse	7
3.1.3	Grundlagen Schutzmassnahmen	8
3.1.4	Gesamtkonzept	9
3.1.5	Negative Wirkungen	11
3.1.6	Relevanz	12
3.2	Massnahmenbeurteilung	13
3.2.1	Übersicht	13
3.2.2	Grundlagen Prozesse	14
3.2.3	Grundlagen Massnahmen	18
3.2.4	Überprüfung der Tragsicherheit	19
3.2.5	Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit	21
3.2.6	Überprüfung der Dauerhaftigkeit	23
3.2.7	Gesamtsystem	23
3.2.8	Bestimmung der Zuverlässigkeit	24
3.3	Wirkungsbeurteilung	24
3.3.1	Massnahmenbeeinflusste Szenarien	25
3.3.2	Sperren als Sohlensicherung	25
3.3.3	Wildbachsperren als Hangfussicherung	29
3.3.4	Gesamtbetrachtung	30
4.	Geschiebesammler und Feststoffrückhalt allgemein	31
4.1	Grobbeurteilung	31
4.1.1	Zielsetzung und Abgrenzung	31
4.1.2	Gefahrensituation und Prozesskenntnisse	31
4.1.3	Grundlagen Schutzmassnahmen	32
4.1.4	Gesamtkonzept	33
4.1.5	Negative Wirkungen	33
4.1.6	Relevanz	34

4.2	Massnahmenbeurteilung	35
4.2.1	Übersicht	35
4.2.2	Grundlagen Prozesse	36
4.2.3	Grundlagen Massnahmen	37
4.2.4	Überprüfung der Tragsicherheit	37
4.2.5	Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit	38
4.2.6	Überprüfung der Dauerhaftigkeit	39
4.2.7	Gesamtsystem	40
4.2.8	Bestimmung der Zuverlässigkeit	41
4.3	Wirkungsbeurteilung	41
4.3.1	Massnahmenbeeinflusste Szenarien	42
4.3.2	Wirkungsszenario mit hoher Zuverlässigkeit	43
4.3.3	Wirkungsszenario mit eingeschränkter Zuverlässigkeit	44
4.3.4	Wirkungsszenario mit geringer Zuverlässigkeit und negativer Wirkung	44
5.	Fallbeispiel Wildbachverbauung Wilerlibach Kt. Uri	45
5.1	Grobbeurteilung	45
5.2	Massnahmenbeurteilung	48
5.3	Wirkungsbeurteilung	51
6.	Beispiel Geschiebesammler Spissibach (Leissigen)	54
6.1	Grundlagen	54
6.2	Grobbeurteilung	58
6.3	Massnahmenbeurteilung	61
6.4	Wirkungsbeurteilung	61
6.5	Empfehlungen zur Umsetzung	63
7.	Danksagung	63
	Literatur	64

# 1. Charakteristik der Prozesse

## 1.1 Übersicht

"Wildbäche sind oberirdische Gewässer mit zumindest streckenweise grossem Gefälle, rasch und stark wechselndem Abfluss und zeitweise hoher Feststoffführung." (DIN 19663, 1985). Diese Eigenschaften, v.a. das Gefälle, unterscheiden Wildbäche von flacheren Fliessgewässern, wie sie im Teil F von PROTECT behandelt werden.

Definition Wildbach

Wildbäche werden durch zahlreiche Einflussfaktoren wie Form, Grösse und Lage des Einzugsgebiets, Witterung Geologie, Relief, Bodeneigenschaften etc. charakterisiert. Zusammen mit den zeitlich und räumlich unterschiedlich auftretenden Einzelprozessen ergibt sich eine grosse Vielfalt an möglichen Ausprägungen. Aus diesem Grund ist jeder Wildbach grundsätzlich als Individuum zu betrachten.

Einflussfaktoren



Abb. 1.1: Räumlichen Gliederung eines Wildbaches am Beispiel des Val Cundeas, Samnaun, GR (Romang, 2004).

Wildbäche lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten gliedern. Anschaulich ist die räumliche Gliederung in Einzugsgebiet, Gerinne und Schwemmkegel (Abb. 1.1). Das Einzugsgebiet umfasst Hänge und Runsen. Runsen sind eher kleine, meist steile und nur sporadisch wasserführende Rinnen, die dem Gerinnesystem Geschiebe zuführen. Das Gerinnesystem umfasst ein Hauptgerinne mit einem oder mehreren Seitengerinnen. Der Kegelhal bildet den untersten Punkt des Einzugsgebietes. Unterhalb schliesst in den meisten Fällen ein Ablagerungsraum in Form eines Schwemmkegels an, bevor das Gerinne in einen Vorfluter mündet. Sinn-gemäss, wenn auch vereinfachend, entspricht diese räumliche Unterteilung der prozessorientierten Einteilung in Entstehung, Verlagerung (Transit) und Ablagerung.

Räumliche Gliederung

## 1.2 Besonderheiten

In Wildbächen  
ablaufende  
Prozesse

In Wildbächen spielen Hochwasser, Geschiebe- und Schwemmholztransport, Murgänge, Gerinneerosion, Gerinneausbrüche, Oberflächenerosion und Rutschungen eine Rolle. Dies sind Prozesse, die sich in der Regel gegenseitig beeinflussen. Diese Prozessvielfalt und die gegenseitige Beeinflussung sind sowohl bei der Gefahrenbeurteilung wie auch bei der Konzeption von Schutzmassnahmen zu berücksichtigen.

Massnahmen schützen  
häufig vor mehreren  
Prozessen

Massnahmen haben deshalb häufig Schutz gegen mehrere Prozesse zu bieten. Zudem ist eine Massnahme oft eine notwendige Voraussetzung für eine weitere. So dient eine Wildbachsperrentreppe dem Schutz vor Gerinnerosion und kann gleichzeitig als Hangfussicherung für einen instabilen Seitenhang wirken.

Murgänge

Eine Kernfrage, sozusagen ein ständiger Begleiter bei der Analyse und Beurteilung sowie bei der Konzeption und Ausführung von Schutzbauten in Wildbächen, ist die Frage der Murfähigkeit. Murgänge können nicht nur durch Niederschläge grosser Intensität (Gewitter) oder langer Dauer ausgelöst werden, sondern auch durch den Ausbruch von Gletscherseen oder aufgrund eines temporären Aufstaus im Gerinne (z.B. infolge einer Rutschung aus der Flanke). Sie können in kurzer Zeit grosse Feststoffmengen verfrachten. Bedingt durch die hohen Fliessgeschwindigkeiten und die grössere Dichte entstehen zudem Einwirkungen etwa auf Verbauungen oder auf Gebäude, die vergleichbar sind mit Lawinenlasten.

Wahrscheinlichkeiten  
sind schwierig  
einzuschätzen

Neben der Beurteilung der Murfähigkeit und damit verbunden der Feststoffkubaturen (Prozessintensität) ist die Angabe von Eintretenswahrscheinlichkeiten eine Voraussetzung für die Gefahrenbeurteilung. Ihre Abschätzung ist bei Geschiebe- und Schwemmholztransport und insbesondere bei Murgängen oder Rutschungen recht schwierig. Die realistische Einschätzung hängt von vielen prozess- und einzugsgebietsspezifischen Merkmalen ab, zu denen die fachlichen Grundlagen zum Teil noch sehr mangelhaft sind. Die Schwierigkeiten der Szenarienbildung und der Abgrenzung von „normalen“ zu Extremszenarien sind ohne und mit Schutzmassnahmen dieselben.

Wirkungsgebiet von  
Wildbächen

Wildbachgefahren wirken sich schliesslich meist auf dem Schwemmkegel aus, abgesehen von lokalen Schäden im Einzugsgebiet (z.B. Unterspülen von Böschungen). Sie können dabei auch das Verhalten des Vorfluters (Talfluss) beeinflussen.

## 1.3 Stand der Beurteilungsmethodik

Entwicklung verschie-  
dener Szenarien und  
Gefährdungsbilder  
nötig

Die Erkenntnis, dass ein Wildbach mehr ist als die Summe seiner Teile und damit integral betrachtet werden muss, hat sich weitgehend durchgesetzt. Dabei sind ein gutes Prozessverständnis und Vorstellungsvermögen für die Entwicklung von Ablaufszenarien und Gefährdungsbildern wichtig. Im Detail beruht die Beurteilung von Wildbächen aber mehrheitlich auf Ansätzen und Modellen, welche sich (nur) mit Teilaspekten wie Abflussbildung oder Geschiebetransport beschäftigen (Abb. 1.2). Es bleibt im Wesentlichen in der Verantwortung des Gutachters, diese geeignet anzuwenden und zu kombinieren. Dabei kann er heute auf ein Methodenset verschiedenster Qualität und Aussageschärfe zurückgreifen und so die für die Gefahrenbeurteilung und mit Modifikationen bzw. mit Ergänzungen auch für die Beurteilung von Schutzmassnahmen relevanten Grössen bestimmen (Tab. 1.1). Unsicherheiten beispielsweise aufgrund lückenhafter Grundlagen, Interaktionen von Prozessen oder begrenzter Prozesskenntnisse sind dabei ständige Begleiter und der Erfahrung des Bearbeiters kommt eine grosse Bedeutung zu.

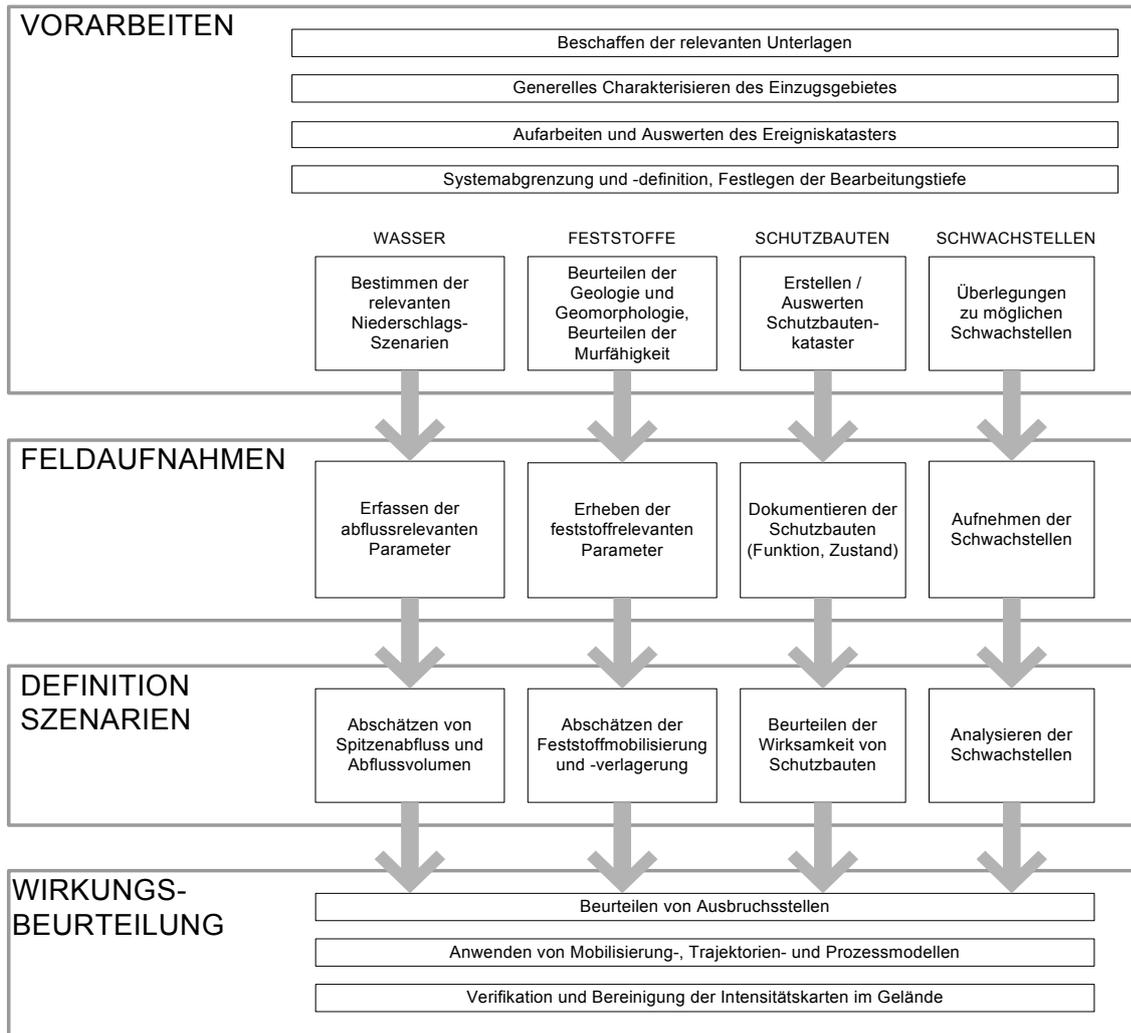


Abb. 1.2: Schematischer Ablauf einer Wildbachbeurteilung (verändert nach Frick et al., 2008a).

Tab. 1.1: Wesentliche Elemente der Prozessbeurteilung in Wildbächen.

Prozessbereich	Mögliche Methoden
	Für eine Methodenübersicht vgl. Romang (2004)
Hangstabilität	Ereigniskataster, geologische und geomorphologische Analyse / Kartierung, geotechnische Überlegungen zu Hangneigung und Scherwinkel, Rutschaktivität
Hochwasser $HQ_{(x)}$ (der Jährlichkeit $x$ ) - Abflussspitze und -volumen - evtl. Fließgeschwindigkeit	Ereigniskataster, Beobachtungen im Gerinne, Schätzverfahren bspw. nach BWG (2003), Übertragung von Abflussmesswerten, Fließgeschwindigkeit nach versch. Verfahren
Geschiebe, Murgänge, Schwemmholz - Verlagerungsprozess - Erosion und Ablagerung - Fracht, Volumina - evtl. Fließgeschwindigkeit	Ereigniskataster, Geomorphologische Betrachtungen, Beobachtungen im Gerinne, Schätz- und Berechnungsverfahren wie Smart und Jäggi (1983), Rickenmann (1990, 1995, 1999), GHO (1996), Frick et al. (2008b), waldbauliche Betrachtungen (Frehner et al. 2005)
Ausbruch und Ablagerungen - Schwachstellenanalyse - Ausdehnung, Intensitäten	Ereigniskataster, Beobachtungen im Gerinne, Geomorphologische Betrachtungen, hydraulische Schätz- und Berechnungsverfahren, -d und 2-d Modellierungen

## 2. Übersicht Schutzmassnahmen

Massnahmen im Einzugsgebiet, im Gerinne und auf dem Schwemmkegel

Tab. 2.1 zeigt die bei Wildbächen möglichen Schutzmassnahmen und legt fest, ob sie potenziell bei Gefahrenbeurteilungen für Gefahrenkarten berücksichtigt werden können. Diese Einschätzung ersetzt nicht die konkrete Beurteilung im Einzelfall. In der Tabelle wird zwischen Massnahmen in der Fläche des Einzugsgebietes, solchen im Gerinne und solchen auf dem Schwemmkegel unterschieden. Dabei beeinflussen die Massnahmen in der Fläche und teilweise jene im Gerinne (z.B. Sperren) die Prozesse direkt, während die Massnahmen auf dem Kegel (z.B. Geschiebesammler) und ein Teil der weiteren Massnahmen im Gerinne Schutz vor den Auswirkungen bieten. Bei vielen Massnahmen im Einzugsgebiet und im Gerinne spielt die Lage in Bezug auf das Wirkungsgebiet eine wesentliche Rolle. Dieser Punkt wird in der Tabelle nicht mehr speziell erwähnt. Zu berücksichtigen sind dabei die Distanz und die Frage der möglichen Entkoppelung der Prozesse und der lokalen Wirkung von Massnahmen z.B. durch flache Umlagerungstrecken zwischen dem Ort der Massnahme und dem Wirkungsgebiet im Schwemmkegelbereich.

Tab. 2.1: Übersicht über die prinzipielle Möglichkeit der Berücksichtigung der Wirkung von Massnahmen an Wildbächen bei Gefahrenbeurteilung.

<b>Massnahmen im Einzugsgebiet</b>			
Massnahme	Wirkung	Berücksichtigung bei der Gefahrenbeurteilung	Kriterien / Bemerkungen
Wald (Waldbau, Schutzwaldpflege) im Einzugsgebiet	Abflussreduktion, Dämpfung von Hochwasserspitzen	Nein	Relevanz für Gefahrenminderung häufig nicht nachweisbar Anforderungen NAIS (Frehner et al., 2005) wichtig
Wald (Waldbau, Schutzwaldpflege) auf Gerinneabhängen und Böschungen	Reduktion der Geschiebelieferung, Reduktion von flachgründigen Rutschungen und Erosion in den Hängen	Nein	Sowohl reduzierende (Erosion) als auch verschärfende Wirkung (Schwemmholz) Generell Unterhalt wichtig => Anforderungen gemäss NAIS (Frehner et al., 2005)
Wasserableitung (Entwässerung, Drainage)	Stabilisierung von Hängen gegenüber Rutschungen und Erosion	Differenzierte Betrachtung bzgl. Reduktion der Geschiebelieferung	Ausdehnung, Relevanz des Gebietes Wirkung meist nur im Verbund mit Massnahmen im Gerinne Bei Rutschungen Anwendung der Kriterien gemäss Teil D „Rutschungen“
Technischer Hangverbau	Wie oben	Wie oben	Wie oben
Ingenieurbiologie	Wie oben	Wie oben	Wie oben
<b>Massnahmen im Gerinne</b>			
Massnahme	Wirkung	Berücksichtigung bei der Gefahrenbeurteilung	Kriterien / Bemerkungen
Hochwasserrückhaltebecken	Dosierung des Abflusses, Brechen der Abflussspitze	Differenzierte Betrachtung bzgl. Reduktion des Abflusses	Setzt sehr gute hydrologische Grundlagen / Abklärungen voraus. Vorsicht speziell bei langandauernden Niederschlägen

Wildbachsperren, Sperrentreppe	Sohlenstabilisierung, Hangfuss-sicherung, Geschieberückhalt, Energieumwandlung	Ja	Anordnung, relevante Ausdehnung, Gesamtkonzept (Vollverbau oder teilweiser Verbau mit Fixpunkten), Stabilität Bauweise der Einzelsperren; Lebensdauer (werkstoffabhängig)
Sohlenpflästerung	Sohlenstabilisierung	Nein, wenn oberhalb des Kegelhalses. Unterhalb s. Kanal.	In steilen Wildbachgerinnen höchstens über kurze Gerinnestrecken von (sehr lokaler) Bedeutung und meistens nur in Kombination mit Wildbachsperren wirksam
Blockrampen	Wie oben	Wie oben	Wie oben
Längsverbau	Uferschutz, Hangfuss-sicherung, Leitung des Wassers zur Abflusssektion, Ersatz von Abflusssektionen	Differenzierte Betrachtung bzgl. Sohlenstabilisierung, Hangfuss-sicherung und Verminderung der Erosion	Geeignet v.a. in flacheren Gerinnen. Allgemein und speziell bei etwas steileren Verhältnissen in der Regel in Kombination mit Sohlensicherung, sonst Unterkollungsgefahr Beachten des Hangdruckes
Murbrecher	Initiierung Prozesswechsel, Geschieberückhalt, Energieumwandlung	Differenzierte Betrachtung bzgl. Prozesswechsel (Stoppen des Murstösses) und Verhalten bei nachfolgenden Murstössen erforderlich	Verhalten von nachfolgenden Murstössen, Ablagerungs- und Ausbruchmöglichkeiten Ergänzende Massnahmen (Dämme, Ausleitungen) Erosionsschutz bzw. Geschiebebewirtschaftung unterhalb
Geschieberückhalt am Kegelhals (halboffene Systeme)	Geschieberückhalt, Schwemmholzurückhalt	Ja	Genügend hohe Relevanz (v.a. Volumen) Erosionsschutz bzw. Geschiebebewirtschaftung unterhalb beachten
Offener Geschieberückhalt (Dosier- / Sortiersperren), Dosierstrecken	Geschieberückhalt, Schwemmholzurückhalt und dosierte Weitergabe	Differenzierte Betrachtung bzgl. Funktionieren der Dosierung / Sortierung erforderlich	Genügend hohe Relevanz (v.a. Volumen) Öffnungen im Verhältnis zum anfallenden Geschiebe bewerten Erosionsschutz bzw. Geschiebebewirtschaftung unterhalb beachten
Holzrückhalt	Schwemmholzurückhalt	Differenzierte Betrachtung erforderlich	Interaktion Schwemmholz - Geschiebe beachten (z.B. Aufstau) In der Regel nur zusammen mit einem Geschieberückhalt zu berücksichtigen
<b>Massnahmen auf dem Schwemmkegel</b>			
Massnahme	Wirkung	Berücksichtigung bei der Gefahrenbeurteilung	Kriterien / Bemerkungen
Leit- / Ablenk-dämme	Umlenken Wasser und Feststoffabfluss inkl. Murgänge	Ja	V.a. eine Frage der Geometrie (Höhe, Länge, Ablenkwinkel) Vgl. Lawinendämme im Teil B
Schale, Kanal	Ableiten von Wasser und Geschiebe	Ja	Querschnitt(-änderungen), Kapazität, Gefällsänderungen (im Vgl. zu oben, im Kanal selber), Möglichkeit von Ablagerungen / Verkläusungen, schlagartiger Zusammenbruch der Transportkapazität beim Ablagerungen auf vorher glatter Sohle oder Aufreissen derselben Vgl. Teil F „Flüsse“

Im Folgenden werden die Möglichkeiten und Voraussetzungen der zwei am häufigsten verwendeten Massnahmentypen vertieft behandelt, kommentiert und mit Beispielen illustriert, nämlich Sperren(-treppen) (Kap. 3) und Geschieberückhalte-einrichtungen (Kap. 4). Interaktionen, insbesondere mit instabilen Seitenhängen, werden soweit angesprochen als sie für die Einwirkungen auf diese Massnahmen massgebend sind. Sperren und Geschiebesammler sind neben gut konzipierten und ausreichend dimensionierten Schalen / Kanälen sowie Dämmen auf dem Schwemmkegel diejenigen Verbauungstypen, die bei der Erstellung von Gefahrenkarten am ehesten berücksichtigt werden können. Weitere der in Tab. 2.1 aufgeführten Massnahmen haben häufig eher ergänzenden Charakter. Sie können allerdings für die Sicherheit und Funktion von Sperrenstaffeln (z.B. Hangsicherungen) oder Geschiebesammler (z.B. Murbrecher oder Murbremsen) sehr entscheidend sein.

### 3. Sperren und Sperrentreppen

#### 3.1 Grobbeurteilung

##### 3.1.1 Zielsetzung und Abgrenzung

Ziel der Grobbeurteilung ist zu entscheiden, ob die Sperren für die Gefahrenbeurteilung relevant sind. Abb. 3.1 zeigt gestützt auf das allgemeine Vorgehen (vgl. Teil A) die bei Wildbachsperren massgebenden Arbeiten mit Bezug auf den folgenden Text.

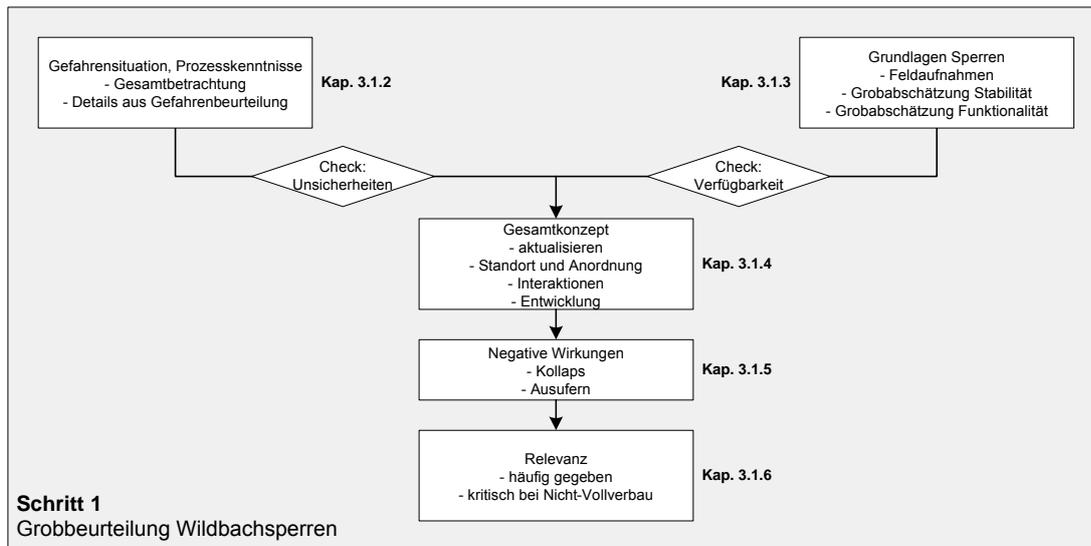


Abb. 3.1: Arbeitsschema zur Grobbeurteilung von Wildbachsperren.

Hinsichtlich der Gefahrenbeurteilung von Wildbächen unter Einbezug von Sperren bzw. von Verbauungen allgemein können zwei Fälle unterschieden werden:

- Der Fokus der Beurteilung richtet sich explizit auf die Wirkung der Sperren (-treppe). Dies ist häufig im Zusammenhang mit Projektierungen (Unterhalt, Erneuerung, Neubau) der Fall. Hier ist die Relevanz schon von der Definition des Auftrages her gegeben. Die Grobbeurteilung dient dann vor allem dazu, sich einen Überblick über die Gesamtsituation zu verschaffen und die Grundlagen für die folgenden Schritte zu erarbeiten. Trotzdem sind die massgebenden Punkte der Grobbeurteilung kurz abzuchecken.
- Die Beurteilung des Wildbaches als Ganzes steht im Zentrum. Dies ist etwa bei Gefahrenbeurteilungen für Gefahrenkarten der Fall. Die Relevanz von allfälligen Verbauungen ist dann nicht à priori gegeben und muss überprüft werden.

Zwei Fälle: Fokus Sperren oder Fokus verbauter Wildbach

##### 3.1.2 Gefahrensituation und Prozesskenntnisse

Die Relevanz kann häufig bereits aufgrund von einfachen Informationen zur Gefahrensituation abgeschätzt werden. So lässt sich eine Sperrentreppe vielfach rasch einordnen, wenn sie im Verhältnis zum Gesamtgebiet und zu den massgebenden Prozessräumen (z.B. erosive Gerinneabschnitte, instabile Hänge) sowie mit Kennt-

Relevanz häufig rasch abschätzbar

nissen etwa zur Murfähigkeit oder die Grössenordnung von Abflüssen und Geschiebemobilisierung und -transport betrachtet wird.

Weil aber in der Mehrzahl der Fälle Wildbachsperrungen die Bedingungen der Grob- beurteilung erfüllen dürften (oder aber sehr rasch herausfallen) empfiehlt es sich, die Abklärung der Gefahrensituation in diesem Schritt nicht auf das minimal Notwendige zu beschränken. Spätere Doppelspurigkeiten können damit vermieden werden. Weiter ergibt es sich schon alleine aus dem Ablauf einer Gefahrenbeurteilung, dass in der Regel wesentlich mehr Informationen als unbedingt nötig zur Verfügung stehen (vgl. Abb. 1.2). So dürften die Feldaufnahmen meist bereits gemacht sein und erste konkrete Vorstellungen über Abflüsse, Geschiebefrachten und Szenarien vorliegen.

Unsicherheiten sind zu beachten

Ein besonderes Augenmerk ist in jedem Fall auf die Unsicherheiten zu legen. Möglicherweise konnte der Grundsatz 2 (vgl. Teil A) noch nicht abschliessend beantwortet werden. Deshalb müssen die Prozessinformation mindestens in einer Genauigkeit vorliegen, die es erlaubt zu beurteilen, ob die Unsicherheiten bei der Prozessbeurteilung grösser sind als die Auswirkungen der Massnahme auf den Prozess.

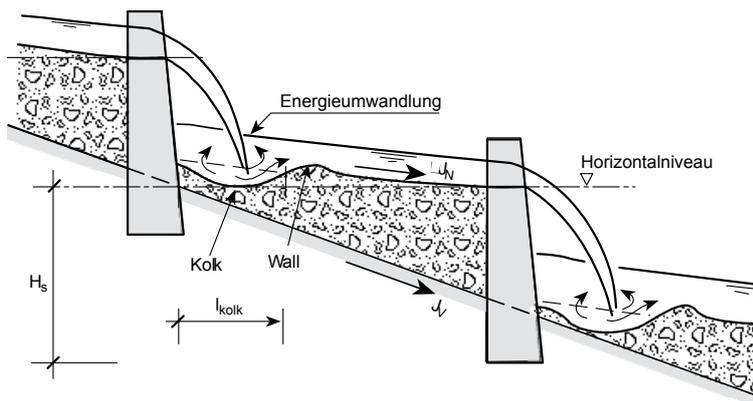
### 3.1.3 Grundlagen Schutzmassnahmen

i.d.R. Feldaufnahmen nötig

Zu den Schutzmassnahmen müssen vergleichsweise detaillierte Angaben vorliegen. So müssen nicht nur Lage, Anordnung (z.B. Vollverbau) und Typ der Sperrungen bekannt sein, sondern auch die Geometrie, die Fundamenttiefe, die Baumaterialien, der Zustand sowie Hinweise auf Interaktionen von Prozessen und Bauwerken (z.B. Hinterfüllung oder Überfließen der Sperrflügel) sind wichtig. In aller Regel werden diese Informationen nicht nur durch ein Studium von Plänen und allfälligen weiteren Dokumenten beschafft, sondern erfordern auch Feldaufnahmen. Diese dienen dann nicht nur dem Schritt 1, sondern liefern auch die Angaben für den Schritt 2 (Massnahmenbeurteilung).

Stabilität frühzeitig beurteilen

Bereits früh stellt sich auch die Frage nach der Stabilität der Bauwerke und des Gesamtsystems. Zwar erfolgt deren Beurteilung (Tragsicherheit) in Schritt 2, erste Hinweise dazu sind aber schon in der Grob- beurteilung möglich und hilfreich. Zu beurteilen ist sie vor allem bei Sperrentreppen, welche die Vollverbaukriterien (Abb. 3.2) nicht erfüllen, oder bei einzelnen Sperrgruppen in einem sonst unverbauten Gerinne. Bezüglich der Stabilität solcher Beispiele liegen unterschiedliche Erfahrungen vor und es sind keine allgemein gültigen Aussagen möglich. Grundsätzlich ist jeder Fall einzeln zu beurteilen. Eine grobe Beurteilung der Sperrzustände, der Lagerungsbedingungen (z.B. seitliche Einbindungen), des Gerinnezustandes, der Sohlenbeschaffenheit und der Geschiebetransportverhältnisse erlaubt erste Abschätzungen zur Stabilität.

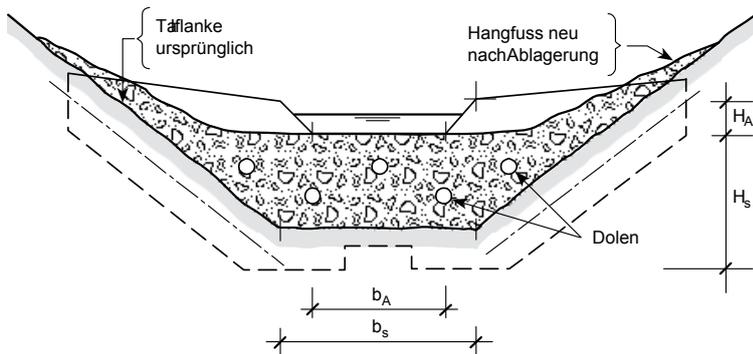


$J_N$ : Grenzgefälle  
 $J_V$ : ehemaliges Sohlgefälle  
 $H_s$ : Sperrenkörperhöhe

Abb. 3.2: Sperrenvollverbau: Längenprofil eines Gerinnes schematisch (Böll, 1997).

Weiter erlaubt auch ein einfacher Vergleich der Sperre mit gerinnespezifischen Merkmalen eine erste Grobeinschätzung. So hängen etwa die Abmessungen von Wildbachsperren-Abflusssektionen (Abb. 3.3) vom Gerinnequerprofil ab (Böll et al. 1999). Vergleiche zwischen den Abmessungen an vorhandenen Sperren (gegeben) oder an projektierten Werken (mögliche Maximalwerte) mit den geschätzten massgebenden Werten (Abfluss, Geschiebe, Murgang) sagen aus, ob ein System grundsätzlich funktionieren kann.

Sperre mit gerinnespezifischen Massen verglichen



$b_A$ : Abflusssektionsbreite  
 $b_S$ : Sohlenbreite  
 $H_s$ : Sperrenkörperhöhe  
 $H_A$ : Abflusssektionshöhe

Abb. 3.3: Hangfussicherung durch Wildbachsperre schematisch (Böll, 1997).

Besonders zu beachten ist schliesslich der Grundsatz der permanenten Verfügbarkeit (Grundsatz 5, vgl. Teil A). Dieser lässt sich im Voraus ohne genauere Kenntnisse der Werke nicht immer schlüssig beantworten. Wesentliche Aspekte sind hier neben dem Unterhalt die Alterung und die Lebensdauer.

Unterhalt, Alterung, Lebensdauer

### 3.1.4 Gesamtkonzept

Wildbach-Schutzmassnahmen sind in ein Gesamtkonzept eingebunden. Ihre Relevanz ergibt sich nicht zuletzt aus ihrer Stellung innerhalb dieses Konzepts. Sofern dieses bei bestehenden Verbauungen nicht dokumentiert ist, lässt es sich meistens relativ leicht aufgrund von Gefahrensituation, Prozesskenntnissen, Massnahmen und deren Standorten bestimmen (Abb. 3.4).

