

# Anleitung zur Dimensionierung von Lawinenauffangdämmen

M.A. Baillifard, M. Kern, S. Margreth

Juni 2007

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>   | <b>3</b>  |
| 1.1      | Gültigkeitsbereich . . . . .  | 4         |
| 1.2      | Allgemeine Grundsätze zur Dimensionierung von Lawinenaufangdämmen . . . . . | 4         |
| 1.2.1    | Funktion . . . . .  | 4         |
| 1.2.2    | Standort . . . . .  | 4         |
| 1.2.3    | Dammgeometrie . . . . .   | 4         |
| 1.2.4    | Schutzziel . . . . .  | 5         |
| 1.3      | Notation und Definitionen . . . . .   | 5         |
| 1.3.1    | Natürliche Schneedecke . . . . .  | 5         |
| 1.3.2    | Schneelawine . . . . .  | 6         |
| 1.3.3    | Fliessanteil . . . . .  | 6         |
| 1.3.4    | Staubanteil . . . . .   | 6         |
| 1.3.5    | Lawinenablagerung . . . . .   | 6         |
| 1.3.6    | Strömungsregime einer Lawine . . . . .                                      | 6         |
| 1.3.7    | Schockwelle . . . . .   | 7         |
| 1.3.8    | Definition der Dammgeometrie . . . . .                                      | 7         |
| 1.3.9    | Referenzgebiet . . . . .  | 8         |
| <b>2</b> | <b>Grundsätzliches zur Wechselwirkung zwischen Lawine und Damm</b>          | <b>10</b> |
| 2.1      | Allgemeines . . . . .   | 10        |
| 2.2      | Elemente der Wechselwirkung zwischen Lawine und Damm . . . . .              | 11        |
| 2.2.1    | Phase 1: Erste Front (run-up) . . . . .                                     | 11        |
| 2.2.2    | Phase 2: Ausbildung der Schockwelle . . . . .                               | 12        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.2.3    | Phase 3: Schockwelle . . . . .  | 12        |
| 2.2.4    | Zurückgehaltenes Volumen . . . . .  | 12        |
| 2.2.5    | Überfließen, Energiedissipation . . . . .                                   | 12        |
| <b>3</b> | <b>Vorgehen zur Bemessung eines Lawinenauffangdamms</b>                     | <b>13</b> |
| 3.1      | Fliesssdiagramm zum Vorgehen . . . . .                                      | 13        |
| 3.2      | Empirischer Formelsatz zur Bemessung von Lawinenauffangdämmen . . . . .     | 15        |
| 3.2.1    | Schritt 1: Berechnung der Froudezahl . . . . .                              | 15        |
| 3.2.2    | Schritt 2: Berechnung der G-Zahl der Lawine . . . . .                       | 15        |
| 3.2.3    | Schritt 3: Bestimmung des dimensionslosen Volumens der Lawine . . . . .     | 16        |
| 3.2.4    | Schritt 4: Bestimmung der Natur der Lawine-Damm-Wechselwirkung . . . . .    | 17        |
| 3.2.5    | Schritt 5: Berechnung der nötigen Dammhöhe . . . . .                        | 18        |
| 3.2.6    | Schritt 6: Rückhaltevolumen des Damms, Überprüfung der Ergebnisse . . . . . | 22        |
| 3.2.7    | Schritt 7: Energiedissipation . . . . .                                     | 23        |
| <b>4</b> | <b>Sicherheitsrelevante Grenzen der Methodik</b>                            | <b>26</b> |
| 4.1      | Allgemeines . . . . .   | 26        |
| 4.2      | Spezielle Situationen (Ablagerungen, Mehrfachlawinen) . . . . .             | 26        |
| 4.3      | Herleitung der Methodik . . . . .   | 27        |
| <b>5</b> | <b>Allgemeine Hinweise</b>  | <b>28</b> |

# Abbildungsverzeichnis

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Beispiele für mögliche Geometrien von Auffangdämmen. . . . .   | 5  |
| 1.2 | Definition der geometrischen Grössen eines Auffangdammes. . . . .  | 8  |
| 1.3 | Definitionen der Lawinengrössen, die im Referenzgebiet bekannt sein müssen. . . . .  | 8  |
| 2.1 | Lawinen-Damm-Wechselwirkung im Modellversuch. . . . .  | 11 |
| 3.1 | Fliessdiagramm zum Vorgehen bei der Dimensionierung eines Auffangdammes. . . . .   | 14 |
| 3.2 | Plot zur graphischen Bestimmung von $G$ . . . . .  | 16 |
| 3.3 | Graph zur Bestimmung der Natur der Lawine-Damm-Wechselwirkung. . . . .   | 17 |
| 3.4 | Graph zur Bestimmung des für die Dammhöhenbestimmung relevanten Prozesses: erste Front oder Schockwelle. Die Zahlen im Graphen bezeichnen Isolinien der Froude-Zahl. . . . .                           | 19 |
| 3.5 | Graph zur Bestimmung der Intensität $d_2/d_1$ . . . . .  | 20 |
| 3.6 | Restenergie (in % der kinetischen Energie am Dammfuss) an der Dammkrone. Quadrate: Experimentelle Resultate vom Versuchsfeld Ryggfonn (N), Dreiecke: Mit Hilfe von Gl.(3.18) ermittelte Werte. . . . . | 24 |

# Tabellenverzeichnis

|     |   |   |
|-----|---|---|
| 1.1 | Parameter zur Beschreibung der Dammgeometrie. . . . .         | 8 |
| 1.2 | Parameter zur Charakterisierung der Lawine im Referenzgebiet. | 9 |

# Vorwort

Im Februar 2003 begannen die Arbeiten zum von BAFU und Kanton Wallis finanzierten Projekt "Dimensionierung von Lawinenauffangdämmen". Das Projekt war durch die Erkenntnis motiviert gewesen, dass das derzeit verwendete Verfahren zur Bemessung von Lawinendämmen in hohem Masse vom subjektiven Urteil der für die Planung des Damms verantwortlichen Personen abhängt. Diese Subjektivität spiegelt sich in der Wahl des empirischen Parameters  $\lambda$  wider, der abhängig von Lawinencharakteristik und topographischen Gegebenheiten Werte zwischen 1.5 und 3 annehmen kann, was eine grosse Bandbreite möglicher Dammhöhen für ein gegebenes Schutzziel bedeutet. Da es keine objektiven Regeln zur Bestimmung von  $\lambda$  gibt, erfordert die Festlegung dieses Parameters und damit der geeigneten Abmessungen des Dammes ein sehr hohes Mass an Erfahrung seitens der planenden Personen.

Entsprechend war das vordringliche Ziel des Projekts, die Bemessung von Lawinenauffangdämmen durch ein vertieftes physikalisches Verständnis der Wechselwirkung zwischen Damm und Lawine auf eine objektive Grundlage zu stellen. Die nun vorliegende Anleitung ist eine Zusammenstellung der praxisrelevanten Ergebnisse dieser Forschungsarbeit. Wir haben uns bemüht, sie in eine praktisch verwertbare Form zu bringen und nehmen deshalb auf die physikalischen Hintergründe nur insoweit Bezug, als sie für die konkretete Durchführung der Dimensionierung von Belang sind.

Die Anleitung besteht aus insgesamt vier Texten:

- ausführliche Anleitung mit Erläuterungen (vorliegender Text),
- Kurzanleitung (als Merkhilfe gedacht, Voraussetzung für ihre Nutzung ist das vorgängige Studium der ausführlichen Anleitung),
- Anwendungsbeispiel Bletzure, Evolène,
- Anwendungsbeispiel Mottec, Val d'Anniviers.

Wir möchten eindringlich darauf hinweisen, dass die vorliegende Anleitung zum jetzigen Zeitpunkt nicht als fixierte Richtlinie verstanden werden darf, nach der Lawinenauffangdämme verbindlich dimensioniert werden müssten.

Vielmehr ist sie als komplementäre Methode anzusehen, die sich in der Praxis bewähren muss, z.B. indem sie bei zukünftigen Dammpjekten parallel zum traditionellen Vorgehen verwendet wird.

Wir hoffen, dass die Anleitung den mit der Dammdimensionierung betrauten Experten eine hilfreiche Unterstützung bieten und zur Objektivierung ihrer gutachterlichen Tätigkeit bei der Planung von Lawinenauffangdämmen beitragen kann.

