

PRAXISHILFE

Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutz- Massnahmen an Verkehrsachsen

1999



Bundesamt für Umwelt, Wald und
Landschaft (BUWAL)

PRAXISHILFE

Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutz- Massnahmen an Verkehrsachsen

1999

Vorgehen, Beispiele und Grundlagen der Projektevaluation

Autor: Christian Wilhelm, Eidg. Institut für Schnee- und
Lawinenforschung SLF, Davos

**Herausgegeben vom
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)**

Herausgeber: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)

Auftragnehmer: Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung
CH - 7260 Davos

Autor: Dr. Christian Wilhelm

Begleitgruppe: Reto Baumann, Eidg. Forstdirektion, BUWAL, Bern
Dr. Rolf Ehrbar, Kreisforstamt IV, Kanton St. Gallen
Dr. Markus Fischer, Gebäudeversicherung, Kanton Graubünden
Hans Merz, Ernst Basler & Partner, Ing. Unternehmen Zollikon, Zürich
Ueli Ryter, Lawinendienst, Kanton Bern
Bernardo Teufen, Ing. - Büro Teufen, Davos
Charly Wuilloud, Sektion Naturgefahren, Kanton Wallis

Begleitung (SLF): Dr. W. Ammann, (Institutsleiter), B. Brabec, Dr. M. Bründl, Dr. D. Issler,
Dr. M. Lehning, S. Margreth, Dr. B. Salm, M. Schär, L. Stoffel

Zitierung: Wilhelm, Chr., 1999: Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutzmassnahmen an Verkehrssachsen. Vorgehen, Beispiele und Grundlagen der Projektevaluation. Vollzug Umwelt, Praxishilfe, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, 1999, 110 S.

Bezugsquelle: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Dokumentation
3003 Bern

Fax: +41 (0)31 324 02 16
E-mail: docu@buwal.admin.ch
Internet: <http://www.admin.ch/buwal/publikat/d/>

Bestellnummer: VU-D
Preis: Fr. 15.- (inkl. Mwst)

Umschlag:

Inhalt

VORWORT	5
ZUSAMMENFASSUNG	7
1 VORGEHEN ZUR PROJEKTBEURTEILUNG	9
1.1 Grobabschätzung für bauliche Massnahmen	11
1.1.1 Datenerfassung	11
1.1.2 Risikoanalyse und Massnahmenplanung	12
1.1.3 Projektbeurteilung und Handlungsempfehlung	14
1.2 Beurteilung von unabhängigen Einzelmassnahmen	15
1.2.1 Risikoanalyse	15
1.2.2 Massnahmenplanung	18
1.2.3 Projektbeurteilung und Check individuelle Todesfallrisiken	22
1.3 Optimierung von Varianten (Massnahmenkombinationen)	25
1.3.1 Optimierung von Varianten bei einem einzelnen Lawinenzug	26
1.3.2 Optimierung von Varianten bei mehreren Lawinenzügen	30
1.3.3 Beurteilung von Risikospitzen	42
2 BEISPIELE DER PROJEKTBEURTEILUNG	47
3 GRUNDLAGEN DER PROJEKTBEURTEILUNG	63
3.1 Generelle Aspekte des Risikomanagements	63
3.2 Risikoanalyse	66
3.2.1 Gefahrenabschätzung	66
3.2.2 Schadenpotentialerfassung	72
3.2.3 Schadenempfindlichkeit	76
3.2.4 Risikoberechnung	78
3.3 Risikobewertung	83
3.3.1 Worst case und Systemgrösse	83
3.3.2 Kollektives Risiko und Aversion	84
3.3.3 Individuelles Risiko und Akzeptanz	85
3.4 Massnahmenanalyse	86
3.4.1 Technische Wirkungsweise und Restrisiko	86
3.4.2 Kosten und Folgewirkungen	88
3.4.3 Kombination von Schutzmassnahmen und Redundanzerfassung	90
3.5 Massnahmenbewertung	98
3.5.1 Bewertung der Kosten	100
3.5.2 Bewertung der Risikoverminderung	102
3.5.3 Entscheidungskriterien, Budgetbeschränkung und Risikodialog	105
4 ANHANG	107
4.1 Begriffe	107
4.2 Literatur	109

Vorwort

Die Lawinenereignisse im Februar 1999 haben uns wieder eindrücklich vor Augen geführt, dass das Leben in den Bergen und die Nutzung des Alpenraumes mit Risiken verbunden ist. Obwohl seit der letzten Katastrophe 1951 intensiv in den integralen Lawinenschutz investiert wurde, forderten die Lawinen in diesem Winter 17 Menschenleben und verursachten Sachschäden in der Höhe von mehreren hundert Millionen Franken.

Es stellt sich prioritär die Frage, wie und mit welchen Mitteln der Lawinenschutz weiterzuführen ist. Dabei müssen wir uns stets bewusst sein, dass dem Schutz vor Naturereignissen technische, ökologische und v.a. auch ökonomische Grenzen gesetzt sind. Die anzustrebenden Schutzziele, die zu akzeptierenden Restrisiken und die Kosten, die aufgewendet werden sollen, um die gewünschten Risikoreduktionen herbeizuführen, müssen umfassend diskutiert werden.

Heute stehen wir an der Schwelle, wo wir von einer ausschliesslich massnahmenorientierten Gefahrenabwehr abkommen und eine neue Risikokultur anstreben. Dabei rücken Fragen zur Bewertung von Naturrisiken, Schutzstrategien, Restrisiken und einer fairen Mittelverteilung ins Zentrum. Die vorliegende Publikation ist eine wertvolle Grundlage zur Beantwortung dieser Fragen. Sie ist als Praxishilfe gedacht, mit der risikobasierte und wirtschaftliche Überlegungen verknüpft werden können. Allerdings beschränkt sie sich auf die Beurteilung von Lawinenschutzmassnahmen an Verkehrsachsen. Grundsätzlich ist die vorliegende Methodik jedoch auch für andere Schutzbereiche (wie Siedlungen, touristische Anlagen) und andere Gefahrenprozesse (wie Hochwasser, Murgänge) geeignet.

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Heinz Wandeler
Eidgenössischer Forstdirektor

Zusammenfassung

Mit dem vorliegenden Leitfaden wird eine Methode zur Beurteilung der Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutzmassnahmen an Verkehrsachsen aufgezeigt. Zentrales Merkmal ist die Verknüpfung der Risikoanalyse mit der Bewertung von Schutzmassnahmen aus ökonomischer Sicht. Damit kann die Kosten-Wirksamkeit von Projekten erfasst und Effizienz im Umgang mit Risiken angestrebt werden. Auf der Risikoseite ist eine Fokussierung auf Todesfallrisiken und auf der Kostenseite eine Beschränkung auf vorwiegend monetäre Aufwendungen vorgenommen. Aus dieser modellhaften Vereinfachung folgt, dass die Ergebnisse des Leitfadens nicht alleiniges Entscheidungskriterium darstellen sollten.

Neu ist die Kombination von verschiedenen Massnahmen (bauliche Schutzmassnahmen und temporäre Sperrungen von Verkehrsachsen) mit dem Ziel die Kosten, Sperrzeiten und Risiken zu optimieren. Dies ermöglicht es den Entscheidungsträgern ihre eigenen oder nutzerseitige Bewertungsansätze z.B. für Strassensperrungen einzubringen und das System erneut zu optimieren. Damit wird die Sensitivität des Modells offengelegt und Transparenz in der Bewertung gewährleistet. In dieser Hinsicht kann der Leitfaden auf verschiedenen Ebenen zu einem offenen Risikodialog im Umgang mit Naturrisiken beitragen.

Der Aufbau des Leitfadens wurde in Zusammenarbeit mit der Begleitgruppe möglichst praxisorientiert gestaltet. Demzufolge wird das Vorgehen zur Projektbeurteilung prioritär im Kap. 4 aufgezeigt, was einen direkten, problemorientierten Einstieg zulässt. Eine erste Stufe (Kap. 1.1) soll dem Praktiker vor Ort ermöglichen, eine Grobbeurteilung des Problems vorzunehmen. Vorwiegend Ingenieurbüros sind wohl auf der zweiten Stufe (Kap. 1.2) angesprochen - falls notwendig - vertiefte Untersuchungen durchzuführen. Die Optimierung von Sicherheitskonzepten ist schliesslich Inhalt der dritten Stufe (Kap. 1.3) und bietet dem Sicherheitsspezialisten die Möglichkeit, Massnahmen zu kombinieren, sei dies am einzelnen Lawinenzug oder im lokalen und zunehmend auch regionalen Kontext.

Konkrete Beispiele im Kapitel 2 bieten Verifikations- und Vergleichsmöglichkeiten. Damit kann das Vorgehen exemplarisch und in geraffter Form nachvollzogen werden. Die ausgewählten Projekte werden fiktiv so beurteilt, als ob sie heute mit den derzeitigen Erkenntnissen zur Begutachtung vorliegen würden. Auf die theoretischen Bezüge und fachlichen Grundlagen des Leitfadens wird im Kapitel 3 eingegangen. Insbesondere sind die Methoden zur Erfassung von Grenzkosten, von individuellen Risikogrenzwerten und von Bewertungsansätzen für Sperrtage beschrieben, um das Verständnis für die Entscheidungskriterien und die daraus resultierenden Aussagen im Kapitel 1 zu fördern.

Für die Anwendung des Leitfadens ist besonders zu beachten, dass:

- *die vorliegende Fassung mit Rückmeldungen aus der Praxis verbessert werden kann.*
- *die vorgeschlagenen Parameter zum Teil Mittelwerte darstellen und mit Begründung situationsspezifisch angepasst werden können bzw. müssen.*
- *Vereinfachungen vorgenommen sind, die nicht erlauben alle Situationen des Lawinenschutzes an Verkehrsachsen zu beurteilen. Vor allem bei Bahnstrecken sind situationsspezifische Erhebungen und zusätzlich angepasste Beurteilungen notwendig.*
- *sich der Risikobegriff im Kap. 1 ausschliesslich auf Personentodesfallrisiken bezieht.*
- *die angewandte Methodik grundsätzlich auch auf andere Verkehrsanlagen wie Skipisten und Langlaufloipen ausgeweitet bzw. auf andere Naturgefahrenprozesse wie Steinschlag und Murgänge angepasst werden könnte.*

1 Vorgehen zur Projektbeurteilung (Aufbau des Leitfadens)

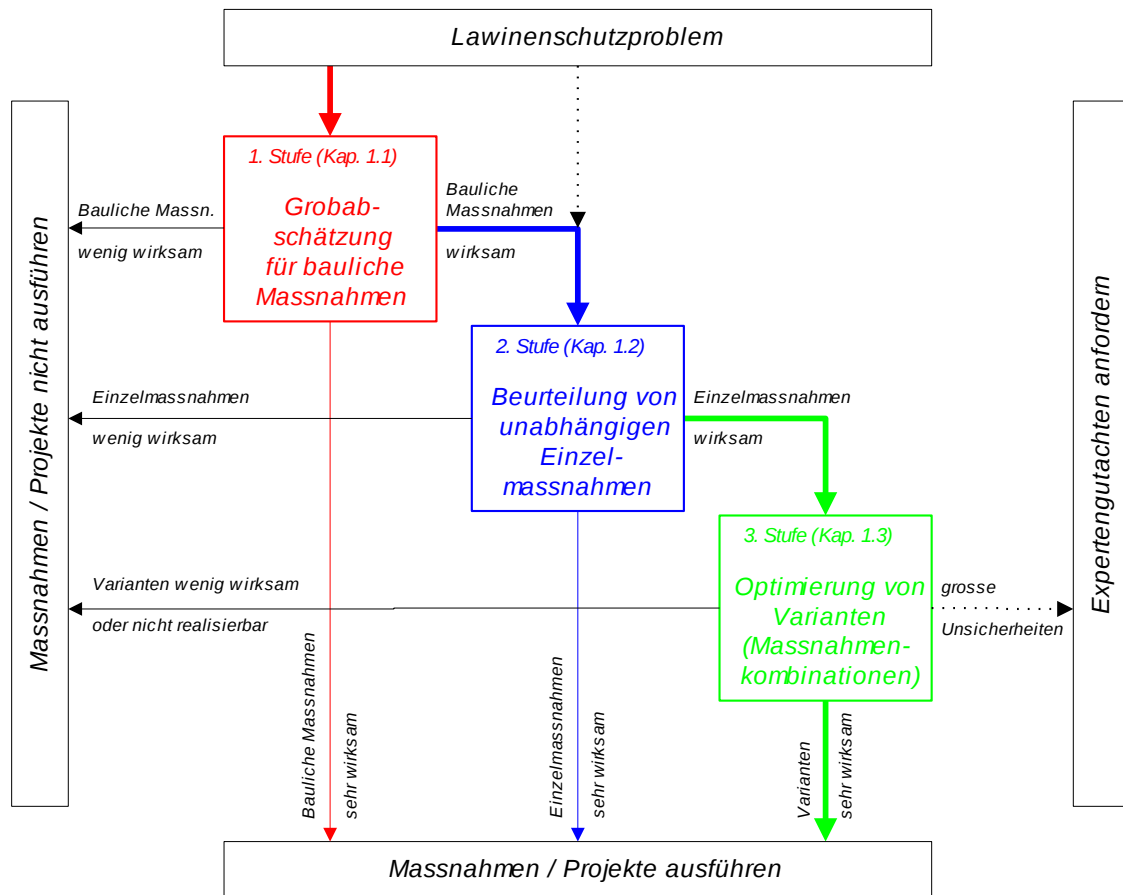
Einleitend wird in Abb. 1.1 das Vorgehen zur Projektbeurteilung mit drei Bearbeitungsstufen dargestellt. In Abb. 1.2 sind sodann die Arbeitsschritte und wesentliche Beurteilungsgrössen angesprochen.

Drei Bearbeitungsstufen

Die Bearbeitungstiefe und der Aufwand einer Beurteilung sollten der Bedeutung der Projekte und den Fragestellungen angepasst sein. Massnahmen und Projekte im Lawinenschutz unterscheiden sich bezüglich Grösse, Wirkungszeitraum, Kosten usw. Demzufolge wird ein angepasstes Vorgehen mit drei Bearbeitungsstufen vorgeschlagen (vgl. Abb. 1.1):

1. Stufe: *Grobabschätzung für bauliche Massnahmen (Kap. 1.1)*
2. Stufe: *Beurteilung von unabhängigen Einzelmassnahmen (Kap. 1.2)*
3. Stufe: *Optimierung von Varianten (Massnahmenkombinationen) (Kap. 1.3)*

Abb. 1.1 Vorgehen zur Projektbeurteilung mit drei Bearbeitungsstufen



Drei Wirksamkeitsklassen und Handlungsempfehlungen

Das Ergebnis auf jeder Bearbeitungsstufe ist eine Beurteilung und Zuordnung von Massnahmen / Projekten zu drei Wirksamkeitsklassen, woraus sich die folgenden Handlungsempfehlungen ergeben:

Wirksamkeitsklasse:	Handlungsempfehlung:
1.) Massnahmen/Projekte sehr wirksam	→ ausführen, keine weitere Beurteilung
2.) Massnahmen/Projekte wirksam	→ vertiefte Untersuchung auf der nächsten Bearbeitungsstufe
3.) Massnahmen/Projekte wenig wirksam	→ nicht ausführen, evtl. Alternativen prüfen

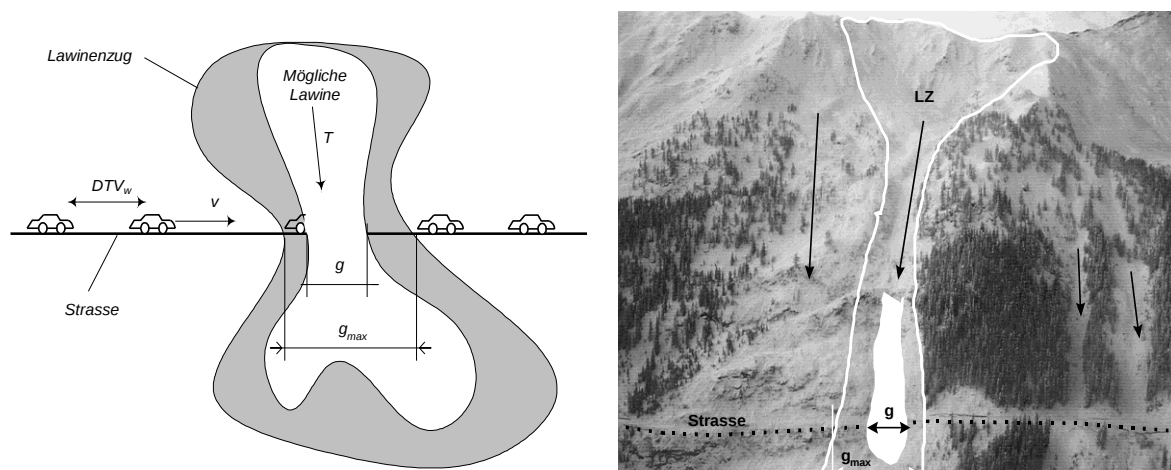
1.1 Grobabschätzung für bauliche Massnahmen (1. Stufe)

Mit der Grobabschätzung kann die Kosten-Wirksamkeit von baulichen Massnahmen an einem Lawinenzug vereinfacht erfasst werden. Abgeschätzt und beurteilt werden die Risikoverminderung R_v und die Investitionskosten I_0 mittels Nomogramm in Abb. 1.4. Aufgrund der Kosten-Wirksamkeit werden anschliessend in Tab. 1.2 die entsprechenden Handlungsempfehlungen gegeben.

1.1.1 Datenerfassung für Risikoanalyse und Massnahmenplanung

In Abb. 1.3 wird der Risikofall a) ein Lawinenzug kreuzt Verkehrsachse (Strasse) dargestellt. Die erforderlichen Beurteilungsgrössen sind gekennzeichnet und in Tab. 1.1 erklärt.

Abb. 1.3 Risikosituation und Beurteilungsgrössen (Risikofall a)



Tab. 1.1 Beurteilungsgrössen und deren Erfassung im Risikofall a)

Beurteilungsgrösse		Einheit	Erfassung
DTV_w	durchschnittlicher täglicher Verkehr im Winter	Fz	aus Strassenverkehrszählungen übernehmen, oder plausibel abschätzen (Kap. 3, S. 74 f.)
v	Fahrzeuggeschwindigkeit 'im Lawinenzug'	km/h	mittlere Geschwindigkeit vor Ort abschätzen oder evtl. mit Polizei absprechen
g	mittlere Breite von Lawinen im Strassenbereich	m	aus Katasterangaben Mittelwert berechnen oder auf Plan / im Gelände abschätzen (z.B. Kap. 2, Bsp. Nr. 1)
T	Wiederkehrdauer der Lawine	Jahre	aus Katasterangaben ermitteln oder Strassensicherungsdienste befragen (z.B. Kap. 2, Bsp. Nr. 1)
g_{max}	maximale Breite des Lawinenzugs im Strassenbereich	m	auf Plan / Karte oder im Gelände messen bzw. abschätzen (falls Galerie / Tunnel beurteilt wird)
I_0	Investitionskosten für bauliche Massnahmen	Mio Fr.	mit Einheitspreisen z.B. gemäss Kap. 1.1.2 abschätzen

1.1.2 Risikoanalyse und Massnahmenplanung

Mit den Beurteilungsgrössen aus Tab. 1.1 kann in Abb. 1.4 die Kosten-Wirksamkeit zur Verminderung von Todesfallrisiken einfach abgeschätzt werden.

Vorgehen:

1.) Kollektives Risiko R_o (im Ausgangszustand)

Ausgehend vom durchschnittlichen täglichen Verkehr DTV, mit der Fahrzeuggeschwindigkeit v , der mittleren Lawinenbreite g und der Lawinenwiederkehrdauer T das Risiko R_o graphisch bestimmen.

2.) Risikoverminderung R_v

Die mit Massnahmen erreichte Risikoverminderung R_v abschätzen und auf der Risikoachse in Abb. 1.4 nach unten abtragen z.B. für:

- Galerie (richtliniengemäss auf einer Länge von g_{max} ausgeführt): $R_v \approx R_o$
- Stützverbau gemäss Richtlinien (BUWAL/WSL 1990) ausgeführt und
 - a) Strasse liegt in der Auslaufstrecke der Lawine (Kap. 3, S. 67): $R_v \approx 95\%$ von R_o
 - b) Strasse liegt in der Sturzbahn der Lawine (Kap. 3, S. 67): $R_v \approx 90\%$ von R_o
- Weitere Massnahmen: R_v spezifisch abschätzen

3.) Investitionskosten I_o

Die Investitionskosten I_o von geplanten Massnahmen aus dem Kostenvoranschlag übernehmen oder die folgenden Schätzwerte aus der Praxis für die Berechnung zugrunde legen:

- Strassengalerie: 20'000 Fr./m' (1-spurig) bis 30'000 Fr./m' (2-spurig)
- Stützverbau (Stahl / Netz): 1'200 Fr./m' ($D_K = 3.0$ m) bis 1'800 Fr./m' ($D_K = 4.0$ m)
0.8Mio Fr./ha ($D_K = 3.0$ m) bis 1.1Mio Fr./ha ($D_K = 4.0$ m)
- Stützverbau (Holz): 700 Fr./m' + 50% für Gleitschneeschutz und Aufforstung, d.h. $\approx 1'000$ Fr./m'

4.) Kosten-Wirksamkeit KW

Mit den Investitionskosten I_o und der Risikoverminderung R_v die Kosten-Wirksamkeit KW im unteren rechten Quadranten von Abb. 1.4 bestimmen und in Tab. 1.2, S. 14 die entsprechende Handlungsempfehlung ableiten:

Ein Risiko von z.B. $R_o = 0.01$ Tf/Jahr kann gemäss Abb. 1.4 mit Investitionskosten I_o bis 1 Mio Fr. sehr wirksam und mit 1 - 5 Mio Fr. wirksam vermindert werden. Umgekehrt sind Investitionskosten von 1 Mio Fr. wirksam, wenn damit eine Risikoverminderung R_v von 0.002 - 0.01 Todesfälle pro Jahr erzielt wird.

Beispiel zum Vorgehen in Abb. 1.4

Risikoanalyse: DTV = 2'500 Fz $\rightarrow v = 60$ km/h $\rightarrow g = 200$ m $\rightarrow T = 15$ Jahre $\rightarrow R_o = 0.0065$ Todesfälle/Jahr

Massnahmenplanung:

Galerie: $I_o = 6$ Mio Fr. ($g_{max} = 300$ m à 20'000 Fr./m'); $R_v \approx R_o \rightarrow KW =$ wenig wirksam (rot)

Stützverbau: $I_o = 0.72$ Mio Fr. (600 m' à 1'200 Fr./m'); $R_v \approx 90\%$ von R_o ; $\rightarrow R_v = 0.006$ Todesfälle/Jahr $\rightarrow KW =$ wirksam (blau). Dieses Beispiel ist mit gestrichelten Pfeilen dargestellt in Abb. 1.4.

Projektbeurteilung:

Der bauliche Schutz mit einer Galerie ist in diesem Beispiel wenig kostenwirksam. Hingegen könnte ein permanenter Stützverbau (kostenwirksam) auf der Bearbeitungsstufe 2 vertieft beurteilt, optimiert und allenfalls zur Ausführung empfohlen werden.

Abb. 1.4 Grobabschätzung der Kosten-Wirksamkeit (nur bauliche Massnahmen)

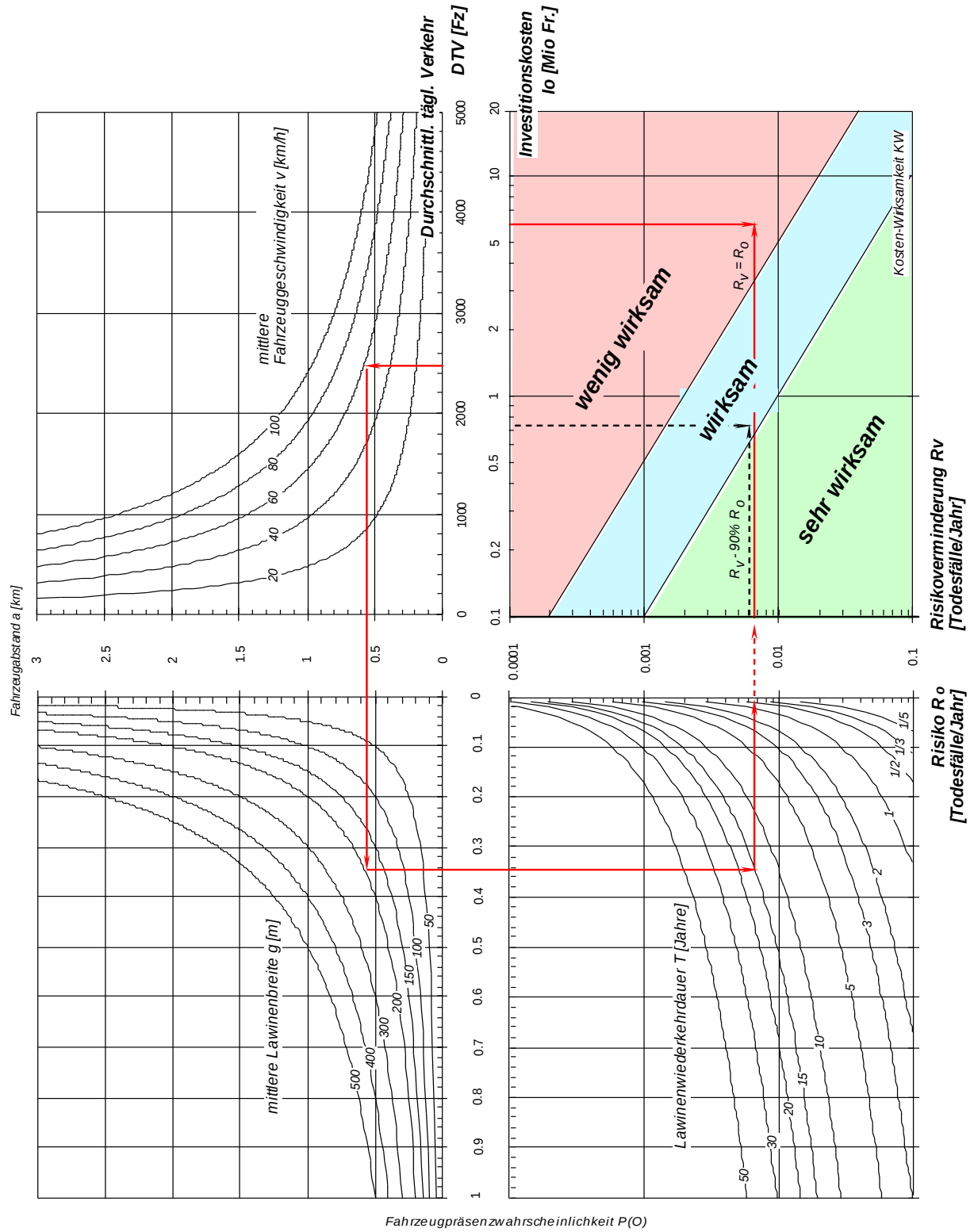
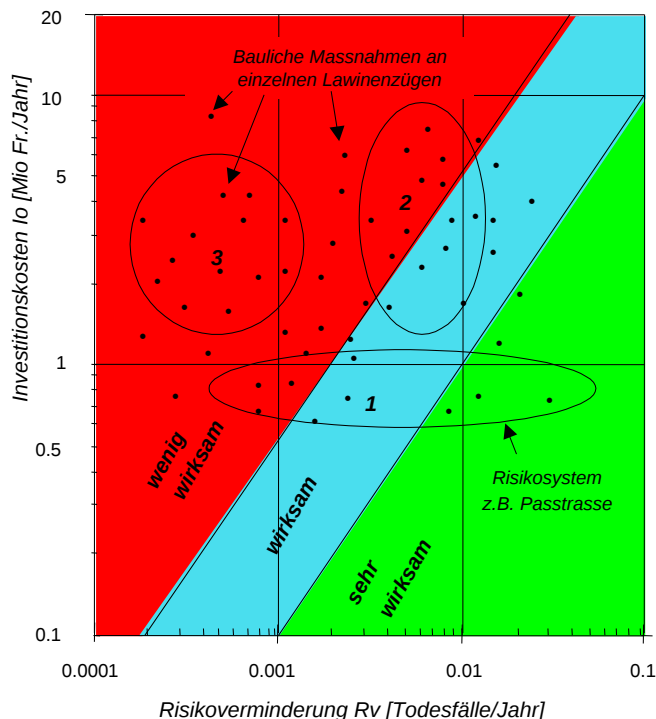


Abb. 1.5 Kosten-Wirksamkeiten von baulichen Massnahmen an Lawinenzügen im Risikofall b)



Im Risikofall b), d.h. in einem System mit mehreren Lawinenzügen können die Kosten-Wirksamkeiten von baulichen Massnahmen in den einzelnen Lawinenzügen gemäss Abb. 1.4 erfasst und in Abb. 1.5 eingetragen werden. Meist ist eine Streuung von wenig wirksam bis sehr wirksam zu erwarten. In Abb. 1.5 sind beispielhaft die Systeme 1, 2 und 3 abgegrenzt, die einen Grossteil der auftretenden Fälle in der Praxis repräsentieren. Bezogen auf diese Systemabgrenzung wird sodann für die kostenwirksamsten Lawinenzüge im jeweiligen System eine Handlungsempfehlung in Tab. 1.2 in der dritten Spalte gegeben.