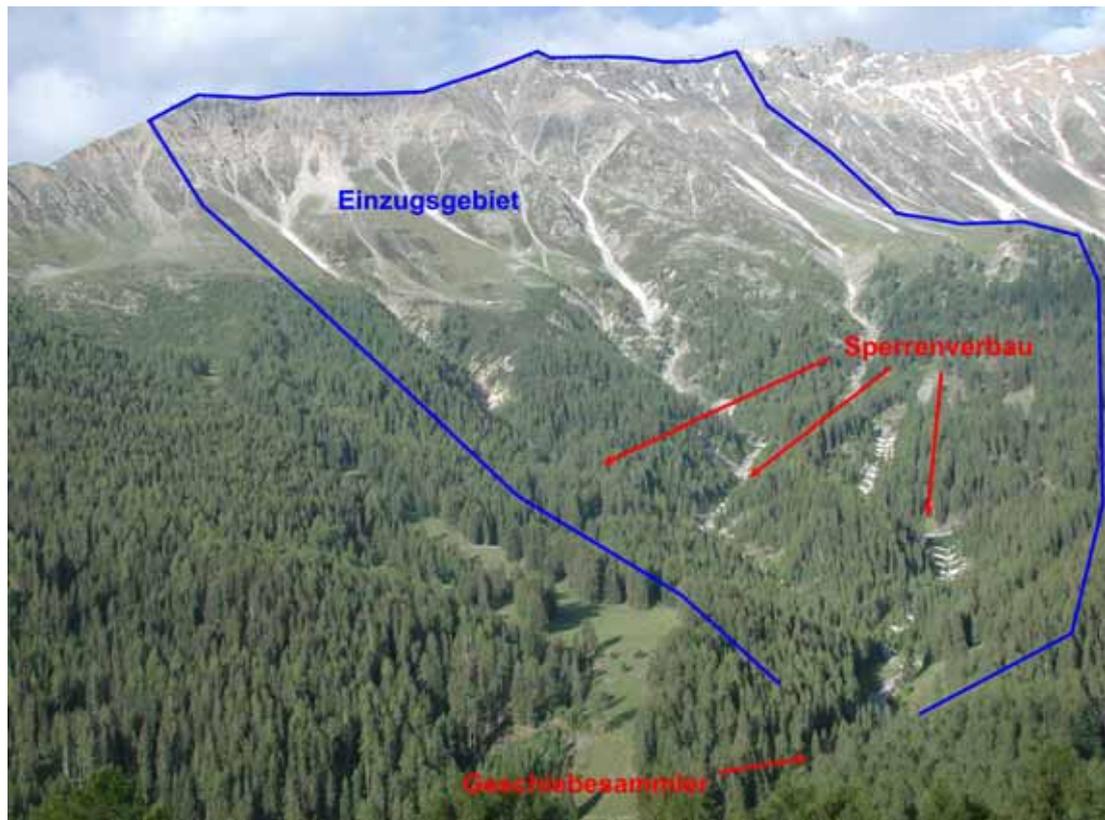


Abb. 3.4: Die Gegenhangbetrachtung eignet sich sehr gut für einen Überblick über die Gefahrensituation einerseits und für das Verständnis des Gesamtkonzeptes andererseits.

Gesamtkonzept bei  
älteren Verbauungen  
überprüfen

Ein vorhandenes Gesamtkonzept ist insbesondere bei älteren Verbauungen anhand der aktuellen Verhältnisse zu überprüfen. Dabei sind folgende Punkte massgebend:

- Als Prozessraum ist das ganze Einzugsgebiet zu betrachten. So genügt es bei einem mit Wildbachsperrren verbauten Gerinneabschnitt nicht, nur den oberhalb davon gelegenen Bereich zu untersuchen. Es ist durchaus möglich, dass aus diesem Bereich nur noch unwesentliche Geschiebefrachten resultieren, dass aber unterhalb davon grosse Geschiebemengen bereit stehen.
- Die Verbauziele wie Verminderung von Geschiebe- und Schwemmhölzeintrag, Verminderung der Transportkapazität, Geschiebe- und Schwemmhölzrückhalt, Verhinderung von Murgängen, Hochwasserschutz oder Hangfussssicherung an Rutschhängen müssen bekannt sein. Falls sie fehlen, lassen sie sich meist anhand des Gesamtkonzeptes rekonstruieren bzw. aktualisieren.
- Zukünftige Entwicklungen etwa der naturräumlichen Bedingungen oder der Verbauungen sind abzuschätzen.
- Die Standorte der Massnahmen spielen im Gesamtkonzept eine wichtige Rolle. Sie geben Hinweise auf die Verbauziele, die möglichen Wirkungen und das Prozessgeschehen sowohl im verbauten als auch im unverbauten Bereich.
- Zu betrachten sind die vielfältigen Interaktionen beispielsweise zwischen den Massnahmen und den massgebenden Prozessen (z.B. Geschieberückhalt in einer Sperrentreppe, Einstoss von Material durch Lawinen oder Rutschungen), zwischen den Massnahmen unter sich (z.B. Sohlenerosion zwischen

Sperren) und Interaktionen mit Massnahmen ausserhalb des Gerinnes (z.B. Stabilisierungsmassnahmen in Seitenhängen und Runsen).

- Da Wildbachsperren meistens auch der Hangfussicherung dienen, ist zu prüfen, ob sie für sich allein zur Hangstabilisierung genügen. Falls das Gesamtkonzept auch Hangstabilisierungs-Massnahmen umfasst (Ausdehnung flächenhaft) ist die Überprüfung im Rahmen der Grobbeurteilung recht einfach. Andernfalls sollten bereits hier erste Überlegungen zur Stabilität der betreffenden Einhänge bzw. Seitenrunsen (insbesondere Geschiebe- und Schwemmholzeintrag) gemacht werden. Bei einer massgeblichen Interaktion von Sperren und Rutschungen ist meist eine geotechnische Analyse notwendig.

Falls sich bei der Beurteilung des Gesamtkonzeptes aus Anordnung und Ausdehnung der Massnahmen keine Mängel zeigen bzw. sich keine Bedürfnisse nach weiteren Massnahmen ergeben, darf angenommen werden, dass die Werke die Anforderungen in erster Näherung (Grobbeurteilung) erfüllen. Es ist aber zu berücksichtigen, dass sich aus der Art der Anordnung auch Probleme ergeben können (z.B. Gerinneabschnitte unterhalb von Sperrentreppen

### 3.1.5 Negative Wirkungen

Unter negativen Wirkungen werden hier solche verstanden, die die Gefährdung im Wirkungsbereich erhöhen. Negative Wirkungen bezüglich lokaler Bedingungen (z.B. Unterspülung eines Sperrenfundamentes) werden erst im Rahmen der Massnahmenbeurteilung (Schritt 2) erfasst.

Verstärkung der  
Gefährdung im  
Wirkungsbereich

Weil hinter Wildbachsperren (Konsolidierungssperren) Geschiebe zurückgehalten wird, besteht grundsätzlich die Gefahr, dass beim Versagen solcher Systeme grosse Geschiebemengen schwallartig zum Abfluss kommen. Aus der Praxis sind Extremereignisse bekannt, bei denen Staffeln von Wildbachsperren kollabierten. Obwohl die manchmal pauschal geäusserte Aussage, Wildbachverbauungen seien Zeitbomben, eher skeptisch beurteilt wird, ist bei Sperren grundsätzliche Vorsicht angebracht. Auch bei heute guten Verbauungen verändert sich die Situation mit der Zeit. Damit auch in Zukunft die Gefahren einer kontraproduktiven Wirkung gering sind, muss eine systematische Überwachung, ein konsequenter Unterhalt und eine rechtzeitige Erneuerung gewährleistet sein (Böll, 2003).

Überwachung, Unter-  
halt und Erneuerung  
notwendig

Sperren und Sperrentreppen, bei welchen bereits in der Grobbeurteilung keine Schutzwirkung erwartet wird, sind unbedingt bezüglich möglicher negativer Folgen zu prüfen. Diese dürften v.a. dann bedeutend werden, wenn die Sperrentreppe aufgrund eines schlechten Zustandes als nicht relevant erachtet wird, trotzdem aber noch ein erhebliches Geschiebepotenzial (Gerinne und Böschungen) zurückhält. Falls Zweifel bezüglich dem Tragverhalten bestehen, sind Untersuchungen erforderlich, die den Rahmen einer Grobbeurteilung sprengen. Sie folgen in der Massnahmenbeurteilung.

Massnahmen ohne  
Schutzwirkung sind auf  
negative Folgen zu  
prüfen

Weitere mögliche negative Wirkungen von Sperrentreppen können sich bei weiten Gerinne-Querprofilen durch das Anheben der Gerinnesohle ergeben. Die Folge sind Gerinneausbrüche, deren Auswirkungen entsprechend der Topographie zu beurteilen sind.

Werke mit üblichen  
Standards erfüllen  
i.d.R. ihre Aufgaben

### 3.1.6 Relevanz

Die Erfahrungen mit Wildbachsperrren sind reichhaltig. Sie beruhen sowohl auf erfolgreichen Beispielen als auch auf Schadenfällen. Im Allgemeinen kann heute vorausgesetzt werden, dass nach den üblichen Kriterien angeordnete Werke bei systematischer Überwachung und konsequentem Unterhalt ihre Aufgaben während ihrer vorgesehenen Lebensdauer erfüllen. In der Praxis dürften viele Fälle diesen Vorgaben einigermaßen nahe kommen, so dass das Abbruchkriterium bei der Grobbeurteilung (Schritt 1) wohl nicht allzu oft zur Anwendung kommt. Dies umso mehr, als dass auch bei Zweifeln die Fortsetzung mit Schritt 2 empfohlen wird.

Die Relevanz von Sperrentreppen, welche die Vollverbaukriterien nicht erfüllen, kann eingeschränkt sein. Genauer zu beurteilen sind insbesondere Sperren in Gerinnen, welche aufgrund ihrer Geometrie einen Vollverbau zulassen würden. In steilen (Runs-) Gerinnen lässt hingegen die Geometrie einen Vollverbau nicht immer zu. Falls solche Gerinne gefährliche Geschiebelieferanten sind, werden sie häufig mit kombinierten technisch-ingenieurbiologischen Methoden stabilisiert (Abb. 3.5). Dabei bilden sohlenstabilisierende (Einzel-) Sperren die notwendige Voraussetzung. Deshalb ist hier speziell die Gesamtwirkung des Systems im Rahmen des Gesamtkonzeptes zu beurteilen.



*Abb. 3.5: Buochserrübi NW. Runsenkessel stabilisiert mit kombinierten technisch- biologischen Massnahmen. Im steilen Runsengerinne waren ursprünglich nur einzelne Sperren aus Blocksteinen vorhanden. Das Unwetter im August 1981 führte zu Sohlenabsenkungen zwischen den Sperren, Rutschungen in den seitlichen Hängen und erheblichen Schäden im Siedlungstraum von Buochs. 1983 wurde ein durchgehender Sperrenvollverbau (vorwiegend Stahlbetonsperren) angeordnet, der sich inzwischen sehr gut bewährt hat.*

Lokal angeordneten Sperrgruppen in sonst unverbauten Gerinnen kommt eine grosse Gesamtbedeutung zu, wenn sie beispielsweise als Hangfussicherung für Rutschflächen oder Seitenrunsen dienen. Da ihre Erstellung recht aufwendig ist, handelt es sich meistens um Rutschflächen oder Runsen von erheblicher Bedeutung für die Geschiebe- oder Schwemmholzliefereung und damit für die Feststoff-

transport-Bilanz in einem Einzugsgebiet (Abb. 3.5). Sie sind in jedem Fall genauer abzuklären. Relevanz darf meist angenommen werden.

In der Regel nicht relevant sind Einzelwerke oder kleine Sperrengruppen mit ausgesprochen lokaler Wirkung ohne nennenswerten Effekt auf erhebliche Feststoffpotenziale.

Irrelevante  
Verbauungen

Bei der Beurteilung der Relevanz sind auch Abklärungen über die weitere Entwicklung der Verbauung und über allenfalls zusätzlich vorgesehene Massnahmen zu treffen. Stabilisierungsarbeiten in Wildbacheinzugsgebieten sind allgemein sehr aufwendig und ihre Erstellung dauert entsprechend lange. Unter Umständen hat sich die Bauherrschaft zusätzliche Massnahmen vorbehalten, die noch nicht im Detail geplant bzw. im Gesamtkonzept enthalten sind.

### 3.2 Massnahmenbeurteilung

#### 3.2.1 Übersicht

Bei der Massnahmenbeurteilung wird die Zuverlässigkeit der Sperren und des Gesamtsystems (z.B. Sperrentreppe) aufgrund von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit (Funktionstüchtigkeit) und Dauerhaftigkeit bestimmt (Tab. 3.1). Dabei werden die bauwerksspezifischen Eigenschaften mit den prozessgesteuerten Einwirkungen verglichen. Abb. 3.6 zeigt, gestützt auf das allgemeine Vorgehen (vgl. Teil A), die bei Wildbachsperren massgebenden Arbeiten mit Bezug auf den folgenden Text.

Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit bestimmen Zuverlässigkeit

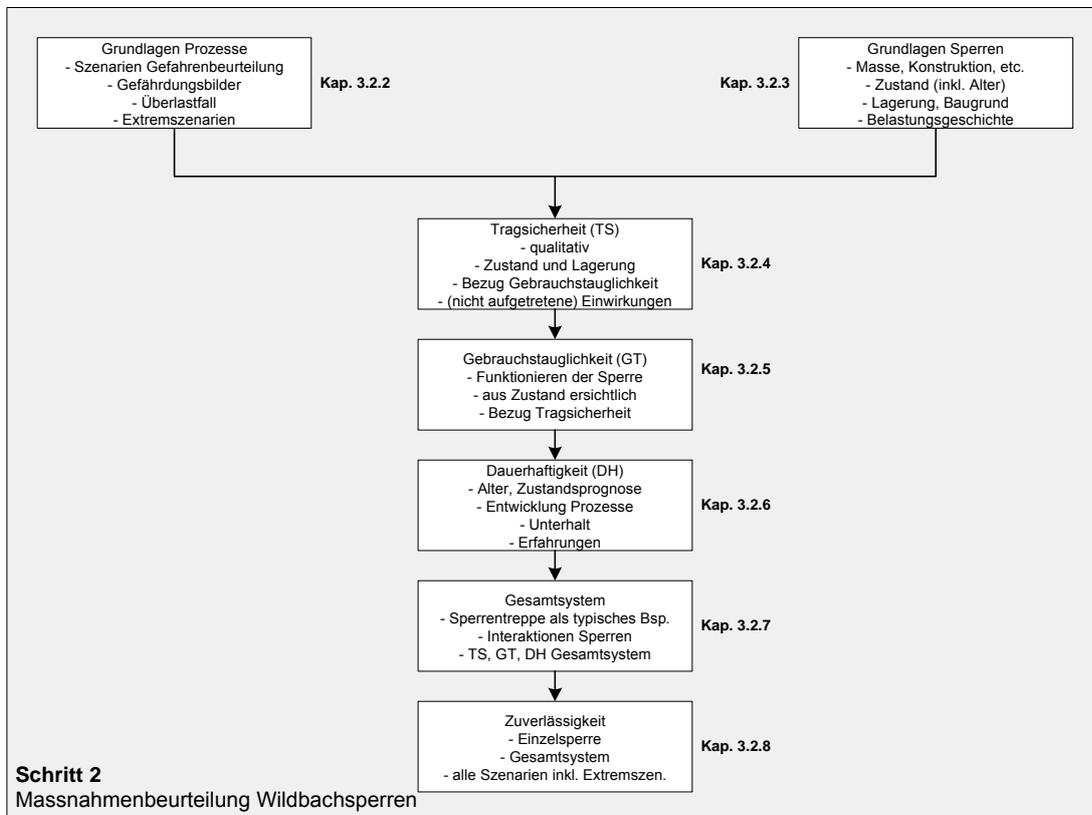


Abb. 3.6: Arbeitsschema zur Massnahmenbeurteilung von Wildbachsperren.

Tab. 3.1: Übersicht über die Beurteilung von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Wildbachsperrern.

Grundlagen	Zu beurteilen (i.d.R. qualitativ)	Bedeutung
Tragsicherheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tragwiderstand der Sperrquerschnitte</li> <li>- Stabilität der einzelnen Sperren</li> <li>- Stabilität des Gesamtsystems</li> </ul>	Bauwerksspezifische Eigenschaften für den Vergleich mit den prozessgesteuerten Einwirkungen. Beurteilen eines möglichen Versagens
Gebrauchstauglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Funktion der einzelnen Sperren und des Gesamtsystems</li> <li>- Sohlenlage unterhalb der Verbauung</li> <li>- Durchbiegungen</li> <li>- Risse</li> </ul>	Funktionalität der Bauwerke in Bezug auf die sich im Gerinne und dessen Umgebung abspielenden Prozesse. Funktionalität im Vergleich mit den Anforderungen gemäss Schutzkonzept
Dauerhaftigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Langfristige Gewährleistung der Tragsicherheit unter Berücksichtigung der Interaktionen mit der Gebrauchstauglichkeit</li> <li>- Lebensdauer</li> </ul>	Eignung bezüglich der zeitlichen Kriterien und Vorgaben

### 3.2.2 Grundlagen Prozesse

Relevante  
Gefährdungsbilder

Die allgemeinen Grundlagen (z.B. Abfluss und Geschiebe) aus der Grobbeurteilung sind zu ergänzen. Dabei geht es nicht nur um Prozesse, welche für die Gefahrenkarte relevant sind sondern auch um lokale Gefahren (z.B. Umfliessen von Sperren). Die relevanten Einwirkungen werden in Gefährdungsbildern für die Schutzmassnahmen zusammengefasst (Tab. 3.2). Sie lassen sich aus den Ergebnissen der Prozessbeurteilung (z.B. Beurteilung von Geschiebe- und Murgangfrachten oder von Hangprozessen) und den Eigenschaften der Verbauung (z.B. Sperrtyp, Anordnung) herleiten.

Tab. 3.2: Prozesse und Gefährdungsbilder bzw. Einwirkungen.

Prozess	Gefährdungsbilder / Einwirkungen
Hochwasser $HQ_x$ der Jährlichkeit $x$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unterspülen der Sperre, Sperrkolk</li> <li>- Unterspülen / Erosion der seitlichen Einbindungen, Instabilität der Auflager</li> <li>- Fliessgeschwindigkeit, Schleppspannung, Abflusstiefe</li> <li>- Erosion der seitlichen Einbindungen / Instabilität der Auflager durch Überströmen der Sperrflügel wegen ungenügender Kapazität der Abflusssektion</li> <li>- Umfliessen der Sperre verbunden mit starker Erosion wegen ungenügender Kapazität der Abflusssektion</li> <li>- Hydraulischer Grundbruch</li> </ul>
Geschiebe- und Schwemholztransport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stoss auf Sperre</li> <li>- Sohlenlagenveränderungen (Erosion, Ablagerungen), z.B. Auflandungen und Verbreiterungen bspw. mit der Folge des Mäandrierens oder Absenkungen mit der Folge von Setzungen</li> <li>- Erosion der seitlichen Einbindungen / Instabilität der Auflager durch Überströmen der Sperrflügel wegen Ablagerungen und Einschränkung der Abflusskapazität (insbes. der Abflusssektion)</li> <li>- Umfliessen der Sperre verbunden mit starker Erosion wegen Ablagerungen und Einschränkung der Abflusskapazität</li> <li>- steile Hinterfüllungen mit erhöhtem Erddruck</li> <li>- Vegetation im Gerinne</li> </ul>
Murgänge	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stoss auf Sperrkörper / Sperrflügel</li> <li>- Übrige s. oben</li> </ul>

Rutschungen in den Seitenhängen	- Überdeckung von Sperren mit Einschränkung der Abflusskapazität - Beanspruchung der Sperren durch Hangbewegungen
Steinschlag	- Stoss auf Sperrenkörper / Sperrenflügel - Überdeckung von Sperren mit Einschränkung der Abflusskapazität
Alterung	- Verlust der Materialfestigkeit

Selbst wenn viele dieser Gefährdungsbilder nur qualitativ oder semi-quantitativ behandelt werden, muss doch darauf geachtet werden, auch verschiedene Szenarien im Sinne unterschiedlich starker Einwirkungen zu betrachten. Dies gilt insbesondere für die eigentlichen Gerinneprozesse Abfluss, Feststoffe und Murgänge. Diese sollen mindestens in einem Bereich entsprechend den für die Gefahrenbeurteilung relevanten Szenarien variiert werden. Zusätzlich sind immer Extrem-szenarien zu beurteilen.

In Szenarien unterschiedliche Intensitäten betrachten

Bei bestehenden Verbauungen sind zur Bestimmung der Gefährdungsbilder und der Einwirkungen in der Regel Detailuntersuchungen im Gelände erforderlich. Bei geplanten Verbauungen sind die Annahmen, welche bei der Projektierung gemacht wurden zu überprüfen bzw. zu verifizieren. Die Untersuchungen bilden die Grundlage, um die kritischen Bedingungen für die Werke bei den zu erwartenden zeitabhängigen Prozessen und Prozesskombinationen durchzudenken und darzustellen.

I. d. R. Detailuntersuchungen im Gelände erforderlich

Bei der Beurteilung von Sperrentreppen sind sowohl die einzelnen Sperren als auch die Sperren im Verband zu beurteilen:

- In Bezug auf die einzelnen Sperren stehen qualitative und punktuell-quantitative Beurteilungen und Einschätzungen im Vordergrund. Es geht dabei um Faktoren, welche die Tragsicherheit, die Gebrauchstauglichkeit oder die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen können (vgl. Kap. 3.2.4 ff).
- In Bezug auf Verbausysteme in Wildbächen stehen quantitative Grundlagen im Vordergrund (vgl. Tab. 1.1). In der Praxis beziehen sich diese quantitativen Angaben in der Regel auf die Szenarien der Gefahrenbeurteilung inklusive Extremereignisse. Es ist jedoch zu beachten, dass für das Verhalten von Verbaumassnahmen auch kleinere und kontinuierliche Ereignisse relevant sein können. So können durch kontinuierliches Einschottern von Sperrentreppen die Abflusskapazitäten derart eingeschränkt sein, dass sie im entscheidenden Moment nicht mehr genügen.

Bei einzelnen Sperren steht qualitative Beurteilung im Vordergrund

Bei Verbausystem stehen quantitative Grundlagen im Vordergrund

### Bemessungsereignis und Überlastfall

Wildbachverbauungen wurden in der Regel auf ein 100-jährliches Ereignis (oder auf das grösste bisher beobachtete Ereignis) ausgelegt (Bemessungsereignis). Bis etwa in die 1980-er Jahre wurde dies als eine recht strenge Bedingung betrachtet. Strenge Bedingungen rechtfertigen sich dadurch, dass die Sperren beim Überströmen stark gefährdet sind (Abtrag der unterwasserseitigen Böschungen, Abb. 3.7) und kollabieren können, unter Umständen verbunden mit schwerwiegenden Folgen (Versagen für die ganze Sperrentreppe).

Bis ca. 1980 wurden Wildbachverbauungen auf 100jährliches Ereignis bemessen



Abb. 3.7: 60-jährige Rundholzsperrre bei Hirzel ZH. Die Sperrentreppe musste erneuert werden und einzelne Sperren wurden bezüglich der Holzfestigkeit untersucht (Noetzli et al., 2002). Die Rundholzlagen sind seitlich in die Flanken eingebunden und tragen somit von Flanke zu Flanke. Sofern die Flanken abrutschen, kollabiert eine solche Sperre. Das gleiche gilt sinngemäss auch für Stahlbetonsperren, welche als Balken oder Platten von Flanke zu Flanke tragen.

Geschiebe- und Schwemmholztransport sowie Murgänge einbeziehen

Verschiedene Schadenereignisse haben gezeigt, dass ein Bemessungsereignis, welches auf dem 100-jährlichen Hochwasserabfluss beruht, nur dann eine ausreichende Sicherheit bietet (bzw. einem „wirklichen“ 100-jährlichen Ereignis entspricht), wenn die Verhältnisse bezüglich Geschiebe- und Schwemmholztransport sowie Murgängen und allenfalls weiteren Einwirkungen korrekt berücksichtigt wurden. In diesem Sinne sind vor allem bestehende Verbauungen kritisch zu prüfen und bei projektierten Verbauungen sind die Projektannahmen zu verifizieren. Bei letzteren ist zudem zwischen Bau- und Gebrauchszuständen zu unterscheiden; beispielsweise für Murgangstösse oder Steinschlag auf Sperrkörper bei nicht hinterfüllten Sperren (Abb. 3.8) oder Sperrrenflügel (hinterfüllte Sperren).

Überlastfall entspricht oft nicht berücksichtigten Gefährdungsbildern

Mögliche Überlastfälle ergeben sich vor allem aus den bei der Bemessung nicht berücksichtigten Gefährdungsbildern. Auf keinen Fall darf der Überlastfall automatisch mit Extremszenario im Sinne von äusserst selten gleichgesetzt werden (s. folgenden Abschnitt). Einwirkungen wie Murgangstoss, steile Sperrrenhinterfüllung, Steinschlag oder Rutschung mit Überschüttung der Sperren sowie Sohlenabsenkung mit Freilegung von Fundamenten (Abb. 3.9) können sich durchaus in einem Bereich der Eintretenswahrscheinlichkeiten befinden, welche für die Gefahrenbeurteilung relevant sind. Sie sind deshalb entsprechend zu prüfen und in der Szenarienbildung zu berücksichtigen.



*Abb. 3.8: Wildbachsperre aus Stahlbeton welche im noch nicht hinterfüllten Zustand durch Blockschlag beschädigt wurde. Die Tragsicherheit ist nicht mehr gewährleistet. Die Sperre war dann allerdings noch einige Jahre im Betrieb, bis sie durch Vorbetonieren saniert werden konnte (Aufnahme W. Gerber 1985).*



*Abb. 3.9: Gerade Wildbachsperre aus (Stahl?) Beton. Nicht nach den Regeln des Vollverbaus angeordnet. Nach einem Hochwasserabfluss hat sich die Gerinnesohle vor der Sperre auf das Grenzgefälle (wenige Prozent) abgesenkt. Dadurch wurde das Sperrenfundament freigelegt.*

Unsicherheiten bei  
300jährlichem Ereignis  
oft gross

Für die Gefahrenbeurteilung ist auch das 300-jährliche Ereignis zu beurteilen, welches streng genommen eine Überlastung einer nach obiger Regel bemessenen Sperre darstellt. Im Allgemeinen dürften speziell bei bestehenden Werken die Unsicherheiten sowohl bei der Prozess- als auch bei der Massnahmenbeurteilung zu gross sein, um diese Feinheit berücksichtigen zu können. Die Auswirkungen des 300-jährlichen Ereignisses können deshalb eher ausgehend vom „100-jährlichen Bemessungsereignis“ durch eine Wahl von ungünstigeren Faktoren / Bedingungen abgeschätzt werden.

### Extremszenarien

Extremszenario  
übertrifft deutlich  
Bemessungsszenario

Die Analyse von Extremereignissen gehört bei der Beurteilung nach PROTECT dazu. Dabei können unter dem Begriff Extremereignis „unerwartete“ respektive „unwahrscheinliche“ Situationen zusammengefasst werden, wozu auch die Kombination verschiedener Ereignisse gehört. Die Wahrscheinlichkeit unterscheidet sie von den Überlastfällen. Jedes Extremszenario übertrifft das Bemessungsereignis deutlich und führt zu einer Überlastung der Massnahmen bzw. der Systeme. Hingegen ist nicht jeder Überlastfall ein Extremszenario.

### 3.2.3 Grundlagen Massnahmen

Details bei neuen  
Bauwerken in  
Projektunterlagen

Grundlagen für die Beurteilung sind möglichst genaue Angaben über Bauwerksabmessungen, statische Systeme, Werkstoffe, konstruktive Details (z.B. Abflusssektionen, Leitwerke, Bewehrung), vorhandene oder zu erwartende Schäden, Baugrundverhältnisse und Belastungsgeschichte. Bei neueren und projektierten Wildbachverbauungen können diese Angaben meistens aus den Projektunterlagen entnommen werden. Bei vielen bestehenden, insbesondere älteren Verbauungen sind sie meistens nur spärlich oder gar nicht vorhanden und müssen im Feld erhoben werden.

### Zustand der Tragwerke

Zustandsbetrachtung  
einzelner Sperrren und  
des Gesamtsystems

Bei bestehenden Sperrren ist der Zustand der Werke eine wichtige Grundlage. Benötigt werden der aktuelle Zustand sowohl der einzelnen Werke als auch des Gesamtsystems Sperrrentreppe. Dabei werden insbesondere die Veränderungen und Schäden aufgezeigt, die auf eine erhöhte Gefährdung des Bauwerkes hinweisen können. Es ist zu beachten, dass nicht nur die Bauwerke selbst, sondern auch ihr Umfeld (z.B. Ereignisspuren) einbezogen werden. Wichtig ist ein systematisches Vorgehen, das heisst eine Begutachtung aller relevanten Punkte nach einem gewissen Schlüssel. Empfehlenswert sind dafür beispielsweise bauwerkspezifische Formulare (Romang, 2004; AfW, 2006). Die Zustandserfassung wird primär direkt am Objekt im Feld durchgeführt. Je nach Fragestellung, insbesondere im Hinblick auf genauere Untersuchungen (Zustandsbewertung) kann diese Erhebung durch ein Studium der Bauwerksakten (z.B. Konstruktion, Bauwerksgeschichte, Gutachten, etc.) ergänzt werden.

Neben dem Alter (vgl. Kap. 3.2.6) hängt der Zustand speziell vom Massnahmentyp, von den Lagerungsbedingungen (z.B. Einbindungen, Fundierungstiefe) und von den Einwirkungen bzw. von der Belastungsgeschichte ab.

Einfacher Zustandstest  
für Holzkonstruktionen

- Während z.B. der Zustand 30-jähriger Stahlbetonsperren, die keine grösseren Risse und Verschiebungen aufweisen, im Allgemeinen als gut bezeichnet werden kann, sind die Verhältnisse bei gleichaltrigen Holzkonstruktionen unter Umständen bereits uneinheitlich. Sie können jedoch mit Hilfe eines einfachen Verfahrens abgeschätzt werden: Von der WSL wird der Holzzustand mit Hilfe eines 3-er Schraubenziehers geprüft. Dieser wird von Hand mit „normaler

voller Kraft“ gegen den Holzkörper gedrückt und die Eindringtiefe wird gemessen. Eindringtiefen zwischen 1 mm und 2 mm repräsentieren einen guten Zustand, solche von mehr als 2 mm bis 10 mm einen mittleren und solche von mehr als 10 mm einen schlechten. Am Beispiel der Holzkonstruktionen wird das Problem der Alterung besonders deutlich. Aus baustatischer Sicht weisen die Sperren anfänglich eine hohe Tragsicherheit auf und sind überdimensioniert (Zeller & Röthlisberger 1987, Böll et al., 1999). Im Laufe der Zeit nimmt die werkstoffbedingte Sicherheit ab und wird schliesslich kritisch.

- Die Lagerungsbedingungen sind in der Praxis häufig für das Tragverhalten von Wildbachsperren massgebend. So sind Fälle bekannt, wo neuere Stahlbetonsperren (trotz hoher werkstoffbedingter Sicherheit) versagten, weil die Böschungen im Bereich der seitlichen Einbindungen abrutschten.
- Bei bestehenden Verbauungen ist abzuklären, ob sich die relevanten Gefährdungsbilder bzw. die massgebenden Einwirkungen bereits eingestellt haben. So ist bei Sperrentreppen häufig erst nach einem extremen Hochwasserabfluss mit Sohlenabsenkungen und Rutschungen aus den Böschungen zu rechnen. In murganggefährdeten Gerinnen kann es unter Umständen viele Jahre dauern, bis die massgebenden Einwirkungen auftreten. Die Belastungsgeschichte kann zudem wertvolle Hinweise zur Tragsicherheit liefern: Aus dem Vergleich der Zustände vor und nach einem bedeutenden Ereignis kann oft auf die Einwirkungen geschlossen werden. So kann bei Sperren in Runsengerinnen, welche vor dem Ereignis steil hinterfüllt waren und es danach nicht mehr sind, angenommen werden, dass sie auch in Zukunft Einwirkungen aus steiler Hinterfüllung aufnehmen können (guter Zustand vorausgesetzt).

Lagerungsbedingungen für Tragverhalten massgebend

Massgebende Einwirkungen oft erst nach einigen Jahren

Grundsätzlich kann nur aufgenommen und beurteilt werden, was sichtbar ist. Verdeckte Bauteile entziehen sich der Zustandsaufnahme und Kontrolle. So sind bei Stahlbetonsperren mit fehlenden Projektunterlagen keine Aussagen zur Bewehrung möglich. Auch werden die Lagerungsbedingungen im Bereich der Gerinnesohle zur Bemessung nicht immer einheitlich angenommen. Bei grossen Spannweiten wird manchmal für die Plattentheorie (gemäss ASF, 1973) eine Einbindung über die Teile der Sohle angenommen. Falls sich die massgebende Einwirkung bzw. die relevanten Gefährdungsbilder noch nie eingestellt haben, erschweren derartige Aspekte die Aussagen zur Tragsicherheit beträchtlich. In solchen Fällen können Erfahrungen und Vergleiche mit ähnlichen Sperren in vergleichbaren Gerinnen hilfreich sein.

Nur sichtbare Bauteile beurteilbar

### 3.2.4 Überprüfung der Tragsicherheit

Die Tragsicherheit ist die Fähigkeit eines Tragwerks und seiner Bauteile sowie eines Systems einander zugeordneter Schutzbauwerke, die Gesamtstabilität für die anzunehmenden Einwirkungen sowie ausreichende Tragwiderstände zu gewährleisten.

Gesamtstabilität bei Einwirkungen gewährleisten

Bei neueren und projektierten Verbauungen ist der Tragwiderstand in der Regel bekannt (Beton- und Stahlbetonsperren) oder kann verhältnismässig leicht abgeschätzt werden (Rundholzsperrern, Holzkasten- und Drahtsteinkorbwerke). In solchen Fällen ist lediglich noch ein Vergleich der angenommenen Einwirkungen mit den zu erwartenden Gefährdungsbildern erforderlich und die zukünftige Entwicklung der Tragsicherheit ist zu prognostizieren (Alterung, veränderte Lagerungsbedingungen). Dieses Vorgehen entspricht einer pauschalen Beurteilung.

Bei neueren und projektierten Bauwerken Tragwiderstand i.d.R. bekannt

Bei älteren Sperrern  
i.d.R. qualitativer  
Ansatz

Bei bestehenden Wildbachsperrern, insbesondere älteren und solchen ohne Projektunterlagen, kommt in der Regel ein qualitativer Ansatz zur Anwendung. Dies weil eine quantitative Überprüfung der Tragsicherheit mangels Daten gar nicht durchgeführt werden könnte. Eine wesentliche Informationsquelle stellt der Zustand des Werkes dar. Der Tragwiderstand von Massnahmen mit einer robusten und bekannten Konstruktionsweise (wie z.B. Wildbachsperrern) kann oft durch eine visuelle Beurteilung von Verformungen und Rissen abgeschätzt werden. Zeigen sich keine verdächtigen Mängel oder Schäden, sind erste Voraussetzungen für die Tragsicherheit erfüllt. Bei der möglichst objektiven Einordnung der Schäden können Kriterien weiterhelfen, wie sie in Tab. 3.3 und von Romang (2004) vorgeschlagen werden.

Tab. 3.3: Schadenbewertung aufgrund verschiedener Kriterien (AfW 2006)

Schäden	Dringlichkeit	Konsequenz Tragsicherheit	Zeithorizont Folgeschäden	Konsequenz Gebrauchstauglichkeit	Beispiel
Alarmierend	Hoch	Sicher	Nächstes Ereignis	Sehr gross	Gekippte Sperre
Tolerierbar	Mittel	Wahrscheinlich	2-5 Jahre	Noch keine	Ausgewaschener Kolkschutz
Unbedeutend	Klein	Unwahrscheinlich	> 5 Jahre	Keine	Bewuchs

Bei der qualitativen Beurteilung der Tragsicherheit ist darauf zu achten (Romang & Margreth, 2007), dass

- mit der erkennbaren, vermuteten oder absehbaren Alterung des Bauwerkes der Tragwiderstand abnehmen kann,
- die massgebende Einwirkung unter Umständen noch gar nicht aufgetreten ist und
- sich die spezielle Bedeutung verborgener und nicht kontrollierbarer Tragwerksteile erst im Schadensfall zeigen kann.