Davos, im Juni 2006

Die Autoren

# Kapitel 1

## Einführung

Bei der Dimensionierung von Lawinenauffangdämmen steht der Praktiker vor der Aufgabe, eine Vielzahl von Einflüssen wie z.B Grösse und Geschwindigkeit der zu erwartenden Lawine, topographische Gegebenheiten und die möglichen Konsequenzen des Überfliessens des projektierten Dammes zu berücksichtigen. Neben den Werkzeugen zur Abschätzung von Lawinengeschwindigkeiten und Auslaufstrecken wie dem Voellmy-Salm Modell oder dem numerischen AVALID Modell ist er hierbei stark auf gutachterliche Arbeitsweisen angewiesen: Bis auf die einfache  $\lambda$ -Formel zur groben Abschätzung der möglichen Auflaufhöhe einer Lawine bekannter Geschwindigkeit an einem Damm gibt es kein systematisches Verfahren zur Abschätzung der nötigen Dammhöhe.

Die folgende Anleitung möchte dem Praktiker eine Methodik zur Abschätzung der erforderlichen Dammhöhe unter Berücksichtigung der Damneigung sowie der Neigung des Damvorfeldes an die Hand geben. In die Anleitung sind Ergebnisse von Modellversuchen zur Dynamik von Lawinen an Dämmen ebenso eingeflossen wie Beobachtungen an realen Lawinen sowie Erkenntnisse aus der Hydraulik. Eine wesentliche Erkenntnis aus der jüngeren Forschungsarbeit, die dieser Anleitung zugrundeliegt, ist, dass das Aufprallverhalten der Lawine am Damm unter bestimmten Umständen durch Schockwellen charakterisiert ist, die entsprechende Anpassungen in den Dimensionierungsformeln erfordern.

Diese Anleitung versteht sich nicht als definitive Norm. Die Autoren hoffen aber, dass sie den Planungsverantwortlichen bei der Erstellung von Dämmen eine nützliche Wegleitung bieten kann.

In diesem Einführungskapitel werden neben einigen grundsätzlichen Bemerkungen zur Rolle von Lawinenauffangdämmen die in dieser Anleitung verwendete Notation und der Gültigkeitsbereich der Methodik erklärt.

## 1.1 Gültigkeitsbereich

- Diese Anleitung berücksichtigt nur den dichten Fliesanteil von Lawinen. Die Wirksamkeit von Dämmen bezüglich Staublawinen ist derzeit noch Forschungsgegenstand, aber nicht Gegenstand der vorliegenden Anleitung.
- Diese Anleitung gilt nur für Lawinenauffangdämme. Auf die Problematik der Energiedissipation beim Überfließen von Dämmen wird im Abschnitt 3.2.7 kurz eingegangen, sie ist aber nicht Hauptgegenstand des vorliegenden Dokuments.
- Die Anleitung bezieht sich lediglich auf Dämme, die in Auslaufzonen geplant werden, deren Hangneigung  $15^\circ$ - $20^\circ$  nicht überschreitet.

## 1.2 Allgemeine Grundsätze zur Dimensionierung von Lawinenauffangdämmen

### 1.2.1 Funktion

Ein Lawinenauffangdamm ist ein Bauwerk, dessen Funktion der Schutz eines gegebenen Gebietes vor den zerstörerischen Kräften des Fließanteils von Lawinen ist. Die Schutzfunktion wird durch das vollständige Aufhalten des dichten Fließanteils der Lawine mittels eines Hindernisses mit ausreichender Höhe im Lawinenzug erreicht.

### 1.2.2 Standort

Da die erforderliche Dammhöhe eine Funktion des Quadrats der Lawinengeschwindigkeit ist, ist es unerlässlich, Auffangdämme, wenn irgend möglich, in Bereichen des Lawinenzugs zu erstellen, in denen die Lawinengeschwindigkeit nicht zu hoch ist (sie sollte unter  $25 \text{ ms}^{-1}$  liegen). Im Prinzip ist diese Bedingung am ehesten im Auslaufbereich der Lawine gegeben. Weiter sollte unter Ausnutzung der topographischen Gegebenheiten versucht werden, die Dammkubatur zu minimieren.

### 1.2.3 Dammgeometrie

Je nach Konstruktionsart sind verschiedene Dammgeometrien möglich. Abbildung 1.1 zeigt verschiedene Dammgeometrien.

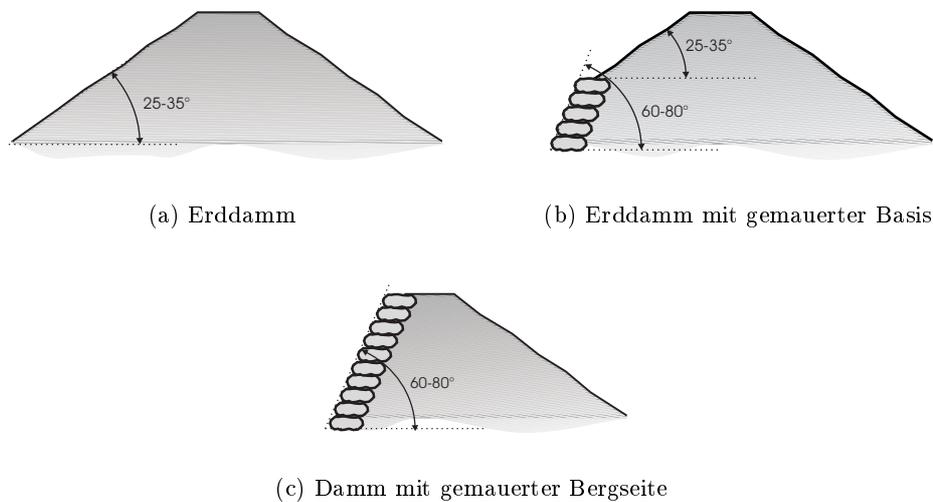


Abbildung 1.1: Beispiele für mögliche Geometrien von Auffangdämmen.

#### 1.2.4 Schutzziel

Gebiete, die von Fließlawinen erreicht werden können und in denen die Lawinen Zerstörungen an Infrastruktur oder Menschenleben anrichten können, sollen durch das vollständige Auffangen der Bemessungslawine geschützt werden. Ein teilweises Überfließen von Auffangdämmen ist nur dann tolerabel, wenn der überfließende Lawinenanteil in Volumen und Energie soweit reduziert ist, dass er keine Zerstörung mehr anrichten kann. Falls durch den überfließenden Anteil Sekundärlawinen unterhalb des Dammes ausgelöst werden könnten, ist ein Überfließen unter keinen Umständen tolerabel.

Soll der geplante Damm besiedelte Gebiete schützen, so ist für seine Dimensionierung die Annahme einer 100- bis 300-jährigen Lawine zugrunde zu legen. Sind Verkehrswege zu schützen, genügt es, Lawinen mit einer Wiederkehrdauer von 10-100 Jahren zugrunde zu legen.

### 1.3 Notation und Definitionen

#### 1.3.1 Natürliche Schneedecke

Die natürliche Schneedecke entsteht durch Schneefall und setzt sich aus den vorgängig gefallenen Schneemengen zusammen. Für die im folgenden beschriebene Dimensionierungsmethode wird eine Schneedecke zugrunde gelegt, die aus Schneefällen mit 50- bis 100-jähriger Wiederkehrdauer zustande gekommen ist.

### 1.3.2 Schneelawine

Unter einer Schneelawine versteht man eine Schneemasse, die sich einen Hang hinunterbewegt. Eine Schneelawine besteht in der Regel aus zwei Bestandteilen: Einem dichten Fliessanteil und einem Staubanteil. Falls der dichte Fliessanteil den Staubanteil deutlich überwiegt, spricht man von einer Fließlawine. Überwiegt hingegen der Staubanteil, spricht man von einer Staublawine. Treten beide Anteile gemeinsam auf, spricht man von einer gemischten Staub/Fließlawine.

### 1.3.3 Fliessanteil

Als Fliessanteil wird der Anteil einer Lawine bezeichnet, der aus mehr oder weniger grossen Schneepartikeln besteht und der während des Lawinniedergangs mit dem Untergrund in Kontakt bleibt, wobei die Dichte des fließenden Schnees in etwa mit der der natürlichen Schneedecke vergleichbar ist.

### 1.3.4 Staubanteil

Der Staubanteil ist der Anteil der Lawine, der aus feinverteiltem Schnee-Luft-Gemisch besteht, das sich turbulent bewegt und sich deutlich über den Fliessanteil hinaus erstreckt.