Die Abb. 1.5 ermöglicht es Lawinenzüge innerhalb grösserer Systeme (z.B. Passstrassen) und das System als ganzes grob zu beurteilen. Falls die Lawinenzüge in naher Abfolge bestehen oder eine lokale Häufung von Lawinenzügen mit häufigen Lawinenabgängen vorliegt, müssen auch Risikospitzen gemäss Kap. 1.3.3 beurteilt werden.

1.1.3 Projektbeurteilung und Handlungsempfehlung

Check individuelles Risiko

Die individuellen Risiken in Fahrzeugen sind im Risikofall a) meist vernachlässigbar klein (evtl. Fussgänger oder Strassensicherungsdienste berücksichtigen). Im Risikofall b) ist diesbezüglich allenfalls Gleichung 1.2 und Tab. 1.9, S. 23 im Kapitel 1.2.1 zu prüfen.

Tab. 1.2 Handlungsempfehlung aufgrund der Grobbeurteilung der Kosten - Wirksamkeit

Kostenwirk- samkeit (Abb. 1.4)	Handlungsempfehlung	
	Lawinenzug ist als einzelne Gefahrenstelle abgrenzbar (Risikofall a)	Lawinenzug ist Teil eines grösseren Systems mit mehreren Lawinenzügen (Risikofall b)
sehr wirksam	Bauliche Massnahmen ausführen falls keine wirksameren Einzelmassnahmen bestehen; Prioritäten nach der Kosten-Wirksamkeit und Budgetverfügbarkeit setzen	Bauliche Massnahmen an einzelnen Lawinenzügen nur ausführen falls diese einen Grossteil des gesamten Risi- kos eliminieren (vgl. System 1 in Abb. 1.5); vertiefte Untersuchung gemäss Kap. 1.2 wird empfohlen
wirksam	Vertiefte Untersuchung gemäss Kap. 1.2 durch- führen; weitere Einzelmassnahmen prüfen	Vertiefte Untersuchung gemäss Kap. 1.2 durchführen (vgl. System 2 in Abb. 1.5)
wenig wirksam	Bauliche Massnahmen nicht ausführen; evtl. individuelle Risiken gemäss Kap. 1.2 berechnen (vgl. Tab. 1.3) und allenfalls spezifische Mass- nahmen prüfen	Bauliche Massnahmen nicht ausführen; evtl. individuel- le Risiken gemäss Kap. 1.2 berechnen (vgl. Tab. 1.3) und allenfalls spezifische Massnahmen prüfen (vgl. System 3 in Abb. 1.5)

1.2 Beurteilung von unabhängigen Einzelmassnahmen (2. Stufe)

1.2.1 Risikoanalyse

Risikofall a) Ein Lawinenzug kreuzt Verkehrsachse

Die Risikosituation ist in Abb. 1.3, S. 11 aufgezeigt und deren Beurteilungsgrössen sind in Tab. 1.1, S. 11 beschrieben. Mit den dort erfassten Daten können das kollektive Risiko R_o und das individuelle Risiko r_{j_o} im folgenden gemäss Gleichung 1.1 und 1.2 berechnet und in Tab. 1.4 aufgelistet werden.

Spezifische Hinweise zu Strassen (Kap. 3, S. 72 ff.)

Betrifft der Lawinenzug im Risikofall a) eine Strassenstrecke auf der häufig mit Fahrzeugstauungen zu rechnen ist, so muss zusätzlich das Risiko für stehende Fahrzeuge in Anlehnung an den Risikofall c) und evtl. spezifischen Annahmen berechnet werden (vgl. Kap. 1.3.3). Wird die Strasse von einem beträchtlichen Bus- und Caranteil befahren ($DTV_{Bus} > 2\%$ des DTV_w), kann dieses Risiko $R_{o_{Bus}}$ separat gemäss Gl. 1.1 berechnet und hinzuaddiert werden (bei $\beta \geq 17$ Personen/Bus und einer mittleren Letalität $\lambda = 0.18$ ist der Aversionsfaktor δ gem. Tab. 1.3 zu berücksichtigen).

Spezifische Hinweise zu Bahnen (Kap. 3, S. 72 ff.)

Das Risiko, dass eine Bahn von einer Lawine getroffen wird (Direkttreffer) und Todesfälle zu erwarten sind, kann grundsätzlich mit der Methodik für Strassen angenähert werden. Zusätzlich ist die mittlere Länge der betreffenden Züge l_z [km] anzunehmen, um den Faktor γ in Gleichung 1.1 zu berechnen. Die mittlere Zahl erfasster Personen (Anzahl erfasster Bahnwagen und mittlere Personenzahl pro Bahnwagen) und somit der Besetzungsgrad β_z [Personen/erfassten Zugteil] ist situationsspezifisch abzuschätzen. Die Letalität in Zügen λ_z wird im Mittel mit $\lambda_z = 0.09$ Todesfälle/erfasste Person in Zügen abgeschätzt. Demzufolge muss ein Aversionsfaktor δ bei einem $\beta_z \geq 34$ Personen/erfassten Zugteil gemäss Tab. 1.3 berücksichtigt werden.

Hat eine Lawine eine Bahnstrecke unterbrochen, so werden bei Fahrleitungsbeschädigungen die Züge auf den benachbarten Streckenabschnitten gestoppt. Für Züge auf demselben Streckenabschnitt besteht die Gefahr einer Kollision mit dem Lawinenkegel oder eines Absturzes (z.B. Brücke beschädigt), was nicht allgemein abgehandelt werden kann. In einer situationsspezifischen Analyse zu diesem Sachverhalt müssten die Letalitäten entsprechend variiert werden. Ebenfalls relevant ist das Risiko von stehenden Bahnwagen in benachbarten Lawinenzügen, was mit dem Risikofall c) im Kap. 1.3.3 vertieft zu beurteilen ist.

Das kollektive Risiko R_o im Risikofall a) (Kap. 3, S. 80 ff.) berechnet sich mit:

$$R_o = \frac{1}{T} \cdot \frac{g \cdot DTV_w}{v \cdot 24h} \cdot \gamma \cdot \lambda \cdot \beta \cdot \delta \quad [\text{Todesfälle/Jahr}] \quad (1.1)$$

$\gamma =$ Faktor zur Berücksichtigung der Zuglänge l_z bei Bahnen ($\gamma = \frac{l_z}{g} + 1$); nur bei Bahnen (Kap. 3, S. 76)

$\lambda =$ Letalität [Todesfälle/erfasste Personen] (Kap. 3, S. 76 f.)

Personen in Fahrzeugen $\lambda = 0.18$ (Mittelwert); bei absturzgefährlichem Gelände (Felsen, Schluchten) $\lambda \geq 0.4$ wählen

Personen in Zügen $\lambda_z = 0.09$ (Schätzung); bei absturzgefährlichem Gelände (Brücken, Felsen, usw.) $\lambda_z \geq 0.2$ wählen

$\beta =$ Besetzungsgrad [Personen/Fahrzeug] (Kap. 3 S. 75 f.)

Personenwagen $\beta = 1.6$ (Mittelwert); bei überwiegendem Reise- und Fernverkehr $\beta \geq 2$ wählen

Bus / Car $\beta =$ situationsspezifisch abschätzen

$\beta_z =$ Personen pro erfassten Zugteil; Anzahl erfasste Bahnwagen und Anzahl Personen pro Bahnwagen abschätzen

$\delta =$ Aversionsfaktor; abhängig vom Schadenausmass $S = \lambda \cdot \beta$; nur bei Risiken von Bahnen berechnen und bei Bus- / Carverkehr (falls dieser $> 2\%$ des DTV_w beträgt und separat berechnet wird) berücksichtigen (Vorg. gem. Tab. 1.3)

Das individuelle Risiko r_{j_o} einer Person j im Risikofall a) berechnet sich mit:

$$r_{jo} = \frac{1}{T} \cdot \frac{g \cdot z}{v_j \cdot 24h} \cdot \gamma \cdot \lambda \quad [\text{pro Jahr}] \quad (1.2)$$

z = Anzahl Durchfahrten pro Tag (z.B. Pendler $z=2$) während der potentiellen Lawinenzeit (z.B. Dez.-April = 151 Tg)
für die Erklärung der verwendeten Abkürzungen vgl. Tab. 1.1 und Gleichung 1.1

Aversionsberücksichtigung (Kap. 3, S. 84 f.)

Das Schadenausmass $S = \lambda \cdot \beta$ wird in Tab. 1.3 in die vier Schadenausmassklassen (AK_1 - AK_4) eingeteilt. Davon ausgehend kann der entsprechende Aversionsfaktor δ abgeleitet und in Gleichung 1.1 berücksichtigt werden.

Tab. 1.3 Schadenausmassklassen (AK_1 - AK_4) und entsprechender Aversionsfaktor δ

	AK_1	AK_2	AK_3	AK_4
Schadenausmass $S = \lambda \cdot \beta$ [Tf/Ereignis]	$S \leq 3$	$3 < S \leq 8$	$8 < S \leq 16$	$S > 16$
Aversionsfaktor δ	1	3	7	15

In Tab. 1.4 sind die kollektiven und individuellen Risiken eines Lawinenzuges aufgelistet und zum Gesamtrisiko $R_{o \text{ tot}}$ aufaddiert. Die kollektiven Risiken bei der Strasse und bei der Bahn sind von mittlerer Grössenordnung für einen einzelnen Lawinenzug. Obwohl sie als Risikozahl ähnliche Grösse aufweisen, ist zu bedenken, dass sie völlig verschiedene Ereignisse betreffen. Auf der Strasse wäre im Ausgangszustand durchschnittlich alle 12 Jahre mit einem Schadenereignis zu rechnen, und im Mittel hätte nur jedes dritte Ereignis davon einen Todesfall zur Folge. Schadenereignisse bei der Bahn sind hingegen mit einer Wiederkehrdauer von rund 500 Jahren sehr selten. Sie verursachen aber im Mittel 5 - 6 Todesfälle pro Ereignis ($S = \lambda_z \cdot \beta_z$). Das individuelle Risiko auf der Strasse beträgt mit $r_{jo} = 1 \cdot 10^{-5}$ gemäss Tab. 1.9, S. 23 genau dem Grenzwert und Massnahmen sind deswegen nicht erforderlich. Der entsprechende Wert bei der Bahn liegt mit $r_{jo} = 1.3 \cdot 10^{-5}$ über dem Grenzwert und Massnahmen wären erforderlich.

Tab. 1.4 Beispiele zur Datenerfassung und Risikoberechnung im Risikofall a)

Lawinenzüge		Daten erfassen (Bsp. Nr. 1 im Kap. 2)				kollektives Risiko	individuelles Risiko
Nr.	Name	g	DTV_w	T	v	$R_o^{1)}$	$r_{jo}^{2)}$
		[km]	[Fz]	[Jahre]	[km/h]	[Tf/Jahr]	[pro Jahr]
Strasse:							
1.s	Sassella	0.10	2814	2	70	0.0243	$1 \cdot 10^{-5}$
Bahn:							
1.b	Sassella	0.10	30	2	60	0.0338 ³⁾	$1.3 \cdot 10^{-5}$
$R_{o \text{ tot}} =$						0.0581	

¹⁾ berechnet gemäss Gleichung 1.1; ²⁾ berechnet gemäss Gleichung 1.2

³⁾ Bei diesem Beispiel wurde mit einer mittleren Zuglänge $l_z = g = 0.1 \text{ km}$ ($\gamma = 2$) gerechnet, ein Besetzungsgrad $\beta_z = 60$ Personen pro erfassten Zugteil angenommen, eine Letalität λ_z mit 0.09 Todesfälle pro erfasste Person abgeschätzt und somit ein Aversionsfaktor $\delta = 3$ eingesetzt ($S = \lambda_z \cdot \beta_z = 0.09 \cdot 60 = 5.4$; vgl. Tab. 1.3)

Risikofall b) Mehrere Lawinenzüge kreuzen Verkehrsachse (Kap. 3, Abb. 3.9)

Für den Risikofall b) sind die entsprechenden Daten für die einzelnen Lawinenzüge zu erfassen und die Risiken zu berechnen wie im Risikofall a). Sowohl die kollektiven als auch die individuellen Risiken pro Lawinenzug können schliesslich gemäss Tab. 1.5 aufgelistet und zu den entsprechenden Gesamtrisiken R_o und r_{jo} aufaddiert werden. Für die Berechnung der Risiken von Bahnstrecken sind in Tab. 1.5 weitere Spalten für den Faktor γ_i und den Aversionsfaktor δ_i hilfreich, da die mittlere Breite von Lawinen im Strassenbereich g , der erfasste Zugteil pro Lawinenzug und somit der Besetzungsgrad pro erfassten Zugteil und Lawinenzug β_{zi} bzw. daraus γ_i und δ_i differieren.

Die Risiken im Risikofall b) können gesamthaft auch mit den folgenden Gleichungen 1.3 und 1.4 berechnet werden. Das gesamte kollektive Risiko gemäss Tab. 1.5 mit $R_o = 0.7034$ Tf/Jahr ist ausserordentlich hoch. Das gesamte individuelle Risiko $r_{jo} = 8.7 \cdot 10^{-4}$ liegt sogar höher als der Grenzwert für Arbeitsrisiken in Tab. 1.9, S.23.

Tab. 1.5 Beispiele zur Datenerfassung und Risikoberechnung im Risikofall b) (Bsp. Nr. 5, Kap. 2)

Lawinenzüge		Daten erfassen (Flüelapass, Kap. 2)					kollekt. Risiko	individ. Risiko
Nr.	Name	$g_{i\max}^{3)}$ [km]	g_i [km]	$\lambda_i^{4)}$ [1]	$T_i^{5)}$ [Jahre]	v_i [km/h]	$R_o^{1)}$ [Tf/Jahr]	$r_{jo}^{2)}$ [1/Jahr]
Strasse:⁶⁾								
10	Murtera	0.26	0.08	0.18	1.4	70	0.0098	1.2E-05
15	Lawiner da l'Alp	0.46	0.13	0.18	0.7	50	0.0446	5.6E-05
i	.....	.....	.....	.....	....	....	.....	.....
17	Law. Cadritsch	0.16	0.07	0.18	0.6	50	0.0280	3.5E-05
24	Galaria	0.11	0.03	0.18	0.2	50	0.0360	4.5E-05
29	Däscher Lawine	0.24	0.05	0.18	0.5	50	0.0240	3.0E-05
n	.....	.....	.....	.....	....	....	.....	.....
total	47 Lawinenzüge	$\Sigma =$					0.7034	0.00087

¹⁾ berechnet gemäss Gleichung 1.1 mit einem DTV_w von 1'000 Fahrzeugen; ²⁾ berechnet gemäss Gleichung 1.2

³⁾ Die maximale Breite des Lawinenzugs im Strassenbereich $g_{i\max}$ wird für die Massnahmenplanung (Kap. 1.2.2) benötigt

⁴⁾ Zur Vereinfachung wurde hier eine mittlere Letalität für Todesfälle von Personen in Fahrzeugen eingesetzt

⁵⁾ Die Wiederkehrdauer T ist hier meist kleiner als 1, da pro Jahr mehrere Lawinenabgänge zu verzeichnen sind. Dank ausgezeichneten Katasterangaben konnte sie berechnet werden, ansonsten sind Abschätzungen erforderlich.

⁶⁾ Bei Bahnstrecken müssen unbedingt zusätzlich die Risikospitzen infolge stehender Züge in benachbarten Lawinenzügen gemäss Risikofall c) analysiert werden (Kap.1.3.3).

Das kollektive Risiko R_o im Risikofall b) berechnet sich demnach mit:

$$R_o = \frac{DTV_w \cdot \beta}{24h} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{T_i \cdot v_i} \gamma_i \cdot \lambda_i \cdot \delta_i \quad i = 1,2,\dots, n \text{ Lawinenzüge} \quad [\text{Todesfälle/Jahr}] \quad (1.3)$$

Für die Erklärung der Abkürzungen vgl. Gleichung 1.1 und Tab. 1.1

In bestimmten Fällen kann die Letalität λ_i und/oder die Fahrzeuggeschwindigkeit v_i konstant angenommen und vor das Summenzeichen geschrieben werden. Die Gleichung 1.3 vereinfacht sich sodann entsprechend.

Das individuelle Risiko r_{jo} einer Person j im Risikofall b) berechnet sich mit:

$$r_{jo} = \frac{z}{24h} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{T_i \cdot v_i} \gamma_i \cdot \lambda_i \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ Lawinenzüge} \quad [\text{pro Jahr}] \quad (1.4)$$

Für die Erklärung der Abkürzungen vgl. Gleichung 1.2 und Tab. 1.1

Risikofall c) Eine Lawine hat Verkehrsachse unterbrochen

Der Risikofall c) ist bei grosser Häufung von Lawinenzügen auf kurzer Distanz, bei Bahnstrecken und bei anderweitigen Fahrzeugstauungen zusätzlich massgebend und wird im Kap. 1.3.3 behandelt.

1.2.2 Massnahmenplanung

Mit der Massnahmenplanung auf der 2. Stufe werden im wesentlichen die Restrisiken und die jährlichen Kosten (an Stelle der Investitionskosten) genauer abgeschätzt. Es werden hier nur Einzelmassnahmen beurteilt, die sich allenfalls im folgenden Kapitel 1.3 zu Varianten (Massnahmenkombinationen) kombinieren und hinsichtlich Kosten und Risiken optimieren lassen.

Abschätzen des Restrisikos R_1 und Berechnen der Risikoverminderung R_v

Das Restrisiko R_1 verschiedener Massnahmen muss situationsspezifisch abgeschätzt werden. Als Anhaltspunkte können folgende Hinweise dienen:

a) Daten sind vorhanden (Abschätzung retrospektiv)

Für die Berechnung des Restrisikos sind diejenigen Lawinen relevant, die nach ausgeführten Massnahmen noch auftreten (und) wenn gleichzeitig die Verkehrsachse offen ist. Katasterangaben zum Lawinengeschehen auf Verkehrsachsen sollten deshalb zusätzlich zu den allgemeinen Angaben (wie Datum, Ausdehnung, Art der Lawine usw.) für (Rest-)Risikoberechnungen speziell die folgenden drei Fragen beantworten:

- Ist die Lawine natürlich abgegangen oder wurde sie künstlich ausgelöst?
- Hat die Lawine die Strasse verschüttet oder ist sie oberhalb zum Stillstand gelangt?
- War die Strasse zum Zeitpunkt des Lawinenabganges offen oder geschlossen?

Mit den natürlichen Lawinenabgängen pro Winter auf die offene Strasse kann die (Rest-) Lawinengefahr im Sinne der veränderten Wiederkehrdauer T_1 berechnet werden. Dies erlaubt sodann quantitative Restrisikoabschätzungen von bestehenden Schutzmassnahmen vorzunehmen (zu Stützverbauungen vgl. z.B. Margreth 1998).

b) Daten sind nicht vorhanden (Abschätzung prospektiv)

- Galerie: falls Galerielänge $l_G \geq g_{\max}$ (maximale Breite des Lawinenzugs im Strassenbereich) so kann vereinfacht das Restrisiko $R_1 = 0$ angenommen werden. Massgebend für ein allfälliges Restrisiko dürften noch Einwirkungen von Staublawinen am Rande von Galerien sein.

- Stützverbau: gemäss Richtlinien (BUWAL/WSL 1990) ausgeführt und Strasse liegt:
 - a) in der Auslaufstrecke der Lawine (Kap. 3, S. 67), so dürfte $R_1 < 5\%$ von R_o betragen
 - b) in der Sturzbahn der Lawine (Kap. 3, S. 67), so dürfte R_1 ca. $5\% - 15\%$ von R_o betragenDas Restrisiko lässt sich weiter reduzieren, wenn die Werkabstände verkleinert und die unterste Werkreihe als sog. Auffangwerk ausgeführt werden. Falls Verbauungen mit unverbauten Flächen zu beurteilen sind, muss ein Zuschlag zum obigen Restrisiko mit mindestens dem Verhältnis von unverbauter zu verbauter Fläche in % gemacht werden.
- Ablenk- und Auffangdämme: Wesentlich sind Lage und Höhe der Dämme bezüglich der Topographie und der relevanten Lawinenparameter. Abschätzungen müssen situationsspezifisch u.a. mit Lawinenberechnungen gemäss (Salm et al. 1990 und Gruber 1998) erfolgen. Treten im gleichen Lawinenzug Lawinen mit grosser Wahrscheinlichkeit mehr als einmal pro Winter auf, so müssen Hintereinfüllungen beachtet und evtl. Räumungen vorgesehen werden.
- Temporäre Strassensperrung **und** künstliche Lawinenauslösung: Untersuchungen (z.B. Stoffel 1996) zeigen, dass mit diesem Sicherungskonzept und den derzeitigen Erfahrungen in der Praxis noch Restrisiken im Bereich von $5\% - 20\%$ von R_o in Kauf genommen werden. Die Restrisiken können natürlich mit mehr Sperrtagen (vgl. Abb. 1.11, S. 34) beinahe beliebig vermindert werden. Im Vergleich dazu muss bei den Sicherungskonzepten ohne künstliche Lawinenauslösung (gleich lange Sperrzeiten vorausgesetzt) mit einer Verdoppelung des Restrisikos gerechnet werden. Mit der separaten Strassensperrung werden im Frühjahr relativ bessere Resultate erzielt als im Hochwinter.
- weitere Massnahmen: Das Restrisiko muss dabei situationsspezifisch abgeschätzt werden.

Die Risikoverminderung R_v berechnet sich mit:

$$R_v = R_o - R_1 \quad [\text{Todesfälle/Jahr}] \quad (1.5)$$

R_o = Risiko im Ausgangszustand, R_1 = Restrisiko nach getätigten Massnahmen

Abschätzen der jährlichen Kosten K_j (Kap. 3.4.2, S. 88 ff. und Kap. 3.5.1, S. 100 f.)

Die Erfassung jährlicher Kosten K_j von Schutzmassnahmen ermöglicht den Vergleich von Massnahmen mit verschiedenen Wirkungszeiträumen. Beispiele zur Kostenerfassung sind für verschiedene Massnahmen in Tab. 1.6 aufgelistet. Die Investitionskosten I_o und die Betriebskosten K_b müssen situations- bzw. projektspezifisch erfasst (z.B. Kostenvoranschlag) oder mit Einheitspreisen berechnet werden. Die Kalkulationsgrössen sind vom Autor abgeschätzte Mittelwerte, von denen für Sensitivitätsanalysen oder bei begründeten spezifischen Erfahrungen durchaus abgewichen werden kann.

Die jährlichen Kosten K_j können berechnet werden mit:

$$K_j = K_b + K_u + K_r + \frac{(I_o - L_n)}{n} + \frac{(I_o + L_n)}{2} \frac{p}{100} \quad [\text{Fr./Jahr}] \quad (1.6)$$

Für die Erklärung der Abkürzungen vgl. folgende Tab. 1.6, 2. und 3. Zeile; K_b , K_u und K_r werden in [Fr./Jahr] eingesetzt.

Tab. 1.6 Beispiele zur Berechnung jährlicher Kosten K_j von Schutzmassnahmen (Preisbasis 1998)

<i>festlegen</i>	<i>erfassen</i>		<i>abschätzen (Kalkulationsgrössen)</i>					<i>berechnen</i>
<i>Massnahmen</i>	<i>Investitionskosten I_o^*</i>	<i>Betriebskosten K_b</i>	<i>Unterhaltskosten K_u^{**}</i>	<i>Reparaturkosten K_r^{**}</i>	<i>Restwert L_n</i>	<i>Zinssatz p</i>	<i>Wirkungszeitraum n</i>	<i>jährliche Kosten K_j</i>
	[Mio Fr.]	[Fr./Jahr]	[%]	[%]	[Fr.]	[%]	[Jahre]	[Fr./Jahr]
400 m' Galerie	10	20'000	1	0.5	30% von I_o	2	30	533'300
2 km Perm. Stützverb.	3	0	0.5	0.5	0	2	50	120'000
2 km Temp. Stützverb. + Auff.	2	0	1	0.5	I_o	2	30	70'000
400 m' Erddämme	z.B. 2	0	0.5	0.2	I_o	2	100	54'000
Künstl. Law.ausl. (1 Law.zug)	'0'	25'000	0	0	0	2	1	25'000
1 Alarmanlage	0.25	3'500	2.5	2	0	2	10	42'300
1 Autom. Schneemessstation	0.15	6'000	4	2	0	2	10	31'500

* Als Einheitspreise können grob folgende Werte aus der Praxis dienen:

- Galerie: 20'000 Fr./m' (1-spurig) bis 30'000 Fr./m' (2-spurig)
- Stützverbau (Stahl oder Netz): 1'200 Fr./m' ($D_K=3.0m$) bis 1'800 Fr./m' ($D_K=4.0m$)
0.8 Mio Fr./ha ($D_K=3.0m$) bis 1.1 Mio Fr./ha ($D_K=4.0m$)
- Stützverbau (Holz): 700 Fr./m' + 50% für Gleitschneeschutz und Aufforstung d.h. $\approx 1'000$ Fr./m'
- Dammschüttungen: 10 Fr./m³ (einfache Schüttung) bis > 20 Fr./m³ (Schüttung mit Böschungssicherung, Entwässerung etc.)
- Künstliche Lawinenauslösung:

Munition Minenwerfer 12 cm	700 Fr./Ladung
Munition Rak-Rohr Hohlpanzergranate 89	150 Fr./Ladung
Heli, 1 Sprengladung Alpinit 4kg	70 Fr./Ladung
1 Anlage Gasex	$I_o = 300'000$ Fr.

