



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	Ablenkdamme	39
5.4	Leitdamme	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.

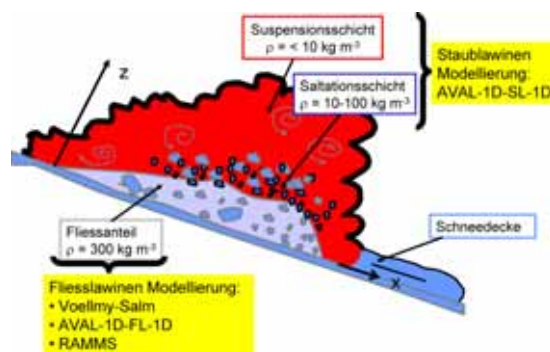


Abb. 1.2: Aufbau einer Lawine – der Fliessanteil wird vom Staubanteil, der aus der Saltationschicht und der Suspensionschicht besteht, überdeckt.

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 Szenariengestaltung 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
Allg.	Ereigniskataster, Beobachtungen	Unter Umständen liegen keine direkten Beobachtungen vor.	Häufige Ereignisse, viele Beobachtungen	Seltene Ereignisse, keine dokumentierten Fälle	3
Anrissgebiet	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
Sturzbahn	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
Auslaufgebiet	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

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
Permanenter Stützverbau		
- 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
Verwehungsverbau		
- Zäune - Kolktafeln	Nein	- Als Einzelmassnahme zu unsicher
Temporärer Stützverbau		
- 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)
Dämme		
- Auffangdämme	Ja	- Genügend hohe Relevanz
- Bremshöcker	Differenzierte Betrachtung erforderlich	- In Zusammenhang mit Auffangdamm: Ja - Als Einzelmassnahme: i.d.R. Nein.
- Ablenkdämme	Ja	- Genügend hohe Relevanz
- Leitdämme	Ja	- Genügend hohe Relevanz
Objektschutzmassnahmen		
- Am Objekt	Differenzierte Betrachtung erforderlich	- Wenn nur lokaler Effekt: Nein - Wenn flächige Wirkung: Möglich
Wald		
- 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
Künstliche Lawinenauslösung		
- 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
Temporäre Massnahmen		
- 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"> - Werktyp - Standortfaktoren (Werkhöhe, Gleitfaktor) - Ausdehnung (verbaute Fläche) - Anordnung u. Werkabstände - Topographie - Zustand (Unterhalt) - Gefahrenquellen für den Stützverbau (z.B. Steinschlag; Hanginstabilitäten) - Bewährung 	pauschal quantitativ quantitativ pauschal pauschal pauschal pauschal
Dämme	<ul style="list-style-type: none"> - Dammhöhe und -länge - Dammvorfeld (Neigung, Länge) - Dammgeometrie (Böschungsneigung) - Auffangvolumen - Topographie am Standort - Gefahrenquellen (z.B. geotechnische Instabilitäten, Erosion, Wasserdruck) 	quantitativ pauschal quantitativ pauschal pauschal pauschal
Wald	<ul style="list-style-type: none"> - Baumhöhe - Kronendeckungsgrad - Ausdehnung der bewaldeten Fläche - Lücken im Bestand (Länge, Breite, Hangneigung) - Zustand (Sturmschäden, Käfer, Pflege) - Baumarten (wintergrün, Lärchen, Laubwald) - Gefahrenquellen für Wald (z.B. Anbrüche von weiter oben) 	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

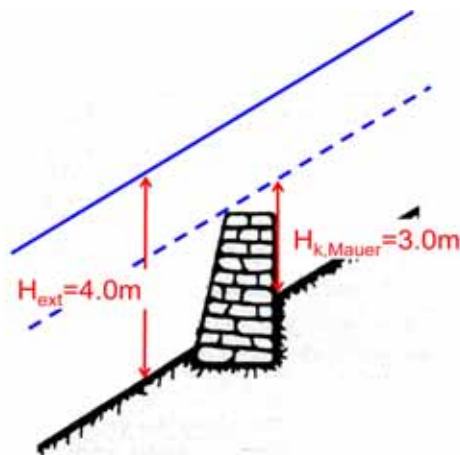
Generell

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

Ablenkdamd ohne relevante Wirkung

Ein Ablenkdamd 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 Auffangdamd erforderlich).
- Der Ablenkdamd wird schon von kleinen, häufigen Schneerutschen erreicht.
- Es können grosse Staublawinen auftreten.

Durch Ablenkdamde 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 kN/m^2 .
- Der Lawinendruck von Staublawinen ist grösser als 3 bis 5 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.