### 1.3.5 Lawinenablagerung

Die durch vorhergehende Lawinen vor dem Auffangdamm abgelagerte Schneemenge bezeichnen wir im Folgenden als Lawinenablagerung.

### 1.3.6 Strömungsregime einer Lawine

Schneelawinen sind Gravitationsströmungen (d.h. Strömungen, deren antreibende Kraft die Schwerkraft ist), und können subkritisches oder superkritisches Strömungsverhalten zeigen. Superkritisches Strömungsverhalten ist gegeben, wenn ein Hindernis den stromaufwärts gelegenen Teil der Strömung nicht beeinflusst, d.h. wenn die Strömung schneller fließt als sich durch das Hindernis verursachte Schwerkraftwellen gegen die Fließrichtung ausbreiten können. Dieses Phänomen kann man z.B. an Steinen in schnellfließenden Bächen beobachten. Ist andererseits die Fließgeschwindigkeit geringer als die Geschwindigkeit der Schwerkraftwellen, spricht man von einer subkritischen Strömung. Um zu entscheiden, ob ein subkritisches oder superkritisches Strömungsregime vorliegt, berechnet man die Froudezahl  $Fr$  der Strömung, die

folgendermassen definiert ist:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gd}}, \quad (1.1)$$

wobei  $u$  die Fliessgeschwindigkeit,  $g$  die Erdbeschleunigung und  $d$  die Fliesshöhe der Strömung bezeichnen. Eine Lawine, deren Froudezahl grösser als 1 ist, bezeichnet man als superkritisch, eine Lawine, deren Froudezahl kleiner als 1 ist, als subkritisch, eine Lawine mit einer Froudezahl von genau 1 ist eine kritische Lawine.

### 1.3.7 Schockwelle

Schockwellen treten auf, wenn eine superkritische Strömung plötzlich subkritisch wird. Dies geschieht im Fall von Lawinen in der Regel, wenn die Lawine auf ein grösseres Hindernis wie einen Damm trifft. Eine Schockwelle ist durch einen plötzlichen Anstieg der Fliesshöhe sowie eine Verringerung der Fliessgeschwindigkeit charakterisiert.

### 1.3.8 Definition der Dammgeometrie

Ein Lawinenauffangdamm besteht in der Regel aus den folgenden Bestandteilen:

- einem flachen Dammvorfeld,
- dem eigentlichen Damm.

Nach Möglichkeit wird das bei der Planierung des Dammvorfeldes anfallende Material zur Erstellung des Dammes verwendet.

Als Dammvorfeld bezeichnet man das bergseitige Gelände vor dem Damm, in dem die mittlere Hangneigung  $10^\circ$ - $15^\circ$  nicht überschreiten soll. Wenn die Ausdehnung  $L$  des Dammvorfeldes in Fliessrichtung der Lawine bekannt ist, wird die mittlere Neigung  $\beta$  über die Ausdehnung des Dammvorfeldes bestimmt. Die Dammhöhe  $H$  wird lotrecht, nicht senkrecht zum Boden bestimmt.

Die zur Beschreibung der Interaktion einer Lawine mit einem Damm wichtigen geometrischen Grössen finden sich in Abbildung 1.2 sowie in Tabelle 1.1.

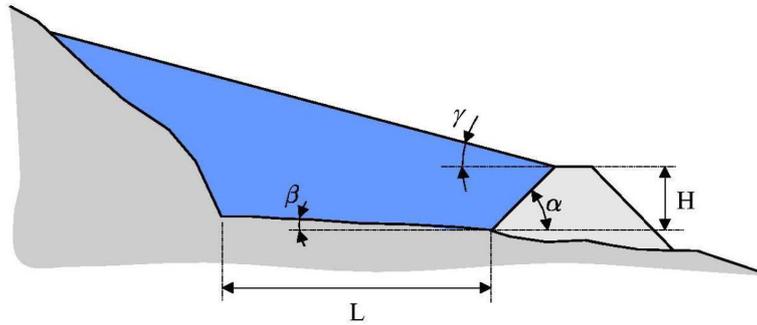


Abbildung 1.2: Definition der geometrischen Größen eines Auffangdamms.

|              |   |                               |
|--------------|---|-------------------------------|
| $\alpha$ [°] | : | Bergseitige Neigung des Damms |
| $\beta$ [°]  | : | Neigung des Dammvorfeldes     |
| $\gamma$ [°] | : | Neigung der Lawinenablagerung |
| $L$ [m]      | : | Ausdehnung des Dammvorfeldes  |
| $H$ [m]      | : | Dammhöhe                      |

Tabelle 1.1: Parameter zur Beschreibung der Damngeometrie.

### 1.3.9 Referenzgebiet

Am Standort des Dammfusses eines projektierten Damms wird ein Referenzgebiet definiert, in welchem die verschiedenen charakteristischen Größen der zu erwartenden Lawinen berechnet werden. Die erforderlichen Größen sind in Abbildung 1.3 und Tabelle 1.2 zusammengestellt.

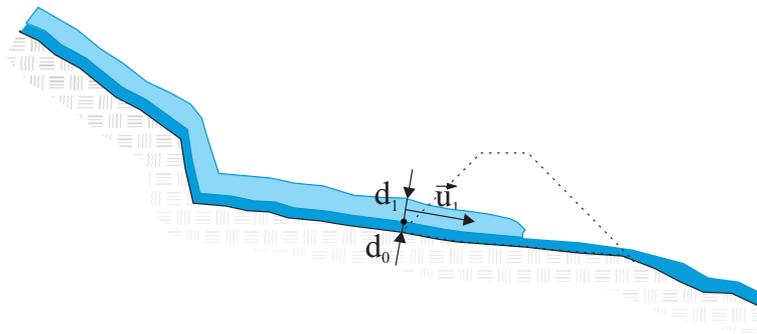


Abbildung 1.3: Definitionen der Lawinengrößen, die im Referenzgebiet bekannt sein müssen.

|                                 |   |   |
|---------------------------------|---|---|
| $\vec{u}_1$ [ms <sup>-1</sup> ] | : | Lawinengeschwindigkeit                                  |
| $d_1$ [m]                       | : | Fliesshöhe der Lawine                                   |
| $d_0$ [m]                       | : | Schneehöhe am Dammfuss<br>vor dem Auftreffen der Lawine |
| $B$ [m]                         | : | Fliessbreite der Lawine im Referenzgebiet               |
| $V$ [m <sup>3</sup> ]           | : | Kubatur der Lawine                                      |

Tabelle 1.2: Parameter zur Charakterisierung der Lawine im Referenzgebiet.

## Kapitel 2

# Grundsätzliches zur Wechselwirkung zwischen Lawine und Damm

### 2.1 Allgemeines

Dokumentierbare Beobachtungen vom Aufprall realer Lawinen an Dämmen stellen eine Ausnahme dar. Zum grundsätzlichen Verständnis der beteiligten Mechanismen greift man deshalb auf skalierte Modellversuche zurück, in denen Fließlawinen mit denselben Froudezahlen wie die entsprechenden realen Lawinen im Labormassstab nachgebildet werden. Abbildung 2.1 zeigt Bilder einer Videosequenz der Interaktion einer superkritischen Modelllawine mit einem Auffangdamm.

Bilder 1 und 2 in Abbildung 2.1 zeigen die Wechselwirkung zwischen der ersten Front der Lawine und dem Auffangdamm, Bilder 3, 4 und 5 zeigen die Ausbildung einer Schockwelle, während die vollentwickelte Schockwelle in Bildern 6,7 und 8 zu sehen ist.

Entsprechend lässt sich die Wechselwirkung zwischen einer Lawine und einem Damm in drei Phasen einteilen:

**Phase 1:** Erste Front,

**Phase 2:** Entwicklung einer Schockwelle,

**Phase 3:** Ausbreitung der Schockwelle entgegen der Fließrichtung.

Es ist dabei zu beachten, dass diese 3 Phasen nicht notwendigerweise bei allen Lawinen-Damm Ereignissen auftreten. So reicht in vielen Fällen das Lawinenvolumen nicht für die Ausbildung einer Schockwelle aus, so dass nur die erste Phase oder nur ein Teil der zweiten Phase der Interaktion auftritt.