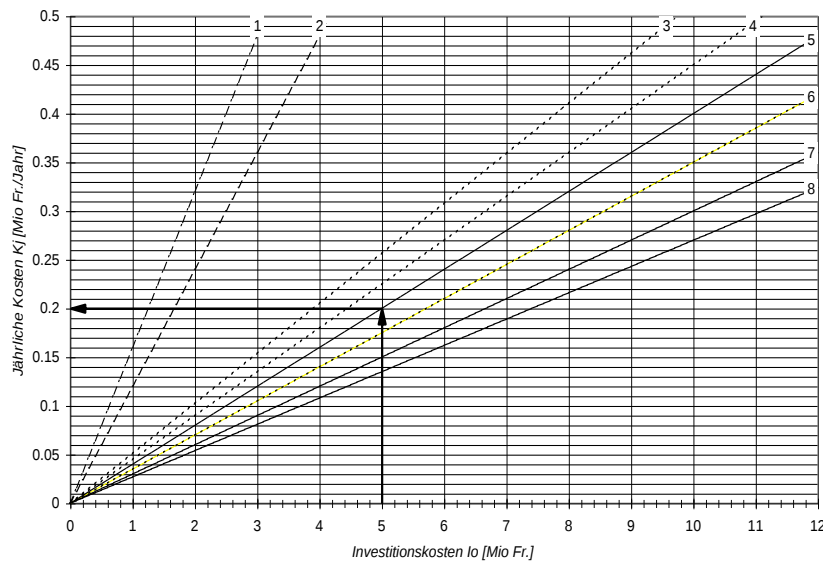
** Die Unterhaltskosten K_u und die Reparaturkosten K_r werden als jährlicher Anteil in % der Investitionskosten I_o abgeschätzt und zur Berechnung in [Fr./Jahr] eingesetzt

Grafische Abschätzung der jährlichen Kosten K_j

In Abb. 1.6 lassen sich ausgehend von den Investitionskosten I_o die jährlichen Kosten K_j für verschiedene Untersuchungszeiträume n (Lebensdauer der Massnahmen) graphisch abschätzen. Vorgeschlagen werden $n=10$ für Maschinen, Geräte, elektr. Anlagen, $n=30$ für temporären Stützverbau, evtl. Galerien, $n=50$ für permanenten Stützverbau, Galerien und $n=100$ evtl. für permanenten Stützverbau, Galerien, Dämme etc.

Die Restwerte L_n (vgl. Tab. 1.6) sind bei $n=30$ für temporäre Verbauungen mit $L_n=I_o$ und für Galerien mit $L_n=30\%$ von I_o angenommen, für Dämme ebenfalls $L_n=I_o$ (für die andern $L_n=0$). Fallen bei den Massnahmen auch Betriebskosten K_b an (wie z.B. für Beleuchtung, Lüftung, aber auch Datenerfassung usw.), so müssen diese in Abb. 1.6 noch zu den jährlichen Kosten K_j hinzuaddiert werden.

Abb. 1.6 Abschätzung der jährlichen Kosten K_j mit den Investitionskosten I_0 und den Standardannahmen gemäss Auflistung in Tab. 1.6 (die Betriebskosten K_b sind noch nicht berücksichtigt)



Vorgehen:

Von den Investitionskosten I_0 vertikal auf die entsprechende Linie verbinden und horizontal die jährlichen Kosten K_j ablesen

n = Untersuchungszeitr. [Jahre]

1 = elektrische Anlagen ($n=10$)

2 = Maschinen / Geräte ($n=10$)

3 = Galerien ($n=30$)

4 = Galerien ($n=50$)

5 = Perm. Stützverbau ($n=50$)

6 = Galerien ($n=100$) oder

6 = temp. Stützverbau ($n=30$)

7 = Perm. Stützverbau ($n=100$)

8 = Erddämme ($n=100$)

Berechnen der Kosten-Wirksamkeit KW

$$KW = \frac{K_j}{R_v} \quad [\text{Mio Fr./verhinderten statistischen Todesfall}] \quad (1.7)$$

K_j = jährliche Kosten, R_v = Risikoverminderung

Risikofall a) Ein Lawinezug kreuzt Verkehrsachse

In Tab. 1.7 sind für einzelne Beispiele aus Kap. 2 das Risiko R_0 sowie für die jeweils kostenwirksamste, bauliche Einzelmassnahme das Restrisiko R_1 , die Risikoverminderung R_v , die jährlichen Kosten K_j und die Kostenwirksamkeit KW zusammengestellt.

Tab. 1.7 Daten der Risikoanalyse und Massnahmenplanung

LZ ¹⁾ Nr.	Risiko R_0 [Tf/Jahr]	Massnahme	Restrisiko R_1 [Tf/Jahr] ²⁾	Risikovermind. R_v [Tf/Jahr]	jährl. Kosten K_j [Mio Fr./Jahr]	Kostenwirksamk. KW [Mio Fr./verh. Tf]
1.s	0.0243	Galerie	"0"	0.0243	0.190	7.8
1.b	0.0338	Galerie	"0"	0.0338	0.180	5.3
2	0.0600	Galerie	"0"	0.0600	0.120	2.0
3	0.0181	perm. Stützverbau	0.0018 (10%)	0.0163	0.026	1.6
4	0.0047	Galerie	"0"	0.0047	0.088	18.9
5	0.0028	Damm mit Galerie	"0"	0.0028	0.083	29.6
6	0.0269	Verwehungsverbau	0.0202 (75%)	0.0067	0.021	3.1

¹⁾ LZ = Lawinenzüge; ²⁾ Tf = statistische Todesfälle

Risikofall b) Mehrere Lawinenzüge kreuzen Verkehrsachse

In Tab. 1.8 sind einzelne Lawinenzüge des Beispiels Nr. 7 aus Kap. 2 mit deren Risiken R_o im Ausgangszustand aufgelistet. Zur grundsätzlichen Beurteilung der Kosten-Wirksamkeit des ganzen Systems und zur Evaluation der Lawinenzüge mit den kostenwirksamsten baulichen Schutzmöglichkeiten werden vorerst fiktiv für alle Lawinenzüge Galerien beurteilt. Deshalb wird das Risiko R_o gleich der Risikoverminderung R_v gesetzt und mit den jährlichen Kosten K_j die Kostenwirksamkeit KW berechnet. Damit ergibt sich eine grobe Prioritätenfolge für bauliche Massnahmen, wobei im folgenden dauernd evaluiert werden muss, ob sich nicht billigere bauliche Einzelmassnahmen anbieten, die bessere Kosten-Wirksamkeiten aufweisen. In der letzten Spalte sind noch die Verminderungen der Risiken pro Lawinenzug in % des gesamten Risikos berechnet (gilt für kollektive und individuelle Risiken).

Tab. 1.8 Daten der Risikoanalyse und Massnahmenplanung (nur Galerien) (Bsp. Nr. 5, Kap. 2)

Nr.	Lawinenzüge	Risiko R_o =Risikoverm. R_v [Tf/Jahr]	jährl. Kosten K_j [Mio Fr./Jahr]	Kosten-Wirksamk. KW [Mio Fr./verh. Tf]	R_v pro LZ ¹⁾ [%]
	Name				
10	Murtera	0.0098	0.260	26.5	1.4
15	Lawiner da l'Alp	0.0446	0.460	10.3	6.3
i	.....	.....	.....	.....	.....
17	Law. Cadritscha	0.0280	0.160	5.7	3.9
24	Galaria	0.0360	0.110	3.0	5.1
29	Däsker Lawine	0.0240	0.240	10.0	3.4
n	.....	.....	.....	.....	.....
total	47 Lawinenzüge	0.7034	10.005	14.2 (Durchschnitt)	100

¹⁾Risikoverminderung R_v pro Lawinenzug LZ

1.2.3 Projektbeurteilung und Check individuelle Todesfallrisiken

Werden die jährlichen Kosten K_j und die Risikoverminderungen R_v der Massnahmen aus Tab. 1.7 und Tab. 1.8 in Abb. 1.7 eingetragen, so kann deren Kosten-Wirksamkeit mit *sehr wirksam (grün)*, *wirksam (blau)* oder *wenig wirksam (rot)* abgegrenzt werden. Ergänzend ist eine Abgrenzung der Projekte nach deren Bedeutung (Ausmass der Risikoverminderung und der Kosten) zu vier Klassen (sehr gross, gross, mittel und klein) vorgenommen. Dies kann bei beschränkten Budgetmitteln mitentscheidend sein, ob einzelne kleine und mittlere Projekte an Stelle eines sehr grossen Projektes ausgeführt werden sollen. Die Handlungsempfehlungen in Tab. 1.10 basieren aber prioritär auf der Kosten-Wirksamkeit KW . Zuvor wird jedoch noch der Check der individuellen Risiken in Tab. 1.9 durchgeführt.

Check individuelle Risiken (Kap. 3.3.3, S. 85 f.)

Aus empirischen Erhebungen können für individuelle Todesfallrisiken sog. Akzeptanzbereiche nach **Risikokategorien** abgeleitet werden (Merz et al. 1995). Davon ausgehend werden hier Ziele (max. Grenzwerte) vorgeschlagen, die - falls nicht eingehalten - separat Massnahmen begründen können.

Sehr bedeutend sind die individuellen Risiken von **Strassensicherungsdiensten**, die im Zusammenhang mit Lawinen sehr grosse Ausmasse annehmen können (Arbeitsrisiken). Dies gilt zum Teil auch für Postautochauffeure, die lawinengefährdete Strassen sehr oft befahren müssen. Die Berechnung der individuellen Risiken erfordert meist situationsangepasste Abschätzungen. Es können z. B. zwei Durchfahrten der lawinengefährdeten Strasse pro Tag (PendlerInnen) angenommen werden, um die individuellen Risiken dieser Personengruppe zu modellieren.

Die **Strassenbenutzer** gehen die Lawinenrisiken weitgehend unfreiwillig ein, haben aber noch eine geringe Freiheit der Selbstbestimmung und Beeinflussung der Risikosituation. Bedeutend kann das individuelle Risiko von Strassenbenutzern auch dort werden, wo bei der Erschliessung kleiner Weiler oder einzelner Häuser die gleichen Personen die gefährdete Strassenstrecke mehrmals pro Tag befahren.

Bahnbenutzer gehen die Lawinenrisiken unfreiwillig ein und ihr Selbstbestimmungsgrad ist in einer Risikosituation sehr gering (Unfreiwillige Risiken). Es wurden diesbezüglich in der Vergangenheit sehr geringe Werte 'akzeptiert' und demzufolge wird für die Zielsetzung ein sehr tiefer Grenzwert angesetzt.

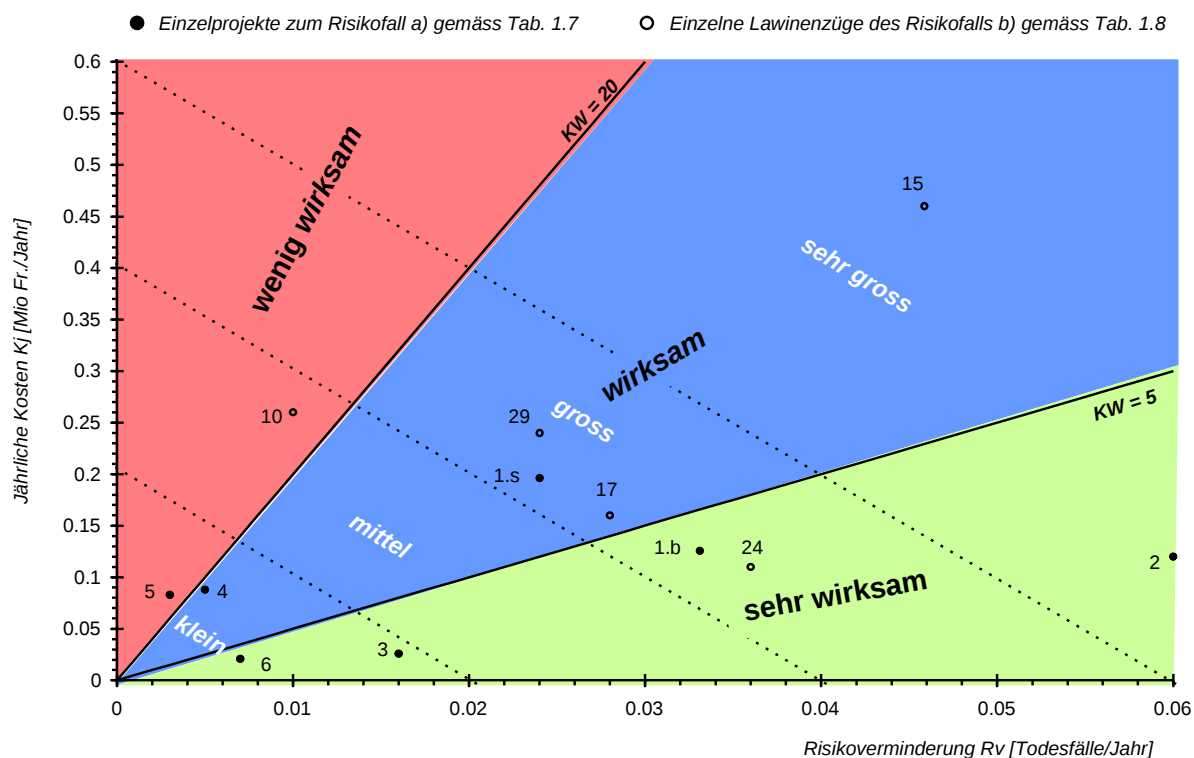
Sind die Grenzwerte der individuellen Risiken überschritten, so sollten spezifische Schutzmassnahmen vorgesehen werden, auch wenn die Kosten-Wirksamkeit bei der kollektiven Risikoverminderung gemäss Tab. 1.10 wenig wirksam ist. Diese Massnahmen sind jedoch ihrerseits auch mit einer Kosten-Wirksamkeit der individuellen Risikoverminderung verbunden, die hier nicht entscheidungswirksam einbezogen wird.

Tab. 1.9 Zielsetzungen (max. Grenzwerte) für individuelle Todesfallrisiken r_j nach Risikokategorien

Risikokategorien	Zielsetzung (max. Grenzwert) des individuellen Todesfallrisikos r_j [pro Jahr]	Determinanten der Risikobereitschaft
Strassensicherungsdienste	$< 1 \cdot 10^{-4}{}^{1)}$	Arbeitsrisiken werden bis zu einem gewissen Grad in Kauf genommen
Strassenbenutzer	$< 1 \cdot 10^{-5}$	Es besteht eine gewisse Selbstbestimmung und Beeinflussungsmöglichkeit der Risikosituation
Bahnbenutzer SBB /BLS usw.	$< 5 \cdot 10^{-6}$	Unfreiwillige Risiken, die nicht beeinflusst werden können

¹⁾ Für Vollzeitstelle und ca. halbjährliche Exposition (Winter) vorgeschlagen

Abb. 1.7 Kosten - Risikoverminderungsdiagramm (KW = Kosten-Wirksamkeit in Mio Fr./verh. Todesfall)



Tab. 1.10 Handlungsempfehlung aufgrund der Kostenwirksamkeit

Kosten- Wirksamkeit KW	Handlungsempfehlung	
	Risikofall a)	Risikofall b) ¹⁾
sehr wirksam ($KW < 5$)	Massnahmen ausführen falls keine wirksameren Einzelmassnahmen bestehen; Prioritäten nach der Kosten-Wirksamkeit und Budgetverfügbarkeit setzen	Bauliche Massnahmen an einzelnen Lawinenzügen nur ausführen falls diese einen Grossteil des gesamten Risikos eliminieren; Optimierung gemäss Kap. 1.3.2 wird empfohlen
wirksam ($5 < KW < 20$)	Vertiefte Untersuchung gemäss Kap. 1.3.1 durchführen	Vertiefte Untersuchung gemäss Kap. 1.3.2 durchführen
wenig wirksam ($KW > 20$)	Massnahmen nicht ausführen; evtl. redimensionierte und weitere Massnahmen prüfen	Bauliche Massnahmen nicht ausführen; evtl. passive Massnahmen für das ganze System gemäss Kap. 1.3.2 prüfen

¹⁾ Obwohl der Risikofall b) hier meist noch nicht abschliessend beurteilt werden kann, sind die Vorarbeiten (Tab. 1.8) Voraussetzung für die Optimierung gemäss Kap. 1.3.2. Falls die Lawinenzüge lokal in naher Abfolge bestehen oder eine Häufung von Lawinenzügen mit häufigen Lawinenabgängen vorliegt, muss auch das kollektive und individuelle Risiko gemäss Kap. 1.3.3 beurteilt werden.

1.3 Optimierung von Varianten (Massnahmenkombinationen) (3. Stufe)

In Sicherheitsbereichen allgemein lassen sich Varianten mit der Kombination verschiedener Massnahmen optimieren. Wesentlich ist dabei, ob Massnahmen eine punktuelle oder eine generelle Risikoverminderung im betrachteten System bewirken. Massnahmen mit punktueller Wirkung können nur einen bestimmten, örtlich abgrenzbaren Risikoanteil des Gesamtrisikos vermindern, während Massnahmen mit genereller Wirkung das Gesamtrisiko des Systems gleichzeitig vermindern bzw. im Extremfall eliminieren. Beispiele für Massnahmen im Lawinenschutz von Verkehrsachsen bei mehreren Lawinenzügen sind diesbezüglich:

- *punktuell wirkend:* *Galerien, permanente Stützverbauungen und künstliche Lawinenauslösung mit Gasex*
- *generell wirkend:* *Strassensperrungen, Carfahrverbote und künstliche Lawinenauslösung mit Helikopter*

In Abb. 1.8 sind Prinzipien der Risikoverminderung mit punktuell und generell wirkenden Massnahmen und deren Kombination aufgezeigt. Das Gesamtrisiko des betrachteten Systems kann dabei mit punktuell wirkenden Massnahmen (Galerien) 'stückweise' eliminiert oder alternativ dazu mit Strassensperrungen generell vermindert werden. Alle Massnahmen - sowohl einzel als auch in Kombination ausgeführt - sind mit einem Restrisiko behaftet. In Abb. 1.8 wird das Restrisiko von Galerien vernachlässigt und dasjenige von Strassensperrungen mit weissen Flächen gekennzeichnet.

Werden punktuell und generell wirkende Massnahmen getätigt, überlagern sich die Wirkungen bei der Risikoverminderung (Redundanz Z), was im folgenden berücksichtigt werden muss. So hat z.B. eine Galerie - getätigt nach Strassensperrungen - eine wirksame Risikoverminderung zur Folge, die kleiner ist als die Risikoverminderung der Galerie als Einzelmassnahme. In Abb. 1.8 ist beispielhaft das (Ausgangs-)risiko von vier Lawinenzügen aufgetragen. Eine temporäre Strassensperrung (Variante 1) vermindert das Risiko an allen Lawinenzügen, was mit den Flächen A, B, C und D aufgezeigt ist. Es verbleibt ein Restrisiko entsprechend den Flächen E, F, G und H. Eine Galerie als Einzelmassnahme im Lawinenzug 2 (Variante 2) hat dort eine vollumfängliche Risikoverminderung gemäss den Flächen B und F zur Folge. Das Restrisiko entspricht dabei den Ausgangsrisiken der verbleibenden Lawinenzüge 1, 3 und 4 (Flächen A, E, C, G, D und H). Schliesslich führt eine Galerie - ausgeführt nach einer Strassensperrung (Variante 3) - gesamthaft zur Risikoverminderung der Flächen A, B, C und D (Strassensperrung) und der Flächen B und F (Galerie) abzüglich der Redundanz (= Überlagerung der Risikoverminderung) von der Fläche B.

Von allen verfügbaren Massnahmen wird meist nur die Kombination von bestimmten Massnahmen eine optimale, d.h. gesamtkostenminimale Variante ergeben (Kap. 1, Abb. 1.12 und Kap 3, Abb. 3.24). In Abb. 1.8 ist vereinfacht die Variante 3 mit der Kombination der Einzelmassnahmen Galerie und Strassensperrung als Optimalvariante angenommen. Für diese Variante sind sodann die gesamten jährlichen Kosten ΣK_j zu erfassen, die entsprechende Risikoverminderung ΣR_v abzuschätzen und die (Gesamt-)Kosten-Wirksamkeit zu berechnen. Dazu ist die Redundanz bei der Risikoverminderung praktikabel zu berücksichtigen. Die Kombination verschiedener Einzelmassnahmen zu Varianten muss zur Beurteilung der (Gesamt-)Kostenwirksamkeit schliesslich folgende Bedingungen erfüllen:

- *Das Gesamtrisiko R_{tot} und die Risikoverminderung verschiedener Massnahmen ΣR_v lässt sich plausibel mit einer Dimension erfassen (hier Todesfälle pro Jahr).*
- *Die einzelnen Massnahmen sind unabhängig voneinander (z.B. punktuell wirkende Massnahmen) oder deren Abhängigkeiten (Bedingtheiten) sind mit einer Berücksichtigung der Redundanz abschätzbar.*

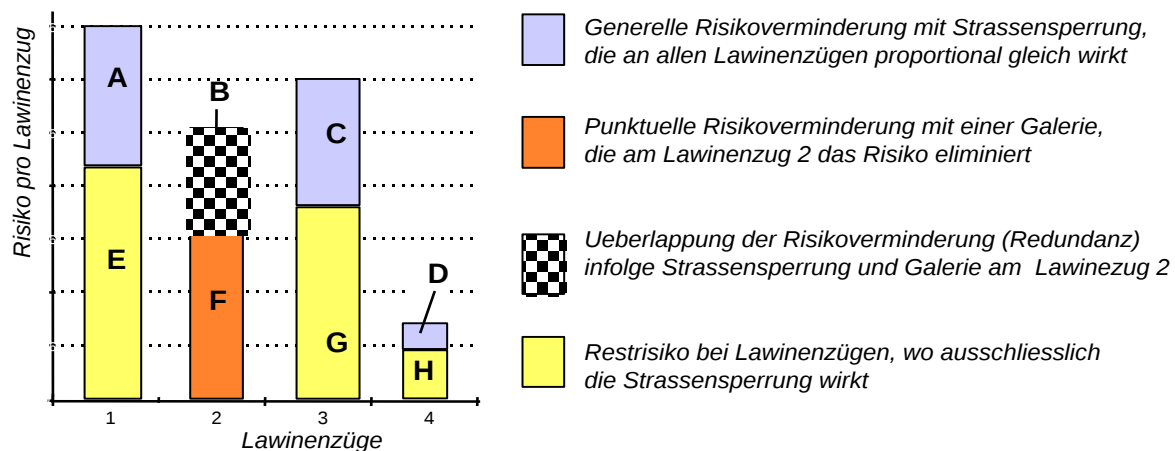
- Früher ausgeführte Massnahmen dürfen nur bedingt in eine (zeitlich) nachfolgende Optimierung einbezogen werden. So darf ein sehr wirksamer Verwehungsverbau (z.B. 1980 ausgeführt) zusammen mit einer wenig wirksamen Stützverbauung (z.B. 1999 geplant) nur bedingt als gesamthaft noch wirksam begründet werden.
- Der oft geringen Akzeptanz von temporären, organisatorischen Massnahmen (z.B. Strassensperrungen) nach bereits ausgeführten, baulichen Massnahmen muss mit überzeugender Information entgegengewirkt werden..

Variante 1, Temporäre Strassensperrung: Summe Risikoverminderung $\Sigma R_v = \text{Flächen } A+B+C+D$

Variante 2, Galerie im Lawinezug 2: Summe Risikoverminderung $\Sigma R_v = \text{Flächen } B+F$

Variante 3; Strassensperrung und Galerie: Summe Risikoverminderung $\Sigma R_v = \text{Flächen } A+B+C+D \text{ (Strassensperrung)} + F+B \text{ (Galerie)} - B \text{ (Redundanz)}$

Abb. 1.8 Prinzipien der Risikoverminderung mit der Kombination von Massnahmen zu Varianten unter Berücksichtigung der Redundanz



Zur Optimierung von Varianten wird das betrachtete System auf einen Lawinezug (Kap. 1.3.1) oder auf mehrere Lawinezüge (Kap. 1.3.2) bezogen. Nachgestellt ist in Kap. 1.3.3 die Beurteilung von Risikospitzen mit grossen Schadenausmassen, die - soweit nicht mit der vorangehenden Optimierung von Varianten abgedeckt - noch spezifische Massnahmen erfordern. Zur Erfassung der Redundanz ist im folgenden ein vereinfachtes und praktisches Vorgehen aufgezeigt, dessen Plausibilität in Kap. 3.4.3, S. 90 ff. überprüft wird.

1.3.1 Optimierung von Varianten bei einem einzelnen Lawinezug (Risiko-fall a)

Vorgehen

- 1.) Daten erfassen und Ausgangsrisiken berechnen (gemäss folgender Tab. 1.11 und Abb. 1.3, S. 11)
- 2.) Verschiedene Einzelmassnahmen definieren (Alternativen einbeziehen!) und deren jährliche Kosten K_j und Risikoverminderungen R_v abschätzen (Tab. 1.12)
- 3.) Kostenwirksamkeit KW der Einzelmassnahmen mit K_j / R_v berechnen (vgl. Tab. 1.12)
- 4.) Mit den Einzelmassnahmen können Varianten (Massnahmenkombinationen) gebildet, die gesamte Risikoverminderung ΣR_v abgeschätzt und deren jährliche Kosten ΣK_j berechnet werden. Ausgehend von der Einzelmassnahme mit der besten Kosten-Wirksamkeit sind die Wirksamkeiten von zweiten bzw. nachfolgenden Massnahmen nur noch am Restrisiko der ersten Massnahme bzw. vorausgehenden Massnahmenkombination zu beurteilen (vgl. Tab. 1.13 zur Redundanzberücksichtigung).
- 5.) Optimale Varianten (Massnahmenkombinationen) gemäss Abb. 1.9 mit Grenzkostenkriterium bestimmen

Risikoanalyse

Mit der Risikoanalyse werden die Daten in Tab. 1.11 erfasst und die Ausgangsrisiken gemäss Gleichung 1.1 und 1.2 auf S. 15 und 16 berechnet.

Tab. 1.11 Daten der Risikoanalyse (Fallstudie Optimalgraben)

Lawinenzug		Daten erfassen				kollektives Risiko	individuelles Risiko
Nr.	Name	g [km]	DTV_w [Fz]	T [Jahre]	v [km/h]	$R_o^{1)}$ [Tf/Jahr]	$r_{io}^{2)}$ [pro Jahr]
1	Optimalgraben	0.40	500	3	30	0.0267	$6.7 \cdot 10^{-5}$

¹⁾ gemäss Gleichung 1.1; ²⁾ gemäss Gleichung 1.2

Massnahmenplanung

Im folgenden sind für die verschiedenen Einzelmassnahmen gemäss Tab. 1.12 die Risikoverminderungen R_v in % vom Ausgangsrisiko R_o abgeschätzt. Bei der qualitativen Abschätzung ist es hilfreich zu überlegen:

- welche Faktoren des Risikos mit den jeweiligen Massnahmen beeinflusst werden (vgl. Kap. 3, Tab. 3.8),
- wieviele Lawinen nach ausgeführten Massnahmen noch auf die geöffnete Strasse abgehen (Restrisiko) und
- welche Differenz (Lawinen im Ausgangszustand minus Lawinen im Restrisikozustand) entsteht.

Die abgeschätzte Risikoverminderung in % am Ausgangsrisiko R_o aus Tab. 1.11 gemessen ergibt die Risikoverminderung R_v in Tf/Jahr. Die Abschätzungen in Tab. 1.12 beziehen sich auf die angesprochene Fallstudie und dürfen keinesfalls verallgemeinert werden. Mit den jährlichen Kosten können sodann die Kosten-Wirksamkeiten berechnet und die Einzelmassnahmen entsprechend Tab. 1.12, letzte Spalte gereiht werden.