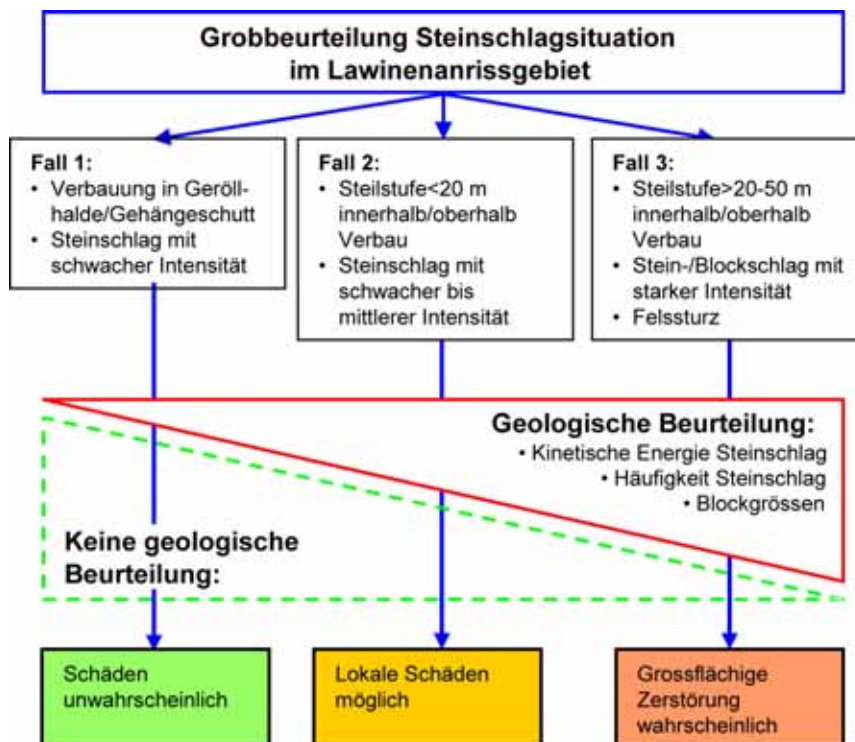


Abb. 4.3: Grobbeurteilung Steinschlagsituation in einem Lawinenanrissgebiet.

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).

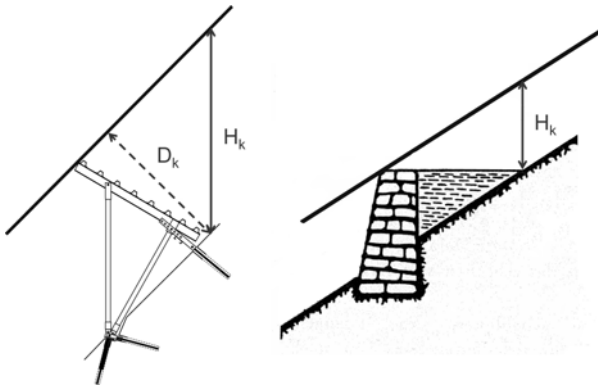


Abb. 4.6: Werkhöhe von gegliederten und massiven Stützwerken. Wenn bei gegliederten Stützwerken die Rostfläche abgedeckt ist, wird H_k um 25% reduziert. Bei Mauerterrassen wird H_k um 50% reduziert.

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				
Typisch: Schneedruck	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
Typisch und untypisch: Schneedruck, Lawinenaufprall, Sturz etc.	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 Beton-
konstruktionen
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.
- Schneeeverfrachtungen (z.B. in grossen Höhenlagen oder wenn Dammachse 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 Gefahrenggebiet) 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_{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/m² 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/m² 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