Neben dem Zustand sind auch der Massnahmentyp und die Lagerungsbedingungen für die Abschätzung der Tragsicherheit wichtig. So wird sich beispielsweise je nach Bedingungen (Einwirkungen, Lagerungsbedingungen) eine als Gewichtsmauer konzipierte Wildbachsperre günstiger verhalten als von Flanke zu Flanke tragende Werke.

Tragsicherheit von  
Gebrauchstauglichkeit  
beeinflussbar

Weiter kann die Gebrauchstauglichkeit die Tragsicherheit beeinflussen. So werden bei eingeschränkter Gebrauchstauglichkeit (z.B. verstopfte Abflusssektionen) die Sperrern auf ihrer ganzen Breite überflossen. Dadurch ist die Stabilität der seitlichen Böschungen und damit der Sperrern in Frage gestellt.

Die Tragsicherheit von seit mehreren Jahren bestehenden Sperrern kann somit vermutet werden,

- wenn der Zustand der Massnahmen inkl. der Lagerungsbedingungen gut ist,
- sich aus der Gebrauchstauglichkeit keine tragsicherheitsrelevanten Einwirkungen ergeben
- und der vermutete Tragwiderstand auch unter Berücksichtigung der oben aufgelisteten Punkte und den zu erwartenden Einwirkungen (Gefährdungsbilder gemäss Tab. 3.2) gewachsen ist.

Soweit möglich erfolgt diese qualitative Beurteilung der Tragsicherheit differenziert für verschiedene Szenarien. Insbesondere Einwirkungen, welche die bekannte oder vermutete Bemessung der Sperren übersteigen, sind ergänzend zu beurteilen. Zu beachten ist in jedem Fall, dass die Beurteilung sehr vorsichtig vorgenommen werden muss, wenn nur wenige Angaben zum Bauwerk oder dessen Belastungsgeschichte vorliegen.

Qualitative Beurteilungen möglichst für verschiedene Szenarien

### 3.2.5 Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit

Die Gebrauchstauglichkeit ist die Fähigkeit eines Tragwerks und seiner Bauteile sowie eines Systems einander zugeordneter Schutzbauwerke, die Funktionstüchtigkeit in Bezug auf die Naturgefahrenprozesse entsprechend den Gebrauchsgrenzen zu gewährleisten. Die Gebrauchsgrenzen sind dabei die festgelegten Grenzen der Gebrauchstauglichkeit (z.B. Schluckvermögen von Abflusssektionen).

Funktionstüchtigkeit bei Naturgefahrenprozessen gewährleisten

Bei neuen Sperren kann die Gebrauchstauglichkeit in der Regel als erfüllt betrachtet werden. Schwachstellen zeigen sich häufig erst nach längeren Zeiträumen v.a. bei ungenügendem Unterhalt. Mangelhafte Gebrauchstauglichkeit äussert sich in der Regel in einer Abnahme der Wirkung auf den Prozess. Mangelhafte Gebrauchstauglichkeit kann aber auch zu neuen, bisher nicht berücksichtigten Gefährdungsbildern respektive Einwirkungen und damit zu einem Verlust der Tragsicherheit führen.

Schwachstellen meist erst nach längeren Zeiträumen sichtbar

Dieser direkte Zusammenhang von Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit unterscheidet Wildbachverbauungen von klassischen Ingenieurtragwerken. Während bei diesen die Nachweise in der Regel getrennt und mehr oder weniger unabhängig voneinander ausgeführt werden können, sind die Nachweise bei Schutzmassnahmen in Wildbächen oft miteinander verknüpft. Dies kann an einem Beispiel illustriert werden: Zum Zeitpunkt X werden alle Sperren in Bezug auf ihre Tragsicherheit als gut beurteilt und ebenso für die Zukunft prognostiziert. Falls sich zum Zeitpunkt X+1 ungünstige Schwemmholzablagerungen an den Abflusssektionen einstellen, ist dies als statische Einwirkung vernachlässigbar. Die Funktionstüchtigkeit (schadloses Ableiten eines Hochwasser-Abflusses gegebener Jährlichkeit) ist aber nicht mehr erfüllt: Die Sperrenflügel werden mit entsprechenden Konsequenzen für die Tragsicherheit überflutet.

Beispiele für Einfluss der Gebrauchstauglichkeit auf die Tragsicherheit

Ein anderes Schadenbild der Gebrauchstauglichkeit mit sehr engem Bezug zur Tragsicherheit stellt die Rissbildung bei Stahlbetonkonstruktionen dar. Die Rissbreiten im Beton werden durch das Einlegen einer Mindestbewehrung begrenzt. Ist die Hauptbewehrung aber deutlich zu schwach bemessen, besteht die Gefahr eines plötzlichen Bruchs beim Auftreten des ersten Risses durch Versagen des Stahles. Entsprechende Schadenfälle sind aus der Praxis bekannt. Bei Sperren mit bekannter oder vermuteter schwacher Bewehrung, welche noch nie mit der massgebenden Einwirkung beaufschlagt wurden, ist daher besondere Vorsicht geboten. Erfahrungen und Vergleiche mit gleichartigen Sperren in vergleichbaren Gerinnen können hilfreich sein.

In erster Linie bezieht sich die Gebrauchstauglichkeit jedoch auf die Funktion der Schutzmassnahmen. Verhält sich bei den möglichen Einwirkungen das Bauwerk so, wie es erwartet wird? Grundsätzlich gilt, dass die Gebrauchstauglichkeit bei unveränderten Anforderungen aus dem aktuellen Zustand ersichtlich ist. Die Anforderungen an Wildbachsperren ergeben sich aus ihrer Funktionalität bzw. aus ihrer im Schutzkonzept geforderten Wirkung. Insbesondere die Erhaltung der Abflusskapazität ist hier speziell erwähnenswert (Abb. 3.10). Dazu kommen Punkte wie die Energieumwandlung am Überfall, der Gerinneszustand und das Fliessverhalten zwischen den Sperren, die Eignung zur Hangfussicherung oder die Sohlenlage

Gebrauchstauglichkeit aus aktuellem Zustand ersichtlich

unterhalb der Verbauung. Die Überprüfung erfolgt im Allgemeinen qualitativ aufgrund der Zustandsaufnahme vor Ort und der vermuteten Zustandsentwicklung über die nächsten rund 20 Jahre.



Abb. 3.10: Durch seitliche Einrutschung teilweise verkleaste Abflusssektion (E. Frick, tur gmbh).

Nachweis der Durchbiegung nur bei sehr schlangen Sperren notwendig

Der klassische (rechnerische) Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Durchbiegungen wird hingegen bei Wildbachsperren in der Regel nicht geführt. Die Erfahrungen bzw. Nachrechnungen an ausgeführten Bauwerken zeigen, dass bei den üblichen Verhältnissen von Sperrenstärken (statischen Höhen) zu Spannweiten (Stahlbeton) die Durchbiegungen klein sind. Bei sehr schlanken Sperren (z.B. Platten aus Stahlbeton) in Gerinnen mit seitlichen Kriechhängen ist aber Vorsicht geboten.

Bei eingeschränkter Gebrauchstauglichkeit nur eingeschränkte Wirkung auf Prozess

Ist die Gebrauchstauglichkeit nicht erfüllt, ist die Wirkung auf die Prozesse eingeschränkt. Dies kann bis zum so genannt funktionellen Versagen führen. Bei diesem bleibt das Werk als solches erhalten, erfüllt aber aufgrund der Mängel keine Funktion. Ein Beispiel dafür wären vollständig und massiv eingeschotterte Sperren als Sohlsicherung. Das Gerinne präsentiert sich dann wie vor dem Verbau und die Verbauung erfüllt als Sohlsicherung keine prägende Funktion mehr, obwohl sie als Bauwerk nicht versagt. Vielfach führen aber ernsthafte Mängel bei der Gebrauchstauglichkeit wie erwähnt zu Problemen bei der Tragsicherheit und somit zum strukturellen Versagen.

### 3.2.6 Überprüfung der Dauerhaftigkeit

Die Anforderungen an die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit der Massnahmen sollen im Rahmen der relevanten Gefährdungsbilder und massgebenden Einwirkungen während der nächsten rund 50 Jahren ohne unvorhergesehenen Aufwand für die Instandhaltung erfüllt bleiben.

Mind. 50 Jahre Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit

Ein wichtiges Kriterium für die Dauerhaftigkeit ist das Alter und die erwartete Lebensdauer der Sperren. Dabei können die folgenden allgemeinen Kennwerte weiterhelfen:

Lebensdauer

- Die Lebensdauer von Sperren aus Mauerwerk und (Stahl-) Beton wird im Allgemeinen mit etwa 100 Jahren angegeben.
- Falls keine Beschädigungen durch Geschiebe und Schwemmholz zu erwarten sind, gilt für Sperren aus Drahtsteinkörben eine ähnliche Grössenordnung.
- Bei Holzkonstruktionen kann unter günstigen Bedingungen mit einer mittleren Lebensdauer von etwa 40 bis 60 Jahren gerechnet werden (Zeller & Röthlisberger, 1987; Böll et al., 1999).

Diese Werte können im Einzelfall stark variieren. Nicht nur der Typ der Massnahme, sondern auch der Standort, die Bauausführung, die Art und Frequenz der Einwirkungen etc. spielen eine wichtige Rolle. Zudem sind Unterhaltsaspekte von Bedeutung.

Weiter müssen die für die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit relevanten Faktoren wie Zustand oder Einwirkungen in die Zukunft übertragen werden. Sind erhebliche Veränderungen zu erwarten? Vorsicht ist besonders in Kriechgebieten bzw. in Gebieten mit schlecht tragfähigem Baugrund geboten (Verschiebungen).

Änderungen im Gebiet

Die Überprüfung der Dauerhaftigkeit erfolgt qualitativ und beruht im Wesentlichen auf den bei der Überprüfung der Tragsicherheit angewandten Verfahren unter Berücksichtigung der Interaktionen mit der Gebrauchstauglichkeit. Abgesehen vom erfassten und prognostizierten Zustand der Bauwerke sind auch Überwachungs- und Unterhalts-Konzepte bzw. -Massnahmen zu berücksichtigen bzw. zu fordern. Die Überprüfung basiert stark auf dem Erfahrungsschatz mit der Massnahme und den lokalen Erfahrungen.

Qualitative Überprüfung der Dauerhaftigkeit

### 3.2.7 Gesamtsystem

Wildbachsperrentreppen sind, zumindest wenn sie nach den Kriterien des Vollverbaus erstellt wurden, das typische Beispiel für das Zusammenwirken von Einzelbauwerk und Gesamtsystem. Aber auch nicht nach den Regeln des Vollverbaus angeordnete Werke können einander beeinflussen, insbesondere in Fliessrichtung. Grundsätzlich sind Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit auch für das Gesamtsystem zu bestimmen bzw. die einzelnen Sperren sind auch unter Einbezug ihrer Nachbarn zu überprüfen. Abb. 3.11 zeigt anschaulich auf, welche Aspekte speziell zu prüfen sind.

Zusammenwirken von Sperren

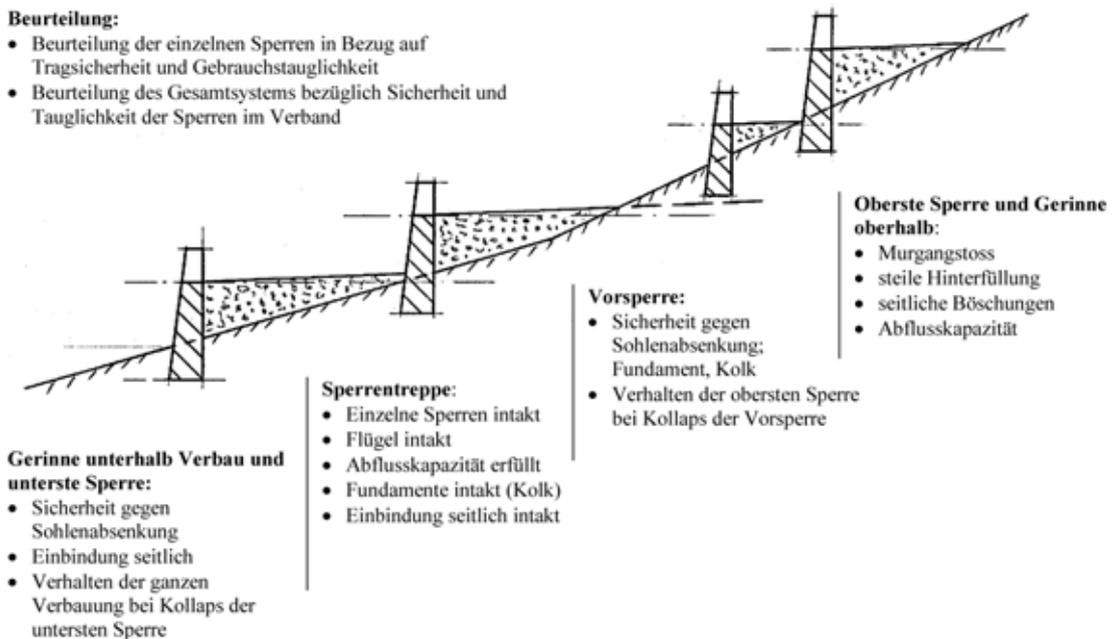


Abb. 3.11: Beurteilung und wichtigste Beurteilungskriterien schematisch für Wildbachsperren, die nicht durchgehend nach den Regeln des Vollverbaus angeordnet sind (Böll, 2003).

### 3.2.8 Bestimmung der Zuverlässigkeit

Zuverlässigkeit für einzelne Sperre und Gesamtsystem bestimmen

Die Zuverlässigkeit der Massnahmen ergibt sich aufgrund der Beurteilung von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit für die verschiedenen Gefährdungsbilder, Einwirkungen oder Szenarien. Sie ist sowohl für die einzelnen Sperren zu bestimmen als auch für das Gesamtsystem. Es wird zwischen hoher, eingeschränkter und geringer Zuverlässigkeit (vgl. Teil A) unterschieden.

Zuverlässigkeit für verschiedene Szenarien bestimmen

Die Zuverlässigkeit ist bezüglich der verschiedenen Szenarien (inkl. Extrem-szenario) zu prüfen. Bei Wildbachsperren ist insbesondere zu untersuchen, ob die Bemessung auf die zu erwartenden Gefährdungsbilder und Einwirkungen ausgerichtet ist. Speziell zu beachten sind zudem die Interaktionen zwischen Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit. Unter Umständen lassen sich negative Auswirkungen auf die Tragsicherheit durch Unterhaltsarbeiten ausschliessen. Andernfalls ist von einer geringen Zuverlässigkeit auszugehen.

### 3.3 Wirkungsbeurteilung

Sohlensicherung und Hangfuss-sicherung sind Hauptfunktionen

Sperren erfüllen in Wildbächen zwei Hauptfunktionen: Sohlensicherung (Stabilisierung) und Hang(fuss)sicherung (Konsolidierung). Erstere schliesst die Funktion als Zwischenspeicher für transportiertes Geschiebe mit ein. Der mögliche Einfluss von Sperrtreppen auf den Abfluss von Murgängen (Bremsen, evtl. Stoppen) wird hier als Spezialfall nicht näher betrachtet. Im Folgenden werden die zwei Hauptfunktionen unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit diskutiert und v.a. Vorgehensweisen zur Quantifizierung erläutert. Dabei richtet sich der Fokus mehr auf Sperrtreppen (mit Vollverbau oder nicht) und weniger auf Einzelwerke.

Abb. 3.12 zeigt gestützt auf das allgemeine Vorgehen (vgl. Teil A) die bei Wildbachsperren massgebenden Arbeiten mit Bezug auf den folgenden Text. Auf den letzten

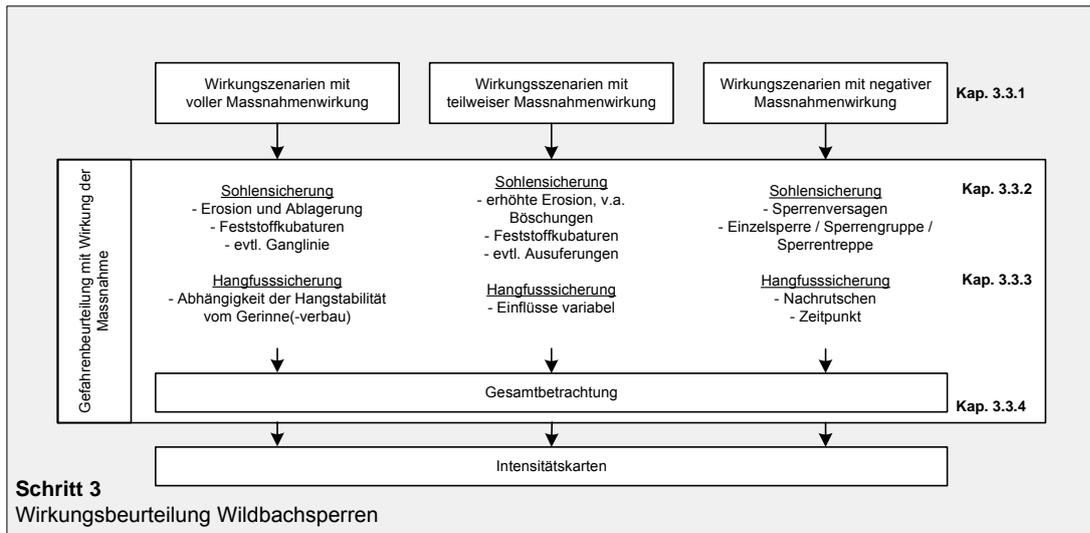


Abb. 3.12: Arbeitsschema zur Wirkungsbeurteilung von Wildbachsperren.

Schritt, die Erstellung von Intensitätskarten wird nicht näher eingegangen. Hier unterscheidet sich das Vorgehen nicht von unverbauten Wildbächen.

### 3.3.1 Massnahmenbeeinflusste Szenarien

In der Wirkungsbeurteilung werden die Wirkungsszenarien unter Berücksichtigung der Schutzmassnahmen und ihrer Zuverlässigkeit bestimmt. Dabei gelten folgende Regeln:

Regeln zur Bestimmung der Wirkungsszenarien

- Hohe Zuverlässigkeit: Die Sperren sind voll wirksam.
- Eingeschränkte Zuverlässigkeit: Die Sperren haben eine reduzierte Wirkung.
  - Eine eingeschränkte Zuverlässigkeit infolge nicht erfüllter Gebrauchstauglichkeit hat einen Einfluss auf die Prozessintensität.
  - Eine eingeschränkte Zuverlässigkeit infolge nicht erfüllter Dauerhaftigkeit hat einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit.
- Geringe Zuverlässigkeit: Die Sperren haben keine Wirkung. Dieses Szenario wird kombiniert mit dem nachfolgenden thematisiert.
- Geringe Zuverlässigkeit und negative Wirkung: Sperrenversagen führt zu einer erhöhten Gefährdung.

Unsicherheiten im gesamten Beurteilungsverlauf beispielsweise bei den Prozesseingangsgrössen oder bei der Zuverlässigkeit und Wirkung der Massnahmen können bei der Szenarienbildung berücksichtigt werden.

### 3.3.2 Sperren als Sohlensicherung

#### Wirkungsszenario mit hoher Zuverlässigkeit

Die Sperren und die Sperrentreppe sind langfristig stabil und funktionstüchtig. Damit ergibt sich unter anderem eine verhältnismässig klar definierte Gerinnegeometrie mit Sohlenfixpunkten und limitierter Breite. Diese Rahmenbedingungen erleichtern z.B. die Abschätzung von Feststoffvolumina. Diesbezüglich können Sperrentreppen sowohl einen rückhaltenden Effekt haben (Roth et al., 2000; Leitgeb, 2002) als auch in begrenztem Ausmass wiederum Geschiebe bereithalten (Abb. 3.13).

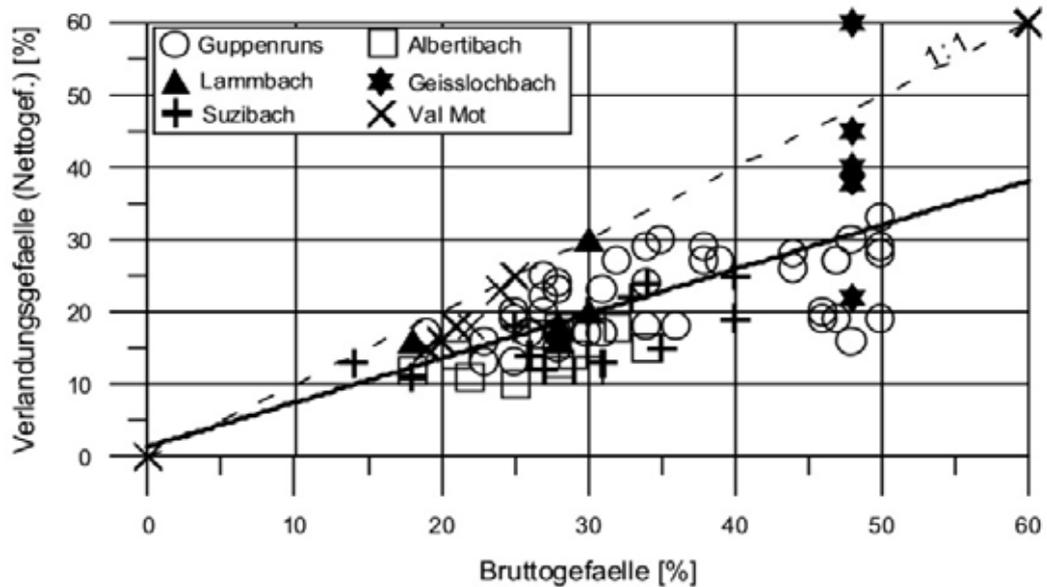


Abb. 3.13: Vergleich des aktuellen Gefälles (Verlandungsgefälle) in verbauten Wildbächen (Sperrentreppen) mit dem Gefälle vor Verbau (Bruttogefälle). Je steiler das ursprüngliche Bachgefälle (= Bruttogefälle) ist, desto steiler wird sich auch das Verlandungsgefälle (= Nettogefälle) einstellen. Durchschnittlich beträgt das Nettogefälle etwa 2/3 des Bruttogefälles (Romang, 2004).

Mobilisierbaren und rückhaltbares Volumen bestimmen Wirkung

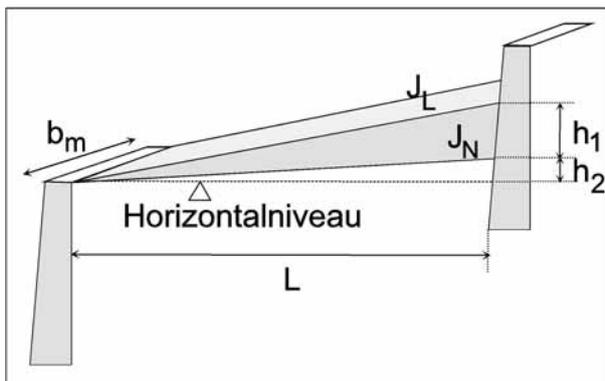
Die Wirkung kann somit durch die Abschätzung der mobilisierbaren oder rückhaltbaren Feststoffvolumina und allenfalls der Feststoffganglinie bestimmt werden. Eine entscheidende Grösse ist dabei das effektive oder angenommene Gefälle innerhalb der Sperrentreppe. Mitentscheidend ist zudem der Input (Wasser, Geschiebe, evtl. Murgang) aus den oberen Gerinneabschnitten sowohl im Ereignis als auch langfristig. Sofern der Geschiebeeintrag aus dem Oberlauf anhält, ist es insbesondere mit langfristiger Optik häufig angebracht, von einem verbleibenden Erosionspotenzial selbst bei hoch zuverlässigen Sperrungen auszugehen. Dies gilt speziell bei Sohlensicherungen in eher flacheren Gerinnen (Abb. 3.14).



Abb. 3.14: Einschotterung der Sperren im Mittellauf (Aua da Mot, St. Maria, GR) (E. Frick, tur gmbh).

Das Feststoffpotenzial zwischen Sperren kann anhand der geometrischen Randbedingungen und einem allfälligen Reduktionsfaktor bestimmt werden (Abb. 3.15). Weiter kann auf die Methoden der Gefahrenbeurteilung verwiesen werden (vgl. Tab. 1.1, S. 3).

Feststoffpotenzial durch geometrische Randbedingungen bestimmbar



Das Volumen  $V$  des „Verlandungskeils“ lässt sich nach der Formel für Prismatoide berechnen.

$$\text{Vereinfacht für Keile gilt: } V = \frac{h}{2} G$$

$$\text{Dies entspricht } V = \frac{L}{2} (h_1 \times b_m) \text{ oder } V = \frac{L^2}{2} \times (J_L - J_N) \times b_m$$

$h_1$ : Höhe der mobilisierbaren Geschiebeablagerungen ( $J > J_N$ ):  $h_1 = (L \times J_L) - h_2$   
 $h_2$ : Höhe der nicht mobilisierbaren Geschiebeablagerungen ( $J < J_N$ ):  $h_2 = L \times J_N$   
 $L$ : Sperrenabstand  
 $J_L$ : Verlandungsgefälle (z.B. Schätzung auf 1/2 bis 2/3 des ursprünglichen Sohlengefälles).  
 $J_N$ : Grenzgefälle  
 $b_m$ : Mittlere Gerinnebreite im Ausbauzustand

Abb. 3.15: Bestimmen der Kubaturen von Ablagerungen in Sperrenfeldern (Romang, 2004).

Einschränkungen aus mangelnder Gebrauchstauglichkeit

### **Wirkungsszenario mit eingeschränkter Zuverlässigkeit**

Resultiert die Einschränkung aus mangelhafter Gebrauchstauglichkeit, ist in der Regel mit höherem Feststoffaustrag bzw. geringerem Rückhalt zu rechnen als bei hoher Zuverlässigkeit. Dies weil der Grund für den Mangel häufig Geschiebeablagerungen beispielsweise zwischen den Sperrern und in der Abflussektion sind, welche a) mobilisiert werden können und b) den Abfluss ungünstig ablenken können, beispielsweise in die Böschungen .

Reine Sohlensicherungen finden sich zudem häufig auf Gerinnestrecken mit ungünstigen Querprofilen. Dabei lassen die fehlenden Seiteneinhänge nur beschränkte Sperrhöhen zu bzw. wird die Sohle durch den Verbau soweit angehoben, dass Gerinneausbrüche möglich sind. Sofern nicht gerade ein Versagen eintritt, betrifft auch dieser Fall die Gebrauchstauglichkeit und zusätzliche Erosion scheint zumindest möglich.

Somit kann die Wirkung in diesem Fall analog der hohen Zuverlässigkeit beurteilt werden, wobei die Feststofffrachten mit einem entsprechenden, auf den Fall angepassten Zuschlag zu versehen sind.

Einschränkungen aus mangelnder Dauerhaftigkeit

Resultiert die Einschränkung aus der Dauerhaftigkeit sind in Zukunft erhebliche Mängel an der Verbauung bis hin zum Versagen nicht unmöglich. Konkret ist die Tragweite im Einzelfall zu beurteilen. Eine mögliche Annäherung könnte sein, dass mit einem starken Verlust der Funktionsfähigkeit bis hin zum Versagen mit entsprechend hohen Erosionsraten gerechnet wird, diesem aber eine um ein bis zwei Klassen geringere Wahrscheinlichkeit zugeordnet wird (das Szenario wird ja, wenn überhaupt erst in mehr oder weniger ferner Zukunft relevant). Die Bestimmung der Feststoffvolumina kann sich in diesem Fall am nachfolgend geschilderten Versagensfall orientieren.

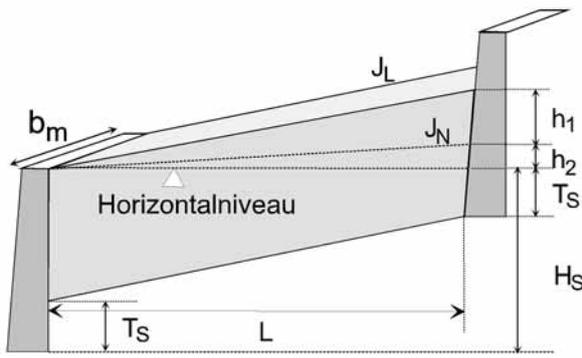
### **Wirkungsszenario mit geringer Zuverlässigkeit und negativer Wirkung**

Versagen der Sperre kann zu höherer Mobilisierung führen

Versagt eine Sperre, kann das dahinter gespeicherte Material mobilisiert werden. Nicht in jedem Fall erfolgt aber eine vollständige Mobilisierung. So wirkt auch die umgestürzte Sperre stabilisierend, der Geschiebekörper selbst ist nicht à priori instabil, liegt doch das Gefälle auch nach Versagen im Bereich des Bachgefälles vor Verbau, oder das Ereignis dauert vielleicht zu kurz, um alles Geschiebe abzutransportieren. In anderen Fällen kann die Mobilisierung noch grösser sein, v.a. durch Aktivierung der durch den Verbau in vielen Fällen konsolidierten Einhänge, teilweise verstärkt durch Abflussumlenkung infolge der liegenden Sperre. Der geometrisch bestimmbare Körper hinter der Sperre soll die Richtgrösse für die Abschätzung darstellen (Abb. 3.16). Anpassungen nach oben (mehr Geschiebe) oder unten (weniger Geschiebe) sind denkbar. Angesichts der ohnehin relativ schwerwiegenden Situation eines Versagens dürfte aber in der Regel die systematische Annäherung genügend genau sein.

Einzel Sperre und Gesamtsystem kann versagen

Im Zusammenhang mit dem Versagen von Einzelsperren ist das Versagen der gesamten Sperrentreppe zu prüfen. Diese Möglichkeit wurde durch Ereignisse bestätigt. Es war in diesen Fällen dann nicht immer einfach mit Gewissheit festzustellen, ob die Schäden für die Unterlieger merklich höher waren, als dies bei unverbautem Gerinne zu erwarten gewesen wäre. Dies mag einerseits darauf zurückzuführen sein, dass es sich in einigen Fällen um verhältnismässig neue Verbauungen handelte, welche kurz nach einem Extremereignis erstellt worden waren; die Gerinne waren deshalb im entscheidenden Moment noch relativ geschiebearm. Ein anderer wichtiger Einflussfaktor ist zudem die Ereignisdauer.



Die Kubatur des Geschieberückhaltes hinter einer Sperre lässt sich nach der Formel für Prismatoide berechnen:

$$V = \frac{L}{2} \times b_m (L \times J_L + T_s + H_s)$$

Zahlenbeispiel:  $L = 30\text{m}$ ,  $b_m = 10\text{m}$ ,  $J_L = 0.15$ ,  $T_s = 1\text{m}$ ,  $H_s = 3\text{m}$   
 $\rightarrow V = 1275 \text{ m}^3$

- $h_1$ : Höhe der mobilisierbaren Geschiebeablagerungen ( $J > J_N$ )
- $h_2$ : Höhe der nicht mobilisierbaren Geschiebeablagerungen ( $J < J_N$ )
- $T_s$ : Einbindung
- $H_s$ : Höhe des Sperrenkörpers
- $L$ : Sperrenabstand
- $J_L$ : Verlandungsgefälle
- $J_N$ : Grenzgefälle
- $b_m$ : Mittlere Gerinnebreite im Ausbauzustand

Abb. 3.16: Bestimmen der Kubaturen hinter Sperren (Romang, 2004). Es handelt sich um eine Maximalschätzung.

Das komplette Versagen der gesamten Sperrentreppe dürfte aber nicht die Regel sein. Nicht jedes Sperrenversagen löst eine Kettenreaktion aus. Kritisch ist die Situation vor allem in relativ steilen Gerinnen und mit engem Bezug zwischen den einzelnen Sperren (Vollverbau) bis hin zur baulichen Verbindung (z.B. Holzsperrentreppen). Ganz klar ist die Möglichkeit des Kollapses immer in Betracht zu ziehen. Die Einschätzung ihrer Wahrscheinlichkeit erfolgt individuell. Pragmatisch scheint es angebracht, bei Versagen einer Sperre ein Folgeversagen von 1 bis 3 Bauwerken oberhalb zu prüfen. Extremere Folgen wären dann eher im Sinne eines Extremereignisses zu behandeln, sollten aber grundsätzlich thematisiert werden.

Möglicher Kollaps muss immer betrachtet werden

### 3.3.3 Wildbachsperren als Hangfussicherung

#### Wirkungsszenario mit hoher Zuverlässigkeit

Falls die Sperren aufgrund ihrer Anordnung und Zuverlässigkeit die Hangfussicherung gewährleisten, ist zu untersuchen, ob diese Massnahme zur Stabilisierung des gesamten Einhangs genügt. Sofern dies der Fall ist oder die Hangstabilität durch geeignete zusätzliche Massnahmen sichergestellt ist, darf die Wirkung z.B. bezüglich Geschiebe- und Schwemmholzeintrag in Rechnung gesetzt werden. Die Hangprozesse sind – soweit sie im Einflussbereich des Gerinnes liegen – stark eingeschränkt. Die Gerinneprozesse verlaufen analog wie bei der Sohlensicherung (Kap. 3.3.2). Die Wirkungsbeurteilung kann sich deshalb an denselben Methoden orientieren.

Stabilisierung des gesamten Hanges

Falls die Hangrutschung bei gewährleisteter Tragsicherheit der Wildbachsperren trotzdem eintritt, weil sie nicht mehr im Einflussbereich des Gerinnes bzw. des Sperrenverbau liegt, lässt sich eine Abschätzung des Eintrags aufgrund der Geometrie von Gerinneabschnitt und Hangpartie vornehmen. Allerdings ist auch zu beachten, dass ein solches Szenario die Gebrauchstauglichkeit und eventuell sogar die Tragsicherheit beeinträchtigen könnte. Somit wäre es als Gefährdungsbild bereits in der Massnahmenbeurteilung zu berücksichtigen.

Hangrutschung ausserhalb des Einflussbereiches

### Wirkungsszenario mit eingeschränkter Zuverlässigkeit

Reduzierte Wirkung bei mangelnder Gebrauchstauglichkeit

Bei eingeschränkter Zuverlässigkeit des Systems infolge mangelhafter Gebrauchstauglichkeit ergibt sich eine reduzierte oder fehlende Wirkung. Die Folge ist ein erhöhter Feststoffeintrag ins Gerinne. Das Ausmass hängt aber sehr stark von der jeweiligen Situation ab. Wichtig sind zum Beispiel der Grund und das Ausmass der Einschränkung, der Grad der Abhängigkeit der Hangstabilität vom Gerinneverbau oder ergänzende Hangsicherungsmassnahmen. Sehr ungünstig ist beispielsweise, wenn infolge von Geschiebeablagerungen der Stromstrich an den Hangfuss des instabilen Hanges gedrückt wird.

mangelhafte Anordnung führt zu mangelnder Gebrauchstauglichkeit

Als Spezialfall der Gebrauchstauglichkeit kann hier auch die mangelhafte Anordnung (z.B. Vollverbaukriterien nicht erfüllt) betrachtet werden. Vollverbau an sich ist ja keine Voraussetzung für Gebrauchstauglichkeit. Ist aber die Hangsicherung auf einen durchgehenden Verbau angewiesen, haben diesbezügliche Mängel des Gesamtsystems (Sperrentreppe) einen bedeutenden Einfluss auf die Hangstabilität und den Eintrag von Feststoffen ins Gerinne.