Tab. 1.12 Daten der Massnahmenplanung und Berechnung der Kosten-Wirksamkeit KW

Nr.	Einzelmassnahmen	Risikoverminderung R_v		jährl. Kosten K_j [Mio Fr./Jahr]	Kosten-Wirksamkeit KW [Mio Fr./verh. Tf]
		[%] ¹⁾	[Tf/Jahr]		
1	Lawinendienst (Sperrungen)	40	0.0107	0.018 ²⁾	1.7
2	Verwehungsverbau	30	0.0080	0.021	2.6
3	Künstl. Lawinenauslösung	15	0.0040	0.015	3.8
4	Galerie	100	0.0267	0.450	16.9
5	Galerie verkürzt	90	0.0240	0.340	14.2
6	Permanenter Stützverbau	90	0.0240	>2 Mio	>80

¹⁾ An einer Fallstudie geschätzte Werte, die keinesfalls verallgemeinert werden dürfen

²⁾ Dabei sind nur Organisationsaufwände berücksichtigt; Methoden zur Bewertung von Sperrungen werden im Kap. 1.3.2 und im Kap. 3.5.1, S. 100 aufgezeigt.

Ausgehend von der Massnahme mit der besten Kosten-Wirksamkeit (Nr.1 Lawinensicherungsdienst) können Varianten gebildet, die gesamten Risikoverminderungen berechnet und die jährlichen Kosten aufaddiert werden (vgl. Tab. 1.13). Die Redundanz der Risikoverminderung Z_{R_v} wird hier berücksichtigt, indem die Risikoverminderungen von nachfolgenden Massnahmen jeweils am Restrisiko der ersten Massnahme bzw. der vorausgehenden Massnahmenkombination beurteilt sind. Wird z.B. ein Verwehungsverbau mit einer separaten Risikoverminderung $R_v = 30\%$ ausgeführt nachdem bereits ein Konzept mit Strassensperrung und einem Restrisiko von 60% bestanden hat, so ist mit dem Verwehungsverbau nur noch eine zusätzliche Risikoverminderung R_v von 30% von $60\% = 18\%$ zu erzielen (Variante B). In diesem Sinne sind die Varianten A - E in Tab. 1.13 aus den

Einzelmassnahmen Nr. 1, 2, 3 und 5 aus Tab. 1.12 kombiniert. Die Ergebnisse der Varianten können mit einem Risiko-Kosten Diagramm in Abb. 1.9 visualisiert werden.

Tab. 1.13 Varianten A - E gebildet aus Kombinationen der Massnahmen Nr. 1,2,3 und 5

Varianten Massnahmenkomb. ¹⁾	Risikoverminderung ΣR_v [%] ²⁾	$[Tf/Jahr]$	Restrisiko R_l [%]	jährl. Kosten ΣK_j [Mio Fr./Jahr]	Kosten - Wirksamkeit KW [Mio Fr./verhinderten Tf]
A: 1	40	0.0107	60	0.018	1.7
B: 1+(2)	40+(18)	0.0155	42	0.039	2.5
C: 1+(2)+(3)	40+(18)+(6)	0.0171	36	0.054	3.2
D: 1+(2)+(3)+(5)	40+(18)+(6)+(32)	0.0256	4	0.394	15.4
E: 5+(1)	90+(4)	0.0251	6	0.358	14.3

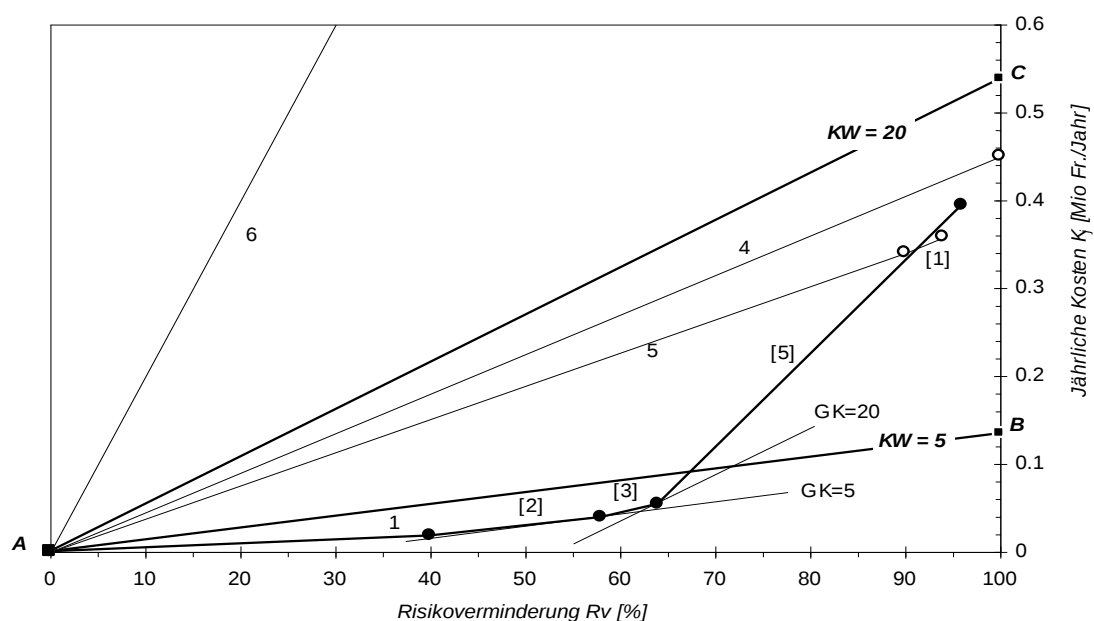
¹⁾ Die Zahlen in Klammern bezeichnen zweite oder nachfolgende Massnahmen (Reihenfolge einhalten)

²⁾ Die Werte in Klammern betreffen die Risikoverminderungen der zweiten und nachfolgenden Massnahmen in der Kombinationsabfolge (beeinflusst durch die zuerst ausgeführten Massnahmen)

Projektbeurteilung (Visualisierung der Resultate aus Tab. 1.13 mit Abb. 1.9 und Beurteilung mit Tab. 1.14)

- 1.) Die Summe der Risikoverminderung in % oder Tf/Jahr auf der x-Achse ($R_v = 100\% \cong R_0 = 0.0267 \text{ Tf/Jahr}$) und die Summe der jährlichen Kosten in Mio Fr./Jahr auf der y-Achse abtragen
- 2.) Die Geraden AB und AC bestimmen: $B = 5 \cdot R_0 = 0.13 \text{ Tf/Jahr}$ und $C = 20 \cdot R_0 = 0.53 \text{ Tf/Jahr}$ als quantitativer Wert (ohne Einheit) auf der y-Achse abtragen. Die Geraden entsprechen einer Kosten-Wirksamkeit KW von 5 bzw. KW von 20 Mio Fr./verhinderten Todesfall.
- 3.) Parallelen zu AB und AC als Tangenten (= Grenzkosten GK) an die Risikoreduktionskurven legen. Die kostenoptimale Risikoreduktion ergibt sich ausgehend vom Punkt A mit der Kombination der Einzelmassnahmen Nr. 1,(2),(3) und (5).

Abb. 1.9 Risiko - Kosten Diagramm mit optimaler Risikoreduktionskurve 1, (2), (3), (5) (KW = Kosten-Wirksamkeit; GK = Grenzkosten [Mio Fr./verh. Todesfall])



Check individuelle Risiken

Das individuelle Risiko r_{j0} eines Strassenbenutzers mit zwei Durchfahrten pro Tag liegt mit $6.7 \cdot 10^{-5}$ (Tab. 1.11) über dem Zielwert für Strassenbenutzer mit $1 \cdot 10^{-5}$ (Tab. 1.9, S. 23). Um diesen Zielwert für Strassenbenutzer zu erreichen müssten Massnahmen das individuelle Restrisiko r_{j1} auf 15 % vermindern. Dies wird nur mit den Einzelmassnahmen Nr. 4, 5 und 6 erreicht. Die Variante C mit einem Restrisiko von 36 % d.h. mit $r_{j1} = 2.4 \cdot 10^{-5}$ dürfte aber noch knapp im akzeptablen Bereich liegen, zumal die Annahme, dass eine Person jeden Wintertag die Strecke zwei mal befahren würde (Gl. 1.2), sehr restriktiv ist.

Beurteilung mit Grenzkostenansatz (Kap. 3.5.2, S. 102 f.)

Grenzkosten sind zusätzlich aufzuwendende Kosten für eine zusätzliche Sicherheitseinheit auf einem beliebigen Sicherheitsniveau. Als zusätzliche Sicherheitseinheit wird hier die Verhinderung eines statistischen Todesfalles Tf definiert und die Grenzkosten in Mio Fr./Tf erfasst. Die Abgrenzung zwischen sehr wirksam, wirksam und wenig wirksam wird wie bei der Kosten-Wirksamkeit mit 5 bzw. 20 Mio Fr./verhinderten Tf angesetzt (Tab. 1.14). Die Parallele zu KW=5 an die kostenoptimale Risikoreduktionskurve in Abb. 1.9 berührt diese als Tangente (Grenzkosten GK=5) bei Massnahme Nr. (2) und diejenige zu KW=20 bei Massnahme Nr. (3). Die Variante B ist somit als sehr kosten-wirksam, die Variante C noch als kosten-wirksam und die Variante D als wenig kosten-wirksam zu beurteilen. War z.B. die Einzelmassnahme Nr. 5 (Galerie verkürzt) gemäss Kosten-Wirksamkeit in Tab. 1.12 noch kosten-wirksam, so ist sie in der Kombinationsabfolge nach den Massnahmen 1,(2),(3) gemäss Grenzkostenbetrachtung nur noch wenig kosten-wirksam und nicht mehr zu empfehlen. Mit dem Grenzkostenansatz beurteilt, können die folgenden Handlungsempfehlungen in Tab. 1.14 abgeleitet werden:

Tab. 1.14 Variantenbeurteilung und Handlungsempfehlung (Fallstudie Optimalgraben)

<i>Grenzkosten GK</i> <i>[MioFr./verhind. Tf]</i>	<i>Varianten (A-D)</i> <i>1,2..6 Einzelmassn.</i>	<i>Beurteilung und Handlungsempfehlung</i>
GK ≤ 5 sehr wirksam	A: 1 B: 1+(2)	Variante A (Einzelmassnahme) ausführen; Restrisiko = 60 % Variante B ausführen; Restrisiko = 42 %
5 < GK ≤ 20 wirksam	C: 1+(2)+(3) E: 5+(1) 4	Falls keine wirksameren Alternativen bestehen Massnahme Nr. 3 auch ausführen; Restrisiko = 36 %; Massnahme Nr. 5 nicht ausführen obwohl die Kombination 1,(2),(3) und (5) eine Gesamtkostenwirksamkeit von KW < 20 Mio Fr./verh. Tf aufweist Restrisiko = 6 % und relativ hohe Kosten; Variante E nicht ausführen, da bessere Varianten bestehen Restrisiko = "0%" und hohe Kosten; Massnahme Nr. 4 evtl. als Alternative zu Massnahmenkombination 1+(2)+(3) ausführen, falls sehr geringe Restrisiken gefordert werden.
GK > 20 wenig wirksam	D: 1+(2)+(3)+(5) 6	Variante D nicht ausführen; geringes Restrisiko aber hohe Kosten und Redundanz Massnahme nicht ausführen! Geringes Restrisiko aber sehr hohe Kosten

1.3.2 Optimierung von Varianten bei mehreren Lawinenzügen (Risikof. b)

Die optimale Kombination von punktueller Risikoverminderung mit aktiven Massnahmen (an einzelnen Lawinenzügen wirkend) und genereller Risikoverminderung mit passiven Massnahmen (an allen Lawinenzügen wirkend) wird in diesem Kapitel aufgezeigt. Ziel ist es, ein Minimum von Massnahmenkosten, Sperrtagen und verbleibenden Restrisiken zu erreichen. Das Vorgehen ist exemplarisch anhand der Daten des Flüelapasses (Kap. 2) erläutert.

1.3.2.1 Kostenoptimale Risikoverminderung mit aktiven Massnahmen

Vorgehen

- 1.) Daten erfassen, Ausgangsrisiken der einzelnen Lawinenzüge bestimmen und das Gesamtrisiko berechnen gem. Tab. 1.5, S. 17 (Risikoanalyse)
- 2.) Aktive Massnahmen bzw. -kombinationen pro Lawinenzug definieren und kostenwirksamste Massnahme bzw. -kombination eruieren (abschätzen oder evtl. bestimmen gem. Kap. 1.3.1)
- 3.) Die jährlichen Kosten, Risikoverminderungen und Kosten-Wirksamkeiten aller 'Lawinenzüge' tabellieren und die Lawinenzüge nach der Kosten-Wirksamkeit von Massnahmen reihen (vgl. die folgende Tab. 1.15)
- 4.) Ausgehend von der Massnahme mit der besten Kosten-Wirksamkeit die Risikoverminderung und die Kosten der nächstbesten Massnahmen aufaddieren; die sich ergebende kostenoptimale Risikoverminderungsfunktion darstellen (vgl. Abb. 1.10) und mit Grenzkostenansatz beurteilen (Punkt $B=5 \cdot R_o$ als quantitativer Wert (ohne Einheit) auf der y-Achse auftragen)

In Tab. 1.15 sind zur Vereinfachung als kostenwirksamste Massnahmen an den einzelnen Lawinenzügen ausschliesslich Galerien mit Einheitspreisen von 25'000 Fr. pro m' berücksichtigt. Damit wird eine vollständige Risikoverminderung mit Restrisiko = "0" erreicht, was bei jährlichen Kosten von 10 Mio Fr. eine mittlere Kostenwirksamkeit des ganzen Systems von $KW \approx 14$ Mio Fr./verh. Todesfall zur Folge hat (vgl. Abb. 1.10).

Tab. 1.15 Daten der Massnahmenplanung für aktive Massnahmen an den einzelnen Lawinenzügen des Risikosystems (punktuelle Risikoverminderung am Bsp. Nr.5, Kap. 2)

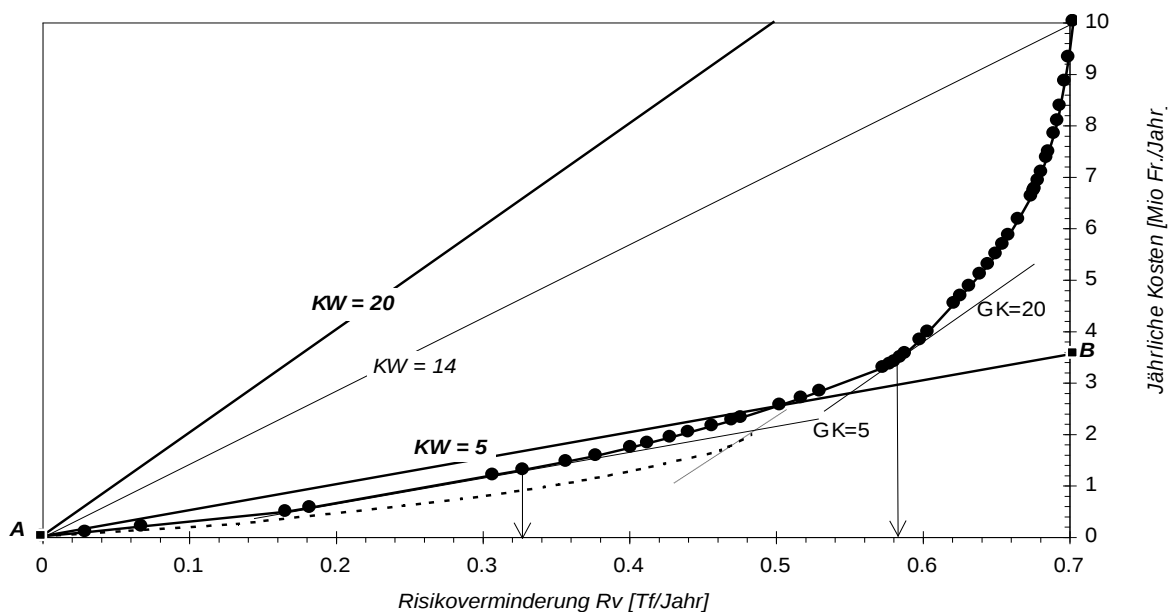
Nr.	Lawinenzüge	Risikoverminderung R_v		Invest. kosten I_o	jährl. Kosten K_i	Kosten-Wirksamk. KW
	Name	[Tf/Jahr]	[%]	[Mio Fr.]	[Mio Fr./Jahr]	[Mio Fr./verh. Tf]
21	Lawiner God Ars	0.0301	4.3	2.000	0.080	2.7
24	Galaria	0.0360	5.1	2.750	0.110	3.0
26	Breiter Zug	0.0976	13.9	7.125	0.285	3.0
22	Lawiner God Ars	0.0164	2.3	2.000	0.080	4.9
27	Champatsch	0.1248	17.7	15.750	0.630	5.0
3	Lawiner Sassè	0.0205	2.9	2.625	0.105	5.1
17	Lawiner Cadritscha	0.0280	3.9	4.000	0.160	5.4
i	.....	.....	.....	.....	.....	.....
6	Lawiner da Roz	0.0031	0.4	17.500	0.700	223.6
total	47 LZ = Vollverbau	0.7034	100	250.125	10.005	14.2 (Durchschnitt)



Es zeigt sich in Tab. 1.15, dass Galerien in den drei 'kosten-wirksamsten' Lawenzügen das Gesamtrisiko um rund 25% vermindern würden und mit Investitionskosten von ca. 12 Mio Fr. verbunden wären. Bessere, d.h. geringere Grenzkosten als 5 Mio Fr./verhinderten Todesfall sind gemäss Reihung in Abb. 1.10 bis zu Massnahmen an fünf Lawenzügen zu erwarten; dies entspricht dem Berührungspunkt der Tangente mit $GK=5$ an die kostenoptimale Risikoverminderungsfunktion in Abb. 1.10. Mit gesamthaft einer besseren Kosten-Wirksamkeit als 5 Mio

Fr./verh. Todesfall wäre noch bei einem Bauvolumen an 15 Lawenzügen zu rechnen (Schnittpunkt der Gerade AB, d.h. $KW=5$ mit der kostenoptimalen Risikoverminderungsfunktion). Vergleichsweise sind auch die Geraden $KW=20$ und $GK=20$ aufgetragen.

Abb. 1.10 Kostenoptimale vollständige Risikoverminderung und kostenoptimale unvollständige Risikoverminderung (gestrichelt dargestellt) mit aktiven Massnahmen (KW = Kosten-Wirksamkeit; GK = Grenzkosten [Mio Fr./verh. Todesfall])



Optimierung unter Budgetbeschränkung

Eine kostenoptimale, unvollständige Risikoverminderung, mit nicht umfassend wirksamen Massnahmen, erzielt am Anfang eine vergleichsweise noch bessere Risikoverminderung (gestrichelt in Abb. 1.10). Dieses Vorgehen ist aber mit einem Restrisiko behaftet. Dazu werden Massnahmen nur soweit ausgeführt, bis jeweils in allen Lawenzügen die Grenzkosten $GK = 20$ Mio Fr. pro verhinderten Todesfall betragen. Gesamthaft resultieren damit jährliche Kosten $K_j = 2$ Mio Fr. und ein Restrisiko $R_1 = 30\%$. In der Praxis ergibt sich jedoch oft die Situation, dass statt 2 Mio Fr. pro Jahr z.B. gesamthaft nur 1 Mio Fr. pro Jahr zur Verfügung stehen. Die relevante Frage lautet dann:

Bis zu welchen Grenzkosten soll in den einzelnen Lawinenzügen verbaut werden?

Da Massnahmen in jedem Lawinenzug eine andere Kostenfunktion für die Risikoverminderung aufweisen, ist eine generelle Aussage nicht möglich. Vorgeschlagen wird ein iteratives Vorgehen, wobei jeweils die kostenwirksamsten Massnahmen bis zu Grenzkosten von z.B. 10 oder 20 Mio Fr. pro verhinderten Todesfall ausgewählt (Vorgehen für die einzelnen Lawinenzüge gemäss Kap. 1.3.1) und die entsprechenden jährlichen Kosten K_j aufsummiert werden. Ist diese Summe der jährlichen Kosten noch grösser als die Budgetverfügung, müssen geringere Grenzkosten gewählt werden und umgekehrt. Bei wenigen Lawinenzügen können einfach einzelne Etappen - nach der Kosten-Wirksamkeit gereiht - ausgeführt werden bis das Budget aufgebraucht ist.

Die Beurteilung der aktiven Massnahmen allein ist jedoch meist nicht ausreichend. Erst nach einer separaten Beurteilung der passiven Massnahmen kann sodann eine Gesamtoptimierung erfolgen, in der auch allfällige Budgetbeschränkungen einzubeziehen sind.

1.3.2.2 Kostenoptimale Risikoverminderung mit passiven Massnahmen

Lawinenrisiken an Verkehrsachsen mit mehreren Lawinenzügen können auch allein mit passiven Massnahmen wie Strassensperrungen, Alarmanlagen, Car- oder Busfahrverboten usw. vermindert werden. Ausschlaggebend für Strassensperrungen ist eine fundierte Beurteilung der aktuellen Lawinengefahr. Dazu wird im Kap. 3.2.1, S.66 ff. auf Leistungen und Produkte hingewiesen, die am SLF bezogen werden können. Im folgenden werden exemplarisch nur Strassensperrungen beurteilt, wobei grössere Unsicherheiten bestehen als bei den aktiven Massnahmen. Die folgenden Abschätzungen sind exemplarisch in Tab. 1.16 und Abb. 1.11 zusammengefasst.

Vorgehen

1. *Ausgangsrisiko R_o gemäss Tab. 1.5, S. 17 erfassen (falls nicht bereits ausgeführt); dieses Risiko in % oder Tf/Jahr auf der x-Achse in der folgenden Abb. 1.11 auftragen (Risikoverminderung $R_v=100$ % bedeutet, dass das Ausgangsrisiko R_o eliminiert wird)*
2. *Die erforderliche Anzahl Sperrtage S_d bestimmen, die einer 100%-igen Risikoverminderung nahe kommt. Diese Sperrtage S_d als Punkt D in Abb. 1.11 auf der y-Achse auftragen.*
3. *Falls Daten zu Lawinenabgängen (Kataster) vorhanden sind, retrospektiv eine sog. theoretisch optimale Risikoverminderungsfunktion abgrenzen (Linie AE in Abb. 1.11).*
4. *Die zukünftig zu erwartende Risikoverminderungsfunktion liegt zwischen der theoretisch optimalen Risikoverminderungsfunktion AE und der Geraden AD in Abb. 1.11 und muss bestmöglichst angenähert werden.*

Zu Punkt 2.

Für die erforderliche Anzahl Sperrtage S_d werden hier für die betrachtete Passstrasse diejenigen Tage erfasst, die gemäss Lawinenbulletin des SLF eine Gefahrenstufe von $\geq$ 'mässig' aufwiesen (vgl. Tab. 3.3, S. 70). Dies entspricht einer Obergrenze, d.h. für Verkehrsachsen in schneearmen Tälern, in tieferen Lagen oder bei einer geringen Anzahl von Lawinenzügen kann dieser Wert wesentlich tiefer liegen. Am vorliegenden Beispiel werden $S_d=110$ Sperrtage postuliert und die mittlere Sperrtagewirksamkeit SW berechnet sich mit $SW=S_d/R_o=156.4$ Sperrtage/verhinderten Todesfall.

Zu Punkt 3.

Zur Erfassung der theoretisch optimalen Risikoverminderung wird der Lawinenkataster retrospektiv für einige Winter ausgewertet und es sollen Sperrtage von je 24 h Dauer zur Verfügung stehen. Angefangen mit demjenigen Tag, der gemäss Kataster am meisten Lawinen aufwies, werden die Sperrtage pro Winter nach abnehmender Wirksamkeit so verteilt, bis der letzte Tag nur noch einen Lawinenabgang abgedeckt hätte. Die mit Sperrtagen 'abgedeckten' Lawinenabgänge können im Verhältnis zur gesamten Zahl der Lawinenabgänge pro

Winter als Risikoverminderung berechnet werden. Dieses Vorgehen mit den Daten von neun Wintern ergibt die Kurvenschar in Abb. 1.11. Zehn Sperrtage hätten im lawinenärmsten Winter eine Risikoverminderung von $R_v=100\%$ zur Folge gehabt; im lawinenreichsten Winter entsprechend eine solche von $R_v=60\%$. Der arithmetische Mittelwert (fett) soll die theoretisch optimale Risikoverminderungsfunktion annähern. Mit max. 25 Sperrtagen wäre demnach im Mittel über die ausgewerteten Jahre das ganze Risiko eliminiert worden (Punkt E).

Zu Punkt 4.

Die abzuschätzenden realen Risikoverminderungsfunktionen (nur Sperren oder Sperren und künstliche Lawinenauslösung) werden hier als Mittel zwischen der Geraden AD und der theoretisch optimalen Risikoverminderungsfunktion AE ermittelt.

Nur Sperren

Es wird dazu angenommen, dass die Sperrtage prospektiv ebenfalls 'optimal' nach abnehmender Sperrtage-Wirksamkeit ausgewählt werden, jedoch für die gleiche Risikoverminderung, wie rückwirkend ausgewertet, durchgehend rund vier mal mehr Sperrtage erforderlich seien. Damit der Punkt E auf den Punkt D zu liegen kommt werden die 110 Sperrtage durch 25 Sperrtage dividiert, d.h. eine Sperreinheit von 4.4 Tagen - prospektiv abgeschätzt - soll die gleiche Wirkung wie ein Sperrtag - retrospektiv erfasst - haben. Die theoretisch optimale Risikoverminderungsfunktion multipliziert mit 4.4 ergibt sodann die Risikoverminderung nur mit Sperren (ausgezogene Linie mit Punkten in Abb. 1.11). Die Kreuze zeigen die Streuungen, die mit diesem Vorgehen verbunden sind bezogen auf die Daten der letzten 10 Jahre. Die 25 Sperreinheiten 1s-25s und Angaben zu den jährlichen Kosten, den Risikoverminderungen und zu den Kosten-Wirksamkeiten sind in Tab. 1.16 aufgeführt. Die jährlichen Kosten pro Sperreinheit (0.400 Mio Fr.) können mit dem sog. Ersatzkostenansatz (Kap. 3, S.100f) bewertet werden, indem die gesamten jährlichen Kosten eines Vollverbau von 10.005 Mio Fr. (Tab. 1.15) durch 25 Sperreinheiten dividiert werden. Die Risikoverminderungen pro Sperreinheit entsprechen denjenigen, die bei der theoretisch optimalen Risikoverminderung unter Punkt 3. berechnet wurden und in Tab. 1.16 aufgelistet sind.