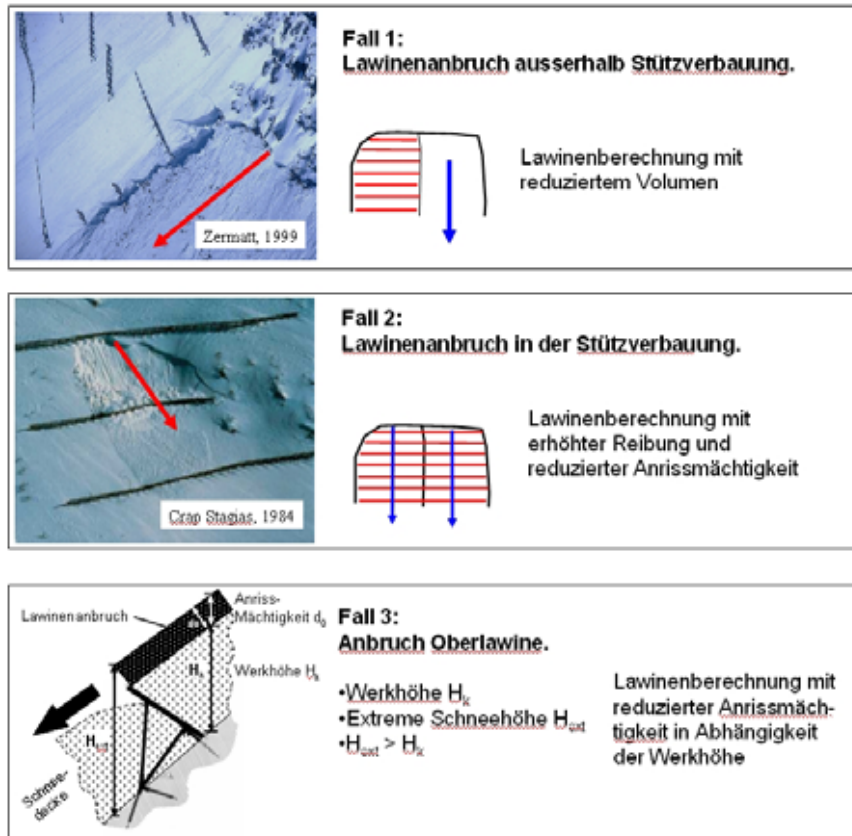


Abb. 5.1: Drei Fälle, um die Wirksamkeit einer Stützverbauung zu beurteilen.

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 m³ anstelle von Grosslawine >60'000 m³) 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 ξ 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 m³) 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 ξ [m/s ²]	1000	280	2500	400
Reibungswert μ [-]	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 ΔH 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 ΔH 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_Δ 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°
- 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_Δ 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.

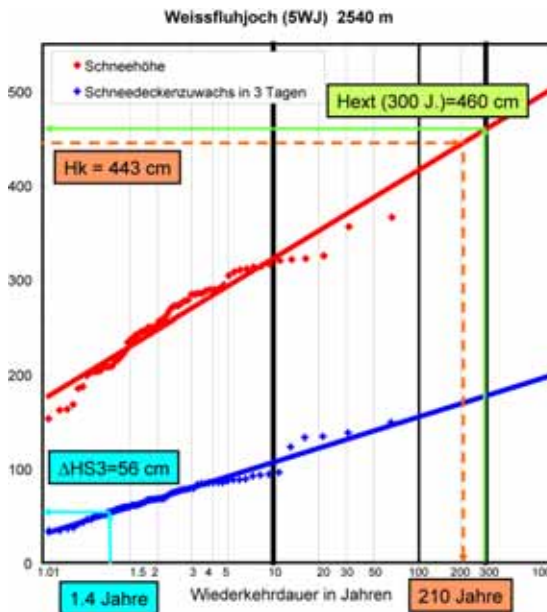


Abb. 5.2: Gumbel Extremwertstatistik für die Vergleichsstation Weissfluhjoch.

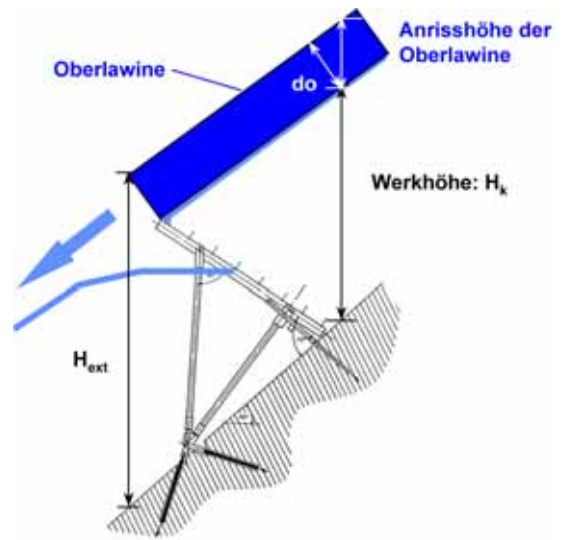


Abb. 5.3: Anbruch einer Oberlawine mit der Anrissmächtigkeit d_0 .