Resultiert die Einschränkung aus der Dauerhaftigkeit kann analog der Sohlensicherung (Kap. 3.3.2) vorgegangen werden.

### Wirkungsszenario mit geringer Zuverlässigkeit und negativer Wirkung

Nach Kollabierung Nachrutschungen möglich

Falls die Sperren kollabieren oder die Rutschung infolge mangelhafter Anordnung der Sperren eintritt, ist grundsätzlich mit einem Nachrutschen von Hangpartien zu rechnen. Die im Gerinne zu erwartende Kubatur hängt unter anderem von den geotechnischen Eigenschaften des Hanges ab; kritisch sind Hanginstabilitäten mit tief verlaufenden Gleitflächen.

Hänge mit oberflächennahen Gleitkreisen

Bei Hängen und Seitenrunsen mit oberflächennahen Gleitflächen ist abzuklären, ob ein Versagen der Hangfussicherung oder eine mangelhafte Anordnung derselben, während des massgebenden Ereignisses zu erhöhtem Feststoffeintrag ins Gerinne führt. Falls der Hang bzw. die Seitenrunse mit technisch-biologischen Massnahmen stabilisiert ist, und es sich bei den potenziellen Gleitflächen nicht um Böschungsfusskreise handelt, kann es unter Umständen mehrere Jahre dauern, bis die Prozesse für die Gefahrenkarten relevant werden.

### 3.3.4 Gesamtbetrachtung

Abschliessend distanzierte Betrachtung notwendig

Während die Massnahmenbeurteilung auf die Schutzbauten fokussiert und die Wirkungsbeurteilung auf die verbauten Abschnitte, gilt es zum Schluss nochmals eine distanziertere Perspektive wahrzunehmen. Zum einen spielt für die Wirkungsbeurteilung neben der Zuverlässigkeit der Massnahmen immer auch deren Anordnung entsprechend des Gesamtkonzeptes eine wesentliche Rolle. Zum anderen ist die Wirkungsbeurteilung hinsichtlich des Schwemmkegels als Wirkungsgebiet erst dann abgeschlossen, wenn auch die Prozesse im Gerinne zwischen verbautem Abschnitt und Kegelhals analysiert wurden. Durch Erosion oder Ablagerung kann das Resultat der Wirkungsbeurteilung nochmals modifiziert werden.

## 4. Geschiebesammler und Feststoffrückhalt allgemein

### 4.1 Grobbeurteilung

#### 4.1.1 Zielsetzung und Abgrenzung

Ziel der Grobbeurteilung ist zu entscheiden, ob der Geschiebesammler für die Gefahrenbeurteilung relevant ist. In vielen Fällen dürfte diese Frage zu bejahen sein. Ausnahmen betreffen deutlich unterbemessene sowie bereits aufgegebene Bauwerke. Abb. 4.1 zeigt gestützt auf das allgemeine Vorgehen (vgl. Teil A) die bei Wildbachsperrren massgebenden Arbeiten mit Bezug auf den folgenden Text.

Geschiebesammler  
i.d.R. relevant

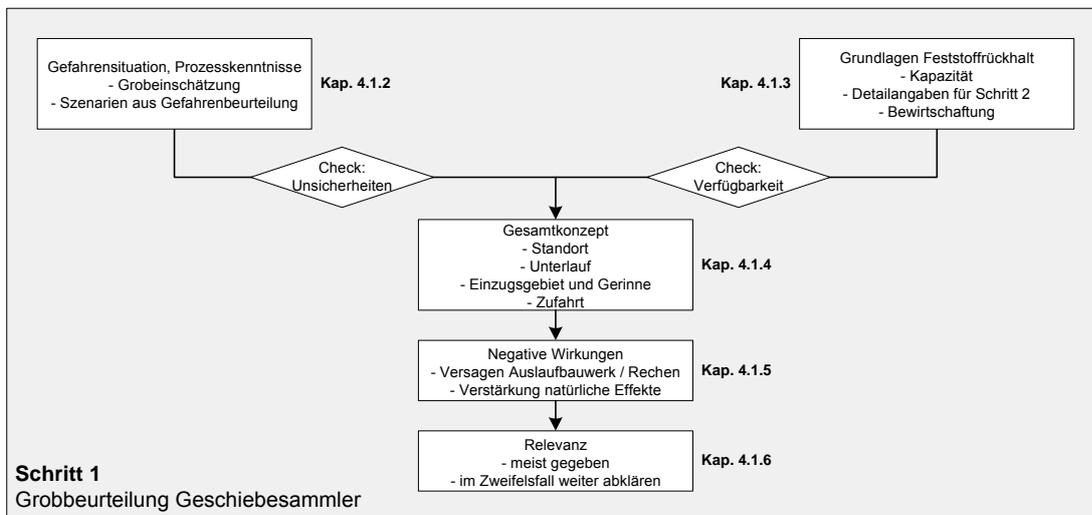


Abb. 4.1: Arbeitsschema zur Grobbeurteilung von Geschiebesammlern / Rückhaltebauwerken allgemein.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich in erster Linie auf Geschiebesammler im engeren Sinn als geschlossene Rückhaltebauwerke (Abb. 4.2). Für andere Typen des Feststoffrückhaltes wie Dosier- und Sortiersperren, Bremsverbau (Murbrecher) und Holzrückhalt gelten teilweise ähnliche Kriterien und Vorgehensweisen. Vereinzelt wird im folgenden Text speziell auf diese Werktypen eingegangen. Sie werden aber hier nicht in der gleichen Tiefe behandelt wie die Geschiebesammler.

Betrachtete Bauwerke

#### 4.1.2 Gefahrensituation und Prozesskenntnisse

Zur Abschätzung der Relevanz reichen auf dieser Stufe Richtwerte der zu erwartenden Feststofffrachten und deren Vergleich mit dem Rückhaltevolumen aus. Die Frachten können aufgrund von Ereigniskataster, Erfahrungswerten oder einer ersten Beurteilung des Gebietes auf Karten, Luftbildern oder vom Gegenhang aus angenähert werden. In vielen Fällen werden aber bereits für die Grobbeurteilung Angaben in einer Genauigkeit vorliegen, wie sie dann für die Massnahmenbeurteilung (Schritt 2) notwendig wird. Denn selbst wenn der Geschiebesammler nicht relevant sein sollte, ist doch eine Gefahrenbeurteilung zu machen. In aller Regel werden so die Abklärungen im Einzugsgebiet und Gerinne bereits gemacht sein und die Szenarien (z.B. zu erwartende Feststofffracht am Kegelhals) mehr oder weniger feststehen, bevor der Geschiebesammler überhaupt ein Thema wird.

Erwartete Feststofffrachten und Rückhaltevolumen bestimmen  
Relevanz

Unsicherheiten  
weniger von Bedeutung

Nötigenfalls können ergänzend die Unsicherheiten überprüft werden (vgl. Grundsatz 2, Teil A). Bei Geschiebesammlern dürften diese aber von geringerer Bedeutung sein als bei anderen Massnahmen, weil zumindest vom Bauwerk her relativ klare Rahmenbedingungen herrschen und die Wirkung auf den Prozess häufig erheblich sein dürfte.



Abb. 4.2: Geschiebesammler Tschägibach, Klosters, GR (Aufnahme E. Frick, tur gmbh).

#### 4.1.3 Grundlagen Schutzmassnahmen

Notwendige  
Informationen

Die wichtigste Information zum Geschiebesammler ist seine Kapazität. Für die weitere Beurteilung (Schritt 2) werden aber noch zusätzliche Informationen benötigt. Es bietet sich an, bereits im ersten Schritt alle notwendigen Angaben zu erheben um Doppelspurigkeiten zu vermeiden. Notwendige Angaben sind:

- Standort des Bauwerkes und generell seine Platzierung im Gelände sowie im Längenprofil
- Abmessungen
- Erschliessung für die Räumung
- Statik
- Geotechnik (Baugrund)
- Werkstoffe
- konstruktiven Details (z.B. Ein- und Auslaufbauwerk, Rechen)
- vorhandene oder zu erwartende Schäden
- Belastungsgeschichte

Bei projektierten Sammlern müssen die Projektunterlagen diese Informationen enthalten. Bei bestehenden Sammlern werden sie durch Feldaufnahmen ergänzt (Abb. 4.2).

Projektunterlagen,  
Feldbegehungen

Zudem sollte bereits im ersten Schritt abgeklärt werden, ob Erfahrungen mit Ereignissen bestehen und wie die Organisation der Bewirtschaftung (Leerung) gelöst ist. Wenn der Geschiebesammler beispielsweise bereits durch kleinere Ereignisse zur Hälfte hinterfüllt wird, ist seine Kapazität offensichtlich ungenügend. Wenn er nicht sofort nach Ereignissen geleert wird, etwa weil er als Kiesdepot dient, ist er nicht verlässlich. In beiden Fällen ist die Relevanz nicht gegeben.

Erfahrungen abklären

Die erwähnten Punkte gelten sinngemäss auch für andere Typen von Rückhaltebauwerken. Insbesondere den Erfahrungen kommt hier ein grosser Stellenwert zu, weil sie bei Werken wie Murbrechern oder Holzrechen allgemein noch spärlich vorhanden sind.

#### 4.1.4 Gesamtkonzept

Allgemeine Aspekte zum Gesamtkonzept wurden bereits bei den Sperren erläutert (Kap. 3.1.4) und haben auch hier ihre Gültigkeit. Wichtig bei einem Geschiebesammler und bei weiteren Rückhaltebauwerken sind dazu insbesondere folgende Punkte:

- Der Standort eines Geschiebesammlers ist mitentscheidend für seine Wirkung. Er trennt den Wildbach in einen oberen und einen unteren Teil. Steht der Sammler beispielsweise am Kegelhals, umfasst der obere Teil das Einzugsgebiet und das Gerinne, der untere Teil das Gerinne bis in den Vorfluter.
- Der Teil oberhalb eines Geschiebesammlers liefert die Feststoffmengen, die zurückgehalten werden sollen. Ein Sammler kann ohne weitere Massnahmen oben wirksam sein. Je nach Aktivität des Baches ist es aber sinnvoll, ergänzende Massnahmen, wie z.B. forstliche Massnahmen, vorzusehen, um die Häufigkeit von Geschiebeeinstössen in den Sammler zu verringern und so a) seine Funktionstüchtigkeit zu erhalten und b) Räumungskosten zu sparen.
- Der Abfluss unterhalb eines Geschiebesammlers ist wegen des Rückhaltes im Hochwasserfall geschiebearm und neigt zu starker Erosion. Deshalb gehört eine Stabilisierung des Unterlaufs in der Regel zu einem Gesamtkonzept Geschiebesammler dazu.
- Zu einem Geschiebesammler gehört immer ein Zugang für die Räumung. Je schwieriger dieser ist, desto grösser ist die Gefahr, dass die Räumung etwa bei kleinen Ereignissen unterlassen wird.

Standort für Wirkung  
wichtig

Evtl. weitere Mass-  
nahmen oberhalb des  
Sammlers sinnvoll

Stabilisierung des  
Unterlaufs

Möglichkeit der  
Räumung

#### 4.1.5 Negative Wirkungen

Versagt eine Geschiebestausperre, kann sich das zurückgehaltene Material schwallartig entleeren. Da die Sammler in der Regel nahe an den Siedlungen stehen, könnten die Auswirkungen dramatisch sein. Besonders kritisch kann diesbezüglich der Rechen im Auslaufbauwerk sein. So können die dort häufig verwendeten Hölzer brechen (was auch bei Betonelementen passieren kann) oder eine temporäre Verklauung kann sich speziell bei relativ weiten Abständen (auch offene Sperren und Ähnliches) schlagartig wieder lösen.

Bei Versagen schwall-  
artige Entleerung  
möglich

Abgesehen von sehr sorgfältiger Planung und Projektierung sind systematische Überwachung, konsequenter Unterhalt und rechtzeitige Erneuerung besonders wichtig. Falls Zweifel bezüglich dem Tragverhalten bestehen, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Überwachung,  
Unterhalt, Erneuerung  
besonders wichtig

Sohlenerosion möglich

Negative Wirkungen können sich weiter aus starker Sohlenerosion und damit verbundener Geschiebeumlagerung unterhalb von Geschieberückhalte-Massnahmen ergeben. Allerdings können diese Prozesse auch ohne Sammler auftreten, wengleich unter Umständen weniger intensiv.

Durch überströmte  
Dämme hohe  
Intensitäten möglich

Schliesslich ist der Fall zu nennen, wo ein Geschiebesammler nicht vom gewachsenen Terrain sondern von Dämmen umschlossen ist (Abb. 4.3). Werden diese überströmt, kommt es punktuell möglicherweise zu grossen Intensitäten. Zwar wären die betroffenen Gebiete wohl auch ohne Sammler gefährdet (Schwemmkegel). Weil aber die Gefährdung nun von einem Bauwerk ausgeht, das genau die Einwirkungen verhindern soll, werden sie hier unter den negativen Wirkungen aufgelistet.



Abb. 4.3: Dieser Geschiebesammler wurde rechtsseitig überflossen. Auch beim Einlaufbauwerk trat bereits Material aus. Schliesslich versagen auch ein Teil des Auslaufrechens (Aufnahme C. Wilhelm, Amt für Wald GR).

#### 4.1.6 Relevanz

Die Relevanz dürfte bei Geschiebesammlern in aller Regel gegeben sein. Mögliche negative Wirkungen oder zumindest Zweifel an der Wirkung begründen ebenfalls die weitere Abklärung, da ein allfälliges Versagen oder Nicht-Funktionieren erhebliche Auswirkungen haben kann.

Aus diesem Grund wird meist auch bei den übrigen Typen von Rückhaltmassnahmen eine nähere Prüfung notwendig sein. Davon können Bauwerke von beschränktem Ausmass ausgenommen sein, die sich bereits als nicht wirksam aber auch nicht als schadenverstärkend erwiesen haben (z.B. kleine Murgangbremsen).

## 4.2 Massnahmenbeurteilung

### 4.2.1 Übersicht

Abb. 4.1 zeigt gestützt auf das allgemeine Vorgehen (vgl. Teil A) die bei Geschiebesammler massgebenden Arbeiten mit Bezug auf den folgenden Text.

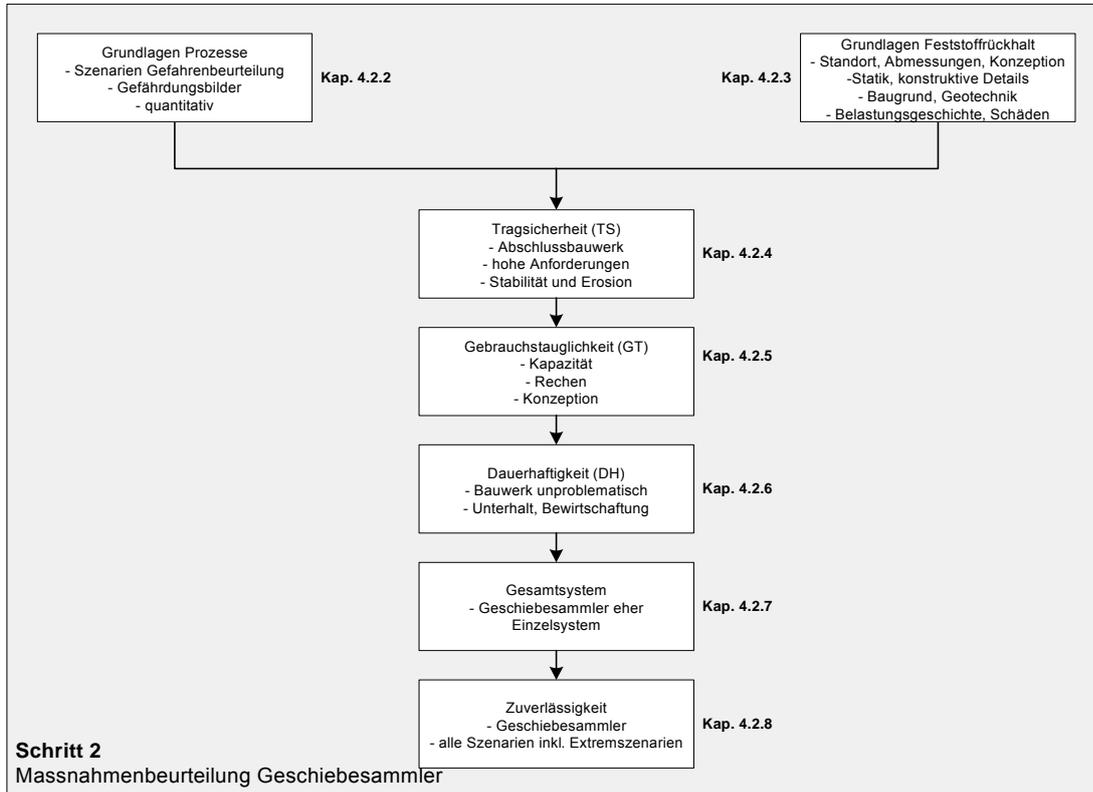


Abb. 4.4: Arbeitsschema zur Massnahmenbeurteilung von Geschiebesammlern.

Tab. 4.1: Übersicht über die Beurteilung von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Geschiebesammlern.

Grundlagen	Zu beurteilen	Bedeutung
Tragsicherheit	- Tragwiderstand der Sperrquerschnitte - Gesamtstabilität der Bauwerke	Bauwerksspezifische Eigenschaften für den Vergleich mit den prozessgesteuerten Einwirkungen
Gebrauchstauglichkeit	- Rückhaltekapazität - Dosierte Abgabe von Geschiebe - Verhalten in Bezug auf Schwemmholz - Sohlenlage unterhalb der Massnahme	Funktionalität der Massnahme in Bezug auf die sich im Einzugsgebiet, im Kegelbereich und bei der Einmündung in den Vorfluter abspielenden Prozesse. Funktionalität im Vergleich mit den Anforderungen gemäss Schutzkonzept
Dauerhaftigkeit	- Langfristige Gewährleistung der Tragsicherheit unter Berücksichtigung der Interaktionen mit der Gebrauchstauglichkeit - Lebensdauer	Eignung bezüglich der zeitlichen Kriterien und Vorgaben

#### 4.2.2 Grundlagen Prozesse

Szenarien bilden

Für die Beurteilung des Geschiebesammlers sind die Szenarien analog der Gefahrenbeurteilung nötig (verschiedene Jährlichkeiten inkl. Extremszenario). Wichtige Angaben sind speziell

- die verlagerte Feststoffkubatur,
- der Verlagerungsprozess (können Murgänge den Sammler erreichen?),
- Korngrößen (z.B.  $d_{90}$  für die Beurteilung der Öffnungen),
- Art und Menge von Schwemmholz sowie
- die Ganglinie (wie und wie rasch wird der Sammler gefüllt).

Gefährdungsbilder  
bearbeiten

Ergänzende Gefährdungsbilder sind notwendig (Tab. 4.2). Gute Hinweise dazu können auch dem Teil F „Flüsse“ im Zusammenhang mit Hochwasserdämmen entnommen werden. Für andere Rückhaltebauwerke als Geschiebesammler stelle die Liste eine gute Grundlage dar, die ergänzt werden muss.

Tab. 4.2: Prozesse und Gefährdungsbilder bzw. Einwirkungen.

Prozess	Gefährdungsbilder / Einwirkungen
Hochwasser $HQ_x$ der Jährlichkeit x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unterspülen des Ein- oder Auslaufbauwerkes, Kolk</li> <li>- Überströmen des Abschlussdammes und luftseitige Erosion</li> <li>- Wasserseitige Instabilität durch Erosion / Unterkolkung</li> <li>- Luftseitige Böschungsinstabilität</li> <li>- Bruch durch innere Erosion</li> <li>- Hydraulischer Grundbruch</li> </ul>
Geschiebe- und Schwemmholztransport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eintrag total und pro Zeit (Fracht)</li> <li>- Stoss auf Abschlussbauwerk / Rechen</li> <li>- Sohlenlagenveränderungen (Erosion, Ablagerungen), z.B. Erosion Unterlauf direkt nach Abschlussbauwerk</li> <li>- Einseitige Ablagerungen und starke Umlenkung Wasserfluss mit der Folge von starker Erosion z.B. des Abschlussdammes</li> <li>- Erd- und Wasserdruck auf das Abschlussbauwerk bei Volleinstau</li> <li>- Überströmen nach Volleinstau infolge zu tiefer Dämme</li> <li>- Überströmen nach Volleinstau infolge Verklausung Überlauf Abschlussbauwerk</li> <li>- Durchströmen des Rechens im Abschlussbauwerk ohne Rückhalt</li> </ul>
Murgänge	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stoss auf Abschlussbauwerk / Rechen</li> <li>- Übrige s. oben</li> </ul>
Rutschungen in den Seitenhängen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- (Einseitiges) Auffüllen des Rückhaltebeckens (vgl. Abb. 4.3)</li> <li>- seitliche Beanspruchung des Abschlussbauwerkes</li> </ul>
Baugrund	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instabilität, Setzung</li> <li>- Statischer Grundbruch</li> </ul>
Alterung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verlust der Materialfestigkeit</li> </ul>

Die hauptsächlichen Einwirkungen wie die Feststoffkubaturen liegen für die verschiedenen Szenarien inklusive Extremszenario quantitativ vor. Andere Gefährdungsbilder werden qualitativ oder semi-quantitativ behandelt. Auch bei ihnen sollen aber analog den Szenarien unterschiedlich starker Ausprägungen betrachtet werden.

Bei bestehenden Verbauungen sind zur Bestimmung der Gefährdungsbilder und der Einwirkungen Detailuntersuchungen im Gelände erforderlich. Bei geplanten Verbauungen sind die Annahmen, welche bei der Projektierung gemacht wurden, zu überprüfen bzw. zu verifizieren.

Detailuntersuchungen  
im Gelände

### 4.2.3 Grundlagen Massnahmen

Bei Geschieberückhaltesystemen (insbesondere bei grösseren Geschiebestausperren) kann angenommen werden, dass Projektunterlagen vorhanden sind. Andernfalls müssen die notwendigen Informationen erhoben werden (vgl. Kap. 4.1.3). Bei Verdacht auf Versagen sind umfassendere Angaben erforderlich (z.B. Statik, Geotechnik).

### 4.2.4 Überprüfung der Tragsicherheit

Die Tragsicherheit ist die Fähigkeit eines Tragwerks und seiner Bauteile, die Gesamtstabilität für die anzunehmenden Einwirkungen sowie ausreichende Tragwiderstände zu gewährleisten. Die qualitative Abschätzung der Tragsicherheit erfolgt für Geschiebesammler differenziert für verschiedene Szenarien. Genau betrachtet wird der Nachweis der Tragsicherheit nur für die tragenden Elemente eines Geschiebesammlers erbracht, nämlich Abschlussbauwerk und sofern vorhanden Einlaufbauwerk.

Gesamtstabilität bei  
Einwirkungen gewähr-  
leisten

Bei Geschiebesammler können die Folgen eines schlagartigen Versagens wie erwähnt dramatisch sein. Deshalb ist besondere Vorsicht bei der Tragsicherheitsbeurteilung angebracht. Die Gefährdungsbilder und Einwirkungen sollen durchaus bis in den extremen Bereich hinein variiert werden. Ein plötzliches und totales Versagen sollte auch bei Überlastung unwahrscheinlich sein. Entsteht ein entsprechender Verdacht, ist dieser weiter abzuklären. Anders gesagt: Wird Tragsicherheit postuliert, soll sie mit relativ hoher Sicherheit auch gewährleistet sein.

Gefährdungsbilder und  
Einwirkungen bis zum  
extremen Bereich

Neue und projektierte Verbauungen können durch einen Vergleich der angenommenen Einwirkungen mit den zu erwartenden Gefährdungsbildern beurteilt werden. Zu untersuchen ist auch, ob weitere, nicht berücksichtigte Gefährdungsbilder relevant sind.

Für die Beschreibung des Vorgehens bei bestehenden Werken wird hier von Typ „Damm mit integriertem Auslaufbauwerk (Rechen)“ ausgegangen (vgl. Abb. 4.2). Dämme sind hinsichtlich der Tragsicherheit in der Regel gutmütige Werke. Kritisch können a) Stabilitätsprobleme etwa infolge von Einwirkungen aus dem Baugrund und b) Erosionsprobleme beispielsweise beim Überströmen werden. Sind solche Gefährdungsbilder nicht relevant und ist der Zustand des Dammes gut, kann meist von einer erfüllten Tragsicherheit ausgegangen werden.

Dämme häufig gutmütig

Etwas vorsichtiger ist der Auslauf des Sammlers (Rechen) zu betrachten. Verschiedene Einwirkungen treten hier konzentriert und maximiert auf (z.B. Stauhöhe, Fliessgeschwindigkeit). Zudem ist sein Tragwiderstand aufgrund der schlankeren Bauweise meist geringer als jener des Abschlussdammes. Deshalb sind hier, wenn überhaupt, eher Tragsicherheitsprobleme zu erwarten. Massgebend für die Einschätzung sind auch hier in erster Linie der aktuelle Zustand, die relevanten Gefährdungsbilder und die Belastungsgeschichte.

Einwirkungen bei  
Auslauf konzentriert

Ergänzend wird das Einlaufbauwerk überprüft. Hier sind die Grundlagen für die Sperrenbeurteilung massgebend (Kap. 3.2.4). Ein Versagen des Einlaufbauwerks hat in der Regel weniger weit reichende Folgen als ein solches des Auslauf-

Weniger Probleme,  
wenn Einlaufbauwerk  
versagt

bauwerkes. Es kann analog den Sperren zu einem erhöhten Feststoffeintrag in den Sammler und so seine Kapazität (Gebrauchstauglichkeit) vermindern.

Abschlussbauwerk wie Sperre behandeln

Abschlussbauwerke, welche durchgehend bzw. mehrheitlich als Sperre ausgebildet sind, können in Anlehnung an Kapitel 3.2.4 wie übrige Sperren behandelt werden. Idealerweise wurde der Nachweis der Tragsicherheit schon im Projekt oder durch Ereignisse (Volllast) erbracht.

Regeln für Tragsicherheit

Generell gilt für Abschlussbauwerke von Geschiebesammlern analog zu den Sperren (Kap. 3.2.4): Die Tragsicherheit von Geschiebesammlern bzw. ihres Abschlussbauwerkes kann im Allgemeinen als erfüllt angenommen werden,

- wenn der Zustand inklusive der Baugrundbedingungen gut ist,
- sich aus der Gebrauchstauglichkeit keine tragsicherheitsrelevanten Einwirkungen ergeben
- und der vermutete Tragwiderstand unter Berücksichtigung aller zu erwartenden Einwirkungen gewachsen ist.

Die Beurteilung muss grundsätzlich sehr vorsichtig vorgenommen werden, wenn nur wenige Angaben zum Bauwerk oder dessen Belastungsgeschichte vorliegen.

Wenn Versagen möglich, detaillierte Abklärung nötig

Aufgrund der möglichen Tragweite eines Versagens sind bei entsprechendem Verdacht gründliche Abklärungen nötig. Beispielsweise ist bei Sickerwasser- austritten, Ausschwemmungen von Feinmaterial und Setzungen eine Expertise mit Bodenuntersuchungen, Verschiebungsmessungen, etc. anzuordnen. Die weiteren Abklärungen und ihre Detaillierung sind fallweise festzulegen.

Bei alternativen Rückhaltebauwerken gelten für den offenen Geschiebesammler (Dosier- und Sortiersperren) die oben formulierten Gedanken. Für andere Werke wie Murbrecher und Holzurückhalt ist die Bearbeitungstiefe (z.B. qualitativ, quantitativ) dem Einzelfall anzupassen. Weil es sich häufig um neuere Bauwerke handelt, liegen in der Regel Projektunterlagen vor, die die Abschätzung der Tragsicherheit erlauben. Fehlen diese, ist aufgrund des kleinen Erfahrungsschatzes die Tragsicherheit generell kritischer einzuschätzen.

#### 4.2.5 Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit

Die Gebrauchstauglichkeit ist die Fähigkeit eines Tragwerks und seiner Bauteile, die Funktionstüchtigkeit in Bezug auf die Naturgefahrenprozesse zu gewährleisten. Die Überprüfung erfolgt im Allgemeinen qualitativ aufgrund der Zustandsaufnahme vor Ort und der vermuteten Zustandsentwicklung über die nächsten rund 20 Jahre.

Die Gebrauchstauglichkeit bei Geschieberückhalte-Massnahmen bezieht sich in erster Linie auf

- ihre Rückhaltekapazität bzw. bei entsprechender Konzeption auf die Tauglichkeit zur dosierten Abgabe von Geschiebe,
- das Verhalten in Bezug auf Schwemmholz,
- die Eignung als Murgangbremse,
- die Sohlenlage unterhalb der Massnahme und
- die Konzeption allgemein.

Gebrauchstauglichkeit aus aktuellem Zustand ersichtlich

Wie diese Auflistung zeigt, bezieht sich die Gebrauchstauglichkeit in erster Linie auf die funktionalen Aspekte. Verhält sich bei den möglichen Einwirkungen das Bauwerk so, wie es erwartet wird? Grundsätzlich gilt, dass die Gebrauchstauglichkeit bei unveränderten Anforderungen aus dem aktuellen Zustand ersichtlich ist. Immer zu prüfen ist die Kapazität (mit welcher Rückhaltekapazität darf gerechnet werden,

bestehen Vorverfüllungen) und das Verhalten des Rechens in Abhängigkeit des Zwecks der Sperre als geschlossenes oder offenes System. Ein deutlich zu gering bemessener oder bereits vorverfüllter Sammler ist nur eingeschränkt als gebrauchstauglich zu bezeichnen. Ein Rechen darf bei einer geschlossenen Sperre nicht zu viel Material durchlassen (muss trotzdem aber eine gewisse Durchgängigkeit gewährleisten), während er bei einer offenen Sperre einen dosierten Durchfluss ermöglichen soll. Dabei spielen die Korngrösse, der Ereignisverlauf und der Anfall von Schwemmholz eine wichtige Rolle.

Weiter ist die Konzeption des Sammlers als Ganzes für die Gebrauchstauglichkeit bedeutend. Damit ist beispielsweise die Höhe und Neigung der Abschluss- / Umfassungsdämme im Vergleich zur Überlaufhöhe des Rechens angesprochen, die Lage und Form des Sammlers (Zollinger, 1983) oder die Wahl des Abschlussrechens (Neigung, Balkenabstände, etc). Bei der Beurteilung helfen insbesondere ein kritisches Durchdenken der Gefährdungsbilder und Erfahrungen weiter.

Ist die Gebrauchstauglichkeit nicht erfüllt, ist die Wirkung auf die Prozesse eingeschränkt. Typisches Beispiel dafür ist eine reduzierte Kapazität infolge nicht erfolgter Räumung. Dies kann bis zum so genannt funktionellen Versagen führen (z.B. Restrückhaltevolumen unbedeutend klein). Zu prüfen ist bei nicht erfüllter Gebrauchstauglichkeit aber auch ein allfälliger Einfluss auf die Tragsicherheit (z.B. Überströmen der Abschlussdämme, Sohlenabsenkungen)

Bei eingeschränkter Gebrauchstauglichkeit eingeschränkte Wirkung auf Prozess

#### 4.2.6 Überprüfung der Dauerhaftigkeit

Die Anforderungen an die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit der Massnahmen sollen während der nächsten rund 50 Jahren ohne unvorhergesehenen Aufwand für die Instandhaltung erfüllt bleiben.

ca. 50 Jahre tragsicher, gebrauchstauglich

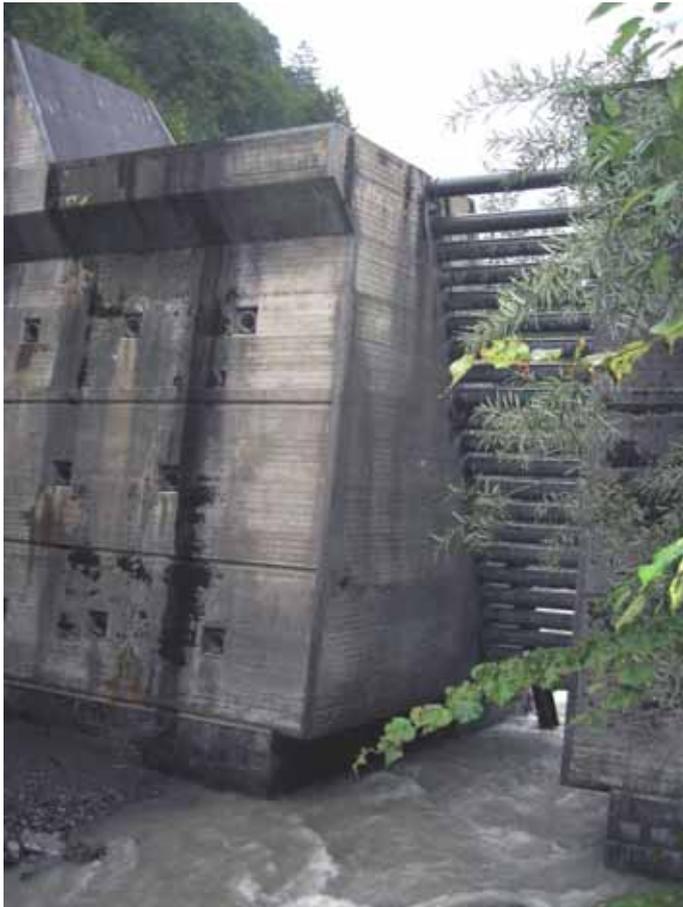


Abb. 4.5: Geschiebestausperre Stigglissammler im Schächen oberhalb von Bürglen UR. Geschieberückhaltevolumen ca. 100'000 m<sup>3</sup> (Aufnahme H. Duss, 2005).

Ca. 100 Jahre  
Lebensdauer

Geschieberückhaltesperren bestehen in der Regel aus (Stahl-) Beton, eventuell in Kombination mit Erddämmen und Stahlrechen-Konstruktionen (Abb. 4.5). Grundsätzlich kann so von einer Lebensdauer von etwa 100 Jahren ausgegangen werden. Bei Kombinationen mit Erddämmen ergeben sich allenfalls Probleme mit dem Dichthalten bzw. mit Ausschwemmungen von Feinmaterial im Übergangsbereich; diese zeichnen sich jedoch meistens bereits nach kurzer Zeit ab.