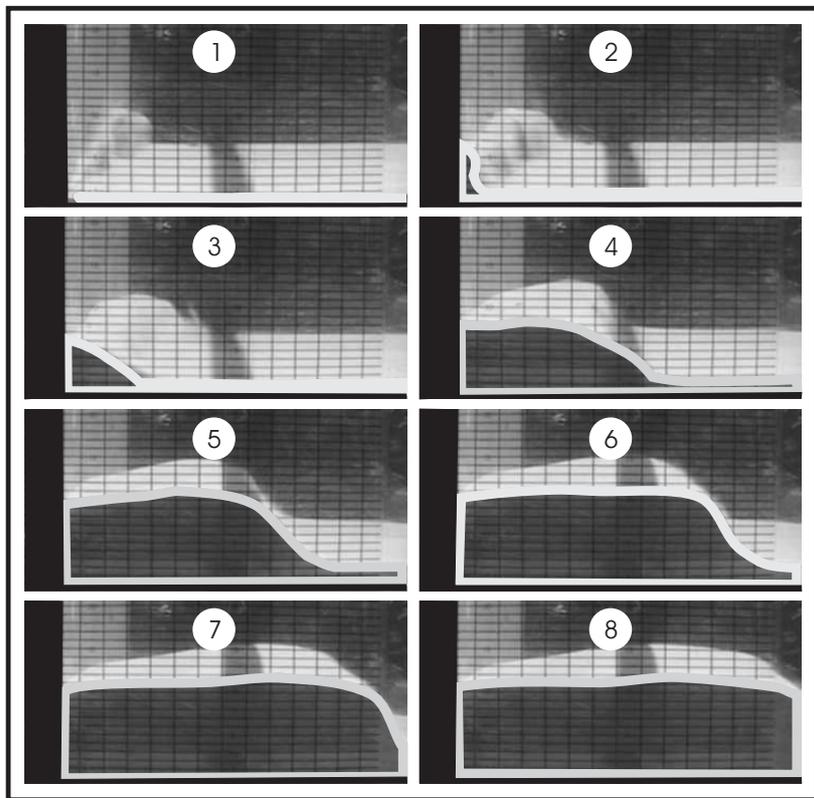


Abbildung 2.1: Lawinen-Damm-Wechselwirkung im Modellversuch.

## 2.2 Elemente der Wechselwirkung zwischen Lawine und Damm

### 2.2.1 Phase 1: Erste Front (run-up)

Hierunter verstehen wir die Wechselwirkung des ersten Teils der Lawine mit dem Damm; sie ist vergleichbar mit dem Auftreffen einer Welle auf eine Mauer. Die Wechselwirkung erstreckt sich über einen relativ kurzen Zeitraum und ist daher durch Trägheitskräfte dominiert. Gravitative Effekte spielen während dieser Phase keine dominierende Rolle.

Die während dieser Phase dissipierte Energie ist im wesentlichen eine Funktion der Neigungsänderung  $\alpha + \beta$ . Je grösser diese Änderung ist, desto grösser ist auch die Energiedissipation.

### **2.2.2 Phase 2: Ausbildung der Schockwelle**

Nach der Wechselwirkung zwischen der ersten Front der Lawine und dem Damm bildet sich eine Schockwelle. Die Intensität dieser Schockwelle ist eine Funktion der Froudezahl der Lawine, ihrer Fliesshöhe vor dem Damm sowie der Neigung des Damvorfeldes.

Die Art und Weise sowie die Geschwindigkeit der Entwicklung der Schockwelle hängen von der Damform ab. Je geringer die bergseitige Neigung des Dammes ist, desto langsamer bildet sich die Schockwelle.

### **2.2.3 Phase 3: Schockwelle**

Wenn die Schockwelle vollständig entwickelt ist, bewegt sie sich gegen die Strömungsrichtung, wobei ihre Höhe unabhängig von der Damform ist. Dieser Prozess ist durch gravitative Phänomene dominiert.

### **2.2.4 Zurückgehaltenes Volumen**

Hat sich einmal die Schockwelle ausgebildet, füllt sich das Volumen hinter dem Damm mit konstanter Geschwindigkeit bei gleichbleibender Höhe der Schockwelle auf.

### **2.2.5 Überfließen, Energiedissipation**

Reicht die Dammhöhe nicht aus, um das komplette Lawinenvolumen zurückzuhalten, so wird die Dammkrone von einem Anteil der Lawine überflossen, dessen Volumen und Geschwindigkeit von der Dammhöhe sowie von Geschwindigkeit, Fliesshöhe und -breite bestimmt sind. Diese Überlegungen sind insbesondere im Zusammenhang mit von vorherigen Lawinen vorverfüllten Dämmen relevant. Überfliessendes Volumen sowie Energiedissipation in Abhängigkeit der (Rest)dammhöhe lassen sich durch Faustformeln bestimmen.

## Kapitel 3

# Vorgehen zur Bemessung eines Lawinenauffangdamms

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur Bemessung eines Auffangdammes dargestellt, wobei davon ausgegangen wird, dass die zur Berechnung nötigen dynamischen Grössen der zu erwartenden Lawine am Dammlandort bekannt sind. Sie sind durch gutachterliche Abschätzung gemäss Salm et al. (1990) oder durch numerische Modellierung mit AVAL-1D o.ä. vorgängig zu bestimmen. Das Vorgehen wird zunächst grob skizziert und dann schrittweise zusammen mit den nötigen empirischen Formeln eingehend beschrieben.

### 3.1 Fliessdiagramm zum Vorgehen

Das grundsätzliche Vorgehen zur Bemessung eines Auffangdammes ist in Abbildung 3.1 skizziert. Aus den lawinendynamischen Eingangsgrössen sowie den Informationen zur möglichen Neigung des projektierten Damms und seines Vorfeldes wird der Typ der Lawine-Damm-Wechselwirkung (Phase 2: Schockwelle oder nur Phase 1: erste Front) bestimmt und dann gemäss Wechselwirkungstyp die erforderliche Dammhöhe bestimmt. Stellt sich die erforderliche Dammhöhe als zu hoch heraus, kann in einem neuen Durchgang mit einer variierten Damngeometrie oder mit dem Einbau von z.B. Bremsböckern versucht werden, die erforderliche Dammhöhe zu reduzieren. Oder es lassen sich, je nach Akzeptierbarkeit eines Überfließens, die durch die vorhandene Dammhöhe erreichbare Energiedissipation und das überfließende Volumen abschätzen.

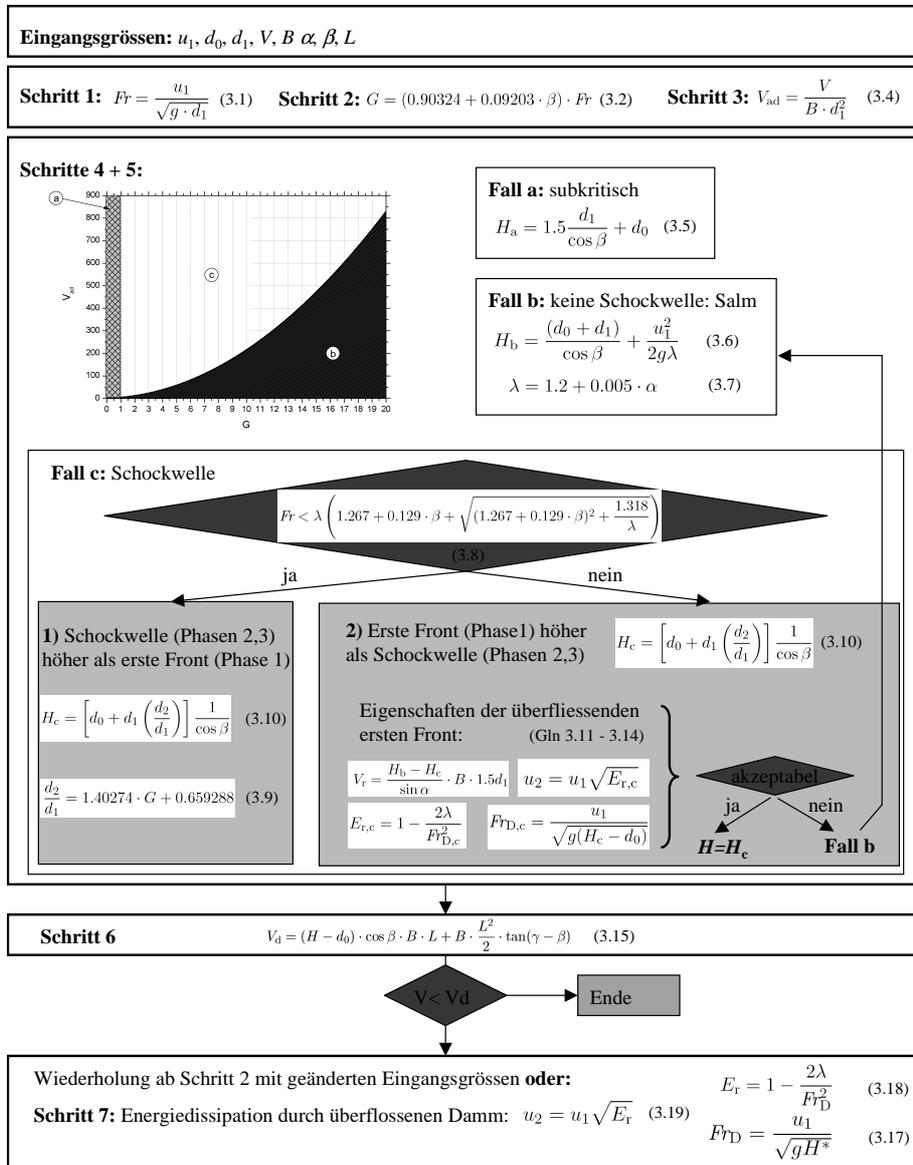


Abbildung 3.1: Fließdiagramm zum Vorgehen bei der Dimensionierung eines Auffangdammes.