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:

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

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)

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

λ = Faktor, der die Energiedissipation beim Aufprall beschreibt

Bedingung 2: Die gesamte Lawinenmasse muss vom Damme 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° bis 10° 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

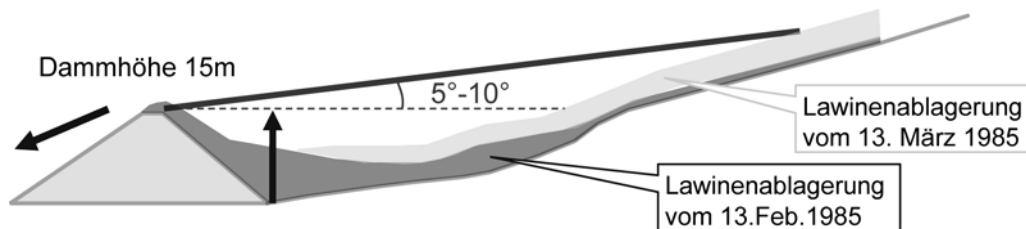


Abb. 5.4: Der Lawinauffangdamm in Ryggfjonn (Norwegen) wurde von Lawinen mit zu grosser Geschwindigkeit überflossen. Der Stauraum wurde nur zu ca. 25% aufgefüllt (NGI).

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

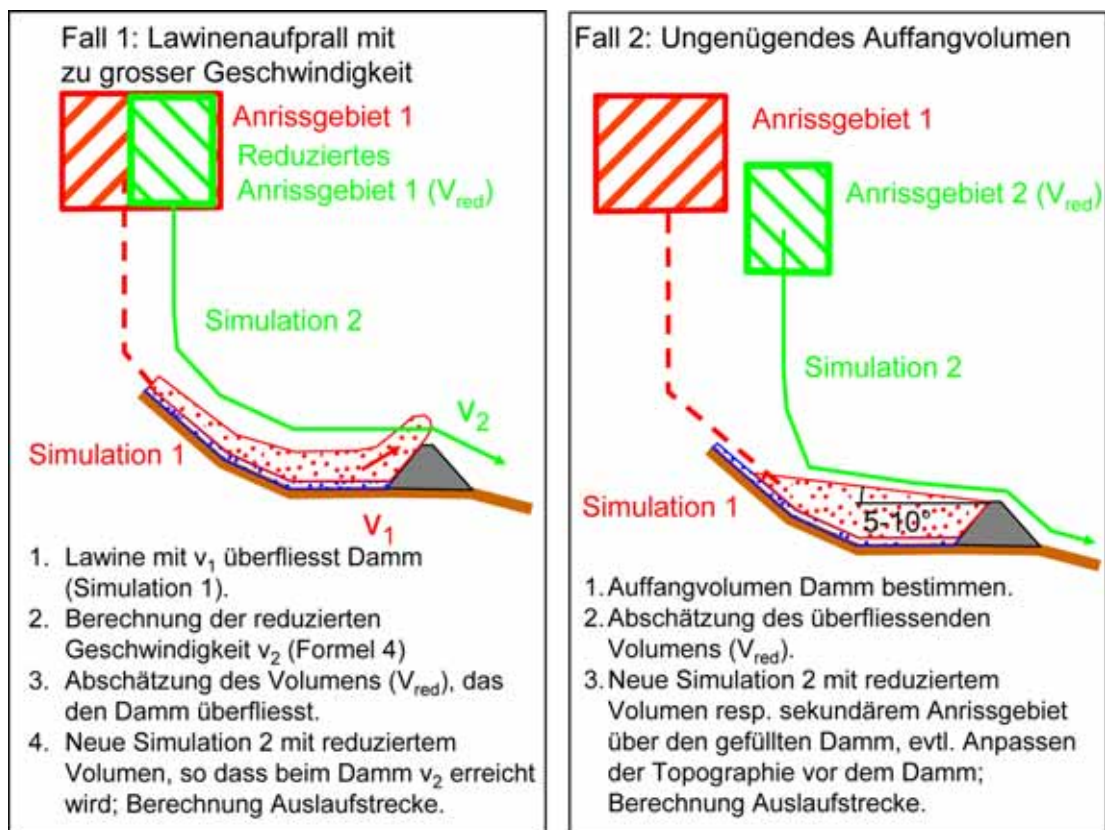


Abb. 5.5: Massgebende Fälle um die Wirkung eines Auffangdammes zu bestimmen.

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)

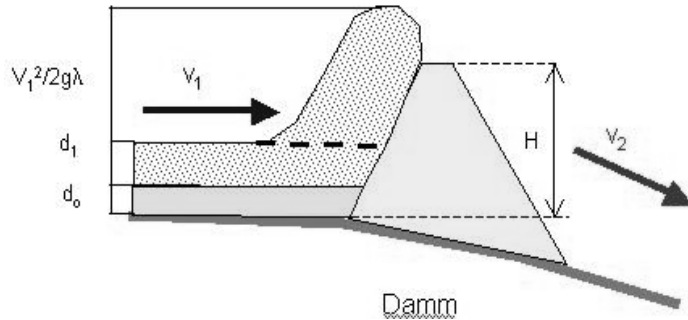


Abb. 5.6: Berechnung der Höhe eines Auffangdammes nach Salm et al. (1990).