Tab. 1.16 Daten der Massnahmenplanung für passive Massnahmen, die auf das ganze Risikosystem wirken (generelle Risikoverminderung mit Strassenspernung am Bsp. Nr. 5, Kap.2)

<i>Sperreinheiten</i>		<i>Risikoverminderung R_v</i>		<i>jährl. Kosten</i>	<i>Kosten-Wirksamkeit KW</i>
<i>Nr.</i>	<i>[Sperrtage/Jahr]</i>	<i>[Tf/Jahr]</i>	<i>[%]</i>	<i>[Mio Fr./Jahr]</i>	<i>[Mio Fr./verh. Tf]</i>
1 s	4.4	0.1583	22.5	0.400	2.5
2 s	4.4	0.0952	13.5	0.400	4.2
3 s	4.4	0.0745	10.6	0.400	5.4
4 s	4.4	0.0574	8.2	0.400	7.0
5 s	4.4	0.0506	7.2	0.400	7.9
i	.....	.....	.....	.....	.....
25 s	4.4	0.0008	0.1	0.400	501.8
total	110	0.7034	100	10.005	14.2 (Durchschnitt)

Sperren und künstliche Lawinenauslösung

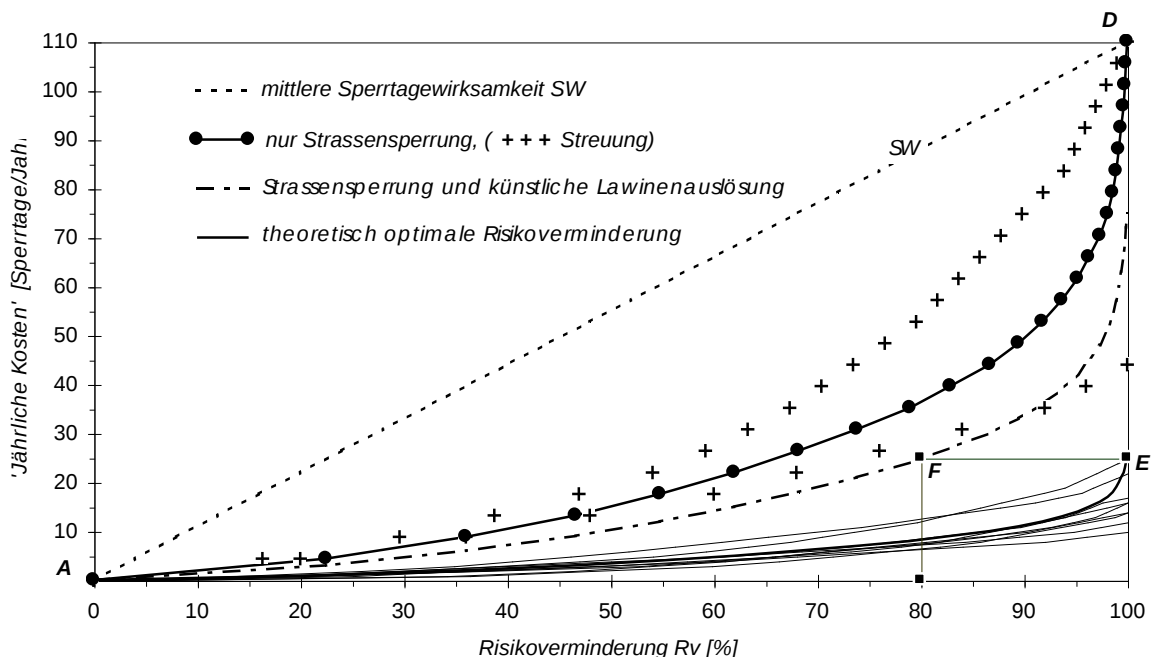
Aktive Massnahmen, wie die künstliche Lawinenauslösung, können sowohl punktuell (permanente Gasex Anlage oder feste Minenwerferstellungen) als auch generell wirken (Helikoptersprengungen mit situationsspezifischer Auswahl der Sprengpunkte). Der Punkt F in Abb. 1.11 ergibt sich aus dem heute betriebenen Sicherungskonzept (Sperren und künstliche Lawinenauslösung), wenn die Anzahl Lawinen auf die offene Strasse im Verhältnis zu den natürlichen Lawinenabgängen insgesamt betrachtet wird (Restrisiko $R_1=20\%$). Es wurden dabei im Mittel rund 26 Sperrtage pro Jahr aufgewendet. Die Risikoverminderungsfunktion mit Sperren und künstlicher Lawinenauslösung ist sodann - entsprechend dem Vorgehen beim Sperren allein - mit der strichpunkttierten Linie angenähert, wobei die theoretisch optimale Risikoverminderungsfunktion AE mit drei multipliziert auf den Punkt F zu liegen kommt. Diese Funktion soll (theoretisch) ebenfalls erst im Punkt D mit $S_d=110$ Sperrtagen das Risiko vollumfänglich eliminieren.



Die künstliche Lawinenauslösung soll hier wie eine generelle Risikoverminderung durch Strassensperrung angesehen werden (z.B. Sprengung mit Heli in allen Lawinenzügen möglich) und sei mit Kosten von 8'000 Fr. pro Tag verbunden. Zusammen mit den jährlichen Kosten der Sperreinheiten ergeben sich jährliche Kosten von 0.435 Mio Fr./Sperreinheit ($0.4 + 4.4 \cdot 0.08$), was bei einer vollumfänglichen Risikoverminderung zu jährlichen Kosten von rund 10.9 Mio Fr./Jahr führen würde (Tab. 1.17). Die Risikoverminderung in % für eine Sperreinheit von 4.4 Tagen kombiniert mit künstlicher Lawinenauslösung wird dabei graphisch aus Abb. 1.11 an der Funktion *Sperren und künstliche Lawinenauslösung* herausgemessen und als Anteil am Gesamtrisiko in [Tf/Jahr] berechnet (Tab. 1.17).

herausgemessen und als Anteil am Gesamtrisiko in [Tf/Jahr] berechnet (Tab. 1.17).

Abb. 1.11 Optimale Risikoverminderung mit passiven Massnahmen (Sperrtagen)



Tab. 1.17 Daten der Massnahmenplanung für Massnahmen, die auf das ganze Risikosystem wirken (generelle Risikoverminderung mit künstlicher Lawinenauslösung und Strassensperrung)

Massn. ¹⁾ Nr.	Sperrungen [Tg/Jahr]	Risikoverminderung Rv		nur Kosten kLA [Mio Fr./Jahr]	jährl. Kosten [Mio Fr./Jahr]	KW [Mio Fr./verh. Tj]
		[%] ²⁾	[Tj/Jahr]			
1 kLA+s	4.4	29	0.2040	0.035	0.435	2.1
2 kLA+s	4.4	17	0.1196	0.035	0.435	3.6
3 kLA+s	4.4	12	0.0844	0.035	0.435	5.2
4 kLA+s	4.4	10	0.0703	0.035	0.435	6.2
5 kLA+s	4.4	8	0.0563	0.035	0.435	7.7
6 kLA+s	4.4	6	0.0422	0.035	0.435	10.3
7 kLA+s	4.4	5	0.0352	0.035	0.435	12.4
i	.....	..	.....	.....	.....	.....
25 kLA+s	4.4	nicht mehr graphisch aus Abb. 1.11 bestimmbar				
total	110	100	0.7034	0.875	10.875	15.5 (Durchschnitt)

¹⁾ kLA = künstliche Lawinenauslösung; s = sperren; ²⁾ graphisch aus Abb. 1.11 herausgelesen

1.3.2.3 Gesamtkostenminimierung mit aktiven und passiven Massnahmen

Im Lawinenschutz von Verkehrsachsen wird letztlich die Zielsetzung verfolgt, die Gesamtkosten K_g einer Sicherungsvariante (i) zu minimieren. Diese Gesamtkosten setzen sich grundsätzlich aus Massnahmenkosten K_m und Schadenkosten K_s zusammen. In den Massnahmenkosten sind die direkten Kosten K von baulichen Massnahmen und die bewerteten Sperrtage S enthalten und als Schadenkosten werden die (Rest-)Risiken R_i bewertet. Zur Erfassung eines Schutzsystems und dessen Wirksamkeiten (am Beispiel der hier beurteilten Verkehrsachse mit mehreren Lawinenzügen und vielfältigen Schutzmöglichkeiten) können vorerst drei Extremvarianten (Nullvariante, Dauersperrung, Vollverbau) mit den Kostenelementen in Tab. 1.18 quantifiziert werden.

Bei der Nullvariante (n) werden bei dauernd offener Strasse nur Strassenverschüttungen geräumt und das Risiko $R_n=R_o=0.7034$ Todesfälle/Jahr berechnet sich gemäss Gl. 1.3 oder Tab. 1.5. Bei der Dauersperrung (d) wird an Tagen mit $\geq$ mässiger Lawinengefahr gemäss EISLF (Hrsg.) 1998 die entsprechende Strecke ganztags gesperrt, was für den Flüelapass mit $S_d=110$ Sperrtagen pro Winter in Kap. 1.3.2.2 bereits erfasst wurde. Die Variante Vollverbau (v) repräsentiert bauliche Massnahmen (Galerien, Stützverbau usw.), wobei die ganze Strecke mit Massnahmenkosten $K_v=10.005$ Mio Fr./Jahr vollumfänglich gesichert wird (Kap. 1.3.2.1). Die weiteren Kostenelemente der Extremvarianten sind sehr gering und können gemäss Tab. 1.18 vernachlässigt werden.

Tab. 1.18 Varianten und Kostenelemente des Verkehrsachsenschutzes

(Extrem-) Varianten	Kostenelemente		
	direkte Kosten K	Sperrtage S	(Rest-) Risiko R_i
	[Fr./Jahr]	[Sperrtage /Jahr]	[Todesfälle/Jahr]
Nullvariante (n)	gering	'keine'	$R_n = R_o$
Dauersperrung (d)	gering	S_d	sehr gering
Vollverbau (v)	K_v	'keine'	sehr gering
Sicherungsvariante(i) ¹⁾	K_i	S_i	R_{i_i}

¹⁾ Die Kostenelemente einer Sicherungsvariante (i) setzen sich aus den direkten Kosten für bauliche Massnahmen K_p , den anfallenden Sperrtagen S_i und dem Restrisiko R_{i_i} zusammen

Es wird im folgenden angenommen, dass sowohl die Variante Vollverbau (v) als auch die Variante Dauersperrung (d) separat das Risiko R_o - berechnet mit der Nullvariante - vollständig eliminieren. Eine mittlere Kosten - Wirksamkeit KW des ganzen Systems mit baulichen Massnahmen kann mit der Wirkung der Massnahmenkosten K_v der Variante Vollverbau im Verhältnis zum Risiko R_o , das damit eliminiert wird, berechnet werden gemäss:

$$KW = \frac{K_v}{R_o} = 14.2 \quad [\text{Mio Fr. / verhind. Todesfall}] \quad (1.8)$$

Entsprechend lässt sich eine mittlere Sperrtage - Wirksamkeit SW auch mit der mittleren Wirkung der Sperrtage S_d berechnen mit:

$$SW = \frac{S_d}{R_o} = 156.4 \quad [\text{Sperrtage / verhind. Todesfall}] \quad (1.9)$$

Da mit den Massnahmenkosten K_v und den Sperrtagen S_d die gleiche Wirkung erzielt wird, können die Sperrtage in Franken ausgedrückt werden (Sperrtage-Kosten-Vergleich SKV) gemäss:

$$SKV = \frac{KW}{SW} = \frac{K_v}{S_d} = 0.091 \quad [\text{Mio Fr. / Sperrtag}] \quad (1.10)$$

Somit lassen sich die Gesamtkosten K_{gi} der möglichen Schutzvarianten i berechnen mit:

Gesamtkosten $K_g = (\text{Massnahmenkosten } K_m) + \text{Schadenkosten } K_s$ $K_{gi} = (K_i + S_i \cdot SKV) + R_{li} \cdot KW$ [Mio Fr. / Jahr] (1.11)

K_i = Kosten für bauliche Massnahmen [Mio Fr./Jahr]; S_i = effektiv anfallende Sperrtage [Tg /Jahr]; SKV = Sperrtage - Kosten Vergleich gemäss Gl. 1.10	R_{li} = Restrisiko [Todesfälle /Jahr] KW = mittlere Kosten - Wirksamkeit gemäss Gl. 1.8 i = Varianten ($i = 1, \dots, n$ Einzelmassnahmen kombiniert)
---	---

Werden nun an einer Verkehrsachse für verschiedene Schutzvarianten i jeweils die direkten Kosten K_i , die Sperrtage S_i und die Restrisiken R_{li} erfasst, so lassen sich die entsprechenden Gesamtkosten K_{gi} berechnen. Danach gilt:

Diejenige Variante i mit den geringsten Gesamtkosten $K_{gi \min}$ ist aus technischer Sicht die Optimalvariante! (vgl. dazu für das praktische Vorgehen Abb. 1.12 und für Grundlagen Abb. 3.2, S. 66 und Abb. 3.21, S. 93)

Massnahmenkosten K_m

Die Massnahmenkosten K_m setzen sich aus direkten monetären Aufwendungen für aktive Massnahmen K_i und den - mit dem Ersatzkostenansatz bewerteten - Sperrtagen ($S_i \cdot SKV$) zusammen. Die Kosten der Sperrtage können auch mit nachfrageseitigen Bewertungsansätzen, d.h. Wertschätzungen der Nutzniesser bewertet werden (vgl. die folgende Sensitivitätsanalyse im Kap. 1.3.2.4).

Schadenkosten K_s

Die Schadenkosten K_s entsprechen dem jeweiligen Restrisiko R_{li} multipliziert (bewertet) mit der mittleren Kosten-Wirksamkeit KW des Systems (Gl. 1.8 bzw. Gl. 1.11) oder mit einem 'externen' Grenzkostenansatz (vgl. Kap. 3). Im vorliegenden Fall werden 'externe' Grenzkosten $GK = 20$ Mio Fr./verhinderten Todesfall - an Stelle der Kosten-Wirksamkeit KW - in Gl. 1.11 eingesetzt (vgl. auch die folgende Sensitivitätsanalyse im Kap. 1.3.2.4).

Gesamtkosten K_g

Die Gesamtkosten K_g - als Summe der Massnahmen- und Schadenkosten - entsprechen bei der Nullvariante den maximalen Schadenkosten; sie werden geringer bis zu einem Minimum bei der Optimalvariante und steigen anschliessend wieder an bis zu den Kosten eines Vollverbau oder einer Dauersperrung (vgl. Abb. 1.12).

Vorgehen zur Minimierung der Gesamtkosten gemäss Tab. 1.19 und Abb. 1.12 (in Tab. 1.19 sind die Spalten in der zweiten Zeile von 1 - 17 numeriert)

- 1.) *Separate Optimierung mit aktiven und passiven Massnahmen gemäss Tab. 1.15, Tab. 1.16 und Tab. 1.17 durchführen*
- 2.) *Erfassen der Kostenelemente der Extremvarianten gemäss Tab. 1.18 und Berechnen der mittleren System - Wirksamkeiten gemäss Gl. 1.8 - 1.10.*
- 3.) *Entscheiden, ob passive Massnahmen ohne künstliche Lawinenauslösung (Tab. 1.16) oder wie im vorliegenden Falle mit künstlicher Lawinenauslösung (Tab. 1.17) mit den aktiven Massnahmen aus Tab. 1.15 kombiniert werden sollen.*
- 4.) *Reihen der Einzelmassnahmen nach ihrer Kosten-Wirksamkeit in Tab. 1.19, Spalte 8 und Auflisten der entsprechenden Kostenelemente gemäss Spalte 3-6*
- 5.) *Ausgehend von der Null - Variante (Spalte 9, Nr. 0) die Einzelmassnahmen hinzukombinieren*
 - *Die Variante 1 entspricht der Einzelmassnahme 1, die Variante 2 den Einzelmassnahmen 1 + 2, usw.*
 - *Die jährlichen Kosten der Galerien und der künstlichen Lawinenauslösung K_j sowie die Sperrtage S werden aufsummiert (Spalte 10+11).*
 - *Die Risikoverminderungen der hinzukommenden Einzelmassnahmen (gemessen am Ausgangsrisiko in Spalte 7) werden jeweils proportional am Restrisiko der vorangehenden Varianten berechnet und in Spalte 12 aufsummiert (Vorgehen gemäss Tab. 1.12 und Tab. 1.13).*
 - *Das Restrisiko in Spalte 13 wird berechnet, indem vom Ausgangsrisiko R_o jeweils die aufsummierte Risikoverminderung (Spalte 12) subtrahiert wird.*
 - *Die Grenzkosten der Varianten (Spalte 14) entsprechen hier den Kosten-Wirksamkeiten der hinzukommenden Massnahmen an dieser Stelle. Die Kosten-Wirksamkeiten der Varianten (Spalte 15 dividiert durch Spalte 12) entsprechen ungefähr den Kosten-Wirksamkeiten der Einzelmassnahmen (Spalte 8).*
- 6.) *Die Massnahmen-, Schaden- und Gesamtkosten in Spalte 15-17 berechnen gemäss Gl. 1.11*
 - *Massnahmenkosten $K_m = K_i + S_i \cdot SKV$; (SKV eingesetzt gemäss Gl. 1.10)*
 - *Schadenkosten $K_s = R_{li} \cdot KW$; (KW mit GK = 20 Mio Fr./verh. Todesfall eingesetzt)*
 - *Gesamtkosten $K_g = \text{Massnahmenkosten } K_m + \text{Schadenkosten } K_s$*
- 7.) *Variante mit minimalen Gesamtkosten $K_{g \min}$ in Spalte 17 eruieren*
- 8.) *Die aufsummierte Risikoverminderung $\sum R_v$ (Spalte 12) auf der x-Achse und die Massnahmen-, Schaden- und Gesamtkosten (Spalten 15-17) auf der y-Achse in Abb. 1.12 auftragen und diskutieren*

Diskussion

In Abb. 1.12 sind die Kosten der Massnahmenabfolge und der Optimalvariante gemäss Tab. 1.19 visualisiert. Mit Gesamtkosten von rund 7 Mio Fr./Jahr ist im Optimum eine Risikoverminderung von rund 0,5 Tf/Jahr erreichbar. Die damit verbundenen Investitionskosten betragen 40 Mio Fr., es sind nur noch 13 Sperrtage pro Winter erforderlich und das Restrisiko ergibt sich mit 30%.

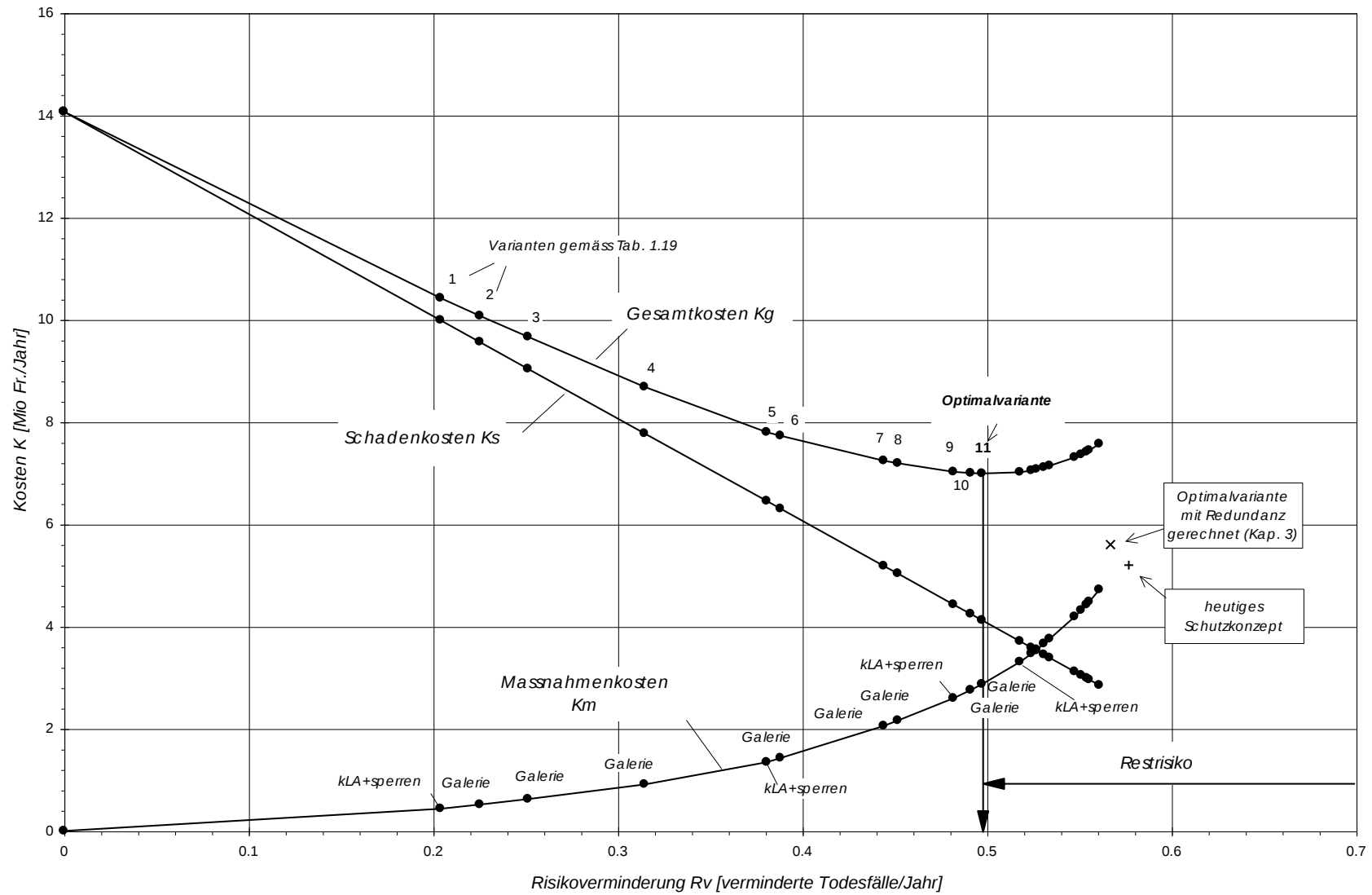
In einem weiteren Schritt können nun vom Entscheidungsträger eigene oder nutzerseitige Bewertungsansätze (wie Grenzkosten pro verhinderten Todesfall oder Kosten pro Sperrtag) in die Optimierung einbezogen werden (erweitertes Risikomanagement). Damit kann schliesslich eine abschliessende Diskussion gemäss dem folgenden Kap. 1.3.2.4 geführt werden.

Tab. 1.19 Gesamtkostenminimierung durch Kombination von Einzelmassnahmen zu Varianten

Einzelmassnahmen (gem. Tab. 1.15 und Tab. 1.17)								Varianten (Kombination von Einzelmassnahmen)								
Nr.	Art	$K_j \text{ }_G$ [MioFr./a]	$K_j \text{ }_{kLA}$ [MioFr./a]	S [Tg/a]	$'K_j \text{ }_S$ [MioFr./a]	R_v [Tf/a]	KW [Mio Fr./Tf]	Nr.	ΣK_j [MioFr./a]	ΣS [Tg/a]	$'\Sigma R_v'$ [Tf/a]	R_l [Tf/a]	GK [Mio Fr./Tf]	K_m [Mio Fr./a]	K_s [Mio Fr./a]	K_g [Mio Fr./a]
1	2	3	4	5	6=5 · SKV	7	8=(3+4+6)/7	9	10=Σ(3+4)	11=Σ5	12	13=R _l - 12	14	15=Σ(3+4+6)	16=13 · GK	17=15 +16
1 kLA+s	kLA+sperren		0.035	4.4	0.400	0.2040	2.1	0	0	0	0	0.7034	--	0	14.07	14.07
21	Galerie	0.080				0.0301	2.7	1	0.035	4.4	0.2040	0.4994	2.1	0.435	9.99	10.42
26	Galerie	0.110				0.0384	2.9	2	0.115	4.4	0.2254	0.4780	3.7	0.515	9.56	10.08
24	Galerie	0.285				0.0983	2.9	3	0.225	4.4	0.2515	0.4519	4.2	0.625	9.04	9.66
2 kLA+s	kLA+sperren		0.035	4.4	0.400	0.1196	3.6	4	0.510	4.4	0.3146	0.3888	4.5	0.910	7.78	8.69
22	Galerie	0.080				0.0164	4.9	5	0.545	8.8	0.3807	0.3227	6.6	1.345	6.45	7.80
27	Galerie	0.630				0.1248	5.0	6	0.625	8.8	0.3883	0.3151	10.6	1.425	6.30	7.73
3	Galerie	0.105				0.0205	5.1	7	1.255	8.8	0.4442	0.2592	11.3	2.055	5.18	7.24
3 kLA+s	kLA+sperren		0.035	4.4	0.400	0.0844	5.2	8	1.360	8.8	0.4517	0.2517	13.9	2.160	5.03	7.19
17	Galerie	0.160				0.0294	5.4	9	1.395	13.2	0.4819	0.2215	14.4	2.595	4.43	7.02
16	Galerie	0.115				0.0204	5.6	10	1.555	13.2	0.4912	0.2122	17.3	2.755	4.24	7.00
4 kLA+s	kLA+sperren		0.035	4.4	0.400	0.0703	6.2	11	1.670	13.2	0.4973	0.2061	18.7	2.870	4.12	6.99
12	Galerie	0.160				0.0235	6.8	12	1.705	17.6	0.5179	0.1855	21.1	3.305	3.71	7.01
11	Galerie	0.080				0.0116	6.9	13	1.865	17.6	0.5241	0.1793	25.8	3.465	3.59	7.05
2	Galerie	0.115				0.0154	7.5	14	1.945	17.6	0.5271	0.1763	27.1	3.545	3.53	7.07
25	Galerie	0.095				0.0125	7.6	15	2.060	17.6	0.5309	0.1725	29.8	3.660	3.45	7.11
5 kLA+s	kLA+sperren		0.035	4.4	0.400	0.0563	7.7	16	2.155	17.6	0.5340	0.1694	31.0	3.755	3.39	7.14
n	---	---	---	--	---	----	--	17	2.190	22	0.5476	0.1558	32.1	4.190	3.12	7.31
total	72 Massnahmen	10.005	0.875	110	10.005	1.4068	--	i	K _i	S _i	---	R _{li}	--	---	--	K _{gi}
								73	10.880	110	0.7034	0	--	20.885	0	20.885

K_j = jährliche Kosten R_v = Risikoverminderung G = Galerien T_f = Todesfall kLA = künstl. Lawinausl. GK = Grenzkosten K_s = Schadenkosten n = Massnahme
 S = Sperrtage KW = Kostenwirksamkeit a = Jahr R_l = Restrisiko s = sperren K_m = Massnahmenkosten K_g = Gesamtkosten i = Variante

Abb. 1.12 Optimierung der Schaden-, Massnahmen- und somit Gesamtkosten in Funktion der Risikoverminderung



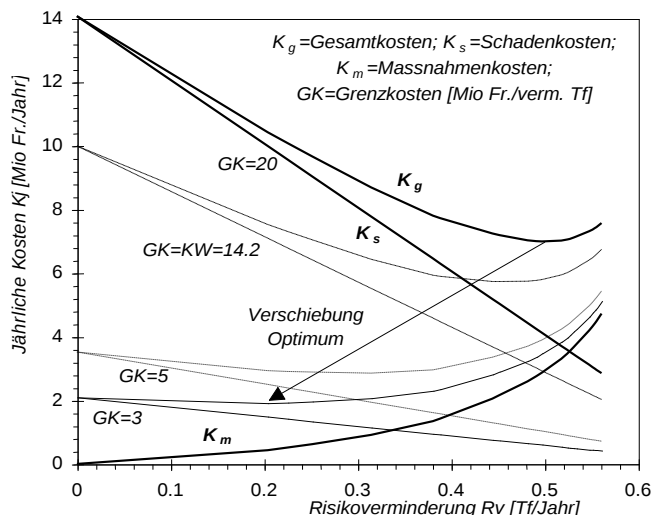
1.3.2.4 Sensitivität der Optimalvariante mit veränderten Bewertungsansätzen

Ausgehend von der Optimalvariante (Alternative A in Tab. 1.20, Zeile 2) werden die Auswirkungen alternativer Schadenkostenbewertungen (Alternativen B, C, und D) und alternativer Bewertungen von Sperrtagen (Alternativen E und F), d.h. insbesondere deren Einfluss auf die Zusammensetzung der Massnahmen und auf das Ausmass der Gesamtkosten und Restrisiken der Optimalvarianten beurteilt. Schliesslich ist auch die heute bestehende, reale Schutzsituation als Alternative G aufgeführt. Nicht aufgelistet sind die Sensitivitäten alternativer Bewertungen der Investitionskosten für Galerien und der Betriebskosten für künstliche Lawinenauslösung, da deren Streuungen gering und demzufolge deren Einflüsse unwesentlich sind.