## 3.2 Empirischer Formelsatz zur Bemessung von Lawinenauffangdämmen

Im Folgenden werden die in Abbildung 3.1 zusammengestellten Schritte zur Bemessung eines Auffangdammes im Einzelnen beschrieben.

### 3.2.1 Schritt 1: Berechnung der Froudezahl

Zur Berechnung der Froudezahl der Lawine ist die Kenntnis folgender Größen der Lawine im Referenzgebiet erforderlich:

$u_1$ : Lawinengeschwindigkeit im Referenzgebiet,

$d_1$ : Fließhöhe der Lawine im Referenzgebiet.

Die Froudezahl berechnet sich nun zu

$$Fr = \frac{u_1}{\sqrt{g \cdot d_1}}, \quad (3.1)$$

wobei  $g$  die Erdbeschleunigung bezeichnet. Der Wert von  $g$  wird näherungsweise mit  $9.81 \text{ ms}^{-2}$  angegeben.

### 3.2.2 Schritt 2: Berechnung der G-Zahl der Lawine

Die G-Zahl ist ein Derivat der Froudezahl, die zusätzlich Informationen über die Form der Schockwelle in Abhängigkeit von der Neigung  $\beta$  des Dammvorfeldes enthält. Für nähere Informationen zur G-Zahl siehe Chow (1959). Zur Bestimmung der G-Zahl  $G$  muss die Froudezahl  $Fr$  der Lawine sowie die mittlere Neigung  $\beta$  des Dammvorfeldes bekannt sein.  $G$  kann graphisch aus dem Plot 3.2 bestimmt werden. Die Graphen in der Abbildung 3.2 entsprechen der Beziehung

$$G = (0.90324 + 0.09203 \cdot \beta) \cdot Fr, \quad (3.2)$$

die alternativ zur graphischen Bestimmung zur Berechnung von  $G$  verwendet werden kann. Für Froudezahlen kleiner als 1 (d.h. für subkritische Strömungen) gilt

$$G = Fr. \quad (3.3)$$

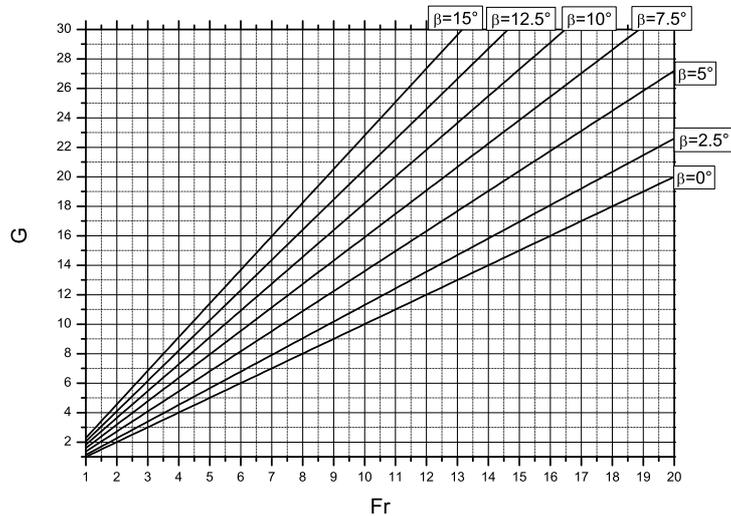


Abbildung 3.2: Plot zur graphischen Bestimmung von  $G$ .

### 3.2.3 Schritt 3: Bestimmung des dimensionslosen Volumens der Lawine

Das sog. „dimensionslose Volumen“  $V_{\text{ad}}$  ist eine dimensionslose Grösse, die das Volumen der Lawine in Beziehung zu ihrer Breite und Fliesshöhe setzt; es drückt die Länge der Lawine in Einheiten ihrer Fliesshöhe aus. Mit Hilfe der Grösse  $V_{\text{ad}}$  lässt sich entscheiden, ob die betrachtete Lawine lang genug ist, um eine vollentwickelte Schockwelle auszubilden. Zur Bestimmung des dimensionslosen Volumens werden folgende Eingangsgrössen benötigt:

$B$ : Lawinenbreite im Referenzgebiet,

$d_1$ : Fliesshöhe im Referenzgebiet,

$V$ : Kubatur der Lawine.

Das dimensionslose Lawinenvolumen  $V_{\text{ad}}$  berechnet sich zu

$$V_{\text{ad}} = \frac{V}{B \cdot d_1^2}. \quad (3.4)$$

### 3.2.4 Schritt 4: Bestimmung der Natur der Lawine-Damm-Wechselwirkung

Um festzustellen, ob sich eine Schockwelle entwickelt, benötigt man die vorgängig berechneten Grössen

$V_{ad}$ : dimensionsloses Lawinenvolumen,

$G$ : G-Zahl der Lawine.

Damit lässt sich anschliessend mit Hilfe des Graphen in Abbildung 3.3 der Typ der Wechselwirkung feststellen. Je nachdem, in welchem Bereich des aus  $V_{ad}$  und  $G$  gebildeten Parameterraums die betrachtete Lawine liegt, lässt sich ihr ein Wechselwirkungstyp zuordnen:

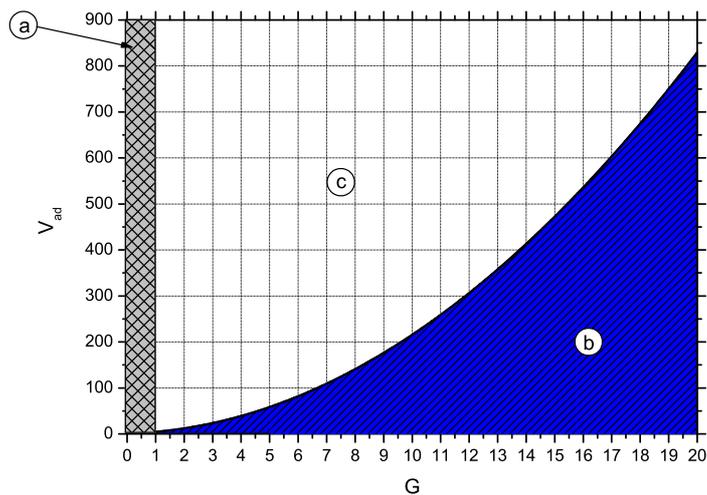


Abbildung 3.3: Graph zur Bestimmung der Natur der Lawine-Damm-Wechselwirkung.

**Bereich a:** subkritischer Bereich, in dem die G-Zahl der Lawine kleiner als 1 ist, was einer Froudezahl kleiner als 1 entspricht.

**Bereich b:** In diesem Bereich reicht das Lawinenvolumen nicht zur Entwicklung einer vollentwickelten Schockwelle aus.

**Bereich c:** In diesem Bereich erlaubt das Lawinenvolumen die Ausbildung einer vollentwickelten Schockwelle.

### 3.2.5 Schritt 5: Berechnung der nötigen Dammhöhe

#### Wechselwirkungstyp a:

In diesem Fall handelt es sich um eine Lawine mit subkritischem Strömungsverhalten. Die erforderliche Dammhöhe ist durch

$$H_a = 1.5 \frac{d_1}{\cos \beta} + d_0 \quad (3.5)$$

gegeben.