Unterhalt notwendig

Da Geschiebesammler ihre Aufgabe nur erfüllen können, wenn die erforderliche Rückhaltekapazität ständig gegeben ist, hängt ihre Funktionsfähigkeit und damit ihre Dauerhaftigkeit stark von menschlichen Eingriffen ab. Eine wichtige Voraussetzung ist neben geordneten Unterhaltspflichten die Erschliessung zur Räumung des Rückhaltereaumes, so dass das erforderliche Rückhaltevolumen auch bei kurz aufeinander folgenden Ereignissen gewährleistet ist. Geschiebedurchlässige Sperren (Dosiersperren) können das Problem etwas entschärfen aber nicht verhindern. Die Erfahrung zeigt, dass auch solche Konstruktionen unter extremen Bedingungen (Schwemmholz, grobes Geschiebe) nicht oder nur schlecht funktionieren.

#### 4.2.7 Gesamtsystem

Betrachtung hauptsächlich als Einzelbauwerk

Anders als Wildbachsperren / Sperrentreppen können Geschiebesammler weitgehend als einzelne Werke beurteilt werden. Relevante Interaktionen bestehen nur mit dem unmittelbar angrenzenden Unterlauf. Sohlenabsenkungen dort werden aber

bereits im Rahmen der Gefährdungsbilder aufgegriffen. Deshalb ist meist keine iterative Prüfung von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit zusammen mit weiteren Schutzbauten notwendig.

Im Rahmen der Gesamtbetrachtung ist aber nochmals zu prüfen, ob sich etwa anhand der Massnahmenwirkung im Oberlauf (z.B. Sperren) neue, bzw. bislang nicht berücksichtigte Einwirkungen ergeben (z.B. Mehranfall von Geschiebe infolge Verbauungsversagen). Allenfalls wäre die Beurteilung des Sammlers anzupassen.

Neue Einwirkungen  
berücksichtigen

#### 4.2.8 Bestimmung der Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit der Massnahmen ergibt sich aufgrund der Beurteilung von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit für die verschiedenen Gefährdungsbilder, Einwirkungen oder Szenarien. Es wird zwischen hoher, eingeschränkter und geringer Zuverlässigkeit unterschieden (vgl. Teil A). Sie ist bei Geschiebesammlern aus den bis hier erarbeiteten Grundlagen abzuleiten.

Zuverlässigkeit für  
verschiedene Szenarien

### 4.3 Wirkungsbeurteilung

Ein geschlossenes Rückhaltebauwerk (ein Geschiebesammler) weist im Vergleich zu anderen Massnahmen weniger Unsicherheiten auf und eignet sich für die quantitative Beurteilung. Zudem wurden in vielen Wildbächen Sammler gebaut und der Erfahrungsschatz ist recht gross. Die primäre Funktion von Sammlern ist der Rückhalt von Feststoffen. Auf diese Funktion hin wird im Folgenden die Wirkung geprüft.

Quantitative  
Beurteilung bei  
geschlossener Sperre

Offene Sperren werden dabei nicht näher behandelt. „Bei echten offenen Sperren handelt es sich meist um individuelle Bauwerke mit spezifischen Eigenschaften. Allgemein gültige Regeln können hier weniger aufgestellt werden. Es wird auf die wachsende Fachliteratur verwiesen. Besonders in ausländischen Publikationen werden offene Sperrenbauweisen basierend auf Modellversuchen, Erfahrungswerten oder Berechnungen intensiv diskutiert. [Dazu gehören u.a die Holzrückhaltebauwerke (Bezzola, 2001) und Murbrecher (Speerli et al., 2008)]. Der Gedanke der offenen Sperre führt schliesslich zum vollständigen Verzicht von Einbauten im Sinne von Hindernissen, was von Jäggi (2001) am Beispiel von Geschiebedosierstrecken und von Jenni und Reiterer (2002) am Beispiel von Absturzbauwerken geschildert wird.“ (Romang, 2004: 98).

Individuelle Abklärung  
bei offener Sperre

Abb. 4.6 zeigt gestützt auf das allgemeine Vorgehen (vgl. Teil A) die bei Geschiebesammlern massgebenden Arbeiten mit Bezug auf den folgenden Text. Auf den letzten Schritt, die Erstellung von Intensitätskarten wird nicht näher eingegangen. Hier unterscheidet sich das Vorgehen nicht von unverbauten Wildbächen.

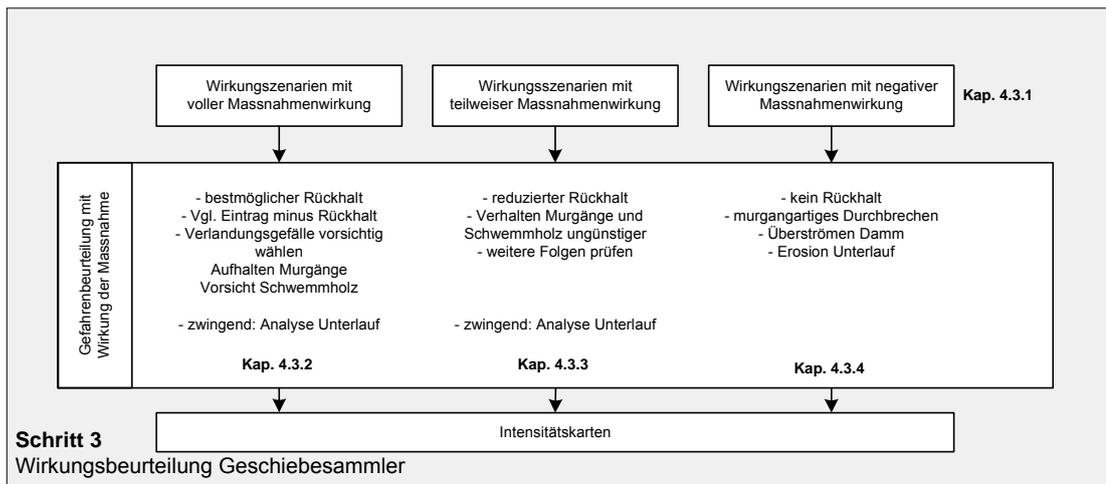


Abb. 4.6: Arbeitsschema zur Wirkungsbeurteilung von Wildbachsperren.

### 4.3.1 Massnahmenbeeinflusste Szenarien

In der Wirkungsbeurteilung werden die Wirkungsszenarien unter Berücksichtigung der Schutzmassnahmen und ihrer Zuverlässigkeit bestimmt. Dabei gelten folgende Regeln:

- Hohe Zuverlässigkeit: Der Geschiebesammler ist voll wirksam (maximaler Rückhalt).
- Eingeschränkte Zuverlässigkeit: Der Sammler hat eine reduzierte Wirkung.
  - Eine eingeschränkte Zuverlässigkeit infolge nicht erfüllter Gebrauchstauglichkeit hat einen Einfluss auf die Rückhaltekapazität und damit auf die Prozessintensität im Unterlauf / auf dem Kegel.
  - Eine eingeschränkte Zuverlässigkeit infolge nicht erfüllter Dauerhaftigkeit hat einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit.
- Geringe Zuverlässigkeit: Der Geschiebesammler hat keine Wirkung. Dieses Szenario wird kombiniert mit dem nachfolgenden thematisiert.
- Geringe Zuverlässigkeit und negative Wirkung: Ein Versagen des Sammlers, insbesondere des Auslaufbauwerkes führt zu einer erhöhten Gefährdung.

Unsicherheiten im gesamten Beurteilungsverlauf beispielsweise bei den Prozess-eingangsgrossen oder bei der Zuverlässigkeit und Wirkung der Massnahmen können bei der Szenarienbildung berücksichtigt werden.

### 4.3.2 Wirkungsszenario mit hoher Zuverlässigkeit

Das Rückhaltevolumen wird verglichen mit dem Geschiebe- und Schwemmholumen, welches bei Ereignissen unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeit anfällt. Es wird die Differenz bestimmt, welche in den Unterlauf weitertransportiert wird und dort gefahrenrelevant ist.

mobilisierbares und rückhaltbares Volumen bestimmen Wirkung

Die Bestimmung der Rückhaltekapazität ist somit die Schlüsselgrösse. Das Sammlervolumen hängt ab von der Geometrie (z.B. Fläche, Böschungsneigungen), von der Höhe des Auslaufbauwerkes und vom Verlandungsgefälle. Die erstgenannten Grössen sind bei einem bestehenden Bauwerk gegeben, bei der Planung eines neuen häufig durch Rahmenbedingungen (z.B. Topographie) nur eingeschränkt variabel. Die kritische Grösse ist meist das Verlandungsgefälle. Dessen Bestimmung kann vor allem auf Erfahrungswerte abstützen. Gemäss japanischen Untersuchungen ist ein Wert von  $\frac{1}{2}$  des ursprünglichen Sohlengefälles vor Ort anzunehmen (Van Dine, 1996). Aus Expertengesprächen ergeben sich einige Hinweise wie „beobachtet 0-15 %, Berechnungsannahmen 4-10 %“ oder „Verlandungsgefälle ca. gleich Bachgefälle“. Generell wird eine zurückhaltende Einschätzung der Rückhaltekapazität gemessen an der realen Ausnützung als richtig empfunden (Romang, 2004). Die Ereignisse in Sachseln 1997 haben gezeigt, dass das Verlandungsgefälle höher sein kann – aber nicht muss – als projiziert (Eicher 2001). Andere Erfahrungen zeigen, dass bei Extrembedingungen das Grenzgefälle, unter dem sich das Geschiebe in Sammlern ablagert, selten grösser als etwa 4 % ist.

Rückhaltekapazität von Geometrie abhängig

Für die Wirkungsbeurteilung wird empfohlen, das Verlandungsgefälle vorsichtig anzusetzen und im Sinne einer Sensitivitätsanalyse auch zu variieren. Neben den Erfahrungswerten kann es auch rechnerisch mit Geschiebetransportrechnungen (Gleichgewichtsgefälle) bestimmt werden. Dazu ist eine Kornverteilungskurve mit viel feinem Material anzunehmen.

Sensitivitätsanalyse für Verlandungsgefälle

Ein wichtiger Nebeneffekt ist in murfähigen Gerinnen das Abbremsen und Aufhalten von Murgängen. In der Regel darf er dieser bei hoch zuverlässigen und damit voll wirksamen Sammlern in Rechnung gestellt werden, sofern die Rückhaltekapazität genügend gross ist.

Murgänge einbeziehen

Vorsichtiger ist der Holzurückhalt zu bewerten. Wenn ein erheblicher Holzanfall aus dem Gebiet zu erwarten ist und der Sammler konzeptionell nicht auf Holzurückhalt ausgelegt ist bzw. konstruktiv (etwa mit einem schrägen Rechen, vgl. Abb. 4.7) vorgesorgt wird, dass das Holz aufschwimmt und den Rechen nicht verkleut, ist mit einem erheblichen Holzeintrag in den Unterlauf zu rechnen. Dieser kann durchaus auch schwallartig auftreten, da sich das Holz beim Aufschwimmen verkeilt und dann paketweise über den Überfall ausgeschwemmt wird.

Holzanfall kritisch betrachten

Auch wenn davon nicht direkt die Wirkung des Geschiebesammlers betroffen ist, soll hier auch die notwendige Beurteilung des Unterlaufs betont werden. In Situationen, wo dieser nicht erosionsresistent ausgebildet ist, oder Brücken und andere Hindernisse das allenfalls abgeführte Holz aufhalten, können sich erneute Gefährdungen ergeben, die die Wirksamkeit des Sammlers in der Gesamtbetrachtung wieder stark relativieren. Anders gesagt: Im ungünstigsten Fall entsteht durch die Prozesse im Unterlauf ein ähnlicher Schaden wie er durch den Geschiebesammler verhindert wurde (vgl. Bsp. Sachseln in Petrascheck et al., 1998).

Unterlauf ebenfalls beurteilen



Abb. 4.7: Rechensperre (Schlitzsperre mit vertikalem schrägem Rechen) in der Guppenruns, Schwanden, GL.

#### 4.3.3 Wirkungsszenario mit eingeschränkter Zuverlässigkeit

mangelnde Gebaruchstauglichkeit

Resultiert die Einschränkung aus mangelhafter Gebrauchstauglichkeit, ist in der Regel die Rückhaltekapazität reduziert. Die Restwirkung wird analog Kapitel 4.3.2 beurteilt. Ein nennenswerter Bremseffekt auf Murgänge kann unter Umständen nicht mehr berücksichtigt werden und der Einfluss auf den Holzanfall ist generell ungünstiger. Mit Bezug zu der konkreten Ursache der mangelhaften Gebrauchstauglichkeit (bspw. aus konzeptionellen Gründen) ist zu prüfen, ob weitere unerwartete Konsequenzen wie ein Überströmen des Dammes auftreten können.

mangelnde Dauerhaftigkeit

Resultiert die Einschränkung aus der mangelhaften Dauerhaftigkeit ist ernsthaft zu prüfen, ob der Sammler überhaupt noch zu berücksichtigen ist.

#### 4.3.4 Wirkungsszenario mit geringer Zuverlässigkeit und negativer Wirkung

Kollaps des Auslaufbauwerks

Bei einem schlagartigen Kollaps des Auslaufbauwerkes ist für die Gefahrenbeurteilung auf dem Schwemmkegel die zurückgehaltene Kubatur plus ein allfälliger Zuschlag für den Einstoss aus dem Gebiet zum Zeitpunkt des Versagens einzurechnen. Der Verlagerungsprozesse wäre als murgangartig anzunehmen.

Massives Überströmen

Bei einem massiven Überströmen des Dammes an nicht vorgesehener Stelle sind die Mengen abzuschätzen und in der Intensitätskarte abzubilden.

Folgeschäden im Unterlauf

Ebenso sind massive Folgeschäden im Unterlauf mit den Methoden der Gefahrenbeurteilung abzuschätzen.

## 5. Fallbeispiel Wildbachverbauung Wilerlibach Kt. Uri

Das Beispiel Wilerlibach wurde gewählt, weil detaillierte Projektunterlagen (Ingenieurbüro DUWAPLAN, Altdorf – Amt für Forst und Jagd Kt. Uri; 2004/2005) zur Verfügung stehen und die Verbauung im Rahmen der Ereignisanalyse nach dem Unwetter vom August 2005 durch die WSL beurteilt wurde. Die Ergebnisse der Ereignisanalyse dienen in erster Linie der Validierung von Aussagen, welche aufgrund der Projektunterlagen (Gefahrenbeurteilung und Schutzmassnahmen), der lokalen Gegebenheiten und der ausgeführten Massnahmen gemacht werden.

Der Wilerlibach mündet bei Kote 750 m linksufrig in den Schächen. Das Einzugsgebiet beträgt 0,60 km<sup>2</sup>. Der Wilerlibach verläuft auf einer Länge von rund 350 m von Kote 895 m bis 1035 m in erosionsempfindlichem Lockermaterial. Dieser Bachabschnitt weist ein hohes Gefälle von durchschnittlich 40% auf und war ursprünglich unverbaut. Durch Erosionsprozesse hatte sich der Wilerlibach im Bereich des Lockermaterials im Laufe der Zeit stark eingetieft, was zu steilen, labilen Einhängen führte.

Topographie

Zur Stabilisierung der Gerinnesohle und der seitlichen Rutschhänge wurden im Sommer 2005 ab Kote 900 m auf einer Strecke von 100 m 16 doppelwandige Holzkastensperren erstellt (Abb. 5.1). Die Sperrenflügel sind mit Leitwerken aus Rundholz versehen, welche ein Funktionieren bei Murgang sicherstellen (Abb. 5.2).

Verbauung mittels doppelwandiger Holzkastensperre

### 5.1 Grobbeurteilung

#### Gefahrensituation und Prozesskenntnisse

Die Hochwasserabflüsse der Unwetter im Jahre 2002 beschleunigten die Prozesse der Sohleneintiefung. In der Folge rutschten die bestockten Uferpartien ab und die labilen Einhänge gerieten in Bewegung. Die rechts- und linksseitige potentielle Rutschkubatur beträgt ca. 30'000 m<sup>3</sup>.

Bei Unwetter 2005 Sohleneintiefung und Uferrutschung

Aufgrund der damals herrschenden Situation bestand die Gefahr, dass infolge lang anhaltender Niederschläge oder Starkregen rund 10'000 m<sup>3</sup> der Rutschmasse während eines Ereignisses in den Mündungsbereich des Schächens verfrachtet werden konnten. Infolge des murgangartigen Abflusses würde ein solches Ereignis zu einem vorübergehenden Aufstau des Schächens führen. Aufgrund der allgemeinen Gefahrensituation des Schächens war bzw. ist der Geschiebeeintrag aus den Seitenbächen zu minimieren. Die Stabilisierungsmassnahmen im Wilerlibach sind vor allem aufgrund dieses Aspektes zu sehen. Eine Reduktion der Geschiebefracht von ein paar tausend Kubikmetern kann bei einem Grossereignis von grossem Nutzen sein. Mit den projektierten Massnahmen wird indirekt die Ausbruchgefahr des Schächens bei der Mündung in die Reuss vermindert. Bei der Beurteilung der Wildbachsperren im Wilerlibach geht es jedoch nicht um die Gefahren durch den Schächens sondern in erster Linie um die Wirkung der Verbauung im Zusammenhang mit Geschiebe- und Schwemmhölzeintrag (siehe Gesamtkonzept/Schutzziele unten).

Massnahme sollte Geschiebeeintrag reduzieren

Die Abflusssektionen der Sperren wurden auf einen ca. 100-jährlichen Abfluss (Reinwasser plus Geschiebezuschlag) von 8.8 m<sup>3</sup>/s ausgelegt. Der Reinwasserabfluss ergab sich als Mittel zwischen den Methoden HAKESCH (BWG, 2003) und Kölla-HQ-meso-CH (Kölla, 1987) zu ca. 6.5 m<sup>3</sup>/s (spezifischer Reinwasserabfluss ca. 10.8 m<sup>3</sup> km<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>). Der Geschiebeanteil wurde mit 50 % (Raumgewicht des Gesteins 17 kN/m<sup>3</sup> unter Wasser gewogen) zu ca. 2.0 m<sup>3</sup>/s eingesetzt.

Sperren auf HQ<sub>100</sub> dimensioniert

Hanginstabilitäten  
durch Erosions-  
prozesse und  
Infiltration

Unterhalb der Verbaustrecke verläuft das Gerinne auf Fels. Die Erosionsprozesse im (unverbauten) Bach sowie Infiltration in den Hängen stellten die Hauptgründe für die Hanginstabilitäten dar. Dabei trat an verschiedenen Stellen Ufererosion auf und einzelne übersteile Hangpartien rutschten ins Gerinne ab (Abb. 5.1, Abb. 5.2 und Abb. 5.3).



Abb. 5.1: Wilerlibach Heli-Aufnahme am 21.10.2005 nach Abschluss der Bauarbeiten (H. Duss).

Charakteristik der  
Massnahme

### Schutzmassnahmen und Verfügbarkeit

Das Schluckvermögen der Abflusssektionen wurde für ein 100-jährliches Ereignis nachgewiesen. Die Sperrentreppe erfüllt im Wesentlichen die Vollverbau-Kriterien. Die doppelwandigen Holzkasten-Sperrenkörper (Höhe ca. 1.5 m bis maximal 4.0 m) mit aufgesetzten Holzkasten-Flügeln (Höhe 1.25 m) und (Flügel-) Leithölzern sind nach den Regeln der Baukunde ausgeführt (Böll et al., 1999) und können als trag-sicher vermutet werden. Diese Vermutung wurde durch die Untersuchungen nach den Unwetterereignissen vom August 2005 bestätigt (Abb. 5.2). Da die Sperr-entreppe nach Norden ausgerichtet und von bewaldeten Einhängen umgeben ist, dürfen die Bedingungen für die Lebensdauer als günstig beurteilt werden. Systematische Überwachung und konsequenter Unterhalt vorausgesetzt, kann mit einer permanenten Verfügbarkeit von ca. 40 bis 60 Jahren gerechnet werden.



Abb. 5.2: Sperrentreppe im Wilerlibach 2005 unmittelbar nach den August-Unwetterereignissen (Aufnahme H. Duss). Starke Geschiebeablagerungen; insbesondere steile Hinterfüllung der Sperrenflügel. Die Erosionserscheinungen an den Ufern waren grösstenteils bereits vor dem Unwetter dokumentiert. Rechts im Bild ist die Schaufel des beim Unwetter zerstörten Schreitbaggers zu erkennen. Die beiden im Gerinne liegenden Kunststoffrohre stammen aus der Wasserhaltung, welche vor und während der Bauarbeiten in Betrieb war.

### Negative Wirkungen

Bei Versagen einer mit Geschiebe hinterfüllten Wildbachsperrengruppe besteht grundsätzlich die Gefahr, dass grosse Geschiebemengen schwallartig zum Abfluss kommen. Durch die Steilheit des (unverbauten) Gerinnes, die verhältnismässig niedrigen Bauwerke, die geringen Sperrenabstände und die beschränkte Länge der Verbaustrecke wäre die anfallende Geschiebemenge im vorliegenden Fall verhältnismässig gering. Eine grobe und eher konservative Schätzung anhand der Profile ergibt ein potenzielles Geschiebevolumen aus der gesamten Verbaustrecke von etwa 2'400 m<sup>3</sup>. Unter Berücksichtigung der geringen Wahrscheinlichkeit des Kollapses der ganzen Sperrentreppe und der grossen Geschiebekubaturen, die bei nicht vorhandener Verbauung anfallen würde (siehe Gefahrensituation und Prozesskenntnisse), kann dies vernachlässigt werden. Bei Versagen der Sperrentreppe wäre allerdings noch mit einem Eintrag von Schwemmholz (325 m<sup>3</sup> verbautes Rundholz) zu rechnen.

Kritische Zustände durch Sohlenanhebung (Gerinneausbrüche) dürfen aufgrund der Querprofile völlig ausgeschlossen werden.

Bei Kollaps geringe negative Wirkung

## Gesamtkonzept

Einzelne offene Rutsch-  
flächen geringer  
Bedeutung

Die Wildbachsperrren sind in das in den Projektunterlagen skizzierte Gesamtkonzept eingebunden. Abgesehen von den durch die Sperrentreppe beeinflussten Uferabbrüchen und Hanganrissen (Abb. 5.3) gibt es oberhalb und unterhalb der Verbaustrecke einzelne offene Rutschflächen von untergeordneter Bedeutung. Zum Schutz dieser Flächen wurden waldbauliche Massnahmen ausgeführt bzw. in die Wege geleitet.

Schutzziele

Die Schutzziele der Verbauung sind: Fussicherung der Gerinneabhängige zur Reduktion des Geschiebeeintrages, Reduktion der Geschiebefrachten und des Schwemholzeintrages in den Schächten sowie Schutz eines oberhalb einer Rutschfläche gelegenen Wohnhauses und zwei Ställen (Abb. 4.5).

Schutzziele erfüllt

Das Verbaukonzept gewährleistet grundsätzlich die Erfüllung der Schutzziele. Im Weiteren berücksichtigt es die lokalen Gegebenheiten bezüglich der Sicherheit der Sperrentreppe (Gerinne auf Fels unterhalb der Verbaustrecke). Die Untersuchungen nach den Unwetterereignissen vom August 2005 zeigten dann auch, dass sich die Sperrentreppe unter extremen Bedingungen als Hangfussicherung bewährt hat. Bezüglich der Hangneigungen ist allerdings Vorsicht geboten. Diese liegen zum Teil bei ca. 38°, was für das anstehende Bodenmaterial (Moräne auf Altdorfer Sandstein) zu lokalen Problemen führen kann. Die Flächen sind zu beobachten und gegebenenfalls sind ergänzende ingenieurbio-logische Massnahmen anzuordnen.

## Relevanz

Hohe Relevanz gegeben

Die Massnahmen beeinflussen unmittelbar die im Rahmen der Gefahrenbeurteilung ermittelten massgebenden Flächen für Geschiebe- und Schwemholzeintrag, indem sie die notwendige Voraussetzung zu deren Stabilisierung liefern. Aufgrund dieser Tatsache, der den Gegebenheiten angepassten Sperrenanordnung und der prognostizierten (und im Rahmen der Ereignisanalyse bestätigten) Stabilität der Bauwerke darf eine hohe Relevanz angenommen werden.

Die oben gemachte Bemerkung zu den Hangneigungen bezieht sich in erster Linie auf lokale Hanginstabilitäten. Sie ist im Rahmen der vorgesehenen waldbaulichen Massnahmen und der notwendigen Überwachung (insbesondere langfristig für das Schutzziel Wohnhaus und Ställe) zu berücksichtigen.

## Fazit Grobbeurteilung

Die Massnahmen erfüllen die Kriterien für weitere Abklärungen.

## 5.2 Massnahmenbeurteilung

### Grundlagen Prozesse

Die allgemeinen Grundlagen (Abfluss, Geschiebe, Gerinnesohle unterhalb der Verbaustrecke, Seiteneinabhängige) wurden anhand der Projektunterlagen bei der Grobbeurteilung dargestellt und können für die Massnahmenbeurteilung übernommen werden. Bezüglich der Gefährdungsbilder für die Sperren spielen folgende Einwirkungen eine zusätzliche Rolle: Geschiebeeinwirkungen auf die Sperren (-Flügel), Ablagerungen zwischen den Sperren (Geschiebe, Schwemholz und seitliche Rutschungen), Ufererosion. Abgesehen von der mechanischen Beanspruchung könnte daraus grundsätzlich ein Umfliessen einzelner Sperren resultieren.

Da die Sperrentreppe lediglich eine Teilstrecke des Gerinnes abdeckt, ist mit Geschiebeeintrag, Geschiebeablagerung und Schwemmholz von oben in die Verbaustrecke zu rechnen. Auch Ablagerungen aus seitlichen Rutschflächen sind nicht auszuschliessen. Wie Abb. 5.2 zeigt, war Ufererosion vor dem Bau der Massnahmen ein massgebendes Phänomen. Durch die Verbauung wird dieses weitgehend entschärft. Weil mögliche Ablagerungen zwischen den Sperrern die Funktions-tauglichkeit beeinträchtigen, könnte aber Ufererosion in Zukunft wieder zu einem Problem werden. Bedingt durch die geringen Sperrenabstände (maximal ca. 8 m) dürfte es sich dabei eher um lokale Probleme zwischen einzelnen Sperrern handeln.

Geschiebe und Schwemmholzeintrag aus Bereichen oberhalb der Verbauung

Anlässlich der Unwetterereignisse 2005 ergab sich die Haupteinwirkung auf die Sperrern tatsächlich aus starker Geschiebeführung (murgangartige Abflüsse) mit entsprechenden Ablagerungen und steiler Hinterfüllung von Sperrernflügeln (Abb. 5.2). Der Schwemmholzanfall war hingegen sehr gering, was vor allem auf die waldbaulichen Massnahmen zurückzuführen war. Die Verbauarbeiten waren damals übrigens noch nicht abgeschlossen. Im Rahmen des Unterhaltes von Gerinne und Einhängen zeitgerecht durchgeführte waldbauliche Massnahmen können auch in Zukunft den Schwemmholzeintrag so gering halten, dass dieser für die Verbauung als Ganzes keine massgebende Gefahr darstellt.

Hohe Geschiebeführung bei Unwetter 2005

### Überlastfälle

Die Überlastfälle ergeben sich aus den oben skizzierten Prozessen und treten ein, sofern diese in extremer Weise auftreten und dadurch die Funktionstüchtigkeit der Sperrern (insbesondere das Schluckvermögen der Abflusssektionen) stark eingeschränkt ist.

Allgemein darf angenommen werden, dass sich die als Gewichtsmauern konzipierten, mit Leitwerken versehenen und relativ flexiblen Holzkastensperrern in Bezug auf die hier relevanten Überlastfälle recht gutmütig verhalten.

Gutmütiges Verhalten bei Überlastfall

Da die Seiteneinhalte aus recht standfestem Material bestehen, können tiefgründige Bodenbewegungen, mit Einwirkungen senkrecht zu Gerinnesohle (Knicken der Sperrern), ausgeschlossen werden.

Keine tiefgründigen Bodenbewegungen bei Seiteneinhängen

Die extremen Einwirkungen anlässlich der Unwetterereignisse 2005 stellten den Überlastfall dar, mindestens was den Abfluss und die Geschiebeeinwirkungen auf die Sperrernkörper (im kritischen Bauzustand) und die Sperrernflügel betrifft. Die Schäden waren gering und konnten leicht behoben werden

Geringe Schäden bei Unwetter 2005

### Grundlagen Massnahmen

Die zur Beurteilung der Bauwerke erforderlichen Daten ergeben sich aus den detaillierten Projektunterlagen und der Ereignisanalyse nach den Unwettern 2005 durch die WSL.

### Überprüfung der Tragsicherheit

Wie oben erwähnt, handelt es sich um Holzkastenkonstruktionen. Diese sind nach den Regeln der Baukunde (Böll et al., 1999) ausgeführt und seitlich gut in die Flanken eingebunden. Der Zustand der heute erst etwa zweijährigen Sperrern ist sehr gut.

Tragsicherheit gegeben

Die Verbauung wurde während der Unwetterereignisse 2005 bereits mit extremen Einwirkungen beaufschlagt. Die Tragsicherheit der einzelnen Sperrern und der Verbauung als Ganzes war erfüllt und kann, nach Behebung einzelner Schäden, nach wie vor als erfüllt vorausgesetzt werden. Die Schäden betrafen vor allem einzelne Sperrernflügel. Insgesamt erwies sich sowohl die Gesamtstabilität der Holzkasten-Sperrernkörper als auch das Tragverhalten der Holzkasten-Flügel als

Tragsicherheit bei Unwetter 2005 erfüllt

unempfindlich auf die Einwirkung aus starker Geschiebeführung. Bedingt durch die sorgfältige seitliche Einbindung waren keine Schäden an den Flanken im Auflagerbereich zu verzeichnen.

Bei Unterhalt 40-60  
Jahre tragsicher

Da die Sperrentreppe nach Norden ausgerichtet und von bewaldeten Einhängen umgeben ist, dürfen die Bedingungen für die Lebensdauer und damit für die Tragsicherheit als günstig beurteilt werden. Systematische Überwachung und konsequenter Unterhalt vorausgesetzt, kann eine ausreichende Tragsicherheit während etwa 40 bis 60 Jahren prognostiziert werden.

### Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit

Abfluss soll innerhalb  
der Abflusssektion  
bleiben

Die im Rahmen der Tragsicherheit betrachteten Gefährdungsbilder können sich ungünstig auf die Funktionstüchtigkeit auswirken. Im vorliegenden Fall geht es vor allem um den schadlosen Abfluss innerhalb der Abflusssektionen. Dieser kann durch die oben erwähnten Prozesse eingeschränkt werden bzw. es kann sich Abfluss über die ganze Sperrenbreite einstellen (Überfluten der Sperrenflügel). Daraus resultierende Schäden an den Uferböschungen können schliesslich die Tragsicherheit gefährden und ausserdem zu einem Umfliessen der Sperren führen.

Umfliessen der Sperren  
ausgeschlossen

Die als Gewichtsmauern konzipierten Sperren im Wilerlibach mit ihren weit in die Uferböschungen reichenden Einbindungen sind, wie bereits erwähnt, recht unempfindlich auf Schäden im Auflagerbereich. Durch die Geometrie der Querprofile (steile und hohe Böschungen) ist zudem ein Umfliessen der Sperren praktisch ausgeschlossen.

Funktionstüchtigkeit  
bei Unwetter 2005  
erfüllt

Während der Unwetterereignisse 2005 wurde das Schluckvermögen der Abflusssektionen bis zur Kapazitätsgrenze und zum Teil darüber hinaus beansprucht. Dabei wurden verschiedene Sperren auf ihrer ganzen Breite überflossen. Trotz starker Geschiebeführung waren danach bei den meisten Sperren noch beide Flügel vorhanden. Die Funktionstüchtigkeit der einzelnen Bauwerke und der Verbauung als Ganzes war weitgehend erfüllt und kann, nach Behebung einzelner Schäden, nach wie vor als erfüllt vorausgesetzt werden. Systematische Überwachung und konsequenter Unterhalt vorausgesetzt, kann eine ausreichende Gebrauchstauglichkeit während etwa 40 bis 60 Jahren prognostiziert werden.

### Überprüfung der Dauerhaftigkeit

Dauerhaftigkeit  
gegeben

Der Vergleich der vorhandenen und prognostizierten Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit (Funktionstüchtigkeit) mit dem für die Schutzziele relevanten Zeitraum von ca. 100 Jahren zeigt, dass die Anforderungen während der vorausgesetzten Lebensdauer (ca. 40 bis 60 Jahre) im Wesentlichen ohne unvorhergesehenen Aufwand für die Instandstellung erfüllt bleiben. Dies betrifft sowohl die einzelnen Sperren als auch die Verbauung als Ganzes.

Waldbauliche Mass-  
nahmen an seitlicher  
Rutschfläche nötig

Bezüglich dem Verhalten der seitlichen Rutschflächen (Abb. 5.3) und ihren möglichen Auswirkungen auf die Verbauung und die Erfüllung der Schutzziele, ist diese Aussage allerdings an die Voraussetzung geknüpft, dass die vorgesehenen waldbaulichen Massnahmen durchgeführt und nötigenfalls ergänzende ingenieurbio-logische Massnahmen angeordnet werden.

### Bestimmung der Zuverlässigkeit

Hohe Zuverlässigkeit  
der einzelnen Sperren  
und des Gesamt-  
systems

Aufgrund der Beurteilung von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit ergibt sich sowohl für die einzelnen Sperren als auch für die Verbauung als Ganzes eine hohe Zuverlässigkeit (Versagenswahrscheinlichkeit < 10%) für ein 100-jährliches Ereignis innerhalb der angegebenen Lebensdauer von 40 bis 60 Jahren. Für das 300-jährliche Ereignis ergibt sich ebenfalls eine hohe Zuverlässig-

keit für die Tragsicherheit der Sperrenkörper. Schäden an den Sperrenflügeln sind jedoch nicht auszuschliessen. Weil die Sperren als Gewichtsmauern konzipiert sind, ist deswegen nicht mit einem Kollaps zu rechnen. Bezüglich des für die Schutzziele relevanten Zeitraums ist die Zuverlässigkeit an die Voraussetzung geknüpft, dass die Sperrentreppe rechtzeitig erneuert wird.

Wie die Untersuchungen nach den Unwettern 2005 zeigten, berücksichtigt das Bemessungsereignis die tatsächlich zu erwartenden Gefährdungsbilder. Auch im Überlastfall ist kein Kollaps der Sperrentreppe zu befürchten.

Bei Überlastfall kein Kollaps

Die Verbauung hat sich auch als Hangfussicherung bewährt. Für die Wirkung der Verbauung als Hangfussicherung kann ebenfalls eine hohe Zuverlässigkeit angegeben werden. Daraus resultiert auch die notwendige Voraussetzung für den Erfolg der vorgesehenen waldbaulichen und nötigenfalls ingenieurbioologischen Massnahmen in den Seiteneinhängen.

Hohe Zuverlässigkeit als Hangfussicherung

### Fazit Massnahmenbeurteilung

Systematische Überwachung, konsequenter Unterhalt und rechtzeitige Erneuerung vorausgesetzt, erfüllen die Sperren die Kriterien für weitere Abklärungen.