Sensitivität der Schadenkostenbewertung (Kap. 3.5.2, S. 102 ff.)

Ausgehend von der Alternative A, wo bekanntlich die Schäden bzw. die Restrisiken mit Grenzkosten von $GK = 20$ Mio Fr./Tf bewertet wurden, sind bei Alternative B die mittlere Kosten-Wirksamkeit des Systems (Gl. 1.8) mit $KW = 14.2$ Mio Fr./Tf und bei Alternative C Grenzkosten $GK = 5$ Mio Fr./Tf eingesetzt. Bei Alternative D wird analysiert, bei wie geringen Grenzkosten keine Galerien mehr getätigt werden sollen. Dies wäre bei Grenzkosten $GK = 3$ Mio Fr./Tf der Fall, wobei nur noch eine Sperreinheit (4.4 Sperrtage) vor dem Optimum zu liegen kommt. Die Auswirkungen einer alternativen Schadenkostenbewertung mit unterschiedlichen Grenzkosten GK sind in Abb. 1.13 und Tab. 1.20 aufgelistet.

Abb. 1.13 Sensitivität der Schadenkostenbewertung

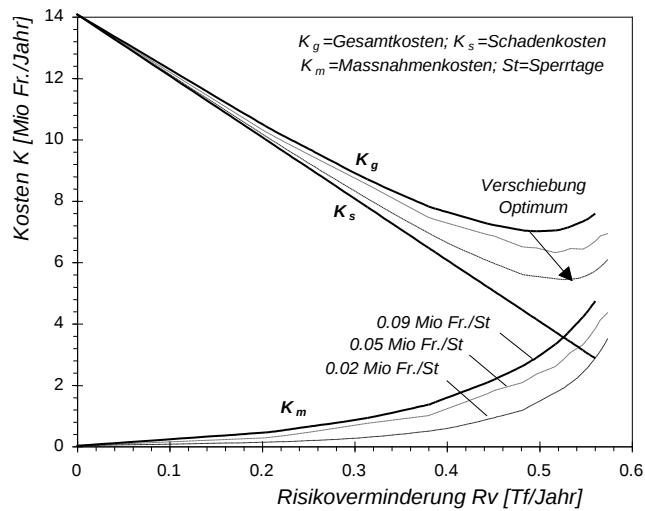


Grundsätzlich ändert sich die Reihenfolge der getätigten Massnahmen mit alternativer Bewertung der Schadenkosten nicht, da damit die Kosten-Wirksamkeit der Einzelmassnahmen nicht beeinflusst wird. Je geringere Grenzkosten wir also aufwenden, um so geringere Gesamtkosten und desto höhere Restrisiken wird die Optimalvariante aufweisen (Alternativen A bis D, Tab. 1.20). In Abb. 1.13 entspricht dies einem flacheren Verlauf der Schadenkostenfunktion K_s , was eine Verschiebung des Optimums nach unten und nach links zur Folge hat. Die Optimalvariante ergibt sich also bereits bei der Kombination von weniger Massnahmen.

Sensitivität der Massnahmenkostenbewertung (Kap. 3.5.1, S. 100 f.)

Ausgehend von der Alternative A, wo bekanntlich die Sperrtage mit einem (angebotsseitigen) Ersatzkostenansatz, d.h. gemäss Gl. 1.10 mit einem Sperrtage-Kosten-Vergleich $SKV=0.091$ Mio Fr. pro Sperrtag, bewertet wurden, ist bei Alternative E ein nutzenseitiger Bewertungsansatz von 0.05 Mio Fr. pro Sperrtag eingesetzt. Bei Alternative F wird analysiert, bei wie geringem Bewertungsansatz für Sperrtage zuerst in der Kombinationsabfolge 6 Sperreinheiten getätigt würden (ähnlich der heutigen Situation). Dies ergibt sich schliesslich bei 0.02 Mio Fr. pro Sperrtag. Die alternativen Bewertungsansätze können hier als nachfrageseitige Bewertungen im Sinne der aggregierten Wertschätzungen der Nutzniesser (wie auch immer erfasst) oder als restriktive Vorgabe des Entscheidungsträgers interpretiert werden. Die Auswirkungen einer alternativen Massnahmenbewertung sind in Abb. 1.14 und Tab. 1.20 aufgezeigt.

Abb. 1.14 Sensitivität der Massnahmekostenbewertung



Die Reihenfolge der Massnahmen wird beeinflusst, weil mit geringeren Kosten für Sperrtage auch die Kosten-Wirksamkeiten der Sperreinheiten besser werden und diese somit weiter vorne in der Kombinationsabfolge zu liegen kommen. Unverändert bleibt hier vorerst die Anzahl der getätigten Massnahmeneinheiten bis zur Optimalvariante (11 Einheiten). Je geringer die Bewertung für einen Sperrtag angesetzt wird, desto geringer werden die Gesamtkosten und Restrisiken einer Optimalvariante. In Abb. 1.12 entspricht dies gesamthaft einem flacheren Verlauf der Massnahmekostenfunktion K_m , was eine Verschiebung des Optimums nach unten und nach rechts zur Folge hat.

Tab. 1.20 Sensitivitätsbeurteilung mit sechs alternativen Bewertungsansätzen

Alternativen	Art und Anzahl der Massnahmen	Invest.kosten [Mio Fr.]	Betriebskosten [Mio Fr./Jahr]			Sperrtage [Tg]	Gesamtkosten [Mio Fr./Jahr]	Restrisiken [%]
			Galerien	kLA	gesamt			
A	8 G + 3 SE	39.1	0.39	0.11	0.50	13.2	7.0	29
B	6 G + 2 SE	32.3	0.32	0.07	0.39	8.8	5.7	36
C	3 G + 1 SE	11.9	0.12	0.04	0.16	4.4	2.9	55
D	1 SE	'0'	0	0.04	0.04	4.4	1.9	71
A	8 G + 3 SE	39.1	0.39	0.11	0.50	13.2	7.0	29
E	6 G + 5 SE	32.3	0.32	0.18	0.50	22	6.2	26
F	5 G + 6 SE	29.6	0.30	0.21	0.51	26.4	5.4	25
G	6 SE (heute)	---	---	0.21	0.21	26.4	5.1	18

Bei der Alternative F, wo bekanntlich die 6 Sperreinheiten zuerst in der Kombinationsabfolge stehen, führt die Berechnung des Restrisikos mit vereinfachter Berücksichtigung der Redundanz zu einem Fehler, da bei der Kombination gleichartiger Massnahmen keine Redundanz auftritt. Die korrekte Berücksichtigung der Risikoverminderungen der Sperreinheiten hätte Gesamtkosten von rund 3 Mio Fr./Jahr und ein Restrisiko von ca. 15 % zur Folge, wobei anschliessend bis zum Optimum nur noch 3 Galerien getätigt würden. Diese Beurteilung - nur für die 6 Sperreinheiten - wird schliesslich noch in Alternative G mit dem anfangs aufgezeigten Bewertungsansatz von 0.09 Mio Fr./Sperrtag vorgenommen. Mit Gesamtkosten von 5.1 Mio Fr. pro Jahr und einem Restrisiko von 18 % kommt diese Berechnung nahe der empirisch erfassten, heutigen Schutzvariante zu liegen. Es zeigt sich allerdings auch, dass bis zum Optimum, d.h. zusätzlich zur heutigen Situation noch drei Galerien ausgeführt werden könnten.

1.3.3 Beurteilung von Risikospitzen (Risikofall c)

Das Vorgehen zur Modellierung und Beurteilung von Risikospitzen (Abb. 3.16, S. 80) wird hier exemplarisch mit dem Risikofall c) modelliert. Der Risikofall c) ist ein Störfall, d.h. eine Lawine (oder sonst ein Ereignis) hat die offene Verkehrsachse unterbrochen und es ergeben sich Fahrzeugstauungen, die kurzzeitig von möglichen Lawinen aus benachbarten Lawinenzügen gefährdet werden (vgl. die folgende Abb. 1.15). Der Risikofall c) ist als Ergänzung/Vertiefung zum Risikofall a) relevant, falls im Bereich des Lawinenzuges häufig Fahrzeugstauungen zu erwarten sind (Verkehrsknotenpunkt, Lichtsignal usw.), oder als Ergänzung/Vertiefung zum Risikofall b), falls die Lawinenzüge in naher Abfolge bestehen oder eine Häufung von Lawinenzügen mit häufigen Lawinenabgängen (mehr als ein Abgang pro Lawinenzug und Jahr) vorliegt.

Die Modellierung von Risikofall c) ist mit grossen Unsicherheiten verbunden und erfordert meist fallspezifische Annahmen und Berechnungen. Schutzmassnahmen sind v.a. ergänzend zu den bereits vorgesehenen Präventivmassnahmen und insbesondere spezifisch während der Intervention, d.h. während ca. einer Stunde von Bedeutung. Die folgende Risikoanalyse muss nicht durchgeführt werden, wenn die Massnahmen und Varianten gemäss der Beurteilung der vorangehenden Kapitel das Risiko von Risikofall c) bereits auch ausreichend vermindert haben. Zusammenfassend können hier exemplarisch für die in Kapitel 1.3.2 beurteilte Risikosituation mit mehreren Lawinenzügen folgende Fragen gestellt werden, um zu entscheiden ob der Risikofall c) beurteilt werden muss.

- | | |
|--|---|
| 1.) Ist der Risikofall c) relevant? | => Ja; Häufung von vielen Lawinenzügen besteht |
| 2.) Sind die bereits geplanten Massnahmen zu ergänzen? | => Ja; ergänzend zum heutigen Sicherheitskonzept |
| 3.) Sind weitere, spezifische Massnahmen wirksam? | => Vermutlich; muss im folgenden beurteilt werden |

Falls zumindest eine dieser Fragen eindeutig mit 'Nein' beantwortet werden kann, ist der Risikofall c) nicht weiter zu beurteilen.

1. Ist der Risikofall c) relevant?

Grobabschätzung des Risikos

Wesentlich für den Risikofall c) sind:

- die räumliche Abfolge der Lawinenzüge im betrachteten System (lokale Häufungen)
 - die topographischen Bedingungen in den Anrissgebieten (ähnliche Exposition, gleiche Windeinwirkung usw.)
 - die erschwerten Bedingungen auf der Strasse (schmale, geneigte Fahrbahn, enge Kurven, keine Wendeplätze)
- Treffen die erwähnten Punkte weitgehend zu, so kann eine Grobabschätzung des Risikos mit den Längenverhältnissen zwischen sicheren und gefährdeten Strassenabschnitten gemacht werden.

Vorgehen

1. Die Grössen Q , n , g' , g'_{max} und s' des betrachteten Systems gemäss Abb. 1.15 und Tab. 1.22 erfassen
 2. Die Verhältnisse von s' / g' und von g'_{max} / g' berechnen; aufrunden auf die Werte gemäss Tab. 1.21
 3. In Tab. 1.21 den Faktor k bestimmen und beurteilen, ob der Risikofall c) relevant ist
 4. Risikofall c) ist relevant: Grobabschätzung des Risikos im Risikofall c) mit dem k -fachen Risiko des Risikofalls b) gemäss $R_c = k \cdot R_b$ (k =Faktor gemäss Tab. 1.21); vertiefte Risikoanalyse ausführen
- Risikofall c) ist +/- relevant: Vertiefte Risikoanalyse ausführen
- Risikofall c) ist nicht relevant: Zusätzlich fallspezifisch lokale Häufungen von Lawinenzügen beurteilen und falls diese auch nicht relevant sind, die Beurteilung beenden.

Gemäss den berechneten Durchschnittswerten in Tab. 1.22 ergeben sich s'/g' mit 2.7 d.h. aufgerundet 3 und $g'_{\max}/g'$ mit 2.8 d.h. aufgerundet 3 und somit k in Tab. 1.21 mit $k = 1.2$ bzw. mit linearer Interpolation zu ca. 1.5. Das Risiko im Risikofall c) ist mit $1.5 \cdot 0.7034 \text{ Tf/a} = 1.06 \text{ Tf/a}$ von relevanter Grössenordnung und zudem bestehen lokal grosse Häufungen von Lawinenzügen mit häufigen Lawinenabgängen. Eine vertiefte Risikoanalyse soll ausgeführt werden.

Tab. 1.21 Faktor k in Abhängigkeit der Verhältnisse von $g'_{\max}/g'$ und s'/g'

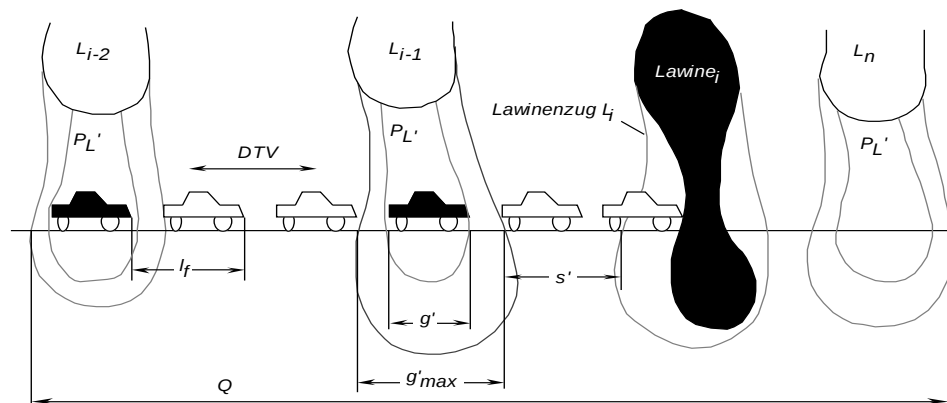
		Verhältnis von $g'_{\max} / g'$			
		1.5	2	3	4
Verhältnis von s' / g'	0.5	10.2	6.6	3.4	2.0
	1	6.5	4.5	2.6	1.6
	2	3.4	2.6	1.7	1.2
	3	2.1	1.7	1.2	0.9
	4	1.4	1.2	0.8	0.6
	5	1.0	0.9	0.7	0.5
	6	0.7	0.7	0.5	0.4

Risikofall c) ist nicht relevant	Risikofall c) ist +/- relevant	Risikofall c) ist relevant
----------------------------------	--------------------------------	----------------------------

Vertiefte Risikoanalyse

Der Risikofall c) erfasst das Risiko, das sich bei einem Fahrzeugstau in benachbarten Lawinenzügen während der Zeitdauer Δt ergibt. Δt repräsentiert den Zeitraum bis die Strasse geräumt ist, oder die Fahrzeuge den Gefahrenraum rückwärtig verlassen haben. Die Anzahl dieser möglichen Situationen (m) pro Jahr muss dabei berücksichtigt werden, um das jährliche Risiko vergleichbar mit Risikofall a) und b) zu berechnen. In Abb. 1.15 sind die erforderlichen Beurteilungsgrössen gekennzeichnet und deren Erfassung ist anschliessend in Tab. 1.22 erklärt.

Abb. 1.15 Risikosituation und Beurteilungsgrössen (Risikofall c)



Alle Grössen in Abb. 1.15 und Tab. 1.22, die mit einem ' bezeichnet sind, repräsentieren Mittelwerte, berechnet aus den einzelnen Angaben aller Lawinenzüge im System. Nach einem Lawinenabgang im Lawinenzug L_i werden also die Grössen der restlichen Lawinenzüge und die Häufigkeit von Lawinenabgängen fiktiv gleich verteilt, so dass der Risikofall c) ebenfalls einem Mittelwert des betrachteten Systems entspricht. Soll hingegen für einen Lawinenabgang in einem bestimmten Lawinenzug der Risikofall c) für die benachbarten Lawinenzüge berechnet werden, so sind deren spezifischen Grössen einzusetzen.

Tab. 1.22 Beurteilungsgrössen und deren Erfassung im Risikofall c)

Beurteilungsgrösse		Einheit	Wert ¹⁾	Erfassung / Berechnung
Q	Länge des betrachteten Systems	km	19.40	auf Plan/Karte messen; Abgrenzung gem. Abb. 1.15
n	Anzahl Lawinenzüge	l	47	gemäss Katasterplan; vgl. Tab. 1.5, Risikofall b)
g'	durchschnittliche, mittlere Breite von Lawinen im Strassenbereich	km	0.077	$\sum g_i / n$; mit $i = 1, 2, \dots, n$ Lawinenzügen; Mittelwert über alle Lawinen in allen Lawinenzügen gerechnet
$g'_{\max}$	durchschnittliche, maximale Breiten der Lawinenzüge im Strassenbereich	km	0.213	$\sum g_{i \max} / n$; mit $i = 1, 2, \dots, n$ Lawinenzügen; Mittelwert über alle Lawinenzüge gerechnet
s'	durchschnittliche, sichere Strassenstrecken	km	0.204	$(Q - g'_{\max} / n - 1) - g'_{\max}$
l_f	mittlerer Fahrzeugabstand stehender Fahrzeuge	km/Fz	0.01	abschätzen; generell werden 0.01 km/Fz vorgeschlagen
DTV_w	durchschnittlicher täglicher Verkehr im Winter	Fz	1000	aus Strassenverkehrszählung übernehmen; falls nicht vorhanden, plausible Abschätzung machen
$\Delta t^{2)}$	mittleres Zeitintervall für einen Risikofall c)	h	1	abschätzen; je nach Systemgrösse und bereits vorhandenem Sicherungskonzept
$p_L^{3)}$	mittlere Lawinenwahrscheinlichkeit in benachbarten Lawinenzügen während Δt	l	0.05	Katasterangaben zu denjenigen Tagen mit >1 Lawinenabgang im System auswerten; den hier abgeschätzten Wert nicht verallgemeinern!
m	erwartete Anzahl Risikofälle c) pro Jahr	l	9	Risikofall a): situationsspezifisch abschätzen Risikofall b): mit der Anzahl Tage pro Jahr abschätzen, die >1 Lawinenabgang/Tag aufweisen

¹⁾ Werte, die für die vorliegende Beurteilung der Flüelapassstrasse abgeschätzt und/oder berechnet wurden und die keinesfalls verallgemeinert werden dürfen!!

²⁾ Werte von 15 Minuten (kleines Risikosystem mit wenig Lawinenzügen und gutem Strassensicherungsdienst) bis zu Werten von 1.5 Stunden (grosses Risikosystem ohne Strassensicherungsdienst) abschätzen

³⁾ Werte von 0.005 (Lawinen sind selten und Anrissgebiete haben unterschiedliche Expositionen) bis zu Werten von 0.05 (Lawinen sind häufig und Anrissgebiete haben ähnliche Expositionen)

Das Risiko im Risikofall c) kann damit berechnet werden gemäss:

$$R_{(c)} = K \cdot \frac{p_L \cdot DTV^2 \cdot g' \cdot \Delta t \cdot m}{(g'_{\max} + s')^2} = 1.003 \quad [\text{Todesfälle/Jahr}] \quad (1.12)$$

Mit dem Faktor $K = (\lambda \cdot \beta \cdot l_f) / 24^2 = 5.031 \cdot 10^{-6}$ sind zusätzlich zu den Grössen in Tab. 1.22 noch die Letalität $\lambda = 0.18$ Todesfälle / erfasste Person und der Besetzungsgrad $\beta = 1.6$ Personen pro Personenwagen berücksichtigt.

Zu analysieren ist weiter, ob das Schadenausmass S pro Risikofall c) mit nachfolgendem Lawinenabgang so gross ist, dass ein Aversionsfaktor δ gemäss Tab. 1.3, S. 16 berücksichtigt werden muss. Mit

$$S = \frac{\lambda \cdot \beta \cdot DTV \cdot \Delta t \cdot m}{24 \cdot (g'_{\max} + s')} = 2.2 \quad [\text{Todesfälle / Risikofall c) mit nachfolgendem Lawinenabgang}] \quad (1.13)$$

ist der Aversionsfaktor $\delta = 1$ und somit unbedeutend.

Individuelle Risiken (Risikofall c)

Die individuellen Risiken können hier ausgehend vom Risikofall b), ebenfalls mit dem Faktor k aus Tab. 1.21 multipliziert werden, um das individuelle Risiko r_j im Risikofall c) grob abzuschätzen. Dieses ergibt sich mit $r_{jc} = r_{jb} \cdot k = 0.00087 \cdot 1.2 = 1 \cdot 10^{-3}$ und Massnahmen sind gemäss Tab. 1.9, S. 23 erforderlich.

2. Sind die bereits geplanten Massnahmen zu ergänzen?

Zur Beurteilung dieser Frage wird auf das Vorgehen gemäss Kap. 1.3.2 Bezug genommen. Gemäss Tab. 1.16 und Abb. 1.12 sind 8 Galerien und rund 13 Sperrtage geplant. Nach eingehendem Planstudium und Beurteilung der topographischen Verhältnisse der Lawinenzüge zeigt sich, dass die 8 Galerien das Risiko im Risikofall c) bereits überproportional vermindert haben. Ein Störfall c) kann trotzdem noch auftreten; er sollte aber nur noch mit äusserst geringer Wahrscheinlichkeit zu einem Schadenfall führen.

3. Sind weitere, spezifische Massnahmen wirksam?

Zur Beurteilung dieser Frage wird auf das heutige Schutzkonzept gemäss Tab. 1.20, Alternative G Bezug genommen. Dabei sind im Mittel rund 26 Sperrtage pro Winter angeordnet. Obwohl damit ein Risikofall c) nur noch mit geringer Wahrscheinlichkeit auftritt sind die Folgen mit grosser Wahrscheinlichkeit fatal. Das Studium der topographischen Verhältnisse zeigt hier exemplarisch, dass für die Risikoverminderung im Risikofall c) ebenfalls die drei kostenwirksamsten Galerien gebaut werden sollten.¹ Das ganze Schutzkonzept ist sodann je nach Kosten-Wirksamkeit durch weitere Schutzmassnahmen spezifisch zu ergänzen. Solche ergänzenden Massnahmen der Prävention und Intervention werden im folgenden qualitativ aufgelistet.

Massnahmen der Prävention

- Wende- und Austellplätze um die Gefahrenbereiche möglichst schnell rückwärtig zu verlassen
- Automatische Messstationen zur Gefahrenbeurteilung und qualitativen Verbesserung der Sperrzeiten
- Risikobasiertes Sicherheitsmanagement mit besonderer Berücksichtigung der Schliessungs- und Öffnungszeiten (Fahrzeugstau)
- Hinweisschilder: Achtung Lawinengefahr, Halten, Parkieren und Aussteigen vermeiden

Massnahmen der Intervention

- Warnanlagen vor Ort für die unmittelbare Schliessung der Verkehrsachse bei Lawinenabgängen (Verminderung des Schadenpotentials)
- Verkürzung der Interventionszeiten von Räumungs- und Rettungsequippen (Verminderung des Schaden - ausmasses)

¹ Es sei hier angemerkt, dass diese Beurteilung einen langfristigen Zeithorizont voraussetzt. Die beurteilte Flüelapassstrasse ist jedoch nur noch kurzfristig offen und präventive bauliche Massnahmen für den Risikofall c) werden damit hinfällig.

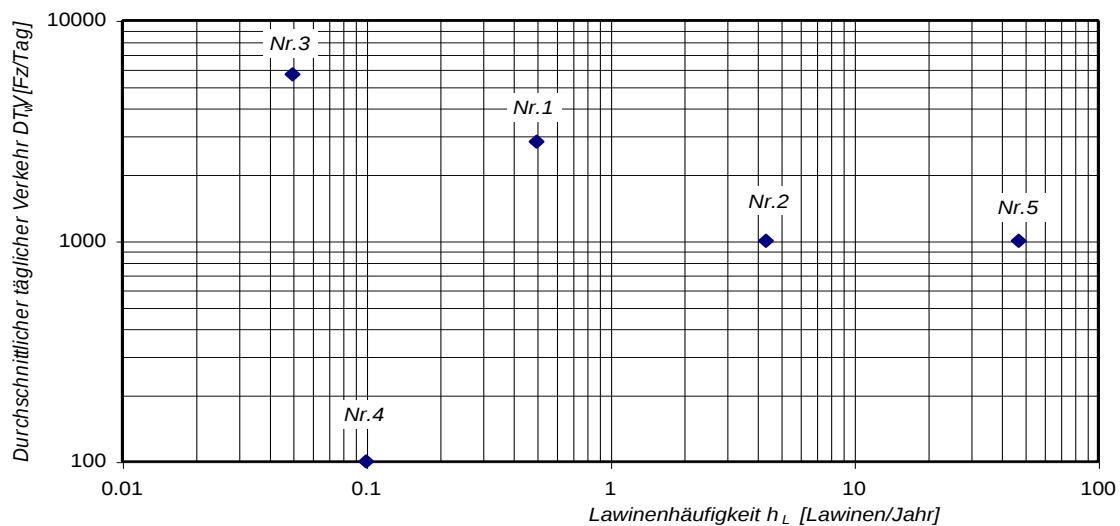
2 Beispiele der Projektbeurteilung

Das zu beurteilende Projekt soll bezüglich Verkehr und Lawinhäufigkeit charakterisiert und in der folgenden Abb. 2.1 positioniert werden. Dasjenige Beispiel (Nr. 1-5), das sodann am nächsten liegt, kann als Vergleichspriorität herangezogen werden. Die beurteilten Bsp. in Kap. 2 sind zudem in der folgenden Tabelle zusammengestellt und grob charakterisiert. Das Beispiel Nr. 1 wird exemplarisch und eingehend analysiert.