#### Wechselwirkungstyp b:

In diesem Fall ist das Lawinenvolumen zu gering, als dass sich eine Schockwelle entwickeln könnte. Die erforderliche Dammhöhe kann gemäss der modifizierten Salm-Faustformel berechnet werden:

$$H_b = \frac{(d_0 + d_1)}{\cos \beta} + \frac{u_1^2}{2g\lambda}, \quad (3.6)$$

wobei

$$\lambda = 1.2 + 0.005 \cdot \alpha \quad (3.7)$$

den Einfluss der bergseitigen Dammneigung  $\alpha$  berücksichtigt.

#### Wechselwirkungstyp c:

Beim Wechselwirkungstyp c handelt es sich um Lawinen mit superkritischem Fliessverhalten, deren Volumen zur Entwicklung einer Schockwelle ausreicht. Wie bereits unter 2.2 beschrieben, sind die zugrundeliegenden Mechanismen der Energiedissipation bei Schockwellen und bei der ersten Front verschieden. Deshalb ist es durchaus möglich, dass die Dammhöhe, die erforderlich ist, um die erste Front einer Lawine aufzuhalten, grösser oder kleiner ist als die zum Stoppen einer Schockwelle nötige. Der grundlegende Unterschied besteht darin, dass das mit einer Schockwelle verbundene Volumen viel grösser ist als das der ersten Front.

Um zu entscheiden, ob die nötige Dammhöhe durch die erste Front oder durch die Schockwelle bestimmt wird, kann einfach der Graph in Abbildung 3.4 herangezogen werden: Liegt der Punkt  $\{\beta, \lambda\}$  rechts der Isolinie der Froude-Zahl der Lawine, so ist die Schockwelle der für die Dammhöhenberechnung relevante Prozess. Alternativ kann überprüft werden, ob die

dem Graphen entsprechende Ungleichung (3.8) erfüllt ist. Falls die Ungleichung erfüllt ist, ist die Schockwelle für die weitere Dammhöhenberechnung bestimmend.

$$Fr < \lambda \left( 1.267 + 0.129 \cdot \beta + \sqrt{(1.267 + 0.129 \cdot \beta)^2 + \frac{1.318}{\lambda}} \right). \quad (3.8)$$

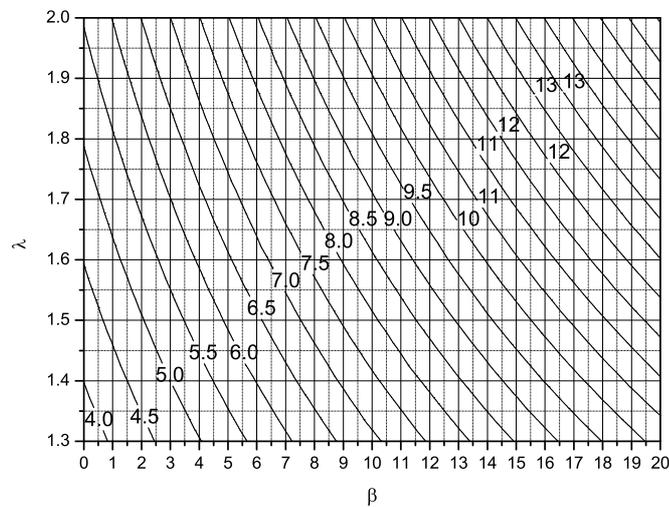


Abbildung 3.4: Graph zur Bestimmung des für die Dammhöhenbestimmung relevanten Prozesses: erste Front oder Schockwelle. Die Zahlen im Graphen bezeichnen Isolinien der Froude-Zahl.

Man unterscheidet also die folgenden beiden Fälle

1. Falls die Schockwelle für die Dammhöhe  $H$  bestimmend ist, berechnet sich diese wie folgt:

Zunächst wird mit Hilfe des Graphen in Abb. 3.5 oder mittels Gleichung (3.9) die sogenannte Intensität der Schockwelle berechnet. (Unter der Intensität  $d_2/d_1$  einer Schockwelle versteht man das Verhältnis der Fließhöhen nach und vor dem Schock.)

$$\frac{d_2}{d_1} = 1.40274 \cdot G + 0.659288. \quad (3.9)$$

Damit ergibt sich dann die nötige Dammhöhe  $H$  gemäss Gleichung (3.10):

$$H_c = \left[ d_0 + d_1 \left( \frac{d_2}{d_1} \right) \right] \frac{1}{\cos \beta}. \quad (3.10)$$

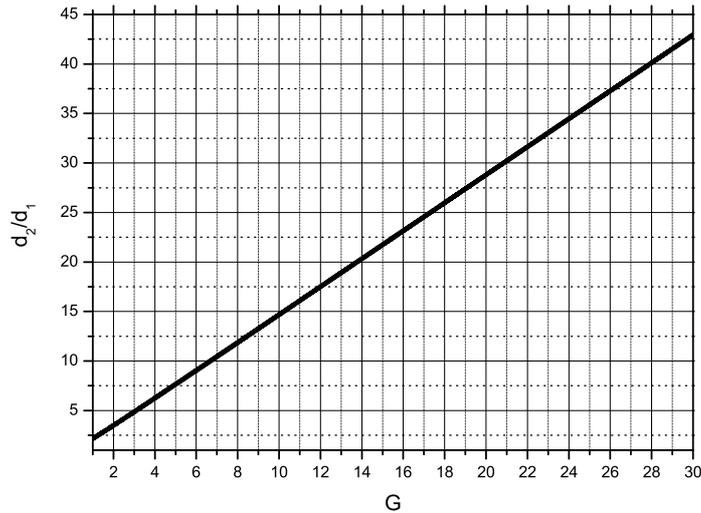


Abbildung 3.5: Graph zur Bestimmung der Intensität  $d_2/d_1$ .

2. Falls die erste Front das Auflaufverhalten der Lawine und damit die nötige Dammhöhe bestimmt (d.h. falls die Ungleichung (3.8) nicht erfüllt ist), sind wiederum zwei Fälle zu unterscheiden:
  - (i) Im Normalfall ist das Überfließen des Damms keinesfalls akzeptabel. In diesem Fall wird für die Berechnung der erforderlichen Dammhöhe ausschliesslich die erste Front berücksichtigt. Die Dammhöhe ergibt sich dann wie im Abschnitt 3.2.5 ("Wechselwirkungstyp b") angegeben, gemäss Gleichung (3.6).
  - (ii) Unter bestimmten Umständen ist ein leichtes Überfließen des Damms akzeptabel. Das bedeutet in diesem Fall, dass nur das Volumen der ersten Front (Phase 1) den Damm überfließt, während der überwiegende Teil der Lawine eine Schockwelle ausbildet und somit vom auf die Schockwellenhöhe dimensionierten Damm aufgehalten wird. Das Volumen der ersten Front ist im Vergleich zur restlichen Lawine marginal. Um zu entscheiden, ob das Überfließen der ersten Front akzeptiert werden kann, werden das Volumen  $V_r$  und die Geschwindigkeit  $u_2$  der ersten Front an der

Krone des anhand Gln. (3.9) und (3.10) auf die Schockwellenhöhe dimensionierten Damms berechnet.

Das den Damm überfliessende Volumen  $V_r$  lässt sich anhand der Beziehung

$$V_r = \frac{H_b - H_c}{\sin \alpha} \cdot B \cdot 1.5d_1. \quad (3.11)$$

grob abschätzen. (Beachte hierbei, dass diese Beziehung aus Beobachtungen an skalierten Modellexperimenten ermittelt wurde. Beobachtungen in realen Situationen, die eine Verifikation erlauben, fehlen!)

Die Geschwindigkeit  $u_2$  der überfliessenden Front lässt sich gemäss

$$u_2 = u_1 \sqrt{E_{r,c}} \quad (3.12)$$

abschätzen, wobei

$$E_{r,c} = 1 - \frac{2\lambda}{Fr_{D,c}^2} \quad (3.13)$$

die kinetische Energie der überfliessenden ersten Front (in % der kinetischen Energie am Dammfuss) und

$$Fr_{D,c} = \frac{u_1}{\sqrt{g(H_c - d_0)}} \quad (3.14)$$

die sogenannte Damm-Froudezahl bedeuten. Beide Grössen sind auf einen Damm bezogen, der gemäss Fall c auf die Schockwellenhöhe dimensioniert wurde (Index c). Zur Motivation der Formeln und zur Erläuterung der Grössen  $E_r$  und  $Fr_D$  sei auf Schritt 7 dieser Anleitung verwiesen. An dieser Stelle sei nur angemerkt, dass die Abschätzung von  $u_2$  sich im Gegensatz zur Volumenabschätzung auf Beobachtungen an einer realen Situation stützt. Falls nun anhand der in den Gleichungen (3.11 - 3.14) ermittelten Kenngrössen festgestellt wird, dass ein Überfliessen der ersten Front nicht akzeptiert werden kann (z.B. wenn die Gefahr der Auslösung von Sekundärlawinen unterhalb des Damms besteht), so ist der Damm gemäss Fall (b) auf die erste Front zu dimensionieren (Gl. 3.6).