## 5.3 Wirkungsbeurteilung

### Massnahmenbeeinflusste Szenarien

Bezüglich der Wirkung der Massnahmen ist ihr Einfluss auf die für die Schutzziele relevanten Gefahrenprozesse (Szenarien) zu untersuchen. Es geht dabei um:

Ziel der Massnahme

- Reduktion der Geschiebefrachten in den Schächten um ca. 10'000 m<sup>3</sup> (Abb. 5.3);
- Schutz eines Wohnhauses und zweier Ställe, die sich innerhalb der rutschgefährdeten Zone befinden (Abb. 5.3);
- Reduktion des Eintrages von Schwemmh Holz in den Schächten.

### Prozessbeurteilungen unter Berücksichtigung der Massnahmen

Prozessbeurteilungen unter Berücksichtigung der Massnahmenwirkungen liefern die Grundlagen zur Beurteilung von Intensitäten und Wahrscheinlichkeiten für die relevanten Szenarien.

### Wildbachsperren als Hangfussicherung

Aufgrund ihrer Anordnung und Zuverlässigkeit gewährleistet die Sperrentreppe die Hangfussicherung im Bereich der Verbaustrecke. Ob die Hangfussicherung zur Stabilisierung der gesamten Einhänge (in ihrem Einflussbereich) genügt, kann hier nicht abschliessend beurteilt werden. Die Hangstabilitäten und deren zeitliche Entwicklung (Erosions-Rutsch-Prozesse) sind zu überprüfen.

Zuverlässigkeit im Bereich der Verbaustrecke gegeben

Sofern Hangrutschungen innerhalb der prognostizierten Lebensdauer von ca. 40 bis 60 Jahren bzw. nach erfolgter Erneuerung auch später eintreten, wird sich der Feststofftransport im Gerinne nicht wesentlich erhöhen. Für den Extremfall, bei dem Rutschung und Abtransport im gleichen Ereignis eintreten, wird eine zusätzliche Kubatur von ca. 2'000 m<sup>3</sup> bis 3'000 m<sup>3</sup> abgeschätzt. Gegenüber der angestrebten Reduktion des Geschiebeeintrages in den Schächten um ca. 10'000 m<sup>3</sup> würde dies nur noch eine solche von ca. 7'000 m<sup>3</sup> bis 8'000 m<sup>3</sup> bedeuten. Es ist hier allerdings klar festzuhalten, dass alle diese Zahlen grobe Schätzungen sind. Gemäss den Projektunterlagen kann bei einem Grosseignis eine Reduktion der Geschiebefracht des Schächens um ein paar tausend Kubikmeter für den Siedlungsraum in

Bei Kubatur nur grobe Schätzung möglich

der Reusebene von grosser Bedeutung sein. Ein so modifiziertes Schutzziel wäre demnach immer noch erfüllt.

Schutz des Wohn-  
hauses nicht  
beurteilbar

Für das Schutzziel Wohnhaus und zwei Ställe ist die Hangfussssicherung notwendig. Ob sie auch hinreichend ist, kann hier nicht beurteilt werden (siehe Bemerkungen oben).

Schwemmholzreduktion  
von waldbaulichen  
Massnahmen abhängig

Die Hangfussssicherung stellt auch für das Schutzziel Reduktion des Schwemmholzeintrages in den Schächen eine wichtige Voraussetzung dar. Die tatsächliche Reduktion bei einem Extremereignis hängt indessen stark von den waldbaulichen Massnahmen ab.



Abb. 5.3: Wilerlibach mit Einmündung in den Schächen. Aufnahme H. Duss November 2005 (nach den Unwettern). Das Wohnhaus und die zwei Ställe befinden sich in Bildmitte im Bereich der Verbauung, linksufrig und oberhalb der Rutschfläche. Im Einmündungsbereich gab es praktisch keine Geschiebeablagerungen durch die Unwetter.

### Wildbachsperrren als Sohlensicherung

Die Funktion der Sperrentreppe als Sohlensicherung dient der Hangfussicherung. Eine reine Sohlensicherung, wie sie etwa unterhalb von Wildbachsperrren bei Gerinnen im Lockermaterial notwendig ist, ist nicht vorhanden und auch nicht erforderlich weil das Gerinne dort auf Fels verläuft.

Sohlenversicherung unterhalb Sperre nicht notwendig

### Fazit Wirkungsbeurteilung

In Bezug auf das Schutzziel „Reduktion der Geschiebefrachten in den Schächen um ca. 10'000 m<sup>3</sup>“ erfüllt die Verbauung die Kriterien der Wirkungsbeurteilung mit gewissen Einschränkungen bezüglich der Kubatur.

Schutzziel mit Einschränkung erfüllt

Bedingt durch die Interaktionen zwischen den Einhängen und dem Gerinne, gelten die gleichen Einschränkungen auch für das Schutzziel „Wohnhaus und zwei Ställe“ und ebenso für das Schutzziel „Reduktion des Schwemholzeintrages in den Schächen“. Der Grund liegt in der längerfristigen Stabilität der seitlichen Einhänge. Diese hängt nicht zuletzt auch von den waldbaulichen Massnahmen und den gegebenenfalls erforderlichen Ingenieurbiologischen Sicherungsarbeiten in den Hängen ab.

Erfolg von waldbaulichen Massnahmen abhängig

### Intensitätskarten, Gefahrenkarten

Auf die Darstellung solcher Karten wird hier aus folgenden Gründen verzichtet:

- Die Gefahrensituation der Siedlungsräume von Schächen und Reuss wird in erster Linie durch das Verhalten dieser Gerinne bestimmt. Wie aus den Schutzzielen hervorgeht, liefern die Massnahmen im Wilerlibach einen zwar nicht unwichtigen, im Gesamtrahmen aber doch recht bescheidenen Beitrag zur allgemeinen Gefahrenreduktion.
- Für den Schächen ist insgesamt mit sehr grossen Geschiebekubaturen zu rechnen. So weist die Geschiebestausperre Stiglissammler im Schächen (Abb. 5.3) oberhalb des Dorfes Bürglen (unterhalb der Einmündung des Wilerlibaches) ein Fassungsvermögen von ca. 100'000 m<sup>3</sup> auf. Im Zusammenhang mit den Schutzzielen für den Wilerlibach (gemäss Projektunterlagen) wird festgehalten, dass der Stiglissammler damit eine beschränkte Kapazität aufweist, und dass deshalb die Geschiebeeinträge der Zuflüsse des Schächens, insbesondere im Mittel- und Unterlauf möglichst zu minimieren sind. Entsprechend ist derzeit ein Hochwasserschutzkonzept Schächen in Bearbeitung.

Was den Wilerlibach betrifft, konnte hier gezeigt werden, dass diese Forderung durch die Verbauung weitgehend erfüllt ist. Dies konnte übrigens mit einem sehr bescheidenen Einsatz an Mitteln erreicht werden. Gemäss Schlussabrechnung des Unternehmers betragen die Gesamtkosten für die Sperrrenverbauung (ohne Rundholz, Projektierung und Bauleitung) Fr. 138'415,05 was einen durchschnittlichen Betrag pro Sperre von ca. Fr. 8'700.- ergibt.

Massnahmen im Wilerlibach erfüllen Forderungen

Unter der Voraussetzung des Eintretens von Ereignissen verschiedener Jährlichkeiten innerhalb der angegebenen Lebensdauer der Verbauung, bzw. nach rechtzeitiger Erneuerung, liefert eine grobe Abschätzung bezüglich der Reduktion des Geschiebeeintrages in den Schächen folgendes:

- Reduktion um ca. 10'000 m<sup>3</sup> für 30- bis 100-jährliche Ereignisse;
- Reduktion um ca. 7'000 m<sup>3</sup> bis 8'000 m<sup>3</sup> für ein 300-jährliches Ereignis.

## 6. Beispiel Geschiebesammler Spissibach (Leissigen)

### 6.1 Grundlagen

#### Das Einzugsgebiet

Topographie

"Das Einzugsgebiet (siehe Abb. 6.1) erstreckt sich vom Morgenberghorn (2249 m ü. M.) bis hinunter zum Delta in den Thunersee (558 m ü. M.). Es bedeckt eine Fläche von 2.6 km<sup>2</sup>. Die mittlere Steilheit des Einzugsgebietes beträgt 28°, das Gefälle des Gerinnes im Mittel 18.8°. 45% des Einzugsgebietes sind von Wald bedeckt, 43% mit Weideland oder Feuchtwiesen." (Frick, 2007).

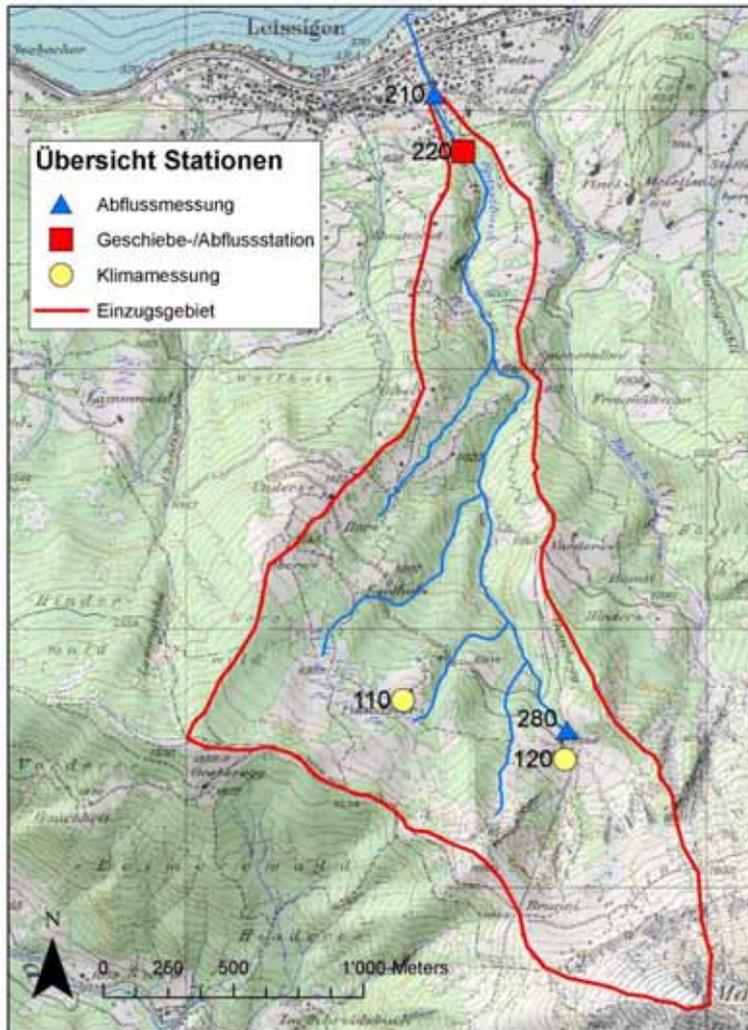


Abb. 6.1: Das Einzugsgebiet des Spissibachs mit den Messstationen.  
Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie (Ja082265).

#### Geologie und Geomorphologie

Zahlreiche  
Hangprozesse

"Der obere Teil des Einzugsgebietes des Spissibachs liegt im Bereich der Wildhorndecke (Helvetikum), der untere Teil im Ultrahelvetikum. Der Gipfelbereich des Morgenberghorns besteht aus resistenten Kieselkalken, während im daran anschliessenden unteren Teil des Einzugsgebietes verwitterungsanfällige Flysch-

formationen vorherrschen. Diese hohe Erodierbarkeit des Gesteins kombiniert mit dem grossen Sohlengefälle ist als Hauptursache für die zahlreichen Hangprozesse anzusehen. Die Flyschzone vom Baachli (1400 m ü. M.) bis hinunter zum Schutt-fächer im See ist teilweise mit glazialen Sedimenten lokaler Gletscher (im oberen Bereich) und des Aaregletschers bedeckt.

Das prägende Landschaftselement sind die vielen substabilen bis wenig aktiven Rutschungsflächen, die hauptsächlich auf Talzuschübe zurückzuführen sind. Es können drei grössere Rutschgebiete ausgemacht werden: Gebiet Hinderwald-Lammweid, Gebiet Greberegg-Egelholz und das Gebiet Vorderes Ramsi. In diesen Gebieten sind oder waren die Hänge grossflächig und tiefgründig, mehr oder weniger stark in Bewegung. Zusätzlich kommen in diesen Gebieten auch kleinere, meist jüngere Rutschungen vor. Diese Hauptrutschgebiete sind praktisch auf die Flyschzone beschränkt. In den übrigen Gebieten, weitgehend übereinstimmend mit den Bereichen der Wildhorndecke, treten praktisch nur kleinere Rutschungen auf.

Drei grosse  
Rutschgebiete

In den steilen Flanken des Morgenberghorns und des Leissiggrates treten als dominante Prozesse Sturzprozesse wie Stein-, Blockschlag und Felsstürze auf. Die Steilhänge sind von zahlreichen Felsbändern durchzogen, aus denen sich Steine und Blöcke lösen können.

In Steilhängen  
Sturzprozesse

Allgemein kann aufgrund der vorherrschenden Geologie im ganzen Untersuchungsgebiet davon ausgegangen werden, dass unterhalb von Felsaufschlüssen Stein-schlag auftreten kann.

Die Gerinnecharakteristik ist sehr vielfältig. Umlagerungsstrecken wechseln mit ero-siven Abschnitten, Akkumulationen und Beharrungsstrecken. Im Siedlungsbereich ist das Gerinne weitgehend verbaut." (Frick, 2007).

Vielfältige Gerinne-  
charakteristik

### Frühere Ereignisse

Im Kegelbereich finden sich deutliche Spuren früherer Murgänge. Eine Übersicht über frühere Ereignisse gibt Tab. 6.1.

Deutliche  
Murgangspuren

Tab. 6.1: Dokumentierte Ereignisse im Spissibach (aus Geo7, 2007).

01.07.1930	Nach Gewitter mit Hagelschlag führt der Spissibach viel Geschiebe, so dass eine Verstopfung der Bahnbrücke drohte. Ablagerung von ca. 300 m <sup>3</sup> Geschiebe.
25.03.1955	Nach einer Rutschung im sog. Gruebi wurde die Staatsstrasse sowie die Bahngleise von ca. 10'000 m <sup>3</sup> Geschiebe überführt.
27.07.1969	Durch intensive Gewitterniederschläge tritt der Spissibach über die Ufer. Durch Schlamm und Geröll werden grosse Teile des Dorfes überführt (Bahnhofareal, Staatsstrasse sowie diverse Häuser).
22. / 23.08.1969	Nach einem Gewitter musste Geröll aus dem Bachbett entfernt werden.
20. / 21.08.1983	Nach Gewitter musste der überlaufende Geschiebesammler entleert werden (ca. 3000 m <sup>3</sup> ).
06.07.1987	Der Geschiebesammler (ca. 3000 m <sup>3</sup> ) wurde vollständig gefüllt, der Spissibach drohte nach rechts auszubrechen.
30.06. / 31.07. / 08.08.1993	3000 m <sup>3</sup> aus Geschiebesammler entnommen ca. 1000 weitere flossen über den Sammler hinweg.
03.07. / 11.07. 1995	Nach Gewitterniederschlägen musste der Geschiebesammler geleert werden (ca. 1700 m <sup>3</sup> ).
07.08.1995	Geschiebesammler gefüllt (ca. 3000 m <sup>3</sup> ).

1955 Schaden durch Murgang

Am 25. März 1955 ergoss sich um 18.30 Uhr ein Murgang aus dem Gerinne des Spissibaches ins Dorf. Die Staatsstrasse, sowie das Bahngeleise der BLS wurden überschüttet, da die Durchlässe bei der Strassenbrücke durch grobe Blöcke (2 bis 5 m<sup>3</sup> Volumen) und Holz verstopft wurden. Die Strasse wurde auf ca. 60 Metern mit 1.5 bis 2 m Schutt eingedeckt. Die Geschiebeablagerungen wurden auf ca. 10'000 m<sup>3</sup> geschätzt. Die Wiederherstellungskosten beliefen sich auf rund 25'000 Fr. Der Murgang wurde durch eine Rutschung im Kummgraben, Kote 850 m linke Einhänge des Spissibachs ausgelöst. Als Ursache wurde die starke Vernässung nach der Schneeschmelze angenommen. Als Sofortmassnahme wurde das Oberflächenwasser im Gebiet 'Grubi' abgeleitet.

Geschiebesammler 1976/1977 gebaut

In der Folge des Unwetters vom 27. Juni 1969 wurden die Leissiger Wildbäche verbaut. So wurde im Spissibach 1976/77 der Geschiebesammler (3000 m<sup>3</sup>) erstellt. In einer weiteren Etappe wurde in den Jahren 1981/82 die Abflusssrinne im Unterlauf bis zur Mündung in den Thunersee erneuert und vergrössert.

Füllung des Geschiebesammlers

Nach den zwei Ereignissen am 30. Juni und 8. August 1993 wurden dem Sammler insgesamt 2900 m<sup>3</sup> Geschiebe, Schwebstoffe und Holz entnommen (mit Lastwagen abgeführte Menge). Beim Ereignis vom 31.7.93 überschritt die Feststofffracht die Kapazität des Sammlers, der von vorangehenden Ereignissen schon recht gut gefüllt war. Aufgrund der Angaben von Anwohnern kann davon ausgegangen werden, dass während etwa einer Stunde Material durch den Sammler hindurch direkt in den Thunersee transportiert wurde. Das dabei verlagerte Feststoffvolumen ist schwer abzuschätzen, dürfte aber mehrere 100 m<sup>3</sup> bis wenige 1000 m<sup>3</sup> betragen haben. Das Ereignis vom 31.7.93 wies damit die grösste der bis jetzt beobachteten Feststofffrachten auf.

Nach dem Hochwasser am 11. Juli 1995 mussten dem Geschiebesammler 1600-1700 m<sup>3</sup> Geschiebe entnommen werden (Angaben anhand Lastwagenfahrten). "Für die Ereignisse vom 3.7. und 11.7.95 konnte nur die gemeinsame Feststofffracht bestimmt werden. Aufgrund der Angaben von Anstössern kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das erste Ereignis deutlich das grössere war. Bei diesen Ereignissen ist der Geschiebesammler nicht vollständig gefüllt worden. Es darf deshalb davon ausgegangen werden, dass nur ein kleiner Teil der aufgetretenen Feststofffracht durch die Öffnungen im Abschlussbauwerk hindurchtransportiert wurde. Die gesamte Feststofffracht wird somit nur wenig über der gemessenen liegen. Beim Ereignis vom 7.8.95 war der Sammler wieder voll ausgebaggert, und die gesamte Feststofffracht konnte, abgesehen vom Verlust durch die Öffnungen im Abschlussbauwerk, zurückgehalten werden." (Kienholz et al., 1998).

### Niederschlag und Abfluss

Extremniederschläge

"Gemäss dem hydrologischen Atlas (1997) sind für das Untersuchungsgebiet folgende Extremniederschläge zu erwarten:

- Niederschlagsdauer 1 Stunde; Wiederkehrperiode 2.33 Jahre: 20 mm
- Niederschlagsdauer 1 Stunde; Wiederkehrperiode 100 Jahre: 45 mm
- Niederschlagsdauer 24 Stunden; Wiederkehrperiode 2.33 Jahre: 55 mm
- Niederschlagsdauer 24 Stunden; Wiederkehrperiode 100 Jahre: 110 mm

schnelle Reaktion des Einzugsgebietes

Das Einzugsgebiet reagiert im Allgemeinen sehr schnell, so dass eine halbe Stunde nach dem intensivsten Niederschlag bereits die Abflussspitze auftritt. Bei längeren Ereignissen können zwei Abflussspitzen beobachtet werden. Die zweite Spitze stammt wahrscheinlich aus dem Teileinzugsgebiet Baachli (Einzugsgebiet der Station 120 gemäss Abb. 6.1), wo das Wasser in einem Bereich mit Schuttmassen

zwischen gespeichert werden kann. Im ansteigenden Teil der Hochwasser-Abflussganglinie reagieren die Teileinzugsgebiete zwar relativ ähnlich, im absinkenden Teil aber ziemlich verschieden. Diese Resultate zeigen die signifikante räumliche und zeitliche Variabilität von Hochwassern in alpinen Wildbächen." (Frick, 2007)

Die meisten der nachfolgenden Angaben basieren auf dem Entwurf zum Bericht Gefahrenkarte Leissigen (Geo7, 2007).

Tab. 6.2: Abflussspitzen im Spissibach (aus Geo7, 2007).

EZG	HQ <sub>30</sub>	HQ <sub>100</sub>	HQ <sub>300</sub>	hQ <sub>100</sub>
2.6 km <sup>2</sup>	6.5 m <sup>3</sup> /s	11 m <sup>3</sup> /s	14 m <sup>3</sup> /s	3.8 m <sup>3</sup> /s/ km <sup>2</sup>

### Abgeschätzte Geschiebefrachten

Die Geschiebefrachten wurden "aufgrund von Felderhebungen abgeschätzt. Die massgebenden Gerinneabschnitte wurden im Gelände beurteilt und die Erosionsleistung eines 100-jährlichen Hochwasser- und Murgangereignisses abgeschätzt. Dabei wurden die vorhandenen Geschiebeherde (Geschiebeakkumulationen im Gerinne) erfasst sowie mögliche Geschiebelieferungen durch Rutschungen und Erosion der Bacheinhänge abgeschätzt. Geschiebeablagerungen im Einzugsgebiet wurden berücksichtigt. Ein langandauerndes Ereignis mit grosser Geschiebefracht wurde dabei ebenfalls berücksichtigt. Die Verbauungen in den Einzugsgebieten wurden bezüglich ihrer Wirkung auf den Geschieberückhalt beurteilt." (Geo7, 2007).

Durch Feldbegehung  
Abschätzung der  
Geschiebefracht

Generell muss auch mit Schwemmholz gerechnet werden.

Tab. 6.3: Annahmen bezüglich Geschiebefrachten im Spissibach (aus Geo7, 2007).

Geschiebefracht	G <sub>30</sub>	G <sub>100</sub>	G <sub>300</sub>	G <sub>EH</sub>
Hochwasser mit Geschiebetransport	8'000 m <sup>3</sup>	14'000 m <sup>3</sup>	nicht relevant	...
Murgang	nicht relevant	18'000 m <sup>3</sup>	25'000 m <sup>3</sup>	40'000 m <sup>3</sup>

Kapazität nicht  
ausreichend

Weil bei grossen Geschiebemengen bereits oberhalb des Geschiebesammlers (Kote des Abschlussbauwerkes = 615 m), nämlich bei Kote 635 m ein Ausbruch nach rechts auf die alte Schwemmkegeloberfläche möglich ist, wurden bezüglich Geschiebefrachten im Bereich des Geschiebesammlers selbst und unterhalb desselben verschiedene Szenarien berücksichtigt (Tab. 6.4). Bei allen diesen Szenarien ist jedoch klar, dass die Kapazität des Ablagerungsplatzes nicht ausreicht und dass mehr oder weniger grosse Geschiebemengen den Sammler passieren bzw. das Abschlussbauwerk überführen werden.

Tab. 6.4: Szenarien im Bereich des Geschiebesammlers Spissibach (aus Geo7, 2007).

Szenarium	100j. Var. 1	100 j. Var. 2	300j. Var. 3	300 j. Var. 4
Fracht bei Kote 640	18'000 m <sup>3</sup>	18'000 m <sup>3</sup>	25'000 m <sup>3</sup>	25'000 m <sup>3</sup>
Ablagerung im Gerinne	2'000 m <sup>3</sup>	6'000 m <sup>3</sup>	4'000 m <sup>3</sup>	9'000 m <sup>3</sup>
Ausbruch bei Kote 635	0 m <sup>3</sup>	2'000 m <sup>3</sup>	2'000 m <sup>3</sup>	4'000 m <sup>3</sup>
Fracht in Sammler	16'000 m <sup>3</sup>	10'000 m <sup>3</sup>	19'000 m <sup>3</sup>	12'000 m <sup>3</sup>
Ablagerung Sammler	5'000 m <sup>3</sup>	5'000 m <sup>3</sup>	6'000 m <sup>3</sup>	6'000 m <sup>3</sup>
Fracht nach Sammler	11'000 m <sup>3</sup>	5'000 m <sup>3</sup>	13'000 m <sup>3</sup>	6'000 m <sup>3</sup>

## 6.2 Grobbeurteilung

Am Kegelhals des Spissibaches wurde Ende der 1960er Jahre ein relativ kleiner Geschiebeablagerungsplatz gebaut. Im Winter 1997/98 wurde der Geschiebeablagerungsplatz vergrössert und ein neues Abschlussbauwerk erstellt. Ziel der Grobbeurteilung ist zu entscheiden, ob der Geschiebesammler für die Gefahrenbeurteilung relevant ist (s. Abb. 4.1 bzw. Kap. 4.1).

### Gefahrensituation und Prozesskenntnisse

Unsicherheiten in  
Prozessbeurteilung

Die Gefahrensituation wird im Wesentlichen durch die Geschiebefrachten gemäss Tab. 6.3 und Tab. 6.4 bestimmt. Es wird mit Murgängen bis in den Geschiebesammler und dessen Abschlussbauwerk gerechnet. Wie bei vielen Wildbächen ergeben sich Unsicherheiten in der Beurteilung u.a. aus den Annahmen bezüglich Geschiebeeintrag im Einzugsgebiet und dem Verhalten der verschiedenen Einhänge im Gerinne sowie in den Wahrscheinlichkeiten der berücksichtigten Grundszenarien. Eine weitere Unsicherheit besteht im Verhalten von Murgängen (Ablagerungs- und Ausbruchsszenarien) im Kegelhalsbereich. Sie findet Ausdruck in der Tatsache von 2 Varianten für das 300-jährliche Ereignis (siehe Tab. 6.4).

Aber auch unter Berücksichtigung dieser Unsicherheiten dürfen die Prozesskenntnisse in diesem Falle als annähernd vollständig angenommen werden.

### Grundlagen Schutzmassnahmen

Erweiterung 1997/1998

Wie erwähnt wurde im Winter 1997/98 der frühere kleine Geschiebesammler vergrössert und ein neues Abschlussbauwerk erstellt. Dieses Abschlussbauwerk weist wesentlich grössere Öffnungen auf als das alte Bauwerk. Das Volumen des Geschiebesammlers wurde auf 5600 m<sup>3</sup> erhöht. Die Schwellen zwischen dem Geschiebesammler und der Messstation 210 (Abb. 6.1) wurden ebenfalls durch neue ersetzt. Für den Auffang von Schwemmholz sind keine speziellen Vorkehrungen getroffen worden.

Dimensionierung des  
Auslaufbauwerks

Gemäss Angaben aus Spissibach (1996) ist das Auslaufbauwerk wie folgt dimensioniert worden (s. Abb. 6.4):

- L = 33.20 m
- H = 9.20 m
- d = 1.40 m
- Durchflussöffnung Querschnitt 4.50 / 3.50 m
- max. Durchfluss 33 m<sup>3</sup>/s
- Die Abschlussperre wurde talseits beidseitig mit Blockmauern abgestützt
- Dem Abschlussbauwerk wurden folgende hydraulischen Berechnungen zugrunde gelegt:
  - Projektierungswassermenge  $QP = HQ_{100} = 33 \text{ m}^3/\text{s}$  (Berechnung nach Müller)
  - Durchlass Rückhaltesperre:  $b = 4.50 \text{ m}$ ,  $h = 3.50 \text{ m}$ ,  $n = \text{senkrecht}$ ,  $Q=33\text{m}^3/\text{s}$ ,  $h_w = 1.76 \text{ m}$
  - Überfallsektion Rückhaltesperre:  $b = 6.00 \text{ m}$ ,  $n = 1:1$ ,  $Q = 33 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h_w = 1.28 \text{ m}$ , Freibord = 62 cm,  $h=1.90 \text{ m}$

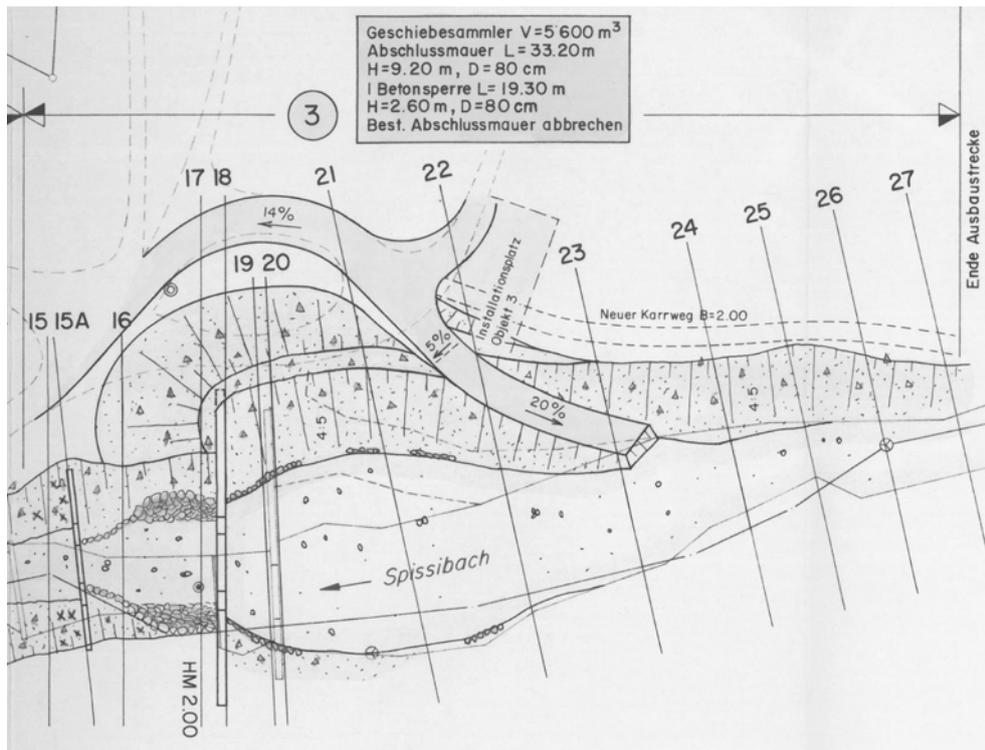


Abb. 6.2: Grundriss Bereich Geschiebesammler Spissibach mit Auslaufbauwerk bei Profil 18 (aus Spissibach, 1996).

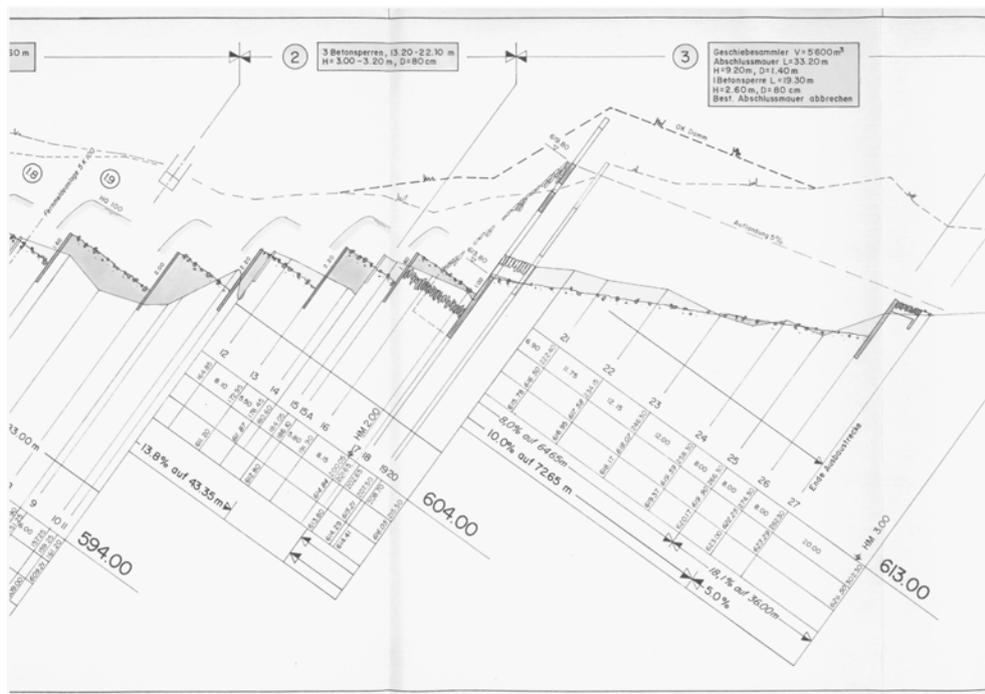


Abb. 6.3: Längsprofil Bereich Geschiebesammler Spissibach mit Auslaufbauwerk bei Profil 18 (aus Spissibach, 1996).

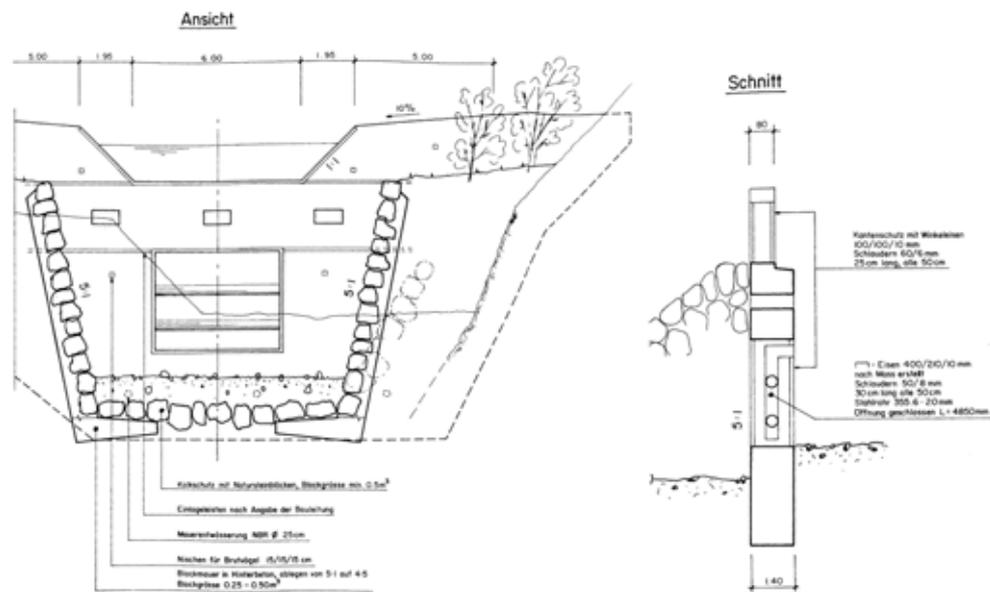


Abb. 6.4: Aufrisse Auslaufbauwerk Geschiebesammler Spissibach (aus Spissibach, 1996).



Abb. 6.5: Geschiebesammler Spissibach von 1998 (Aufnahmestandort im Geschiebesammler): links: Einlaufbauwerk, rechts: Abschlussbauwerk.