Vorgehen

- 1.) Durchschnittlicher täglicher Verkehr im Winter DTV_w auf der y-Achse in Abb. 2.1 auftragen
- 2.) Lawinhäufigkeit h_L für das ganze Risikosystem abschätzen und auf der x-Achse in Abb. 2.1 auftragen
 - ein Lawenzug: Lawinhäufigkeit $h_L = 1/T$ (T = Lawinewiederkehrdauer in Jahre)
 - mehrere Lawenzüge: Lawinhäufigkeit $h_L = \sum 1/T_i$ (i = 1,2,3,...n Lawenzüge)
- 3.) Die nächstliegenden Beispiele zur Beurteilung und zum Vergleichspriorität heranziehen

Abb. 2.1 Vereinfachtes 'Risikodiagramm' zur groben Positionierung von Lawenschutzprojekten



Charakterisierung der beurteilten Beispiele im Kapitel 2 (LZ = beurteilte Lawenzüge)

Bsp. Nr.	Name (Lokalität)	Seite	Risikosystem			heutiges Schutzkonzept	beurteilte Massnahmen
			LZ	Verkehr	Bedeutung		
1	Sassella (Engadin)	48	1 von 2	Hauptstrasse und Bahn	regional, Hauptver- bindung im Tal	Galerien für Bahn und Strasse	Galerien, diverse
2	Galaria (Flüelapass)	53	1 von 47	Hauptstrasse (mittlerer Verkehr)	lokal für Sicherung Passstrasse	Strassensperrung und künstl. Lawinen- auslösung	Galerie, Stützverbau
3	Salezertobel (Davos)	55	1	Hauptstrasse (viel Verkehr)	regional gross für Zufahrt Davos	Galerie	Galerie
4	Deira (Me- socco)	56	2 von 2	Verb. strasse (wenig Verk.)	lokal als Verbindung zu Weiler	passive Massnahmen	diverse
5	Flüelapass (Davos-Eng.)	58	47	Hauptstrasse (mittl. Verk.)	regional bis kantonal	Strassensp. und künstl. Lawinenausl.	diverse

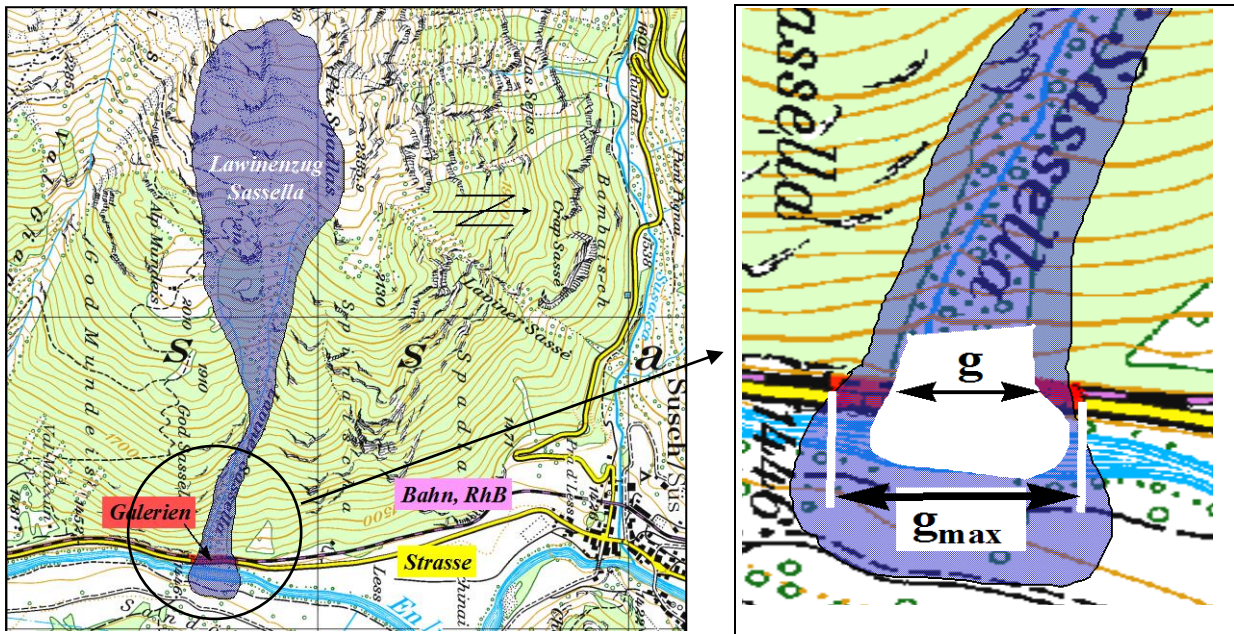
Beispiel Nr.1: Sassella, Engadin

Risikosituation

Auf der 6 km langen Strecke zwischen Susch und Zernez wurden die Hauptstrasse und die Bahn, RhB von den zwei Lawinenzügen Sassella und Ova Sparsa gefährdet. Da die Bahn seit langem und die Hauptstrasse seit 1992 mit Galerien gesichert sind, werden diese und weitere Schutzmassnahmen rückblickend beurteilt. Zuerst wird der Lawinenzug Sassella separat und anschliessend mit Bezug zur Strecke Susch - Zernez analysiert.

Grobabschätzung für bauliche Massnahmen (1. Stufe)

Risikosituation und Beurteilungsgrössen (vg. allenfalls Abb. 1.3, S. 11)



© Landestopographie

Beurteilungsgrössen und deren Erfassung (vgl. allenfalls Tab. 1.1, S. 11)

Beurteilungsgrösse		Wert	Erfassung
DTV _w	durchschnittlicher täglicher Verkehr im Winter	2814 Fz	aus Strassenverkehrszählung übernommen, Zählstelle S-chanf 099, TBA Kt. Graubünden
v	Fahrzeuggeschwindigkeit 'im Lawinenzug'	70 km/h	mittlere Geschwindigkeit vor Ort abgeschätzt
g	mittlere Breite von Lawinen im Strassenbereich !	100 m	aus Katasterangaben ermittelt; vgl. die folgende Tabelle)
T	Wiederkehrdauer der Lawine	2 Jahre	aus Katasterangaben ermittelt; vgl. folgende Tabelle
g _{max}	maximale Breite des Lawinenzugs im Strassenbereich	140 m	auf Plan / Karte oder im Gelände gemessen; nicht direkt für Risikoberechnungen benötigt
I ₀	Investitionskosten für bauliche Massnahmen	4.21Mio Fr.	effektiv abgerechnete Projektkosten für Galerie (Galerielänge = g _{max} = 140m d.h. ≈ 30'000 Fr./m')

Da die mittlere Wiederkehrdauer T und die mittlere Breite von Lawinen im Strassenbereich g oft schwierig zu bestimmen sind, wird deren Erfassung im folgenden mittels Katasterangaben aufgezeigt. Dazu müssen der Beobachtungszeitraum abgegrenzt und die für Risikoberechnungen relevanten Ereignisse analysiert werden.

Lawinenkataster für den Lawinenzug Sassella (Beobachtungszeitraum 1969-1985 = 16 Winter)

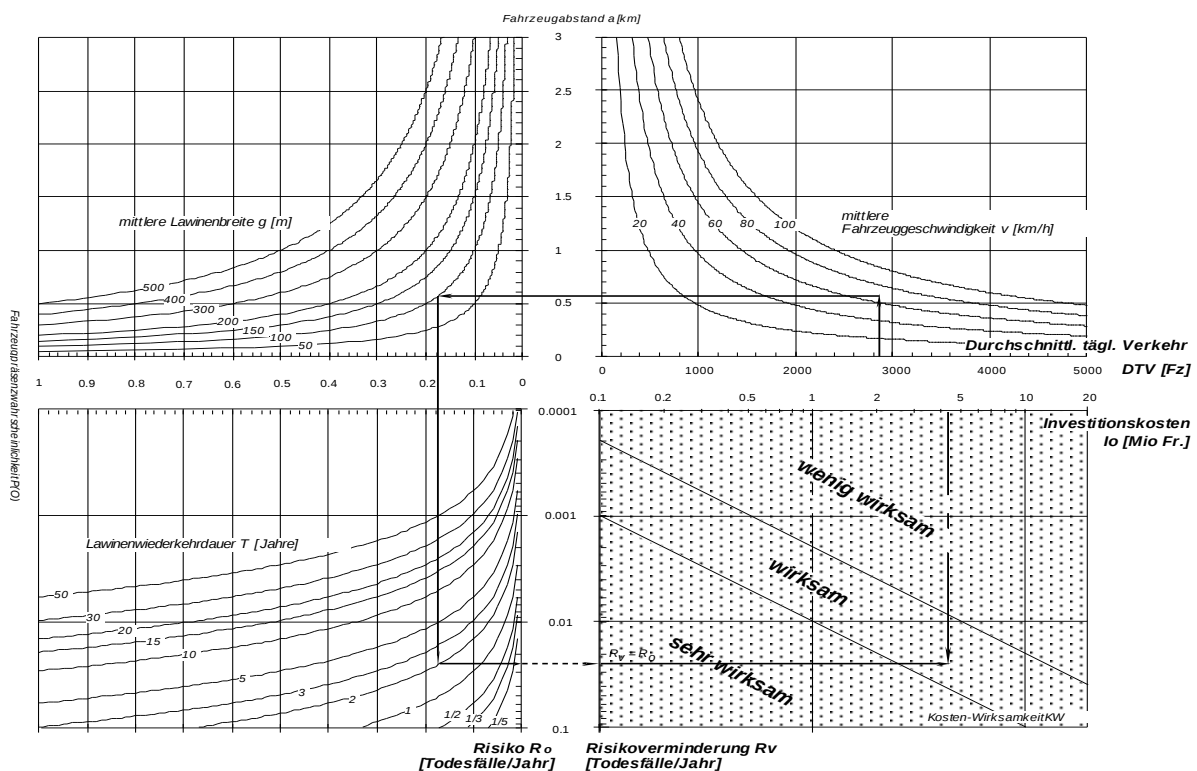
Datum			Auslösung	Ausdehnung im Strassenbereich		Art der Lawine	Strassenzustand	Bemerkungen
Jahr	Tag	Zeit	natürlich oder künstlich	Breite [m]	Höhe [m]	Nass-, Fliess- oder Staublawine	offen oder gesperrt	
1970	21.2.	nachts	natürlich	130	5	Fliess-/Staublawine	offen	--
1972	23.2.	18.00	natürlich	70	?	Nassschneelawine	offen	--
1975	5.4.	14.00	natürlich	90	2	Nassschneelawine	??	--
1977	15.1.	11.00	künstlich, Heli	80	2	Fliesslawine	gesperrt	nicht mitgezählt
1979	22.12.	10.00	natürlich	120	3	Fliesslawine	??	--
1979	16.3.	??	natürlich	100	?	Nassschneelawine	gesperrt	nicht bis Strasse
1981	5.1.	morgen	natürlich	? (100)	?	Fliesslawine	offen	--
1981	7.1.	morgen	künstlich, Heli	?	2	Fliesslawine	gesperrt	nicht mitgezählt
1982	30.1.	nachts	natürlich	120	?	Fliesslawine	offen	--
1983	17.1.	morgen	natürlich	70	5	Fliess-/Staublawine	gesperrt	--
1984	10.2.	morgen	natürlich	80	4	Fliess-/Staublawine	gesperrt	--

Werden nur die natürlich ausgelösten Lawinen - die über die Strasse flossen - gezählt, so ergeben sich 8 Lawineneignisse innerhalb des Beobachtungszeitraumes von 16 Jahren.

Wiederkehrdauer $T = 16 / 8 = 2$ Jahre

Mittlere Breite von Lawinen im Strassenbereich $g = (130+70+90+120+100+120+70+80) / 8 = \approx 100$ m

Grobabschätzung der Kosten-Wirksamkeit (vgl. allenfalls Abb. 1.4, S. 13)



Risiko $R_0 = 0.023$ Todesfälle/Jahr; vollständige Risikoverminderung mit Galerie $\rightarrow$ Risikoverminderung $R_v \approx R_0$
 Investitionskosten $I_0 = 4.21$ Mio. Fr. $\rightarrow$ Kosten-Wirksamkeit $KW = \text{wirksam}$

Beurteilung:

Für eine Galerie ist eine mittlere bis gute Kosten-Wirksamkeit zu erwarten. Diese soll auf der 2. Stufe vertieft beurteilt und mit weiteren Massnahmen verglichen werden.

Beurteilung von unabhängigen Einzelmassnahmen (2. Stufe)

Es werden im folgenden für den Lawinenzug Sassella Massnahmen sowohl für die Strasse und die Bahn separat als auch Massnahmen, die für beide Verkehrsträger gleichermassen wirken, beurteilt.

Risikoanalyse (vgl. allenfalls Kap. 1.2.1, S. 15)

Die Daten für die Strasse wurden bereits erfasst; diejenigen der Bahn sind in der folgenden Tabelle (gemäss Auskünften der RhB) aufgelistet. Kollektives Risiko R_0 und individuelles Risiko r_{j0} gemäss den Gleichungen 1.1 und 1.2 (Kap.1.2.1) berechnen.

Aversionsberücksichtigung:

Auf der Strasse ist der Busanteil am $DTV_w < 2\%$ und somit keine Aversion zu berücksichtigen (Kap.1.2.1)

Das Schadenausmass S bei der Bahn ergibt sich gemäss Gleichung 1.1 mit $S = \lambda_z \cdot \beta_z = 5.4$ Todesfälle pro Ereignis und somit $\delta = 3$ (gemäss Tab. 1.3, S. 16), wobei zur Aversionsabschätzung folgende Annahmen getroffen werden:

λ_z = mittlere Letalität für Todesfälle bei Personen in Zügen = 0.09, d.h. 9% der erfassten Personen sind tot

β_z = Besetzungsgrad für Züge (vier Bahnwagen à 15 Personen / Wagen) = 60 Personen/erfassten Zugsteil

Datenerfassung und Risikoberechnung (vgl. Tab. 1.4)

Lawinenzüge		Daten erfassen				kollekt. Risiko	individ. Risiko
Nr.	Name	g [km]	DTV_w [Fz]	T [Jahre]	v [km/h]	$R_0^{1)}$ [Tf/Jahr]	$r_{j0}^{2)}$ [pro Jahr]
Strasse:							
1.s	Sassella	0.10	2814	2	70	0.0243	$1 \cdot 10^{-5}$
Bahn:							
1.b	Sassella	0.10	30	2	60	0.0338 ³⁾	$1.3 \cdot 10^{-5}$
					$R_{0 \text{ tot}} =$	0.0581	

¹⁾ berechnet gemäss Gleichung 1.1; ²⁾ berechnet gemäss Gleichung 1.2

³⁾ Bei diesem Beispiel wurde mit einer mittleren erfassten Zuglänge $l_z = g = 0.1$ km ($\gamma = 2$) gerechnet, ein Besetzungsgrad $\beta_z = 60$ Personen pro erfassten Zugsteil angenommen, eine Letalität λ_z mit 0.09 Todesfälle pro erfasste Person abgeschätzt und somit ein Aversionsfaktor $\delta = 3$ eingesetzt ($S = \lambda_z \cdot \beta_z = 0.09 \cdot 60 = 5.4$; vgl. Tab. 1.3)

Individuelles Risiko r_{j0}

Verglichen mit den Zielsetzungen (Grenzwerten) in Tab. 1.9 entspricht das individuelle Risiko auf der Strasse hier genau dem Grenzwert und dasjenige auf der Bahnstrecke liegt über dem Grenzwert, d.h. Massnahmen zum Schutze der Bahnstrecke sind auch allein aufgrund des individuellen Risikos r_{j0} erforderlich.

Massnahmenplanung (Kap.1.2.2)

Vorgehen (vgl. folgende Tabelle)

1. Verschiedene Einzelmassnahmen auflisten (1. Spalte)
2. Restrisiken R_1 der Massnahmen [%] abschätzen und als Anteil am Risiko R_0 in Tf/Jahr berechn. (2. Spalte)
 - Galerien: $R_1 = „0“$; Risiken werden praktisch vollumfänglich vermindert da Galerien $\geq g_{\max}$
 - Stützverbau: $R_1 = 10\%$; Stützverbau richtliniengemäss ausgeführt und Strasse liegt in der Sturzbahn
3. Risikoverminderung $R_v = R_0 - R_1$ in Tf/Jahr berechnen (3. Spalte)
4. Die jährlichen Kosten K_j gemäss effektiver Abrechnung und/oder Gleichung 1.6, Tab. 1.6 bzw. Abb. 1.6 erfassen (4. Spalte)
 - Gale-
rie Strasse: $I_0 = 4.21 \text{ Mio Fr.}$; mit $n=50$ Jahre $\rightarrow K_j = 0.190 \text{ Mio Fr./Jahr}$ (Abb. 1.6)
 - Gale-
rie Bahn: $I_0 = 4.0 \text{ Mio Fr.}$; mit $n=50$ Jahre $\rightarrow K_j = 0.180 \text{ Mio Fr./Jahr}$ (Abb. 1.6)
 - Stütz-
verbau: $15 \text{ ha} \rightarrow 1 \text{ Mio Fr./ha}$ (geschätzt gem. den Einheitspreisen in Tab. 1.6) $\rightarrow I_0 = 15 \text{ Mio Fr.}$
 $\rightarrow K_j = 0.6 \text{ Mio Fr.}$ (Gl. 1.6 oder Abb. 1.6)
5. Die Kosten-Wirksamkeit $KW = K_j/R_v$ der Einzelmassnahmen berechnen (5. Spalte)

Daten der Massnahmenplanung und Berechnung der Kosten-Wirksamkeit (vgl. folgende Abb.)

Nr.	Massnahme	Restrisiko R_I		Risikovermind. R_v	jährliche Kosten K_j	Kostenwirksamk. KW
		$[\%]$	$[Tf/Jahr]$	$[Tf/Jahr]$	$[Mio\ Fr./Jahr]$	$[Mio\ Fr./verh.\ Tf]$
nur für Strasse:						
1	Galerie	„0“	„0“	0.0243	0.19	7.8
2	Stützverbau	10	0.0024	0.0219	0.60	27.4
nur für Bahn:						
3	Galerie	„0“	"0"	0.0338	0.18	5.3
4	Stützverbau	10	0.0030	0.0304	0.60	19.7
für Strasse und Bahn:						
5	2 Galerien	„0“	„0“	0.0581	0.37	6.4
6	Stützverbau	10	0.0058	0.0523	0.60	11.5

Weitere Einzelmassnahmen

Aufgrund der Topographie des Lawinenzuges und der Breite des Lawinenzuges im Strassenbereich $g_{\max}$ wäre weiter eine Alarmanlage mit automatischer Strassensperrung (Rotlichtsignal) diskutierbar. Mit einer Durchquerungszeit des Lawinenzuges von rund 10 Sekunden (Autos) bis max. 20 Sekunden (Zug) ist - mit einer mittleren Lawinengeschwindigkeit von 40 m/s gerechnet - eine kanalisierte Topographie des Lawinenzuges auf einer Länge von rund 400 - 800 m oberhalb der Strasse erforderlich. Damit ist mit einer Alarmanlage eine sehr gute Kosten-Wirksamkeit erreichbar, wobei diese meist mit einem beträchtlichen und schwierig abzuschätzenden Restrisiko verbunden sein dürfte. Zudem wäre bei einer Lawinenwiederkehrdauer von $T=2$ Jahre im Mittel jedes zweite Jahr mit einer Räumung des Lawinenschnees auf dem Bahn- und Strassentrasse zu rechnen, was auf einer Hauptverbindung im Tal heutzutage kaum mehr akzeptiert werden dürfte. Für den Lawinenzug Sassella sind aus topographischen und lawinentechnischen Gründen weitere bauliche Massnahmen (z.B. Verwehungsverbau, Dämme usw.) nicht geeignet.

Optimierung von Varianten (Massnahmenkombinationen) (3. Stufe)

Die Variante Strassensperrung kombiniert mit künstlicher Lawinenauslösung wurde in früheren Jahren angewandt. Dessen Kosten-Wirksamkeit kann aufgrund fehlender Daten zu den positiv und negativ verlaufenden

Sprengaktionen und der Anzahl und Dauer der Strassensperrungen nicht mehr quantitativ abgeschätzt werden. Bei nur zwei Lawinenzügen, aber relativ häufigen Lawinenabgängen (Wiederkehrdauer $T=2$ Jahre) sind jedoch bei einer Hauptverbindung im Tal rel. häufige wenig akzeptiert. Bauliche Massnahmen stehen im Vordergrund. Somit fällt hier eine Optimierung von Varianten (Kombination von aktiven und passiven Schutzmassnahmen gemäss Kap.1.3) ausser Betracht.

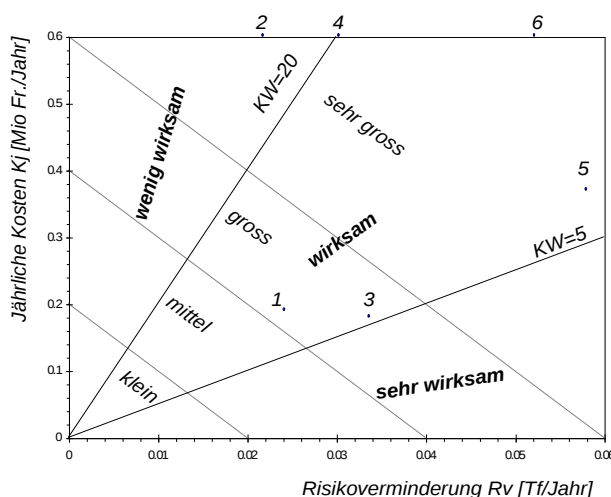
Projektbeurteilung

Individuelles Restrisiko r_{j1}

Die getroffenen Massnahmen vermindern das individuelle Risiko gleichermassen wie das kollektive Risiko. Das individuelle Risiko r_{j0} wird demzufolge mit Galerien ebenfalls eliminiert und mit dem Stützverbau auf 10% d.h. bei der Bahn auf $r_{j1} = 1.3 \cdot 10^{-6}$ vermindert was unter dem Grenzwert gemäss Tab. 1.9, S. 23 liegt.

Kosten-Wirksamkeit KW

Im folgenden Kosten-Risiko Diagramm sind die Projekte der Galerien und der Stützverbauung Nr. 1 - Nr. 6 aufgetragen und bezüglich der Kosten-Wirksamkeit (sehr wirksam, wirksam, wenig wirksam) beurteilt. Um die Grösse (Bedeutung) der Projekte grob abzuschätzen, ist das Diagramm weiter nach dem Ausmass der Kosten und der Risikoverminderung in klein, mittel, gross und sehr gross unterteilt.



- 1 = Galerie für Strasse; 2 = Stützverb. für Strasse
- 3 = Galerie für Bahn; 4 = Stützverbau für Bahn
- 5 = Je eine Galerie für Strasse und Bahn (1Projekt)
- 6 = Stützverbauung für Strasse und Bahn (1Proj.)

Sowohl Galerien für Strasse und Bahn separat (Nr. 1 und 3) als auch beide Galerien als ein Projekt beurteilt (Nr. 5) sind kosten-wirksam. Hingegen ist bei der Stützverbauung nur bei Betrachtung für Strasse und Bahn (Nr. 6) eine mittlere Kosten-Wirksamkeit zu erreichen, wobei ein sehr hoher 'Preis' bezahlt und ein Restrisiko von 10% hingenommen werden müsste. Die Galerien für Strasse und Bahn separat (Nr. 1 oder Nr. 3) sind im Lawinenschutz von Verkehrsachsen als grosse, die rest-

lichen Projekte (Nr. 2, 4, 5, 6) als sehr grosse Projekte zu bezeichnen. Die Galerien sind mit einer mittleren Kosten-Wirksamkeit und mangels besserer Alternativen durchaus begründbar.

Bedeutung des Projekts innerhalb der ganzen Risikosituation

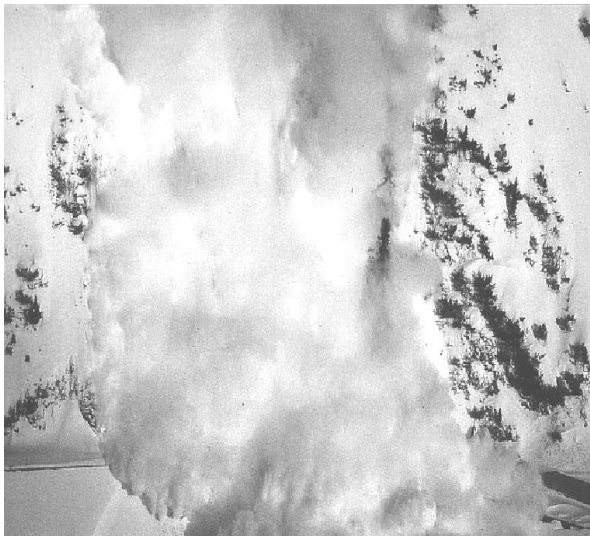
Da auf der Strecke Susch - Zernez 2 Lawinenzüge die Strasse und Bahn gefährden ist anzunehmen, dass ausgeführte bauliche Massnahmen im Lawinenzug Sassella eine präjudizierende Wirkung auf die Beurteilung des zweiten Lawinenzuges Ova Sparsa zur Folge haben dürften. Eine Galerie zum Schutze der Bahn im Lawinenzug Ova Sparsa ist noch knapp kosten-wirksam, diejenige für die Strasse jedoch wenig kosten-wirksam. Alle vier Galerien zusammen (2 Lawinenzüge, Strasse, Bahn) ergeben gesamthaft betrachtet noch eine mittlere Kosten-Wirksamkeit. Diese Rechnung ist aber nur zulässig falls alle Galerien zum gleichen Zeitpunkt geplant und ausgeführt werden.

Die zwei Galerien für die Bahn wurden bereits früher ausgeführt, die Strassengalerie im Lawinenzug Sassella 1985 und diejenige im Lawinenzug Ova Sparsa schliesslich 1992.

Beispiel Nr. 2: Galaria, am Flüelapass

Risikosituation

Der Passübergang von Davos ins Engadin wird auf einer Strecke von 20 km von 47 Lawinenzügen gekreuzt. In diesem Risikosystem wird der Lawinenzug Galaria separat und ohne Berücksichtigung der zur Zeit angewandten Schutzmassnahmen (Strassensperrung und künstliche Lawinenauslösung) beurteilt. Die Lage des Lawinenzuges ist beim Beispiel Nr. 5, Flüelapass, auf der Karte zur Risikosituation zu finden und dort als Lawinenzug Nr. 24 bezeichnet. Es tritt in diesem Bereich eine grosse Häufung von Lawinenzügen auf, deren Anrissgebiete gleiche Exposition aufweisen (Süd-Südost) und deren Sturzbahnen die Strasse queren. In einzelnen Lawinenzügen sind zudem drei bis fünf natürliche Lawinenabgänge pro Winter zu verzeichnen, was eine ausserordentliche Situation für Risikospitzen darstellt. Diese Spitzen werden bekanntlich mit dem Risikofall c) zu erfassen versucht ('Störfall' dadurch, dass eine Lawine die Strasse unterbricht und gestaute Fahrzeuge in benachbarten Lawinenzügen gefährdet sind). Die Situation kann mit einem Unfallbericht aus der Schadenlawinendatenbank des SLF anschaulich geschildert werden. Der Lawinenunfall ist am 1. Mai 1992 im Lawinezug Nr. 26 aufgetreten.