### 3.2.6 Schritt 6: Rückhaltevolumen des Damms, Überprüfung der Ergebnisse

Nach der Dammhöhenbestimmung muss überprüft werden, ob das angenommene Dammvorfeld gross genug ist, um das gesamte erwartete Lawinenvolumen aufzunehmen. Zu diesem Zweck wird das Rückhaltevolumen  $V_d$  des Damms aus der vorgängig ermittelten Dammhöhe  $H$  unter Berücksichtigung der Topographie des Dammvorfeldes und einer Oberflächenneigung  $\gamma \approx 5^\circ \dots 10^\circ$  der Lawinenablagerungen ermittelt. Eine grobe Abschätzung von  $V_d$  kann gemäss

$$V_d = (H - d_0) \cdot \cos \beta \cdot B \cdot L + B \cdot \frac{L^2}{2} \cdot \tan(\gamma - \beta) \quad (3.15)$$

erfolgen, wobei  $B$  die Fließbreite der Lawine und  $L$  die Länge des Dammvorfeldes bezeichnen.

Sollte das Rückhaltevolumen des Damms nicht ausreichen (d.h.  $V_d < V$ ) kann man folgendermassen vorgehen:

1. Falls ein teilweises Überfließen des Dammes tolerabel ist, lässt sich unter der Annahme, dass der überfließende Schnee mit der Geschwindigkeit  $u_1$  und der Fließhöhe  $d_1$  weiterfließt, das überfließende Volumen gemäss

$$V_2 = V - V_d \quad (3.16)$$

abschätzen. Beachte, dass der überfließende Teil der Lawine gemäss der o.g. Annahme keinerlei Bremswirkung durch den Damm mehr erfährt.

2. Falls möglich, Variation der Dammneigung  $\alpha$  und der Geometrieparameter des Dammvorfeldes (Neigung  $\beta$ , Länge  $L$ ). Mit den variierten Parametern wird nochmals die Dammhöhenbestimmung ab Schritt 2 durchgeführt. Dieses Verfahren kann mehrmals wiederholt werden, bis man zu einem optimalen Ergebnis kommt.
3. Sollte das Rückhaltevolumen des Damms nicht ausreichen (d.h.  $V_d < V$ ) und ein Überfließen des Dammes keinesfalls akzeptabel sein, kann man folgendermassen vorgehen: Falls das Dammvorfeld sich aufgrund topographischer Gegebenheiten nicht ausreichend variieren lässt, gehe man davon aus, dass sich das überfließende Lawinenvolumen  $V_2 = V - V_d$  mit der ursprünglichen Fließgeschwindigkeit  $u_1$  und Fließhöhe  $d_1$  weiterbewegt. Für die Restlawine mit den Parametern  $(u_1, d_1, V_2)$  wird nochmals eine Dammhöhenbestimmung (ab Schritt 3) vorgenommen und die ermittelte Dammhöhe zu der ursprünglich erhaltenen addiert.

### 3.2.7 Schritt 7: Energiedissipation

In bestimmten Situationen ist es nicht möglich, einen Damm hoch genug zu konzipieren, um jegliches Überfließen zu verhindern. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn ein Damm bereits teilweise von einer Lawine hinterfüllt ist (mit der Ablagerungshöhe  $h_d$ ) und dadurch seine effektive Höhe reduziert ist. In diesem Fall kann man mit Hilfe der klassischen Salm-Formel (3.6) die Restgeschwindigkeit  $u_H$  der Lawine an der Dammkrone und somit ihre verbleibende Restenergie abschätzen. Dazu geht man folgendermassen vor:

#### 1. Bestimmung der effektiven Dammhöhe

Zur Bestimmung der effektiven Dammhöhe  $H^*$  unterscheidet man zwei Fälle:

1. **Damm zu niedrig:** In diesem Fall ist die effektive Dammhöhe  $H^*$  durch  $H^* = H - d_0$  gegeben, wobei  $H$  die vorgängig berechnete Dammhöhe bzw die Höhe eines existierenden, aber zu niedrigen Damms bezeichnet.
2. **Damm durch eine Lawine bereits teilweise hinterfüllt:** Hier ist die effektive Dammhöhe  $H^*$  durch  $H^* = H - h_d$  gegeben, wobei  $H$  wiederum die Dammhöhe und  $h_d$  die Höhe der Lawinenablagerung hinter dem Damm bezeichnet.

#### 2. Berechnung der Damm-Froude-Zahl $Fr_D$

Folgende Eingangsgrößen werden zur Berechnung der Damm-Froude-Zahl  $Fr_D$  benötigt:

- $H^*$ , die effektive Dammhöhe,
- $u_1$ , die Geschwindigkeit der Lawine am Dammfuss.

Mit diesen Eingangsgrößen berechnet sich die Damm-Froude-Zahl zu

$$Fr_D = \frac{u_1}{\sqrt{gH^*}}. \quad (3.17)$$

#### 3. Bestimmung der Restenergie

Zur Berechnung der Restenergie  $E_r$  des überfließenden Schnees an der Dammkrone (in % der kinetischen Energie am Dammfuss) benötigt man folgende Eingangsgrößen:

- $Fr_D$ , die Damm-Froude-Zahl,
- $\lambda$ , der Energiedissipationsfaktor, der gemäss Gleichung (3.7) abgeschätzt werden kann.

Die Restenergie an der Dammkrone ist dann durch

$$E_r = 1 - \frac{2\lambda}{Fr_D^2} \quad (3.18)$$

gegeben.

In Abb. 3.6 ist die an dem Damm des Versuchsfeldes Ryggfonn (Norwegen) ermittelte Restenergie an der Dammkrone gegen die Damm-Froudezahl aufgetragen. Der dortige Damm ist 16 m hoch und hat eine bergseitige Neigung von  $40^\circ$ . Die experimentellen Ergebnisse zeigen eine befriedigende Übereinstimmung mit den aus Gleichung (3.18) ermittelten Werten. Beachte, dass die gemäss Gl. (3.18) ermittelte Restenergie an der Dammkrone für hohe Damm-Froudezahlen  $Fr_D$  etwas höher liegt als die entsprechenden experimentellen Werte. Dies bedeutet eine zusätzliche Sicherheit bei der Restenergieabschätzung.

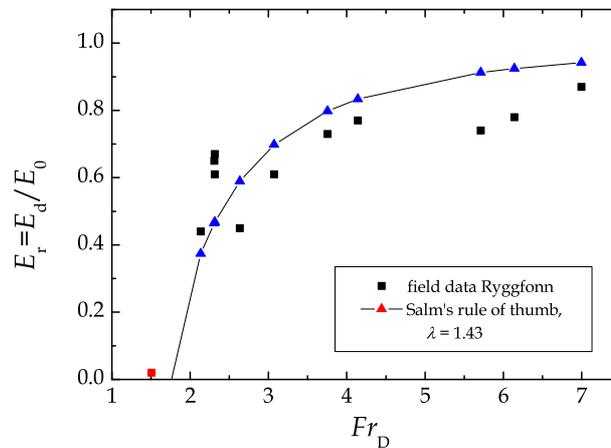


Abbildung 3.6: Restenergie (in % der kinetischen Energie am Dammfuss) an der Dammkrone. Quadrate: Experimentelle Resultate vom Versuchsfeld Ryggfonn (N), Dreiecke: Mit Hilfe von Gl.(3.18) ermittelte Werte.

Mit Hilfe der kinetischen Restenergie erhält man schliesslich die Geschwindigkeit  $u_2$  des überfliessenden Lawinenanteils an der Dammkrone :

$$u_2 = u_1 \sqrt{E_r}. \quad (3.19)$$

## Kapitel 4

# Sicherheitsrelevante Grenzen der Methodik

### 4.1 Allgemeines

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die in dieser Anleitung vorgestellte Methodik nur für den dichten Fliessanteil der Lawine gültig ist. Trifft eine gemischte Fliess/Staub-Lawine auf einen Damm, kann es durchaus so sein, dass der Fliessanteil aufgehalten wird, der Damm jedoch auf den Staubanteil der Lawine keinen merklichen Bremsseffekt ausübt.