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 λ -Werte gewählt werden. Bei schnellen, trockenen Lawinen und flacheren Dammböschungen müssen kleinere λ -Werte gewählt werden. Neue Forschungsergebnisse zeigen (Baillifard et al. 2007), dass im Vergleich zur bisherigen Erfahrung λ -Werte eher kleiner gewählt werden sollte und in Funktion der bergseitigen Dammböschung α ($^\circ$) 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.

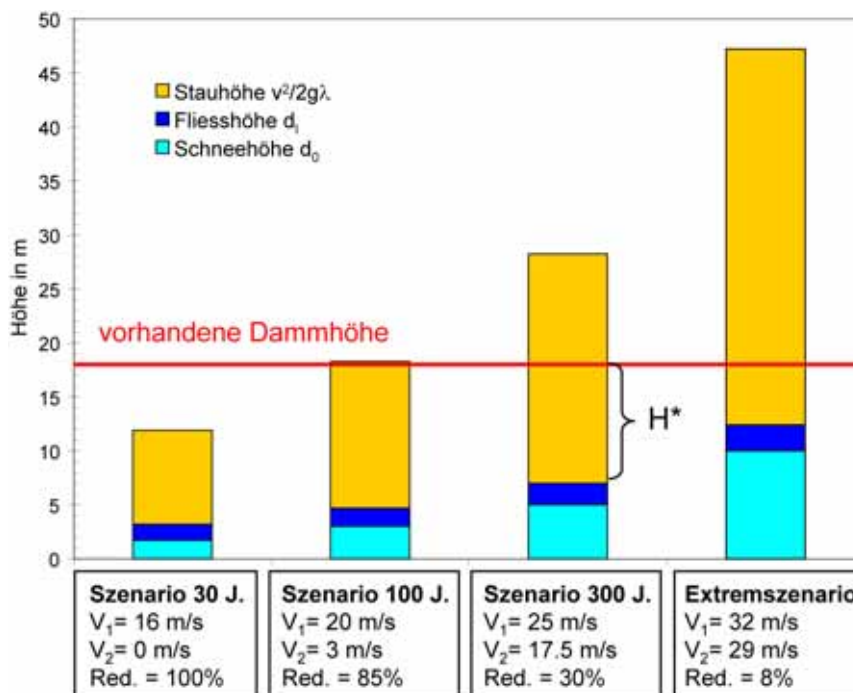


Abb. 5.7: Vergleich der für die verschiedenen Szenarien berechneten Dammhöhen mit der vorhandenen Dammhöhe. Weiter sind für die verschiedenen Szenarien die Schneehöhe (inkl. Lawinenablagerung), die Fließhöhe und die Stauhöhe dargestellt.

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_{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 Mehrfachlawinnenedergängen 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

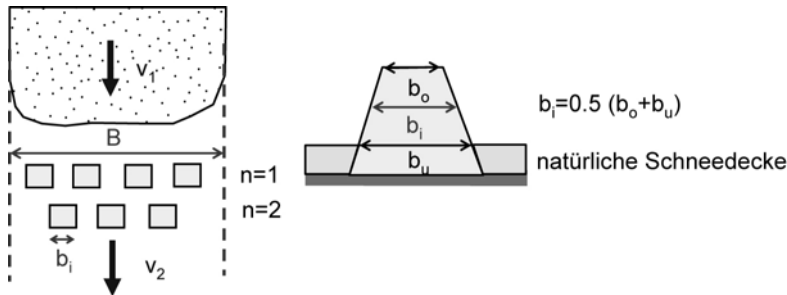


Abb. 5.8: Prinzipskizze von Bremshöchern.

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)

φ = 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 ϕ =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 ξ -Wertes berücksichtigt werden. Beim Voellmy-Salm wird ein ξ 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/m² 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.

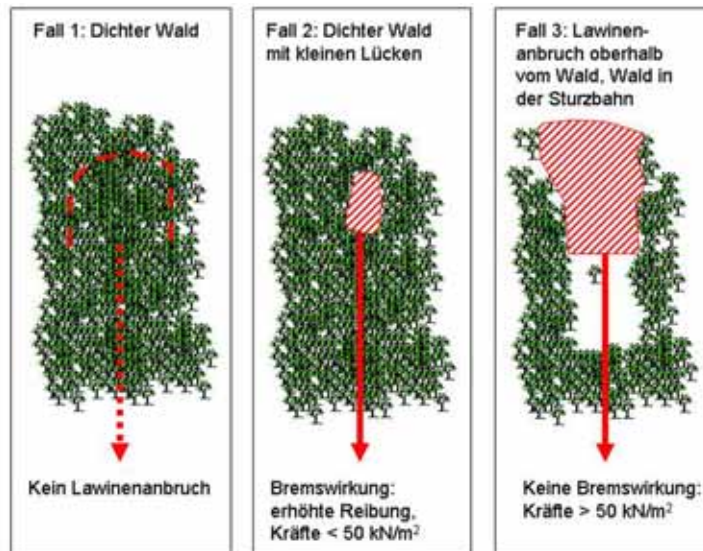


Abb. 5.9: Wirkung von Wald anhand dreier typischer Fälle.