### Beurteilung Gesamtkonzept

Optimaler Standort des Geschiebesammlers

Der Standort der Schutzmassnahme (Geschiebeablagerungsplatz mit Einlauf- und Abschlussbauwerk) am Kegelhals, d.h. am unteren Ende des Einzugsgebiets und am oberen Ende des Schuttkegels ist optimal; dies gilt ebenfalls bezüglich der lokalen Geländebeziehungen und ebenso für die Zufahrt. Der Geschiebesammler ist permanent verfügbar, sofern die speditive Leerung nach Ereignissen gewährleistet ist. Letzteres war in den vergangenen zwei Jahrzehnten immer der Fall. Die Nachhaltigkeit ist unter der Prämisse der regelmässigen Leerungen und des Unterhalts vor allem des Abschlussbauwerkes gegeben.

Ungenügender Geschieberückhalt

Der gewährleistete Geschieberückhalt von 5000 bis 6000 m<sup>3</sup> ist ungenügend, jedoch nicht unbedeutend.

Keine nachteiligen Wirkungen

Nachteilige Wirkungen gehen vom Bauwerk nicht aus. Dank den Querwerken im Gerinneabschnitt unterhalb des Geschiebesammlers und der Schale im eigentlichen

Dorfteil dürfte der Schutz gegen Erosion durch das entlastete Wasser im Gerinne gewährleistet sein.

### Fazit der Grob beurteilung

- Konzept, Anordnung und Ausführung des Bauwerks ist grundsätzlich in Ordnung.
- Die Kapazität ist jedoch bereits für ein 30-jährliches Ereignis nicht ausreichend, kann hier aber noch mehr oder weniger schadlos abgeführt werden.
- Bei selteneren Ereignissen kann der Sammler rechtsseitig durch Ausbruch oberhalb umflossen werden. Der Geschieberückhalt ist aber trotzdem bedeutend.
- Der Geschiebesammler ist somit für die Gefahrenbeurteilung relevant.

### 6.3 Massnahmenbeurteilung

Die verfügbaren Grundlagen bezüglich Prozesse und Szenarien sind aufgrund der 2007 erfolgten Gefahrenbeurteilung für die Gefahrenkarte weitgehend in Kap. 6.1 aufgeführt.

Tab. 6.5: Prozesse und Gefährdungsbilder bzw. Einwirkungen entsprechend Tab. 4.2 in Kap. 4.2.2 konkretisiert für die Situation am Spissibach.

Prozess	Gefährdungsbilder / Einwirkungen	Bemerkungen
Alterung	- Ermüdung, Verlust der Materialfestigkeit für die nächsten 50 Jahre kaum relevant	qualitative Beurteilung
Baugrund	- Instabilität / Setzung unwahrscheinlich, bisher keine Anzeichen, - Statischer Grundbruch unwahrscheinlich	qualitative Beurteilung
≥ ca. HQ <sub>30</sub>	- Unterspülen des niedrigen Einlaufbauwerkes (Messstelle des Geogr. Inst. d. Univ. Bern) möglich, jedoch unproblematisch - Auffüllen des Geschiebesammlers möglich - Durchströmen der Durchflussöffnung oder Abfluss via Abflusssektion schadlos möglich - Das Geschiebe kann mehr oder weniger schadlos abgeführt werden	
≥ ca. HQ <sub>100</sub> und G <sub>100</sub> (Murgang) mit Schwemmholz	zusätzlich Überlastfall! - Stoss auf Abschlussbauwerk möglich - Umfliessen des Sammlers durch Ausbruch oberhalb möglich - Unterspülen Auslaufbauwerkes, Kolk nicht auszuschliessen - Erosion im Unterlauf durch Querwerke bzw. Schale begrenzt, dagegen Ausuferung und Erosion im Gelände zu erwarten	Schätzung ohne rechnerischen Nachweis  - positive Wirkung des Geschiebesammlers (teilweiser Geschieberückhalt) ist nicht beeinträchtigt - keine negativen Auswirkungen des Geschiebesammlers
≥ ca. HQ <sub>300</sub> und G <sub>300</sub> (Murgang) mit Schwemmholz	klarer Überlastfall! zusätzlich - nach Volleinstau Überströmen des rechtseitigen Abschlussdammes, der Zufahrtstrasse zum Geschiebesammler und des Umgeländes möglich - örtliche luftseitige Erosion möglich	Schätzung ohne rechnerischen Nachweis  - positive Wirkung des Geschiebesammlers (teilweiser Geschieberückhalt) ist auch in diesem Überlastfall nicht beeinträchtigt

Prozess	Gefährdungsbilder / Einwirkungen	Bemerkungen
	- Böschungsinstabilität durch innere Erosion oder durch hydraulischen Grundbruch eher unwahrscheinlich	- keine negativen Auswirkungen des Geschiebesammlers; allenfalls ein verstärkte Lenkung des Abflusses und Geschiebes in den rechtsseitigen Sektor des Schuttkegels (Richtung Eybach)

Betreffend Abmessung, Ausführung, Zustand und Bewährung des Geschiebesammlers und im Besonderen des Abschlussbauwerkes lassen sich somit folgende Aussagen machen:

- Das Volumen Geschiebesammlers ist ungenügend.
- Die Abmessungen des Abschlussbauwerkes sind generell gut gewählt.
- Die Dimensionierung gegenüber aufprallenden Blöcken (Murstoss) dürfte genügen.
- Betreffend Schwemmholz sind keine speziellen Vorkehrungen getroffen worden.
- Der Zustand des Abschlussbauwerkes ist gut.
- Der Geschiebesammler wird regelmässig geleert.

#### Resultat der Massnahmenbeurteilung

- Konzept, Anordnung und Ausführung des Bauwerkes sind grundsätzlich in Ordnung. Wie weit das Fehlen einer Auffangvorrichtung für Schwemmholz nachteilig ist, ist schwer zu beurteilen.
- Die Ablagerungskapazität des Geschiebesammlers ist bereits für ein 30-jährliches Ereignis nicht ausreichend, kann hier aber noch mehr oder weniger schadlos abgeführt werden.
- Das Abschlussbauwerk ist in seiner Dimensionierung zweckmässig und genügend. Im Überlastfall sind keine nachteiligen Wirkungen zu erwarten.
- Die Massnahmen sind zuverlässig, wenn von der wesentlichen Einschränkung wegen zu geringer Kapazität abgesehen wird.

#### 6.4 Wirkungsbeurteilung

Für die Wirkungsbeurteilung muss auf den speziellen Szenarien gemäss Tab. 6.4 basiert werden.

Bei grossen Ereignissen fliesst grosser Teil über Sperrenkrone

Es kann davon ausgegangen werden, dass im Sammler 5000 bis 6000 m<sup>3</sup> Geschiebe abgelagert werden. Ein Teil der restlichen Mengen passiert im günstigen Fall den Geschiebesammler dosiert durch die Öffnungen zwischen den Balken. Da jedoch mit einem Verstopfen der Öffnungen zu rechnen ist wird der grössere Teil des überschüssigen Geschiebes über die Sperrenkrone verfrachtet werden (bei ca. 30-jährlichen Ereignissen via Abflussektion).

Keine nachteilige Wirkung bei Überlastfall

Bei grösseren Ereignissen (ca.  $\geq$  100-jährlich) muss somit mit einer Überlastung gerechnet werden. Die Beurteilung ergibt, dass der Überlastfall von der Anlage so bewältigt wird, dass gegenüber einer fiktiven Situation ohne Massnahme keine nachteiligen Wirkungen zu erwarten sind. Im Gegenteil: Dank dem partiellen Geschieberückhalt sind die Auswirkungen im Gebiet unterhalb des Geschiebesammlers gegenüber einem Zustand ohne Geschiebesammler reduziert.

## Intensitätskarte

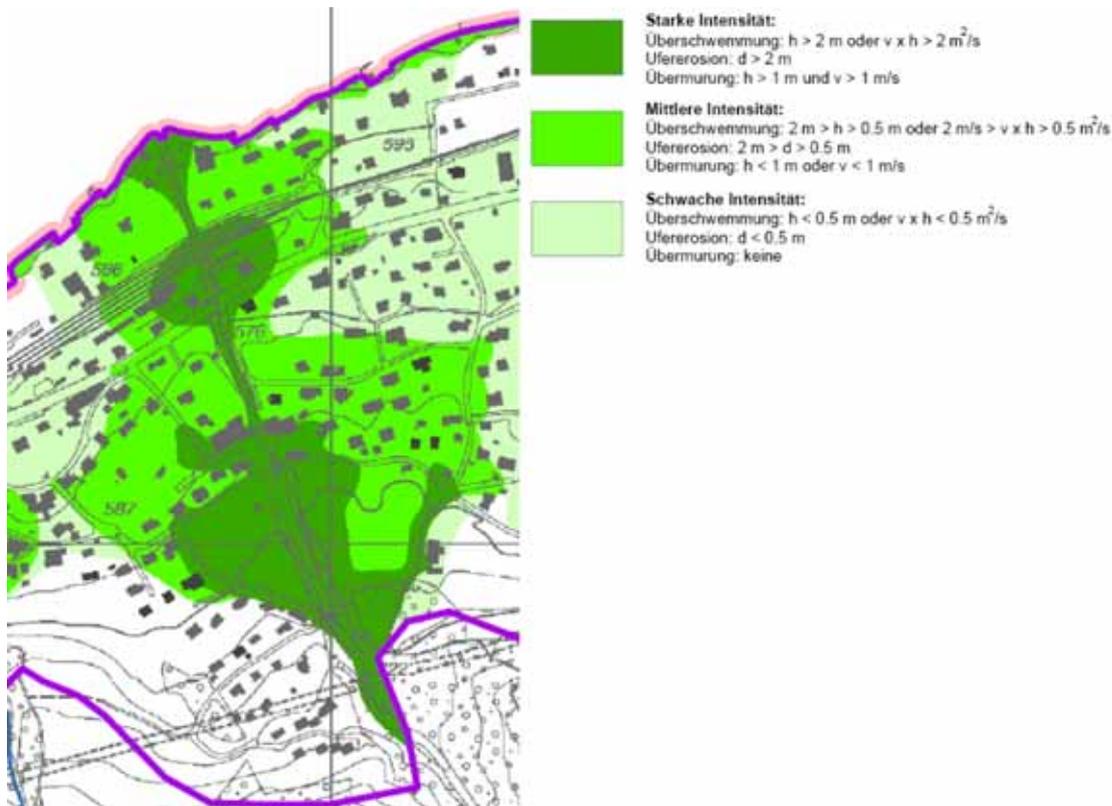


Abb. 6.6: Intensitätskarte für 300-jährliche Ereignisse des Spissibachs (aus Geo7, 2007).

## 6.5 Empfehlungen zur Umsetzung

Das Ablagerungsvolumen von 5000 bis 6000 m<sup>3</sup> des Geschiebesammlers darf berücksichtigt werden.

Dies ist bei der Ausarbeitung des Entwurfs zu den Intensitätskarte (Abb. 6.6) erfolgt.

## 7. Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Beatrice Herzog und Eva Frick für die kritische Durchsicht des Berichtes. Für das Fallbeispiel Wilerlibach geht der Dank an das Ingenieurbüro DUWAPLAN und das Tiefbauamt des Kantons UR, für das Fallbeispiel Spissibach an die Geo7, den Oberingenieurkreis I des Kantons Bern sowie speziell an die Schwellenkorporation Leissigen.

## Literatur

- AfW GR (Amt für Wald Graubünden), 2006: Handbuch zur Kontrolle und zum Unterhalt forstlicher Infrastruktur. [www.wald.gr.ch/aufgaben/index-kontrolle.htm](http://www.wald.gr.ch/aufgaben/index-kontrolle.htm)
- ASF, Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau (Hrsg.), 1973: Dimensionierung von Wildbachsperren aus Beton und Stahlbeton. Richtlinie 1973, Bern, Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale.
- Bezzola G.R., 2001: Schwemmholz – Rückhalt oder Weiterleitung? Wasser-Energie-Luft, 93. Jg., Nr. 9/10: 247-252.
- Böll, A., 1997: Wildbach- und Hangverbau: Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL Birmensdorf.
- Böll, A., Gerber, W., Graf, F., Rickli, Ch., 1999: Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau. Birmensdorf, Eidg. Forsch.anst. WSL, 60 S.
- Böll, A., 2003: Überwachung und Unterhalt von Schutzmassnahmen. Kursunterlagen des Weiterbildungskurses 2003 in Gams SG. Forstliche Arbeitsgruppe Naturgefahren (FAN), 28 S.
- BWG, 2003: Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. Bundesamt für Wasser und Geologie, Berichte des BWG, Serie Wasser, Bern, 118 S.
- DIN 19663 (1985): Wildbachverbauung: Begriffe, Planung und Bau. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im Deutschen Institut für Normung (DIN), Berlin.
- Eicher W., 2001: Verlegung des Dorfbaches Sachseln. FAN-Agenda 1/2001.
- Frehner M., Wasser B., Schwitter R., 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NAIS). Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Frick, E., 2007: Spissibach Leissigen, Allgemeine Angaben zum SEDEX Workshop vom 15.5.07. Geogr. Inst. d. Univ. Bern.
- Frick, E., Hiller, R., Kienholz, H., Romang, H., 2008a: SEDEX - Sediments and Experts – Eine praxisorientierte Methodik zur Beurteilung der Feststofflieferung in Wildbächen. Tiefbauamt des Kantons Bern und Geogr. Inst. d. Univ. Bern.
- Frick E., Kienholz H., Roth H., 2008b: SEDEX – eine Methodik zur Beurteilung zur gut dokumentierten Abschätzung der Feststofflieferung in Wildbächen. In: Wasser Energie Luft, 100. Jg., H2:131-136, Baden.
- Geo7, 2007: Gefahrenkarte Leissigen, Entwurf zum Bericht. Im Auftrag der Einwohnergemeinde Leissigen, begleitet durch den Oberingenieurkreis I des TBA Kanton Bern.
- GHO, Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie (Hrsg.), 1996: Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen, Landeshydr. -geol., Mitt. 4, 186 S.
- Jäggi M., 2001: Natürlicher Geschieberückhalt und Geschiebedosierung. Wasser, Energie, Luft, 93. Jg., Nr. 5/6: 133-139.
- Jenni A., Reiterer A., 2002: Bewirtschaftung von Murbächen durch Absturzbauwerke. FAN-Agenda 2/2002. Zur Publikation vorgesehen in der Zeitschrift Wildbach- und Lawinenverbau.
- Ingenieurbüro DUWAPLAN, Altdorf – Amt für Forst und Jagd Kt. Uri, 2004/2005: Verbauung Wilerlibach Technischer Bericht / Baudokumentation der Verbauung Wilerlibach.
- Kienholz H., Keller H.M., Ammann W., Weingartner R., Germann P.F., Hegg C., Mani P., Rickenmann D., 1998: Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Zürich, vdf Hochschulverlag.

- Kölla, E., 1987: Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Versuchsanstalt. Wasserbau Hydrologie und Glaziologie VAW 163 S.
- Leitgeb M., 2002: Event documentation – useful tool for risk analysis and proper risk management. International Congress Interpraevent 2002 in the Pacific Rim, Band 1: 325-334. Tokyo: Nissei Eblo Co. Ltd.
- Liener S., 2000: Zur Feststofflieferung in Wildbächen. Geographica Bernensia, G64, Geogr. Inst. d. Univ. Bern
- Noetzli, K. P., Frei, M., Böll, A., 2002: Tragsicherheit von Holzkonstruktionen im Wildbachverbau – Ein Fallbeispiel 60-jähriger Wildbachsperrern. Schweiz. Z. Forstwes. 10: 377-384
- Petrascheck A., Berwert-Lopes J., Mani P., Zarn B., 1998: Ereignisdokumentation Sachseln. Studienbericht Nr. 8/1998 des Bundesamtes für Wasserwirtschaft. Bern: EDMZ.
- Rickenmann D., 1990: Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitt. der VAW Nr. 103, Zürich.
- Rickenmann, D., 1995: Beurteilung von Murgängen. Schweiz. Ing. Archit. 113, 48: 1104-1108.
- Rickenmann, D., 1999: Empirical relationships for debris flows. Natural Hazards, Vol. 19: 47-77.
- Romang, H., 2004: Wirksamkeit und Kosten von Wildbach-Schutzmassnahmen. Geographica Bernensia, G 73, 211 pp., Geogr. Inst. d. Univ., Bern ISBN 3-906151-76-X
- Romang H., Margreth S., 2007: Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung. Umsetzung der Strategie Naturgefahren Schweiz: Projekt A 3. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, Bern.
- Roth M., Bezzola G.R., Hunzinger L., Fäh R., Minor H.-E., 2000: Risikountersuchung an einem Wildbach bei Luzern (Schweiz). Internationales Symposium Interpraevent 2000, Band 2: 293-304. Villach: Kreiner Druck.
- Smart, G., Jäggi, M., 1983: Sediment transport on steep slopes. Mitt. der VAW Nr. 64, Zürich.
- Speerli, J., Grob, M., Künzi, R., Wyss, P., Zimmermann, M., Pozzi, A., 2008: Glyssibach Brienz, Schweiz: Hochwasser und Murgangereignis vom 22./23. August 2005. In: Tagungsbeilagen Interpraevent 2008, Bd. 1: 489-500 Klagenfurt
- Spissibach, 1996: Projekt IV für die Verbauung der Wildbäche in der Gemeinde Leissigen. Projektverfasser Kissling+Zbinden, Bern, im Auftrag der Schwellenkorporation Leissigen.
- VanDine D.F., 1996: Debris flow control structures for forest engineering. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C. Work. Pap. 22.
- Zeller, J., Röthlisberger, G., 1987: Lebensdauer von Holzsperrern am Beispiel der Gamser Wildbäche. Ber. Eidg. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 291, 33 S.
- Zollinger F., 1983: Die Vorgänge in einem Geschiebeablagungsplatz. Diss. ETH Nr. 7419. Zürich.





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

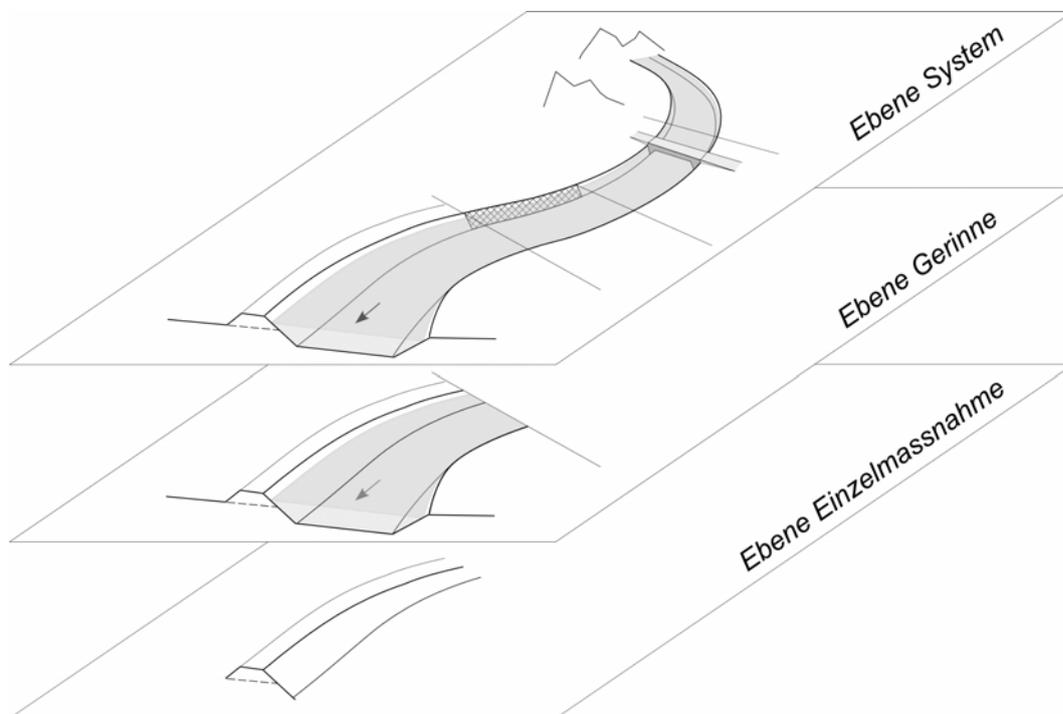
5.3	Einhaltung der Grundsätze	23
5.4	Grobbeurteilung (Schritt 1)	24
5.5	Gerinne- und Massnahmenbeurteilung (Schritt 2)	26
5.5.1	Grundlagen Prozesse	26
5.5.2	Grundlagen Gerinne und Massnahme	27
5.5.3	Gefährdungsbilder	27
5.5.4	Einwirkung	29
5.5.5	Widerstand	29
5.5.6	Tragsicherheit, Kapazität/Gebrauchstauglichkeit 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.

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.

Abgrenzung



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 Einzugsgebiet, 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.

<b>Massnahmen zur Steuerung der Kontinuität von Wasser, Sedimenten und Schwimmstoffen</b>			
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
Rückhalt von Schwimmstoffen	Flussaufweitung	ja	
	forstliche Massnahmen im Einzugsgebiet	bedingt, wenn der Rückhalt quantifizierbar ist	
	forstliche Massnahmen im Einzugsgebiet	bedingt, wenn der Rückhalt quantifizierbar ist	
Gewährleisten der Abflusskapazität	Holzrechen u. ä.	ja	
	Eiswehr	ja	
	Gewährleisten der Transportkapazität für Sedimente	Hochwasserschutzdamm, -mauer	ja
		Gerinneverbreiterung	ja
		Sohlenabtiefung	ja
Ufergestaltung		ja	
Gewährleisten der Transportkapazität für Schwimmstoffe	Brücke mit Druckabfluss	ja	
	Hochwasserschutzdamm, -mauer	ja	
	Sohlenpflasterung	ja	
	Gerinneverengung	ja	
Um- und Ableiten von Wasser	Ufergestaltung	ja	
	Brücke mit Druckabfluss	ja	
	Brückenverschalung	ja	
Um- und Ableiten von Sedimenten	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	

<b>Massnahmen zur Stabilisierung des Gerinnes</b>		
Massnahme	Einzelmassnahme	Berücksichtigung bei der Gefahrenbeurteilung
Stabilisierung der Sohlenlage	Schwelle	ja
	Rampe	ja
	Sohlenpflasterung	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.

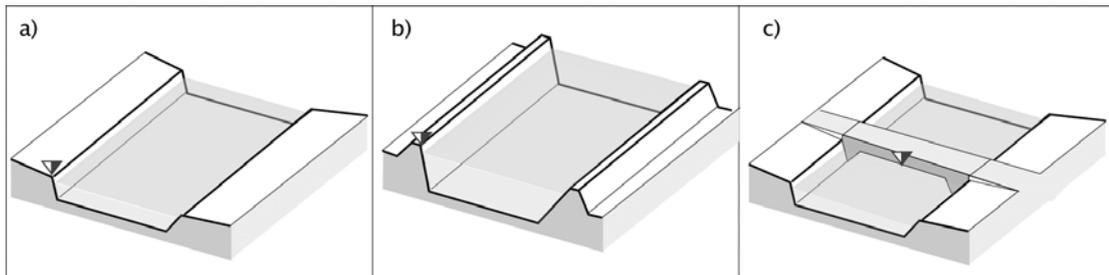


Abb. 3.1: Vertikale Begrenzung von Gerinnen: a) Terrain bei einem eingeschnittenen Gerinne, b) Dammoberkante, c) Brückenunterkante in einem überdeckten Gerinne.

#### 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 Dammbüche 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 "Gewährleistung 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

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 Damfstrecken wird der Zustand des Dammes grob beurteilt (Setzungen, bekannte undichte Stellen etc.).

Verfügbarkeit, Zustand

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.

Prozesskenntnisse  
Gefahrensituation

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).

Relevanz

Eine Beurteilung mit geringem Tiefgang hinsichtlich der Abflusskapazität genügt, wenn

Bearbeitungstiefe

- 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

Die hydrologischen Szenarien, auch Grundszenarien genannt, umfassen:

Grundszenarien

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

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

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

- Schwemmh Holz unbedeutend
- Schwemmh Holz mengen gering
- Schwemmh Holz mengen gross

Schwemmh Holz steht hier stellvertretend für alle Arten von Schwimmstoffen und Treibgut.

### 3.3.3 Grundlagen Gerinne und Massnahme

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.

Ein Hochwasserschutzdamm wird mit folgenden Parametern beschrieben:

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

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).

Grundlagen  
Gerinnegeometrie

Grundlagen  
Hochwasserschutzdamm

Grundlagen  
Überdeckung

### 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 Verkläuserung (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 einjährigen 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 Verkläuserung 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, Foundationstiefe
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, Foundationstiefe
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.

<b>G1 Abflusskapazität erschöpft durch Erreichen der vertikalen Begrenzung.</b>	
Kapazität/Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn $z_b + h + \alpha \frac{v^2}{2g} \leq OK \text{ Gerinne}$ bzw. $z_b + h + \frac{v^2}{2g} \leq OK \text{ Brücke}$ bei Abfluss unter Druck	erfüllt, wenn längerfristig <ul style="list-style-type: none"> <li>- keine massgeblichen Sohlenhebungen zu erwarten sind<sup>1</sup></li> <li>- keine Verminderung der Abflusskapazität durch Vegetation zu erwarten ist</li> </ul>
<b>G2 Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Versagen der Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm/-mauer</b>	
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)

<sup>1</sup> Eine Sohlenhebung wird dann als massgeblich bezeichnet, wenn dadurch das Kriterium der Tragsicherheit für das entsprechende Szenario nicht mehr erfüllt wird.

<b>G3 Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Verklausung des Querschnitts</b>	
Kapazität/Gebrauchstauglichkeit	Dauerhaftigkeit
<p>erfüllt, wenn die kleinste Abmessung (<math>H</math>, <math>B</math> oder <math>D</math>) <math>&gt; 1</math> m und</p> $z_b + h + \frac{v^2}{2g} \leq UK \text{ Brücke}$ <p>oder</p> $z_b + h + 1m \leq UK \text{ Brücke}$ <p>oder</p> $z_b + h + \alpha \frac{v^2}{2g} \leq UK \text{ Brücke}$ <p>und</p> <p>Schwemmholaufkommen gering</p> <p>Brücken unter Druckabfluss und Brücken mit Pfeilern müssen im Einzelfall beurteilt werden.</p>	<p>erfüllt, wenn längerfristig</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- keine massgeblichen Sohlenhebungen zu erwarten sind</li> <li>- keine Verminderung der Abflusskapazität durch Vegetation zu erwarten ist</li> </ul>
<p>mit <math>z_b</math> = Sohlenkote, <math>h</math> = Abflusstiefe, <math>v</math> = Fließgeschwindigkeit, <math>g</math> = Erdbeschleunigung, <math>H</math> = lichte Höhe eines Brückenquerschnittes, <math>B</math> = Gerinnebreite, <math>D</math> = Durchmesser Rohrdurchlass, <math>\alpha</math> = Faktor zwischen 0 und 1.</p>	

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

<b>D1 Überströmen und luftseitige Erosion</b>	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
<p>erfüllt, wenn</p> $z_b + h + \frac{v^2}{2g} \leq OK \text{ Dammkrone}$ <p>oder</p> <p>Erosionswiderstand Luftseite hoch</p> <p>oder</p> <p>Erosionswiderstand Luftseite mittel und luftseitige Böschungsneigung <math>\leq 1:10</math></p>	<p>erfüllt, wenn längerfristig</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- keine massgeblichen Sohlenhebungen zu erwarten sind</li> <li>- keine Verminderung der Abflusskapazität durch Vegetation zu erwarten ist</li> <li>- keine Setzungen im Dammbau zu erwarten sind</li> </ul>
<b>D2 Wasserseitige direkte Erosion</b>	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
<p>erfüllt, wenn die Strömungsbelastung auf der Wasserseite geringer ist als der Erosionswiderstand</p>	<p>erfüllt, wenn längerfristig</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- keine grösseren Sohlenhebungen zu erwarten sind</li> <li>- keine Strömungskonzentration durch Vegetation zu erwarten ist</li> <li>- die Stabilität der Oberfläche nicht durch Viehtritt vermindert wird</li> </ul>

<b>D3 Wasserseitige Instabilität durch Kolkbildung oder Sohlenerosion</b>	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn $z_b >$ Foundation von Damm bzw. Mauer	erfüllt, wenn längerfristig - keine grösseren Sohlenerosionen zu erwarten sind - keine Strömungskonzentration durch Vegetation zu erwarten ist
<b>D4 Luftseitige Böschungsinstabilität</b>	
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
<b>D5 Bruch durch innere Erosion</b>	
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
<b>D6 Bruch durch hydraulischen Grundbruch</b>	
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
<b>D7 Bruch durch Erdbeben</b>	
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.

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

<b>B3 Abheben der Brückenplatte durch Auftrieb</b>	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn Gewichtskraft der Brückenplatte > Auftriebskraft oder wenn die Verankerungskräfte > Auftriebskräfte	
<b>B4 Abschieben der Brückenplatte durch Wasserdruck</b>	
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.

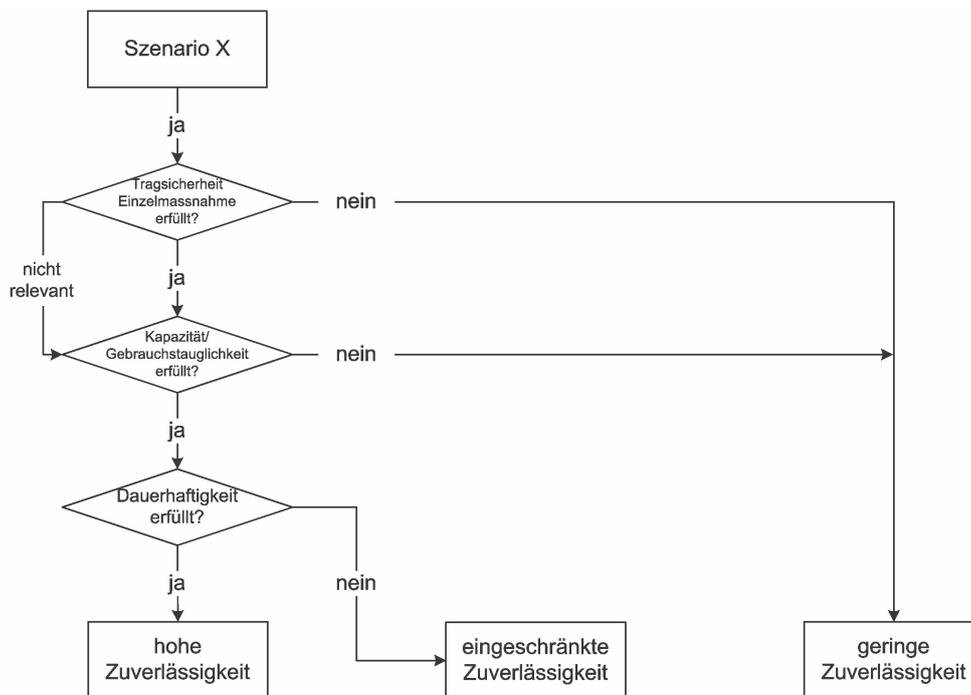


Abb. 3.2: Bestimmung der Zuverlässigkeit aufgrund von Tragsicherheit, Kapazität / Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

## 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 Grund-szenarios abweichen.

Tab. 3.8: Wirkungsszenarien der Gefährdungsbilder.

Gefährdungsbild	Wirkungsszenarien
G1 Abflusskapazität erschöpft durch Erreichen der vertikalen Begrenzung	<p>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.</p> <p>Bei hoher und bei eingeschränkter Zuverlässigkeit wird keine Entlastung angenommen.</p> <p>Das Wirkungsszenario hat die Eintretenswahrscheinlichkeit des Grund-szenarios.</p>
G2 Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Versagen der Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm/-mauer	<p>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.</p> <p>Bei hoher Zuverlässigkeit wird keine Breschenbildung angenommen. Die Entlastung durch Überströmen ohne Dammbruch (Gefährdungsbild G1) bleibt vorbehalten.</p> <p>Bei geringer Zuverlässigkeit hat das Wirkungsszenario die Eintretenswahrscheinlichkeit des Grund-szenarios. Bei eingeschränkter Zuverlässigkeit wird dem Wirkungsszenario eine um eine Klasse geringere Eintretenswahrscheinlichkeit zugeordnet.</p>
G3 Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Verklausung des Querschnitts	<p>Mit einer Verklausung reduziert sich der Abflussquerschnitt unter einer Brücke/in einem Durchlass.</p> <p>Für Gerinne mit einer Querschnittsfläche bis <math>30 \text{ m}^2</math> können für das Ausmass der Querschnittsreduktion folgende Szenarien definiert werden:</p> <p>Reduktion des Abflussquerschnittes um 100 % (vollständige Verklausung), wenn</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kleinste Abmessung des Querschnitts <math>&lt; 1 \text{ m}</math> oder Schwemmholaufkommen gering und Anpassung der Sohle durch Auskolken nicht möglich</li> <li>- Schwemmholzmenge gross</li> </ul> <p>Reduktion des Abflussquerschnittes um 50 % (Teilverklausung), wenn</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Schwemmholaufkommen gering und Anpassung der Sohle durch Auskolken möglich</li> </ul>

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

### 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).

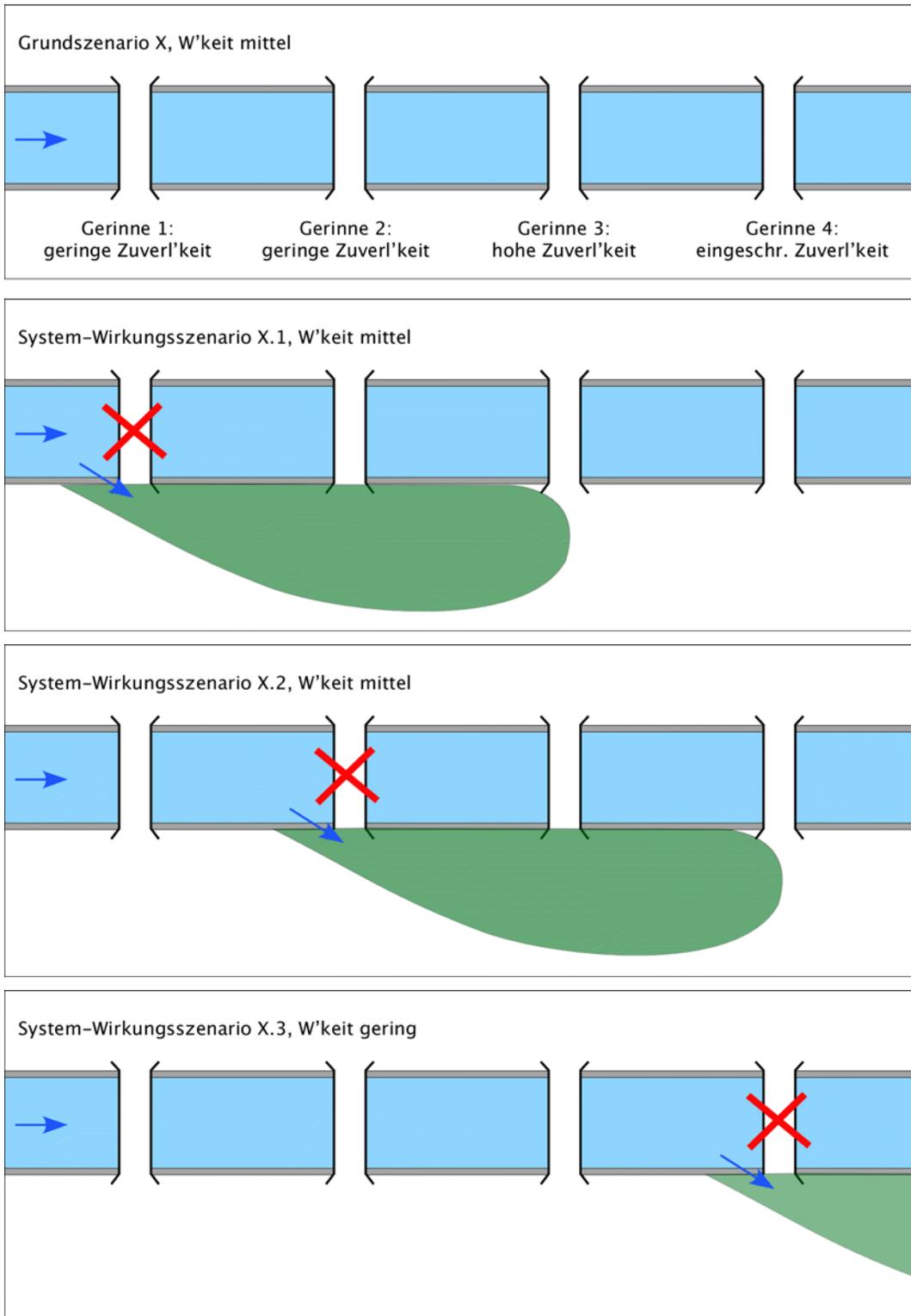


Abb. 3.3: Systemwirkungsszenarien am Beispiel einer Abfolge von Gerinnen mit Brücken.