Ausserdem erfordert die Methodik die Kenntnis der charakteristischen Grössen der Lawine wie z.B. Fliesshöhe und Geschwindigkeit. Diese Grössen müssen mit Hilfe von lawindynamischen Berechnungen (z.B. VS-Modell oder Aval-1D) abgeschätzt werden. Durch ihren Abschätzungscharakter ist die Bestimmung dieser Grössen mit grossen Unsicherheiten verbunden.

Deshalb hängt die Zuverlässigkeit der nach der vorgestellten Methodik vorgenommenen Dammdimensionierungen in hohem Masse von der Qualität der verwendeten Eingangsgrössen ab.

### 4.2 Spezielle Situationen (Ablagerungen, Mehrfachlawinen)

Im Rahmen der vorgestellten Methodik wird implizit angenommen, dass die gesamte Dammhöhe zum Aufhalten der Lawine zur Verfügung steht. In dem (häufig vorkommenden) Fall, dass ein Damm das darunterliegende Gebiet vor mehreren Lawinen schützen soll, ist es unbedingt nötig, die Tatsache zu berücksichtigen, dass die effektive Dammhöhe durch Ablagerungen vorhergehender Lawinen reduziert sein kann.

Zu beachten ist auch, dass in exponierten Lagen die effektive Dammhöhe durch starke Schneefälle und Schneeverfrachtung beträchtlich reduziert werden kann.

### 4.3 Herleitung der Methodik

Die direkte Beobachtung der Lawine-Damm-Wechselwirkung ist sehr schwierig (Abpassen des richtigen Zeitpunkts, Sichtverhältnisse). Zudem treffen Lawinen nur selten auf Dämme auf, da diese in der Regel für Lawinen mit einer hohen Wiederkehrdauer dimensioniert werden. Aus diesen Gründen ist es praktisch unmöglich, die Entstehung der Lawinenablagerungen hinter einem Damm direkt zu beobachten.

Deshalb ist die einzige verfügbare Methode zur direkten Beobachtung der Lawine-Damm-Wechselwirkung, Experimente im verkleinerten Masstab durchzuführen, entweder mit Schnee oder mit granularem Modellmaterial. Für die Durchführung solcher skalierten Experimente besteht eine wichtige Einschränkung darin, dass diese Experimente den tatsächlichen Vorgang so gut wie möglich abbilden müssen - d.h. die sog. Ähnlichkeitskriterien müssen erfüllt sein. Hier ist zu beachten, dass das dieser Anleitung zugrundegelegte Froude-Ähnlichkeitskriterium nur die kinematischen Eigenschaften der Lawine wie Fliesshöhe und Fliessgeschwindigkeit berücksichtigt. Die im Inneren der Lawine stattfindenden Reibungsprozesse wurden nicht in die Ähnlichkeitsbetrachtungen miteinbezogen. Die Froude-Skalierung trägt also rein empirischen Charakter und ist mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.

Auf der Froude-Ähnlichkeit basierende skalierte Experimente sind jedoch bereits zur Untersuchung anderer praktischer mit Lawinen verbundener Probleme angewendet worden, so zum Beispiel zur Untersuchung der Energie-dissipation von Lawinen an Bremshindernissen (sog. braking mounds oder Bremshöcker). In diesem Fall ergaben sich praktisch gut verwertbare Ergebnisse (z.B. die Dimensionierung und Platzierung der Bremshöcker oberhalb von Neskaupstadur, ÍS). Dennoch gibt es bis anhin keinen Beweis, dass diese aus Modellversuchen hergeleiteten Dimensionierungen 100 % verlässlich sind.

## Kapitel 5

# Allgemeine Hinweise

Die vorliegende Anleitung hat zum jetzigen Zeitpunkt provisorischen Charakter. Sie ist als komplementäre Methode zu verstehen, die sich in der Praxis bewähren muss, z.B. indem sie bei zukünftigen Dammprojekten parallel zum traditionellen Vorgehen verwendet wird und anhand von Beobachtungen unter Realbedingungen überprüft wird.

In diesem Sinne sind die Autoren dankbar für jegliche Rückmeldung aus der Praxis, die dazu beitragen kann, die Methode anzupassen und zu verbessern.

Die hinter den vorgestellten Dimensionierungsregeln stehende Physik wurde im vorliegenden Text nur andeutungsweise aufgezeigt, um die Lektüre und Anwendung der Anleitung zu erleichtern.

Der interessierte Leser/Anwender sei hiermit auf die folgenden Referenzen verwiesen, in denen die der vorliegenden Anleitung zugrundeliegende Physik beschrieben ist. Gerne sind die Autoren der Anleitung bereit, weitergehende Anfragen zu beantworten.

Das Problem der Ähnlichkeit bei der Verwendung skaliert Modelle bei Dimensionierungsproblemen ist z.B. in Szirtes (1998), Andreotti et al. (2002) oder Hakonardottir et al. (2001) beschrieben.

Die Arbeiten von Hakonardottir et al. (2002, 2003) beschreiben die Ergebnisse von Modellexperimenten zur Dimensionierung von Strukturen zur Energiedissipation (Mounds, Bremsböcker).

Allgemeine Einführungen zu den hydraulischen Konzepten, die der Anleitung zugrundeliegen, finden sich in Chow (1959) und De Mello Flôres (1954).

Die Autoren hoffen, dass sich die vorgestellte Methode in der kommenden Zeit durch Validierung und Verbesserung in der Praxis zu einem gebräuchlichen Instrument bei der Dimensionierung von Lawinenauffangdämmen entwickeln wird.

Davos, im Juni 2007,  
Marc-André Baillifard, Martin Kern, Stefan Margreth.

# Literaturverzeichnis

- Andreotti, B., Daerr, A., & Douady, S. (2002). Scaling laws in granular flow down a rough plane. *Physics of fluids* 14, 415–418.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. Burr Ridge, Illinois: McGraw-Hill.
- De Mello Flôres, J. (1954). Le ressaut. *La Houille Blanche* 6, 811–822.
- Hakonardottir, K. M., Hogg, A. J., Johannesson, T., & Tomasson, G. (2002). A laboratory study of retarding effects of braking mounds on snow avalanches.
- Hakonardottir, K. M., Johannesson, T., Tiefenbacher, F., & Kern, M. (2001). a laboratory study of the retarding effect of breaking mounds in 3, 6 and 9 m long chutes. Technical report, Vedurstofa Islands.
- Hakonardottir, K. M., Johannesson, T., Tiefenbacher, F., & Kern, M. (2003). avalanche braking mound experiments with snow switzerland - march 2002. Technical Report 03023, Vedurstofa Islands.
- Salm, B., Burkard, A., & Gubler, H. (1990). Berechnung von Fließlawinen; Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. *Mitteilungen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung* (47).
- Szirtes, T. (1998). *Applied dimensional analysis and modeling*. New-York: McGraw Hill.

# Dank

Diese Anleitung ist im Rahmen des durch den Kanton Wallis und das BAFU finanziell unterstützten Projekts „Dimensionierung von Lawinenauffangdämmen“ entstanden. Besonderer Dank gilt Charly Wuilloud vom Service des Forêts et du Paysage des Kantons Wallis und Reto Baumann von der Sektion Schutzwald und Naturgefahren des BAFU. Ohne den grossen persönlichen Einsatz der beiden und das Ermöglichen grosszügiger finanzieller Unterstützung wäre das Projekt nicht möglich gewesen. Nicht vergessen sei auch ihre Geduld bei Verzögerungen und Problemen und das unermüdliche Vertreten der Belange der Praxis, die wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Wichtige Impulse verdanken wir auch den Sitzungen des Projektteams, dessen Mitglieder viel Zeit und Engagement investiert haben - André Burkard und Viktor Bregy sei hier, auch stellvertretend für die anderen Team-Mitglieder, herzlich gedankt. Neben seinem grossen Engagement für das Projektteam und für die organisatorischen Belange des Projekts hat François Dufour dankenswerterweise die Endfassung der Anleitung sorgfältig und kritisch durchgesehen. Es war uns eine grosse Hilfe, dass Jenny Sigot von der WSL in Birmensdorf die Übersetzung der Kurzanleitung übernommen hat. Nicht zuletzt möchten wir uns recht herzlich bei allen nicht namentlich genannten Kollegen am SLF bedanken, ohne die die Durchführung eines derartigen Projekts gar nicht möglich gewesen wäre.