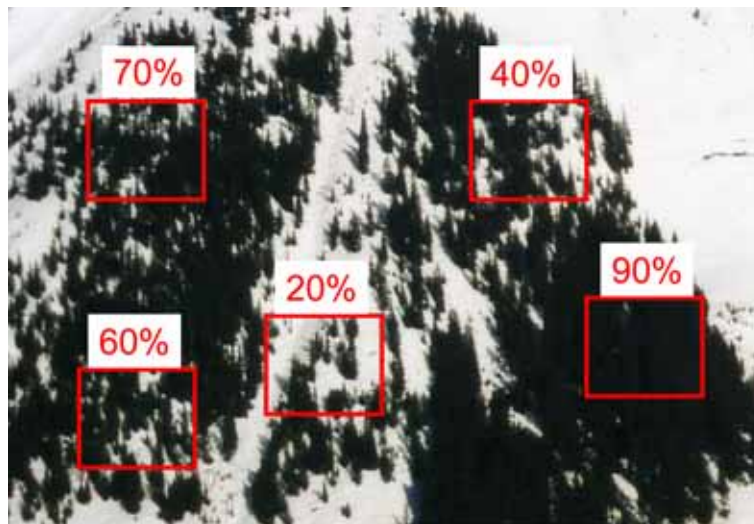


Abb. 5.10: Abschätzung des Kronendeckungsgrades.

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

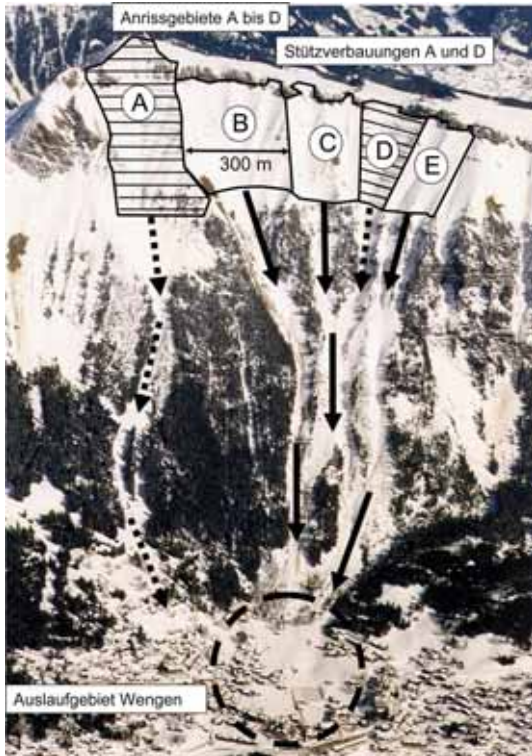


Abb. 6.1: Übersicht über die Westflanke des Männlichen mit der Eggigrabenlawine und Wengen.

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 m³ auf rund 115'000 m³, 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 Gefahrengbietes verwendete 30 kN/m² 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.