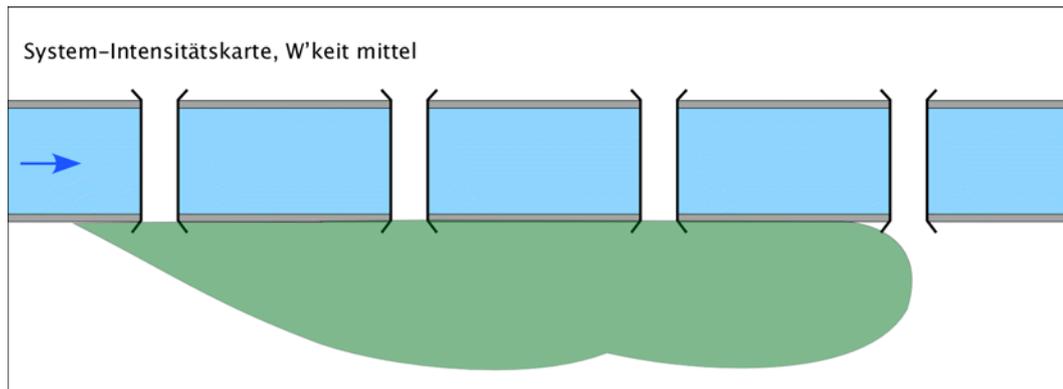


Abb. 3.4: Intensitätskarte am Beispiel für die Wahrscheinlichkeit mittel.

### 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,  
Geschiebetransport-  
modell

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

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.

Überflutungsflächen

### 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:

- Die Abfluss- und Geschiebetransportrechnung wird mit Hilfe einer Normalabflussrechnung durchgeführt.
- Der Querschnitt für eine Normalabflussrechnung kann in einem lokalen Koordinatensystem erfasst sein. Das Längengefälle im Querschnitt muss mit besonderer Sorgfalt ermittelt werden.
- 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.
- 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.
- Die von Überflutung und Übersarung betroffenen Flächen werden im Feld ausgeschieden und die Intensitäten gutachterlich definiert.

Normalabflussrechnung

Gerinnegeometrie für Normalabflussrechnung

Pauschale Beurteilung der Kapazität

Enge Durchlässe

Überflutungsflächen

## 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 Bühnen oder Leitwerken bestehen (Abb. 4.1).

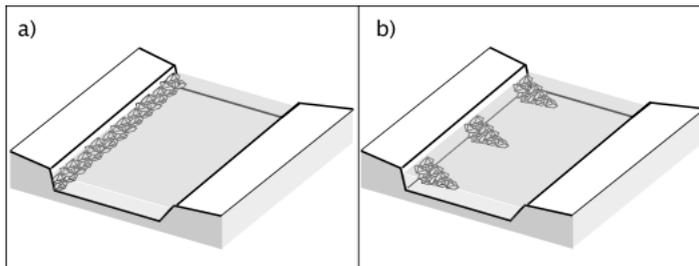


Abb. 4.1: Ufersicherung: a) mit Längsverbau, b) mit Querwerken.

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

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

Grundszenarien

- 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

Das Gerinne wird mit folgenden Parametern beschrieben:

Grundlage  
Gerinnegeometrie

- 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.

Die Einzelmassnahme Längsverbau wird mit folgenden Parametern beschrieben:

Grundlagen  
Längsverbau

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

Die Einzelmassnahme Bühnenverbau wird mit folgenden Parametern beschrieben:

Grundlagen Bühnen

- Geometrie der Bühne (Länge, Foundationstiefe, Verbauungshöhe, Neigung)
- Anordnung der Bühnen (Abstand zwischen zwei Bühnen, 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 Bühnenkopf	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 Kolkiefen

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 Kolkiefen 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.

<b>U1 Erosion durch direkten Strömungsangriff</b>	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn die Strömungsbelastung geringer ist als der Erosionswiderstand	erfüllt, wenn <ul style="list-style-type: none"> <li>- das Ufer mit dauerhaftem Material gesichert ist (Blöcke) oder Holzverbauungen einer konstanten Feuchte ausgesetzt sind</li> <li>- längerfristig keine grösseren Sohlenerosionen zu erwarten sind, welche zu einer Deformation und Schwächung der Verbauung führen</li> </ul>
<b>U2 Instabilität durch Kolkbildung oder Sohlenerosion</b>	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn $z_b >$ Fundation der Ufersicherung	erfüllt, wenn längerfristig <ul style="list-style-type: none"> <li>- das Ufer mit dauerhaftem Material gesichert ist (Blöcke) oder Holzverbauungen einer konstanten Feuchte ausgesetzt sind</li> <li>- keine grösseren Sohlenerosionen zu erwarten sind</li> <li>- keine Strömungskonzentration durch Vegetation zu erwarten ist</li> </ul>
<b>U3 Hinterspülen durch Überströmen</b>	
Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
erfüllt, wenn die Strömungsbelastung oberhalb bzw. hinter der Ufersicherung geringer ist als der Erosionswiderstand	erfüllt, wenn längerfristig <ul style="list-style-type: none"> <li>- keine massgeblichen Sohlenhebungen zu erwarten sind</li> <li>- keine Verminderung der Abflusskapazität durch Vegetation zu erwarten ist</li> </ul>

#### 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.

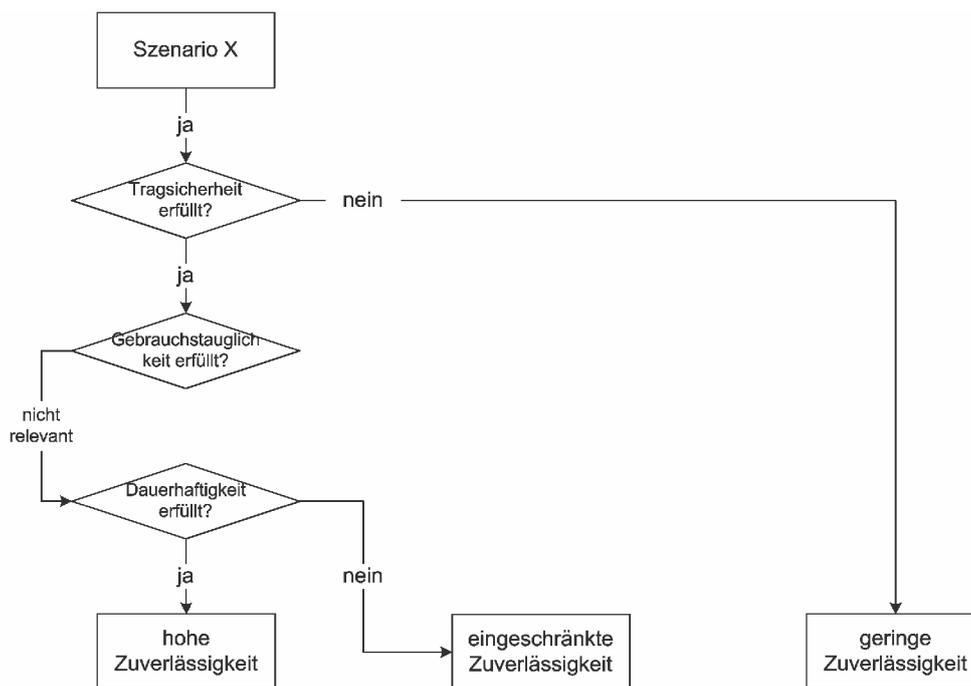


Abb. 4.2: Bestimmung der Zuverlässigkeit einer Ufersicherung aufgrund von Tragsicherheit und Dauerhaftigkeit.

#### 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 vornweg 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<sup>2</sup> 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 Dammbbruch 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: Dammbürche 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 Schwemmholaufkommen 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 <sub>30</sub>	400 m <sup>3</sup> /s	20'600 m <sup>3</sup>	~0	~0
HQ <sub>100</sub>	530 m <sup>3</sup> /s	33'800 m <sup>3</sup>	750 m <sup>3</sup>	3'000 m <sup>3</sup>
HQ <sub>300</sub>	650 m <sup>3</sup> /s	48'300 m <sup>3</sup>	1'100 m <sup>3</sup>	4'500 m <sup>3</sup>

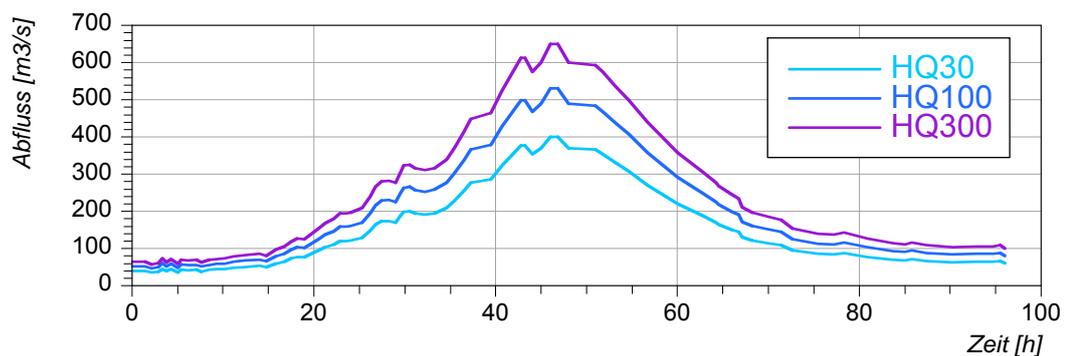


Abb. 5.3: Abflussganglinien der Grundszenarien.

### 5.5.2 Grundlagen Gerinne und Massnahme

Folgende Parameter beschreiben das Gerinne der Aare:

- 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  $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  für Buschwerk und  $36 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  für Grasland.
- Zusammensetzung und Aufbau der Sohle: Die Sohle ist alluvial. Die charakteristischen Korngrössen sind  $d_{90} = 16.9 \text{ cm}$  und  $d_m = 7.0 \text{ cm}$ .

Grundlage  
Gerinnegeometrie

Folgende Parameter beschreiben die Hochwasserschutzdämme entlang der Aare:

- 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.

Grundlagen  
Hochwasser-  
schutzdamm

### 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.

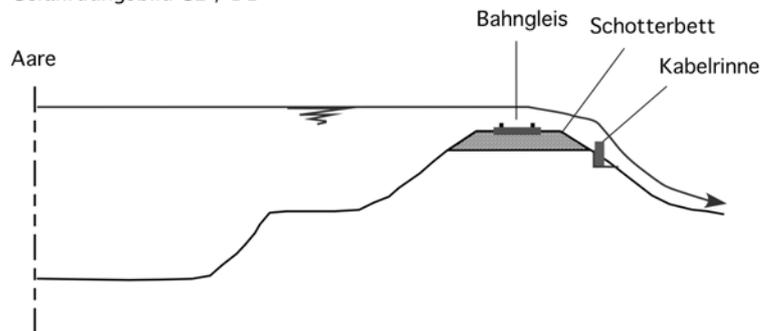
Für die Hochwasserschutzdämme entlang der Aare sind die Gefährdungsbilder

- 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.

Gefährdungsbild G2 / D1



Gefährdungsbild G2 / D1.2

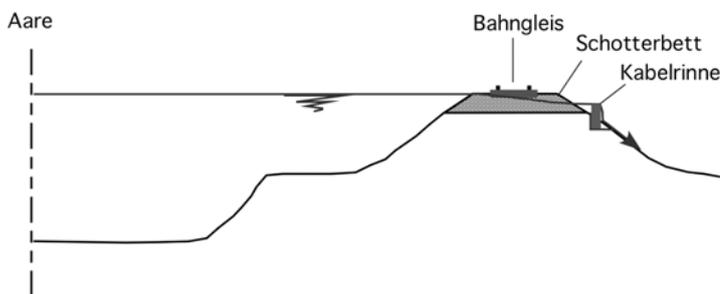


Abb. 5.4: Gefährdungsbilder für die Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm entlang der Aare.

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 Grob- beurteilung 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

Mit Hilfe einer 1d-Abflusssimulation werden die maximale Lage von Wasserspiegel und Energielinie für alle Grundscenarien 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 Knoten der Begrenzung des Gerinnes (Dammkrone bzw. Dammkrone abzüglich 60 cm Bahnschotter) verglichen (Abb. 5.5). Für die Berechnung wurden keine Entlastungen durch Überströmen oder Dammbbruch angenommen.

Belastungsgrößen

### 5.5.5 Widerstand

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

Vertikale Begrenzung

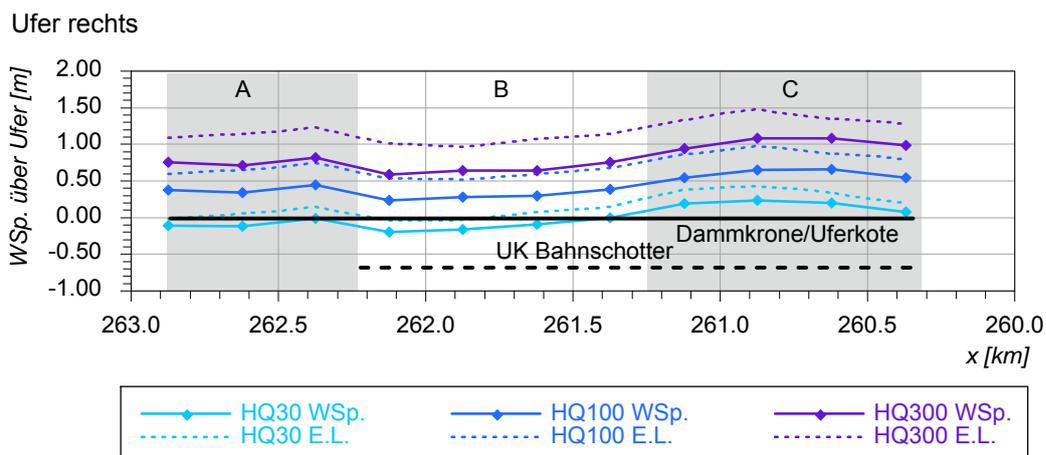
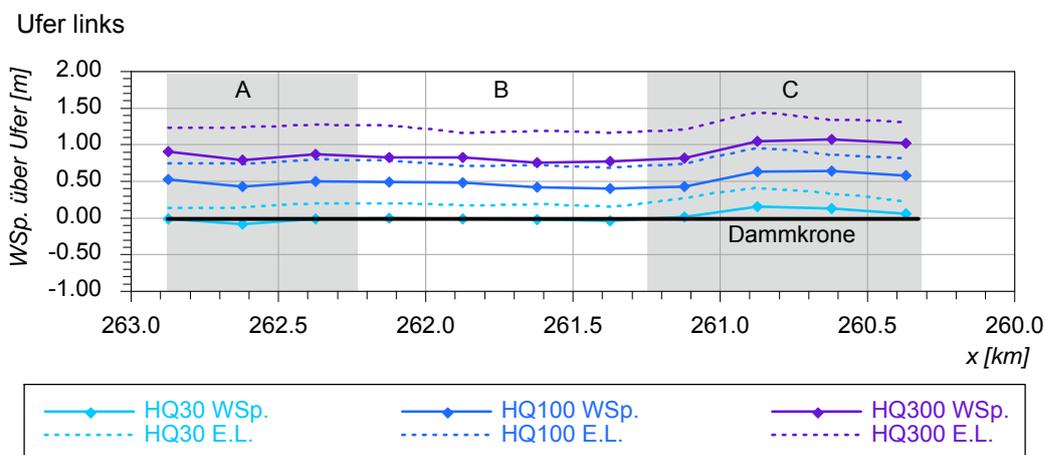


Abb. 5.5: Vergleich der maximalen Lage von Wasserspiegel und Energielinie mit den massgeblichen Knoten der Begrenzung des Gerinnes.

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 Grundzenario und jedes Gefährdungsbild einzeln betrachtet. Grundlage dazu bildet der Vergleich der Wasserspiegellage mit den massgeblichen Knoten, 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.

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

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

Die Dauerhaftigkeit der Massnahme ist erfüllt, weil

- die Sohlenlage durch regelmässige Kiesentnahme am Ausgang der Aare-schlucht und bei der Mündung der Aare in den Brienersee 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.

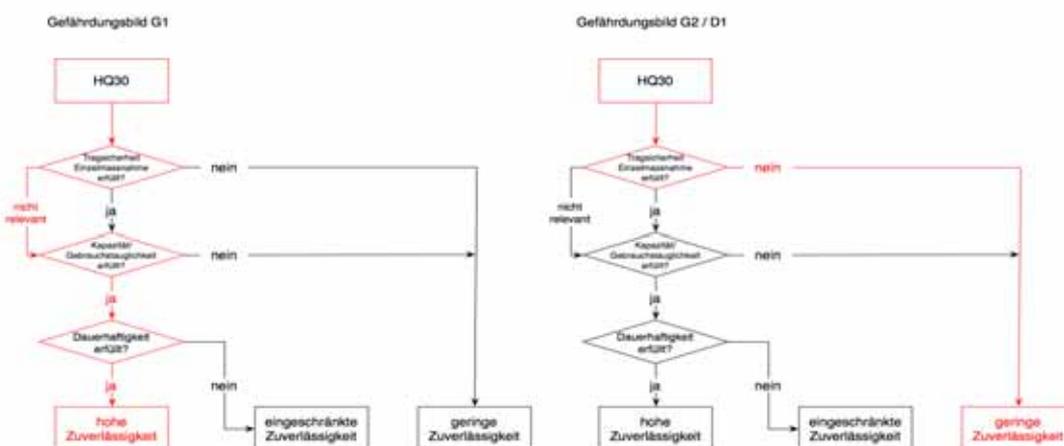


Abb. 5.6: Zuverlässigkeit des Gerinneabschnitts B, linkes Ufer in Bezug auf die zwei massgeblichen Gefährdungsbilder beim Szenario HQ300.

## 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 → Dammbbruch, 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 Dammbbruch 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.

Grundzenario	Gefährdungsbild	Wirkung links	Wirkung rechts
HQ <sub>30</sub>	G1	hohe Zuverlässigkeit: keine Wirkung	hohe Zuverlässigkeit: keine Wirkung
	G2 / D1	geringe Zuverlässigkeit: Dammbbruch	hohe Zuverlässigkeit: keine Wirkung
	G2 / D1.2	–	geringe Zuverlässigkeit: Dammbbruch
HQ <sub>100</sub>	G1	geringe Zuverlässigkeit: Überströmen des Dammes	geringe Zuverlässigkeit: Überströmen des Dammes
	G2 / D1	geringe Zuverlässigkeit: Dammbbruch	geringe Zuverlässigkeit: Dammbbruch
	G2 / D1.2	–	geringe Zuverlässigkeit: Dammbbruch
HQ <sub>300</sub>	G1	geringe Zuverlässigkeit: nur Überströmen	hohe Zuverlässigkeit: keine Wirkung
	G2 / D1	geringe Zuverlässigkeit: Dammbbruch	geringe Zuverlässigkeit: Dammbbruch
	G2 / D1.2	–	geringe Zuverlässigkeit: Dammbbruch

### 5.6.2 Wirkung des Systems

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:

Abfolge von  
Gerinneabschnitten

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

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

Tab. 5.4: Systemwirkungsszenarien als Kombinationen von Gerinnewirkungen.

Grund szenario	Systemwirkungsszenario	A	B	C
HQ30	HQ30_A	Dambruch links	keine Wirkung	Überströmen rechts
	HQ30_B	keine Wirkung	Dambruch rechts	Überströmen rechts
HQ100	HQ100_A	Dambruch links	Überströmen links	Überströmen rechts
	HQ100_B	Überströmen links	Dambruch rechts	Überströmen rechts
HQ300	HQ300_A	Dambruch links	Überströmen links	Überströmen rechts
	HQ300_B	Überströmen links	Dambruch 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 Dambruch im Gerinne B rechts stellvertretend für einen Dambruch im Gerinne C rechts. Die Intensitäten der Überflutung im Nahbereich der Bresche, welche für den Stellvertreter ermittelt werden, werden auf die flussabwärts liegende potenzielle Dambruchstelle im Gerinne C extrapoliert.

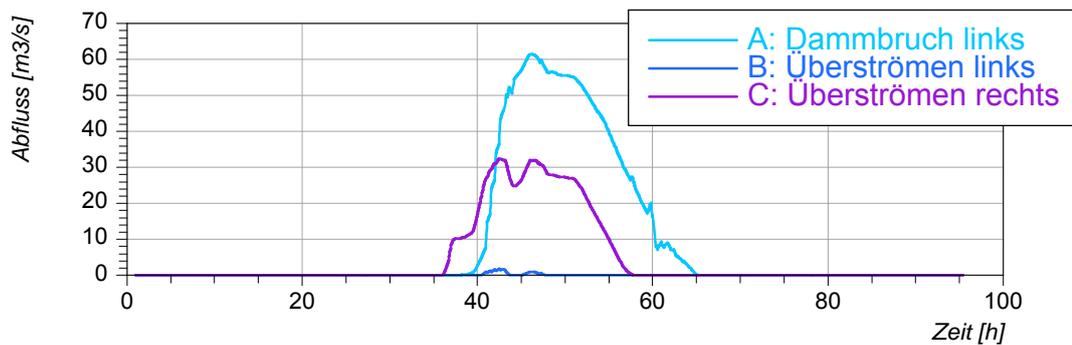


Abb. 5.7: Systemwirkungsszenario HQ100\_A. Entlastungsganglinien.

## 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 Wiederkehrperioden 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)

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.

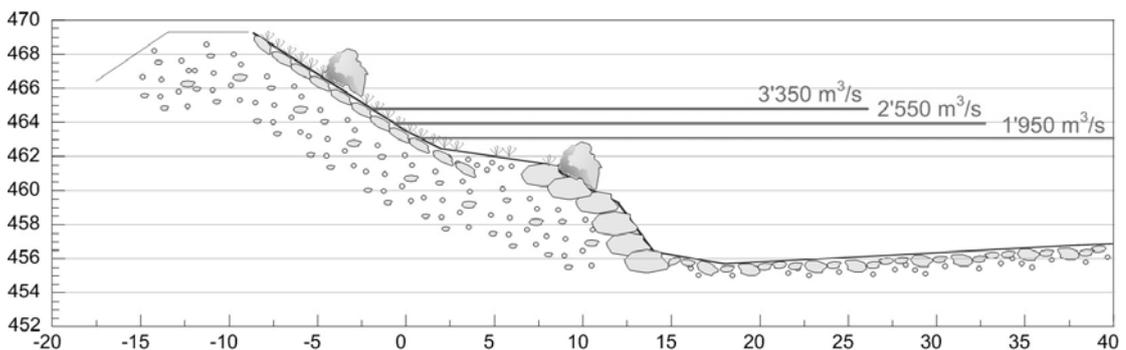


Abb. 6.1: Schematische Darstellung der Ufersicherung des Hochwasserschutzdammes des Alpenrheins zwischen Sargans und Ruggell.



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

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.

Verfügbarkeit, Zustand,  
Relevanz

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.

Bearbeitungstiefe

## 6.5 Gerinne- und Massnahmenbeurteilung (Schritt 2)

### 6.5.1 Grundlagen Prozesse

Der Alpenrhein entwässert bei Sargans ein Einzugsgebiet von rund 4'500 km<sup>2</sup>. 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.

Grundscenarien

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 Grundscenarien aufgeführt.

Das Schwemmholaufkommen ist für dieses Fallbeispiel nicht von Bedeutung.

Die in Tab. 6.1 und Abb. 6.3 aufgeführten Grundscenarien HQ<sub>30</sub>, HQ<sub>100</sub> und HQ<sub>300</sub> stehen stellvertretend für Ereignisse mit hoher, geringer und mittlerer Wahrscheinlichkeit.

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

Szenario	Abflussspitze	Geschiebedurchgang		
		km 35 Sargans	km 49.6 Buchs	km 60 Ruggell
HQ <sub>30</sub>	1'950 m <sup>3</sup> /s	60'000 m <sup>3</sup>	50'000 m <sup>3</sup>	20'000 m <sup>3</sup>
HQ <sub>100</sub>	2'550 m <sup>3</sup> /s	100'000 m <sup>3</sup>	80'000 m <sup>3</sup>	35'000 m <sup>3</sup>
HQ <sub>300</sub>	3'350 m <sup>3</sup> /s	165'000 m <sup>3</sup>	125'000 m <sup>3</sup>	60'500 m <sup>3</sup>

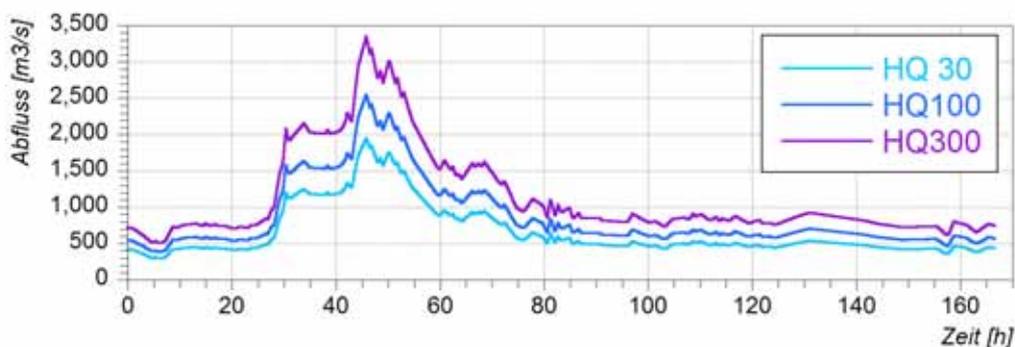


Abb. 6.3: Abflusganglinien der Grundscenarien.

### 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 Dammanstand 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<sup>1/3</sup>/s und für die Sohle auf rund 35 m<sup>1/3</sup>/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  $33^\circ$  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

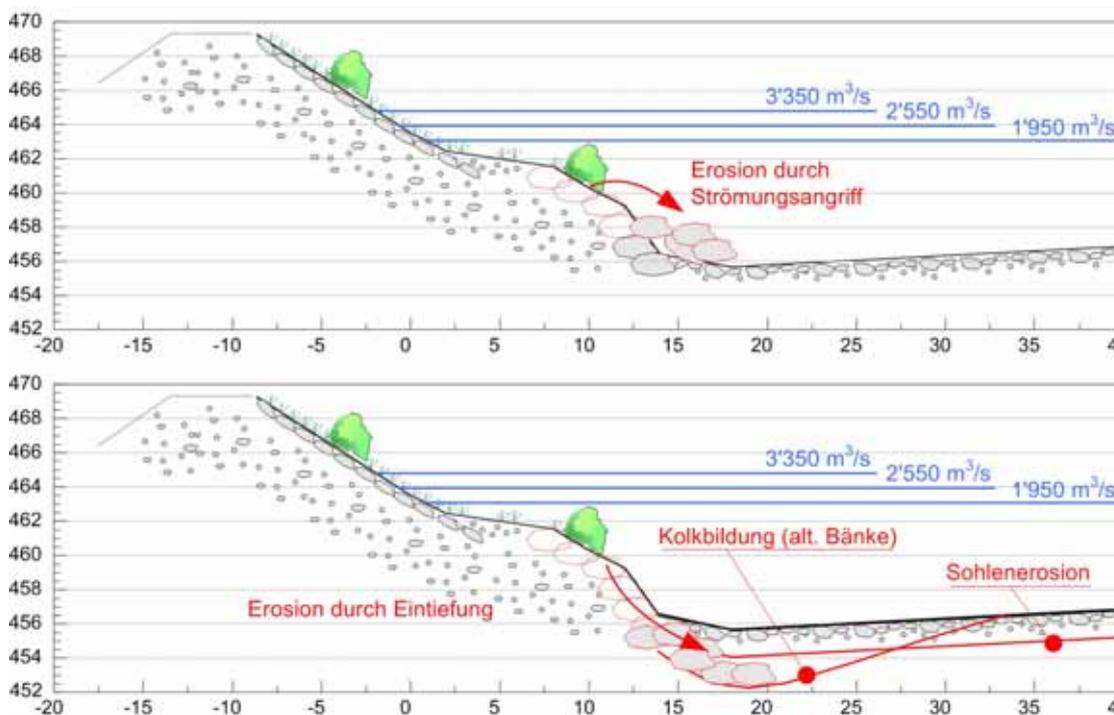


Abb. 6.4: Gefährdungsbilder für die Einzelmassnahme Hochwasserschutzdamm entlang der Aare.

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

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

Belastungsgrößen

### 6.5.4 Einwirkung

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 Kolk-tiefen der vorhandenen alternierenden Bänke und grossräumige Sohlenveränderungen. Abb. 6.6 zeigt, dass die Kolk-tiefen der alternierenden Bänke mit zunehmendem Abfluss abnehmen, weil diese Gerin-reformen abflachen respektive ausgewaschen werden. Die rechnerischen Kolk-tiefen von rund 3.5 m bei Abflüssen unter 500 m<sup>3</sup>/s werden durch die Querprofil-aufnahmen 1995/96 bestätigt, welche für den Untersuchungsabschnitt eine maximale Kolk-tiefe von 3.7 m ausweisen.

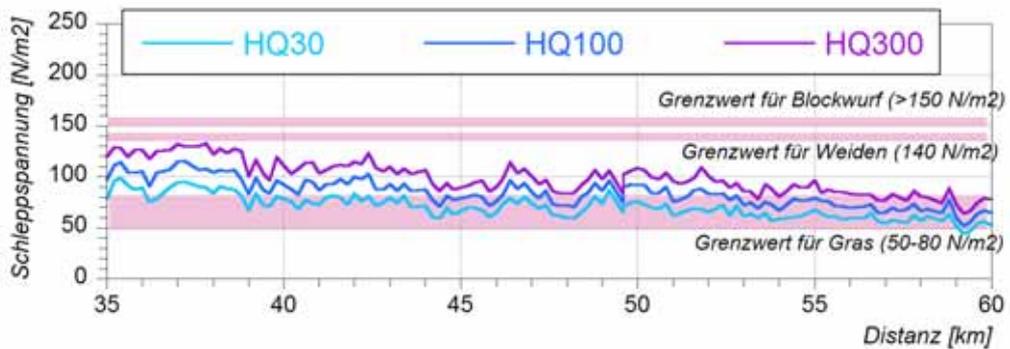


Abb. 6.5: Vergleich der maximalen Schleppspannung am Ufer mit Grenzwerten für Gras und Weiden. Letztere werden als eher konservative Werte betrachtet (Oplatka, 1998).

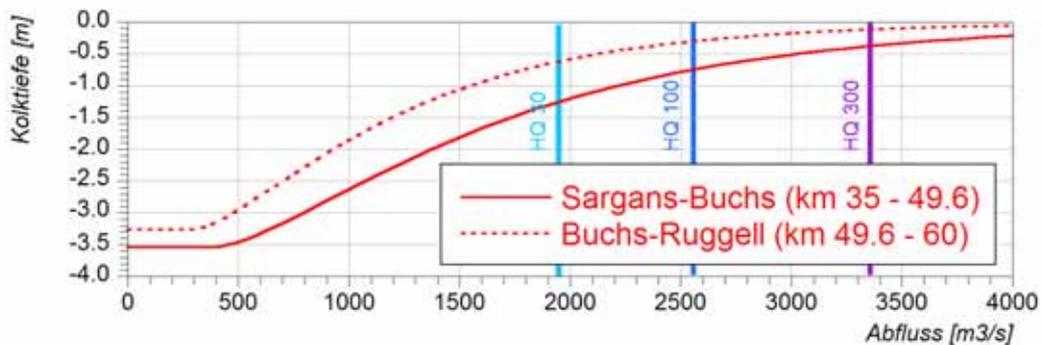


Abb. 6.6: Entwicklung der Kolk-tiefen von alternierenden Bänken zwischen Sargans und Ruggell bei zunehmendem Abfluss (Kolk-tiefe bezieht sich auf die mittlere Sohle).

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

Der Erosionswiderstand des am meisten beanspruchten Vorgrundes wird mit 150 N/m<sup>2</sup> 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.

Vertikale Begrenzung

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

Erosionswiderstand  
Dammböschung

### 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 Grundscenarien 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.

Grundscenario	Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
HQ <sub>30</sub>	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 <sub>100</sub>	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 <sup>2</sup> ). 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 <sub>300</sub>	Erfüllt Begründung dito oben, Erosionswiderstand (> 150 N/m <sup>2</sup> ) aber geschätzt und nicht berechnet.	erfüllt Begründung dito oben

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

Grundscenario	Tragsicherheit	Dauerhaftigkeit
HQ <sub>30</sub>	erfüllt Die Fundation der Ufersicherung liegt zwar höchstens auf dem Niveau der Kolkentiefe der alternierenden Bänke. Da die Kolkentiefe 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 <sub>100</sub>	erfüllt dito Begründung HQ30	erfüllt dito Begründung HQ30
HQ <sub>300</sub>	erfüllt dito Begründung HQ30	erfüllt dito Begründung HQ30

Blockrampe Buchs

Rechnerisch ist die Stabilität der Blockrampe Buchs (km 49.6) bei einem HQ<sub>100</sub> 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 Kolkiefen 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 Brienersee. Neubeurteilung nach dem Hochwasser 2005. Schälchli, Abegg + Hunzinger, im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Bern, 18. Oktober 2006.