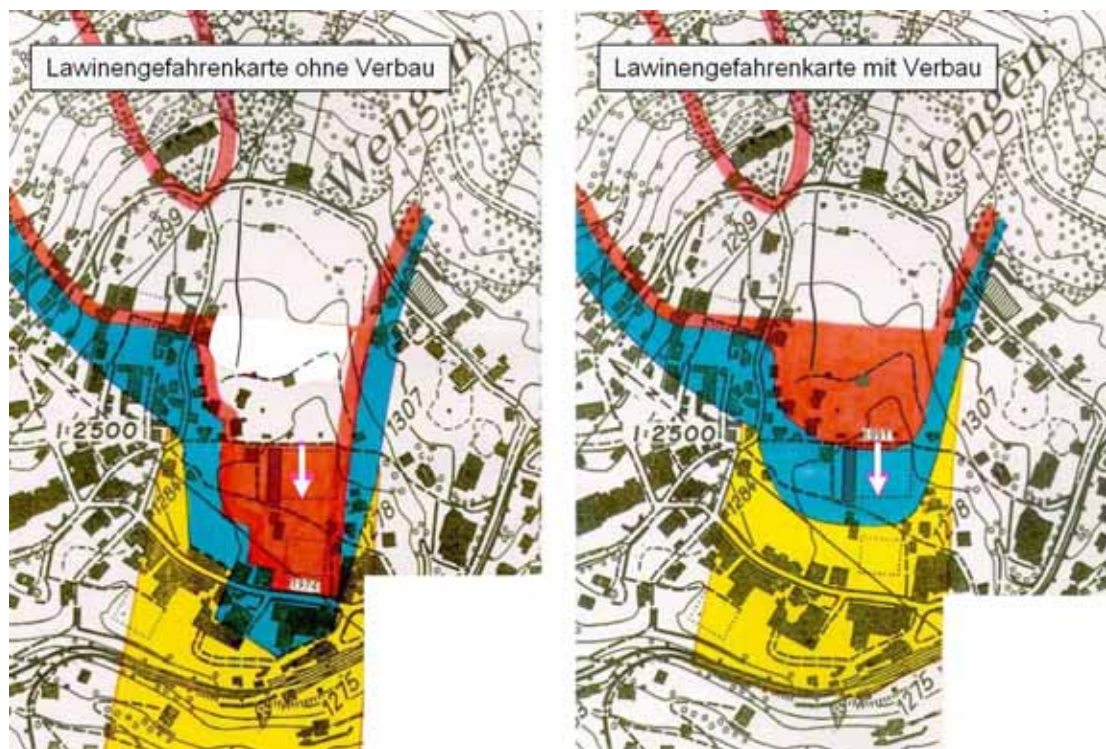


Abb. 6.3: Lawinengefahrenkarte mit und ohne Verbauung (Quelle: KAWA, Abt. Naturgefahren, Interlaken).

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°
- Neigung Dammvorfeld: 0° über eine Distanz von 20 m
- Auffangvolumen (Neigung Schneeoberfläche 5°) $70'000 \text{ m}^3$

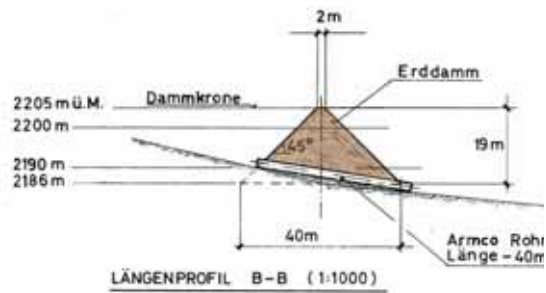


Abb. 7.1: Auffangdamm Dorfbach, im Vorfeld des Auffangraumes gibt es Bremshöcker, die wegen ihrer kleinen Höhe und konusförmigen Form nur eine kleine Wirkung zeigen dürften.

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° beträgt.

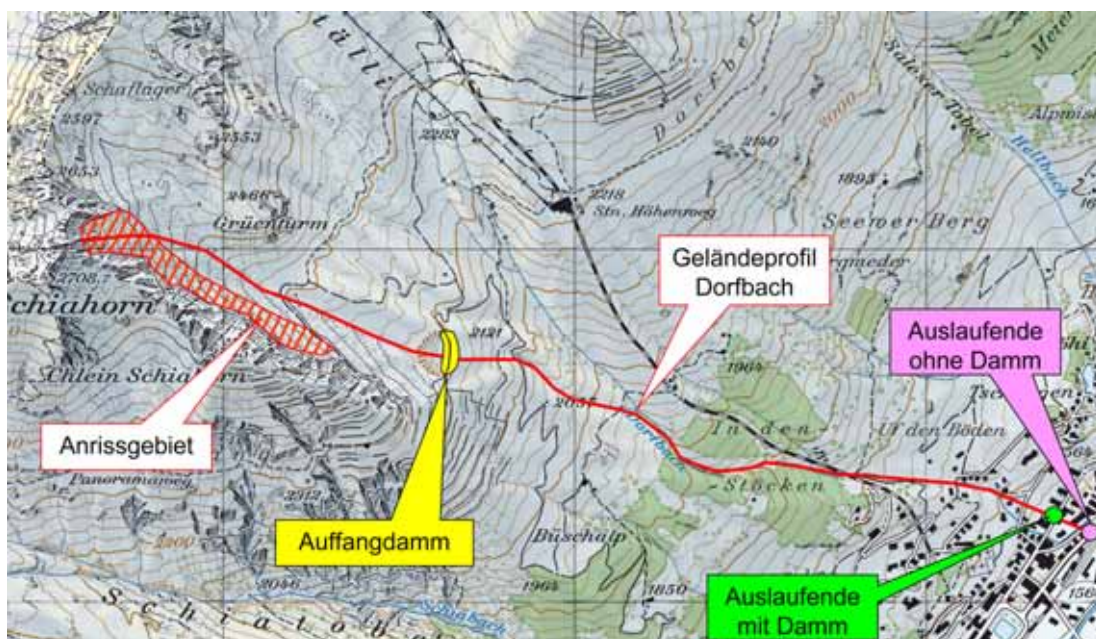


Abb. 7.3: Übersichtsplan Schiachorn mit dem Anrissgebiet der Dorfbachlawine (gelbe Fläche).

Lawinenberechnung
mit AVAL-1D

1. Lawinenberechnung ohne Damm

Simulation 1, Anrissmächtigkeit 1.3-1.2 m, Anrissvolumen 116'000 m³, 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/s²

$\lambda = 1.5$ (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 m³
- Vorhandenes Auffangvolumen: 70'000 m³

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_{red} , die den Damm überfließt

- Das totale Auffangvolumen beträgt ca. 70'000 m³.
- 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 m³.
- Der Damm bewirkt eine Geschwindigkeitsreduktion von knapp 40%. Unter der Annahme, dass die 300-jährliche Lawine den Auffangraum vollständig füllt und 40'000 m³ ablagert. Infolge der Höhenlage sind trockene Fließlawinen massgebend. Eine Verdichtung des Lawinenschnees beim Aufprall wird vernachlässigt. Folglich fließen rund 76'000 m³ (V_{red}) über die Dammkrone und werden nicht gestoppt.

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

- Die Anrissmächtigkeit wird von 1.3 m auf 1.0 m reduziert, so ergibt sich das neue Anrissvolumen V_{red} zu 93'000 m³. 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 m³ 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 Bremshöcker 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 m³ 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 ³			Simulation 2 (mit Damm): 70'000m ³			Neigung °	Distanz (m)	
	μ	ξ	d ₀ (m)	μ	ξ	d ₀ (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 ³			93'061 m ³					
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					

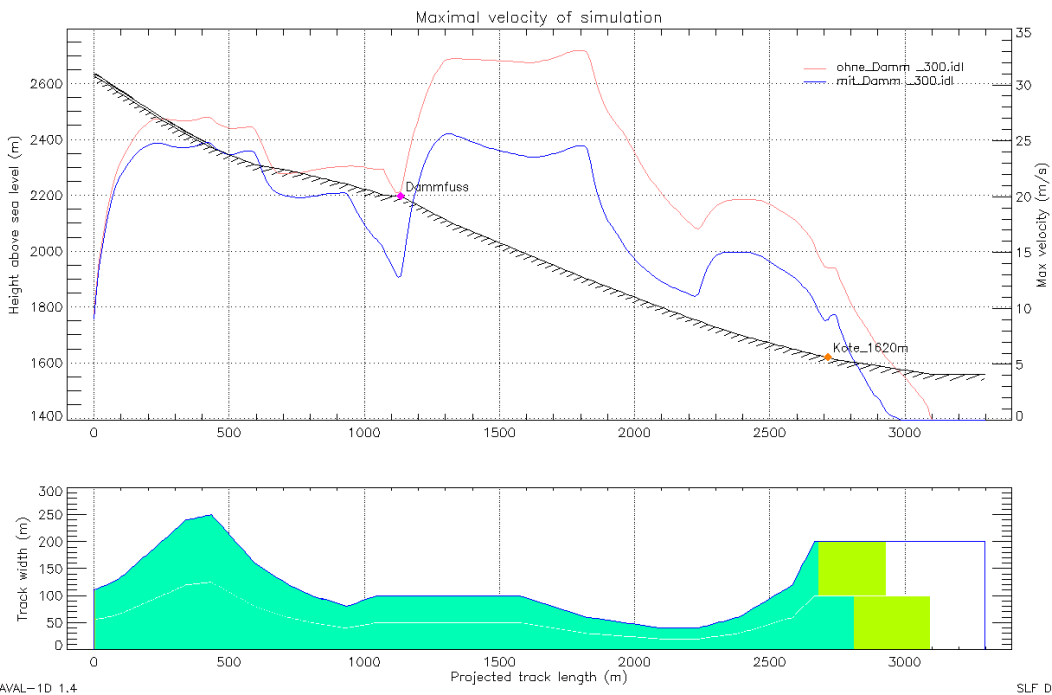


Abb. 7.4: Lawinengeschwindigkeit entlang der Lawinenbahn gemäss AVAL-1D mit (blau) und ohne Damm (rot).

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 Staubláwinen (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)