Lawine im Lawinenzug Galaria überquert die Flüelapassstrasse

„Ein erster kleiner Nassschneerutsch erfasste einen bergwärts fahrenden PW und schob diesen auf die Gegenfahrbahn, so dass die Strasse blockiert wurde (Insassen unverletzt). Kurz darauf kamen ein vollbesetzter Reisebus und 3 weitere PWs talwärts fahrend zur Stelle und mussten anhalten. Während dem Versuch dem blockierten PW zu helfen stützte eine zweite grössere Nassschnee- Lockerschneelawine nieder. Der Bus samt Insassen sowie 1 PW (mit 1 Insassin) wurden erfasst und 200 m den Hang hinunter getragen. Die Fahrzeuge blieben auf dem Lawinenkegel liegen. Von den 25 Carinsassen wurden 4 getötet, 12 teilweise schwer verletzt und 9 blieben unverletzt. Die PW-Insassin wurde auch verletzt. Auf der Strasse oben wurde 1 Mann mitgerissen und schwerverletzt, 3 weitere Personen blieben unverletzt. Während der umfangreichen Rettungsaktion gingen weitere Nachlawinen ab, die z.T. Helfer erfassten aber niemanden schwerwiegend verletzten. Der Unfall geschah 1 Std. vor der offiziellen Schliessung der Passstrasse.“ (Latenser et al. 1995)

Datenerfassung

	Beurteilungsgrösse	Einheit	Erfassung
DTV _w	durchschnittlicher täglicher Verkehr im Winter	1000 Fz	aus Strassenverkehrszählungen übernommen und für den Winter berechnet (1993/94)
v	Fahrzeuggeschwindigkeit 'im Lawinenzug'	50 km/h	mittlere Geschwindigkeit vor Ort abgeschätzt
g	mittlere Breite von Lawinen im Strassenbereich	0.03 km	aus Katasterangaben Mittelwert berechnet (Nur Fliesslawinen, aber auch kleine Nassschneerutsche)
T	Wiederkehrdauer der Lawine	0.2 Jahre	aus Katasterangaben berechnet
g _{max}	maximale Breite des Lawinenzugs im Strassenbereich	0.11 km	aus Katasterangaben erfasst und im Gelände nach der Topographie verifiziert
I _o	Investitionskosten für eine Galerie	2.75Mio Fr.	mit 20'000.- pro m' und g _{max} = 110 m berechnet

Risikoanalyse

Kollektives Risiko R_o	= 0.0360	Tf/Jahr	(Gl. 1.1, S. 15 für fahrende Fahrzeuge)
Individuelles Risiko r_{jo}	= $4.5 \cdot 10^{-5}$	pro Jahr	(Gl. 1.2, S. 16 für fahrende Fahrzeuge)

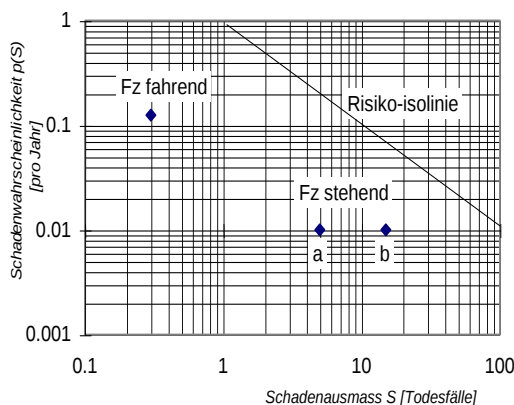
Da grosse Risikospitzen auftreten, muss ebenfalls der Risikofall c) gemäss Kap. 1.3.3, S. 42 ff. abgeschätzt werden. Die folgenden Werte sind Untergrenzen, da diesbezüglich Mittelwerte über den ganzen Pass berechnet wurden und in der Umgebung des Lawinenzuges Galaria diese Gefährdung am höchsten liegt.

Kollektives Risiko $R_{o\ c)}$	= 0.0508	Tf/Jahr	(Tab. 1.21 und Gl. 1.12; mit $k = 1.4$)
Individuelles Risiko $r_{jo\ c)}$	= $6.3 \cdot 10^{-5}$	pro Jahr	(Tab. 1.21; mit $k = 1.4$)

Da talseitig absturzgefährliches Gelände besteht, könnte λ auch ≥ 0.4 gewählt werden, was ein Schadenausmass $S=12$ Todesfälle und einen Aversionsfaktor $\delta=7$ ergibt. Das Schadenpotential SP in einem Risikofall c) kann hier 4 und mehr stehende Fahrzeuge betreffen, wobei auch Cars dabei sein können. Würde ein Szenario mit 3 PWs und einem Car (Besetzungsgrad $\beta_{Car}= 25$ Personen) angenommen, so ergibt sich im Schadenfall ein mittleres Schadenausmass $S = \lambda \cdot \beta = 0.18 \cdot [(3PW \cdot 1.6) + (1Car \cdot 25)] \approx 5$ Todesfälle und somit ein Aversionsfaktor $\delta = 0.4$.

Risikobewertung

Das kollektive Risiko R_o für fahrende Fahrzeuge ist für einen einzelnen Lawinenzug sehr hoch. Entsprechend liegt auch das individuelle Risiko r_{jo} über dem Grenzwert gemäss Tab. 1.9, S. 23. Hinzu kommt das Risiko für



stehende Fahrzeuge im Risikofall c), das beim Lawinenzug Galaria und den benachbarten Lawinenzügen noch höher ist als dasjenige für fahrende Fahrzeuge. Ein Schadenausmass $S = 5$ Todesfälle (Punkt a in der Grafik links) hat zudem noch einen Aversionsfaktor von $\delta = 3$ gem. Tab. 1.3, S. 16 zur Folge. Dies entspricht schliesslich dem Punkt b in der linken Grafik.

Wesentlich ist, dass die Risiken für fahrende und für stehende Fahrzeuge, obwohl sie ähnliche Risikozahlen ergeben, mit sehr differierenden Schadenwahrscheinlichkeiten und Schadenausmassen verbunden sind. Während Ereignisse mit fahrenden Fahrzeugen eine Wieder-

kehrdauer von rund 10 Jahren ($p(S) = 0.1$) aufweisen und im Mittel nur jedes dritte Ereignis zu einem Todesfall führt, sind Ereignisse mit stehenden Fahrzeugen nur ca. alle hundert Jahre ($p(S) = 0.01$) zu erwarten. Sie haben aber Schadenausmass von 5 bzw. mit Aversion gerechnet von 15 'empfundenen' Todesfällen.

Massnahmenplanung

Da oberhalb der Waldgrenze ein Anrissgebiet von mehr als 10 ha permanent verbaut werden müsste, wird eine Strassengalerie beurteilt. Mit einer maximalen Breite des Lawinenzuges $g_{max} = 110$ m und 25'000.- pro m' fallen Investitionskosten $I_o = 2.75$ Mio Fr. an, was jährliche Kosten $K_j = 0.11$ Mio Fr. ergibt ($K_j \approx I_o \cdot 0.04$). Damit wird das Risiko für fahrende Fahrzeuge eliminiert und das mit einer sehr guten Kosten-Wirksamkeit $KW = K_j / R_v = 3.0$. Für den Lawinenzug Galaria separat betrachtet, ist damit natürlich auch das Risiko für stehende Fahrzeuge eliminiert.

Projektbeurteilung

Obwohl die abgeschätzte Kosten-Wirksamkeit eine Galerie hoch rechtfertigen würde, muss die Beurteilung eines einzelnen Lawinenzuges noch im Risikokontext des ganzen Passes (47 Lawinenzüge) diskutiert werden (vgl. den Lawinenzug Nr. 24 im Beispiel Nr. 5).

Beispiel Nr. 3: Salezertobel, Davos

Risikosituation

Die Salezertobellawine betrifft die Hauptzufahrtsstrasse vom Prättigau Richtung Davos unmittelbar vor Davos. Die andern zwei Zufahrten nach Davos, d.h. der Flüelapass und die Zufahrt durch das Landwassertal sind von vielen Lawinenzügen betroffen. Durch den Wintertourismus und durch verschiedene Veranstaltungen wirtschaftlicher, politischer und wissenschaftlicher Ausrichtung (z.B. World Economic Forum) kommt einer durchgehend wintersicheren Zufahrt nach Davos sehr grosse Bedeutung zu. An Spitzentagen kann der tägliche Verkehr das Dreifache des durchschnittlichen täglichen Verkehrs aufweisen. Trotz 'seltener' Wiederkehrdauer der Salezertobellawine ($T \approx 20$ Jahre) wurde anfangs achtziger Jahre eine Galerie gebaut. Das Beispiel soll in knapper Form auf Grenzen des vorliegenden Beurteilungsmodells hinweisen, und kann nicht umfassend sein.

Datenerfassung

	Beurteilungsgrösse	Einheit	Erfassung
DTV _w	durchschnittlicher täglicher Verkehr im Winter	5'688 Fz	Durchschnitt aus Strassenverkehrszählungen übernommen und daraus den DTV _w berechnet
v	Fahrzeuggeschw. 'im Lawinenzug'	60 km/h	mittlere Geschwindigkeit vor Ort abgeschätzt
g	mittlere Breite von Lawinen im Strassenbereich	0.10 km 0.15 km	für Fliesslawinen und zusätzlich für Staubanteil
T	Wiederkehrdauer der Lawine	20 Jahre	aus Katasterangaben berechnet
g _{max}	maximale Breite des Lawinenzugs im Strassenbereich	< 0.4 km	aus Katasterangaben erfasst und im Gelände nach der Topographie verifiziert
I _o	Investitionskosten für die Galerie	12 Mio Fr.	effektive Kostenabrechnung (ca. heutige Preise)

Risikoanalyse

Kollektives Risiko R _o Fließ	= 0.0057	Tf/Jahr	(Gl. 1.1, S. 15, mit $\lambda = 0.18$)
Kollektives Risiko R _o Staub	= <u>0.0043</u>	Tf/Jahr	(Gl. 1.1, S. 15, mit $\lambda = 0.09$)
Kollektives Risiko R _o tot	= <u>0.0100</u>	Tf/Jahr	(im Mittel alle hundert Jahre ein Todesfall)
Individuelles Risiko r _{jo} tot	= <u>$2.2 \cdot 10^{-6}$</u>	pro Jahr	(liegt deutlich unter dem Grenzwert)

Risikospitzen

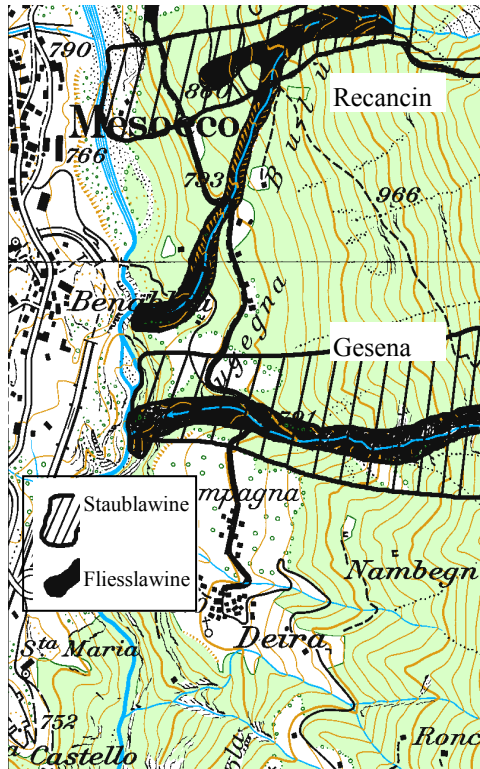
Aufgrund von Stauungen des Rückreiseverkehrs an Wochenenden kann es zu stockendem Kolonnenverkehr kommen. Die Wahrscheinlichkeit für einen Lawinenabgang während diesen kurzen Zeiträumen ist sehr gering, aber das mögliche Schadenausmass hoch. So ist es denkbar, dass sich rund 20 Fahrzeuge gleichzeitig auf der mittleren Breite g von Lawinenabgängen im Strassenbereich befinden könnten.

Projektbeurteilung (Beschränkungen des Modells)

Mit einem Wirkungszeitraum von $n = 50$ Jahren und den Investitionskosten I_o von 12 Mio Fr. ergeben sich jährliche Kosten K_j für die Galerie gemäss Abb. 1.6, S. 21 von 0.54 Mio Fr., was eine Kosten-Wirksamkeit $KW = K_j/R_v = 54$ Mio Fr./verh. Tf ergibt. In dieser Hinsicht wäre die Galerie als sehr wenig kosten-wirksam einzustufen. An einem Ort getätigte Investitionen stehen für andere (evtl. kosten-wirksame) Projekte nicht mehr zur Verfügung, und was das in Sicherheitsbereichen bedeutet ist offenbar. Die Todesfallrisiken sind am vorliegenden Beispiel nur ein Aspekt und können allein nicht entscheidend sein. Diesbezüglich vermag das vorliegende Beurteilungsmodell gewisse Situationen nicht ausreichend zu beschreiben. Der politische Entscheidungsträger hat hier offensichtlich die wirtschaftlichen Aspekte einer wintersicheren Zufahrt nach Davos sehr stark gewichtet. Die grosse Nachfrage danach hat sich im Winter 1999 gezeigt, als diese Strasse in Saas für drei Tage wegen Lawinengefahr gesperrt werden musste und beträchtliche Verluste im Wintertourismus entstanden.

Beispiel Nr. 4: Deira, Mesocco

Risikosituation



© Landestopographie

Deira ist ein kleiner ganzjährig bewohnter Weiler ausserhalb von Mesocco im Misox, Kanton Graubünden. Die einzige Zufahrtsstrasse wird durch zwei Lawinenzüge gefährdet: Den Lawinenzug 'Recancin' im Norden und den Lawinenzug 'Gesena' ca. 500 m weiter südlich. Es ist in beiden Lawinenzügen sowohl mit Staub- als auch mit Fliesslawinen zu rechnen, welche die Strasse gefährden. Die Strasse wurde durch abgelagerten Lawinenschnee auch schon längere Zeit blockiert. Die Situation ist bezeichnend für viele kleine Weiler in abgelegenen Berggebieten, die oft nur auf wenig befahrenen und lawinengefährdeten Zufahrtsstrassen zu erreichen sind. Charakteristisch ist der geringe Verkehr der Anwohner, der sich vorwiegend aus Personenwagen, landwirtschaftlichen Fahrzeugen und dem Schulbus zusammensetzt. Diesbezüglich kann es jedoch für diejenigen Personen, die die Strasse zwei, vier oder noch mehr mal pro Tag befahren zu beträchtlichen individuellen Risiken kommen. Durch die Erfahrung im 'Umgang mit Lawinengefahren', kann aber auch davon ausgegangen werden, dass sich diese Personen nicht unnötig lange im Gefahrenbereich aufhalten. Das Beispiel wird aufgezeigt, um Schutzmöglichkeiten bei geringem Verkehr und bei kleinen Risiken zu beurteilen.

Datenerfassung und Risikoanalyse (Daten aus Schär 1997)

Der durchschnittliche tägliche Verkehr im Winter DTV_w wird grob mit 100 Fahrzeugen abgeschätzt.

Daten	<i>Lawinenzug Recancin</i>		<i>Lawinenzug Gesena</i>		
	<i>Fliesslawine</i>	<i>Staublawine</i>	<i>Fliesslawine</i>	<i>Staublawine</i>	
<i>Fahrzeuggeschwindigkeit v im LZ</i>	20	40	20	30	km/h
<i>mittlere Breite der Lawinen im Strassenbereich g</i>	0.05	0.27	0.15	0.18	km
<i>Letalität λ</i>	0.18	0.09	0.18	0.09	Tf/erf.Person
<i>Wiederkehrdauer der Lawinen T</i>	12	20	4	20	Jahre
Berechnungen					total
<i>Kollektives Risiko R_o</i>	0.00025	0.00020	0.00225	0.00018	0.00288 Tf/a
<i>Individuelles Risiko r_{jo}</i>	$3.12 \cdot 10^{-6}$	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$2.81 \cdot 10^{-5}$	$2.25 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-5}$
<i>Anteil in %</i>	9	7	78	6	100

Risikobewertung

Das kollektive Risiko R_o ist erwartungsgemäss klein. Hingegen liegt das individuelle Risiko r_{jo} mit $3.6 \cdot 10^{-5}$ leicht über dem Grenzwert gemäss Tab. 1.9, S. 23 und könnte allein Massnahmen begründen. Dies trifft umso mehr zu, als auf dieser Strecke auch Fussgänger zu erwarten sind, die höhere individuelle Risiken haben (lange Präsenzzeit in Gefahrenbereichen und grössere Letalität). Die Risiken pro Lawinenzug zeigen, dass 80 % des Risikos von den Fliesslawinen im Lawinenzug Gesena ausgehen. Dementsprechend werden Massnahmen dort auch prioritär beurteilt. Dies jedoch immer im Hinblick auf die ganze Risikosituation.

Massnahmenplanung

Stützverbau

Da die Anrissgebiete beider Lawinen sehr grosse Ausmasse aufweisen und kaum zugänglich sind, kommt ein permanenter Stützverbau nicht in Frage.

Galerien

Direkt an der Strasse kann eine Galerie im Bereich der Fliesslawine des Lawinenzuges Gesena geprüft werden. Mit einer geschätzten Galerielänge von 150 m (Schär 1997) und 20'000.- pro m' sind Investitionskosten in der Grössenordnung von 3 Mio Fr. zu erwarten. Die sich daraus ergebenden jährlichen Kosten K_j betragen 0.12 Mio Fr. und führen zu einer Kosten-Wirksamkeit $KW = 42$ Mio Fr./verhinderten Tf. Laut den Vorgaben in diesem Leitaden würde dies allgemein mit wenig wirksam beurteilt. Galeriebauten auf den restlichen gefährdeten Streckenabschnitten sind aus wirtschaftlicher Sicht nicht vertretbar.

Künstliche Lawinenauslösung mit Strassensperrung

Gegen eine künstliche Lawinenauslösung sprechen die folgenden Punkte:

- Es wäre mit Wald- und Flurschäden zu rechnen, bei grossen Lawinen evtl. sogar mit Gebäudeschäden
- Es bestehen mehrere dutzend Teilanrissflächen, welche alle einzeln gesichert werden müssten
- Die Hangneigung mit z.T. nur rund 30° wäre für die künstliche Lawinenauslösung auch problematisch

Strassensperrungen ohne künstliche Lawinenauslösung wurden bis anhin angeordnet. Solche Konzepte werden heute jedoch zunehmend weniger akzeptiert.

Weitere Massnahmen

Bei einer Alarmanlage, welche Lawinenabgänge festhält und die Strassenbenutzer frühzeitig warnen kann, ist die Vorwarnzeit für die Strassenbenutzer hier zu kurz, um den Gefahrenbereich rechtzeitig zu verlassen oder diesen nicht zu befahren. Näher zu prüfen wären Ablenkbauten mit Erdwällen im Lawinenzug Recancin, die vermutlich nicht allzu teuer zu stehen kommen würden. Die bis anhin aufgezeigten Massnahmen müssten bei grosser Lawinengefahr durch vereinzelte, temporäre Strassensperrungen ergänzt werden.

Projektbeurteilung

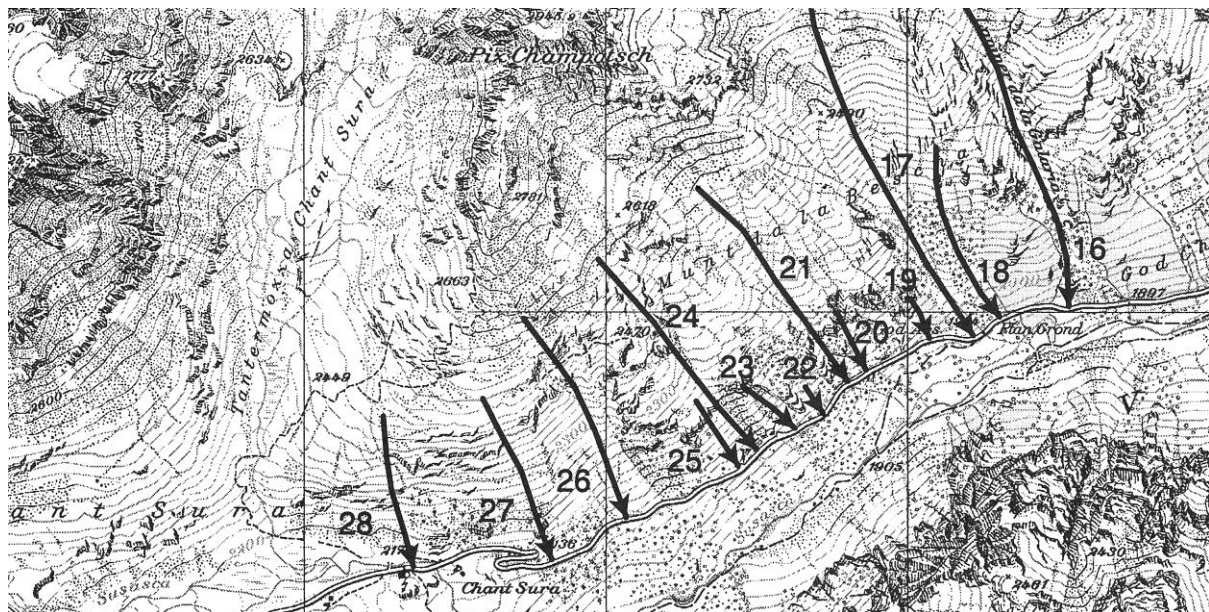
Wird davon ausgegangen, dass die heutigen Sperrzeiten zu hoch bzw. nicht zumutbar sind, so steht trotz geringer Kosten-Wirksamkeit die beurteilte Galerie im Lawinenzug Gesena im Vordergrund. Sie vermindert 80% des Risikos, insbesondere auch die im Ausgangszustand d.h. ohne jegliche Massnahmen zu hohen individuellen Risiken. Diese Massnahmen müssten jedoch bei grosser Lawinengefahr immer noch durch einzelne Strassensperrungen ergänzt werden.

Beispiel Nr. 5: Flüelapass, Davos - Engadin

Die Flüelapassstrasse zwischen Davos und Engadin wird zwischen Tschuggen und Susch auf einem Abschnitt von ca. 20 km von 47 Lawinenzügen betroffen. Die Länge der gefährdeten Streckenabschnitte beträgt dabei rund 10 km. Das heutige Sicherungskonzept am Flüelapass wird mit temporärer Strassensperrung - kombiniert mit künstlicher Lawinenauslösung - betrieben. Keiner der Lawinenzüge ist bisher verbaut. Im Mittel ist die Strasse an 25 Tagen pro Winter gesperrt, wobei dies von Winter zu Winter erheblich variieren kann. Ebenso ist die jeweilige Dauer der Strassensperrungen sehr unterschiedlich, sie reicht von nur einzelnen Stunden bis zu maximal acht Schliesstagen. Aufgrund der noch auf die geöffnete Strasse abgehenden Lawinen ergibt sich ein Restrisiko von ca. 20 % des Ausgangsrisikos.

Der Risikomanagement Prozess soll an diesem grossen Risikosystem exemplarisch und in geraffter Form aufgezeigt werden. Die Daten, Abbildungen und Tabellen sind weitgehend aus Kap. 1 zusammengetragen und es ist hier kein detaillierter Nachvollzug beabsichtigt (Verweis auf Abbildungen und Tabellen in Kap. 1). Vielmehr soll der/die geübte AnwenderIn eine Art Checkliste und ergänzende Ideen zum Vorgehen erhalten. Da bei grösseren Risikosystemen (>ca. 5 Lawinenzüge) die Bearbeitung auf Stufe 3 im Vordergrund steht, sind die Vorarbeiten (Stufe 1+2) in sehr geraffter Form angesprochen.

Risikosituation (Streckenabschnitt mit einem Teil der insgesamt 47 Lawinenzüge)



© Landestopographie

Vorgehen

1. Grobbeurteilung der Risikolage (Kosten-Wirksamkeit für bauliche Massnahmen)
2. Risikomanagement im engeren Sinne (Kombination von Massnahmen zu optimierten Varianten)
3. Risikomanagement im weiteren Sinne (alternative Bewertung, Sensitivität und Risikodialog)

Grobbeurteilung der Risikolage

Datenerfassung und Risikoanalyse

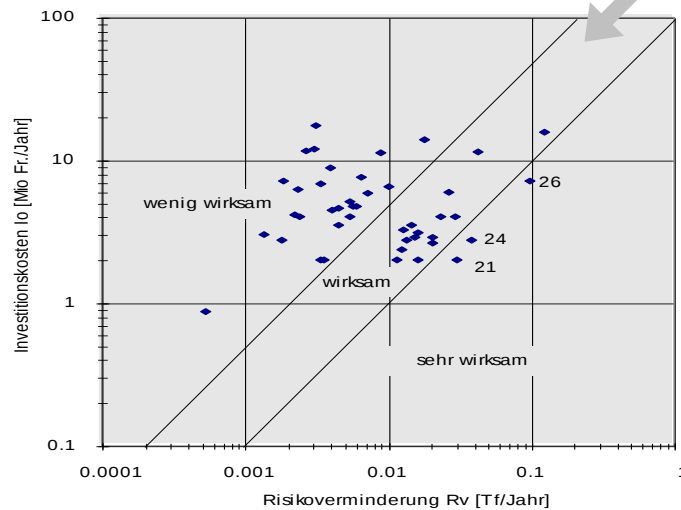
Tab. 1.5, S. 17

Kostenabschätzung für Galerien

Lawinenzüge		Daten erfassen (Flüelapass, Kap. 2)					kollekt. Risiko	individ. Risiko
Nr.	Name	$g_{i,max}^{(3)}$ [km]	g_i [km]	$\lambda_i^{(4)}$ [1]	$T_i^{(5)}$ [Jahre]	v_i [km/h]	$R_o^{(7)}$ [Tf/Jahr]	$r_{jo}^{(2)}$ [1/Jahr]
10	Murtera	0.26	0.08	0.18	1.4	70	0.0098	1.2E-05
15	Lawiner da l'Alp	0.46	0.13	0.18	0.7	50	0.0446	5.6E-05
i	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
17	Law. Cadritsch	0.16	0.07	0.18	0.6	50	0.0280	3.5E-05
24	Galaria	0.11	0.03	0.18	0.2	50	0.0360	4.5E-05
29	Däscher Lawine	0.24	0.05	0.18	0.5	50	0.0240	3.0E-05
n	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
total	47 Lawinenzüge	$\Sigma =$					0.7034	0.00087

Lawinenzüge $i=1,2,...,n$		Breite LZ	Invest.kosten
Nr.	Name	$g_{i,max}^{(3)}$ [km]	I_o [Mio Fr.]
10	Murtera	0.26	5.2
15	Lawiner da l'Alp	0.46	9.2
i	.....	.....	.....
17	Law. Cadritsch	0.16	3.2
24	Galaria	0.11	2.2
29	Däscher Lawine	0.24	4.8
n	.....	.....	.....
total	47 Lawinenzüge		

Grobbeurteilung der Kosten-Wirksamkeit von Galerien mit Abb. 1.4, S. 13



Folgerungen aus der Grobbeurteilung

- Die kollektiven Risiken der einzelnen Lawinenzüge in Tab. 1.5 ergeben aufsummiert ein hohes kollektives Risiko von $R_o = 0.7034$ Tf/Jahr.
- Das entsprechende individuelle Risiko r_{jo} liegt mit $8.7 \cdot 10^{-4}$ weit über dem Grenzwert von $1 \cdot 10^{-5}$ für Strassenbenutzer (Tab. 1.9, S. 23) und würde allein Massnahmen begründen (ohne Risikofall c zu beachten).
- Mit den Investitionskosten I_o für Galerien und der Risikoverminderung R_v pro Lawinenzug (Annahme, dass Galerien das Risiko eliminieren) kann die Verteilung der Kosten-Wirksamkeiten in Abb. 1.4 gezeigt werden.
- Nur Galerien in den drei Lawinenzügen 21, 24 und 26 sind eindeutig sehr kosten-wirksam

Riskomanagement im engeren Sinne (vgl. die folgende Seite)

- Die Kosten-Wirksamkeiten der aktiven Massnahmen gem. Tab. 1.15 erfassen und der Güte nach reihen
- Mit den aufsummierten Kosten und Risikoverminderungen die Kostenfunktion in Abb. 1.10 erfassen
- Für die passiven Massnahmen entsprechend vorgehen und die Sperrtagefunktion in Abb. 1.11 eingrenzen
- Ausgehend von der besten Einzelmassnahme die nächstbesten kombinieren (Redundanzberücksichtigung)
- In Tab. 1.19 die Gesamtkosten K_{gi} der einzelnen Varianten berechnen und in Abb. 1.12 darstellen
- Mit den minimalen Gesamtkosten die Optimalvariante bestimmen und bezüglich den anfallenden Investitions- und Betriebskosten, den verbleibenden Restrisiken und den erforderlichen Sperrtagen beurteilen

Aktive Massnahmen

Kosten-Wirksamkeit

Tab. 1.15, S. 30

Nr.	Lawinenzug LZ i=7,1,7,2,...,n	Risikoverminderung Rv [Tf/Jahr]		Invest. kosten I _i [Mio Fr./Jahr]	jährl. Kosten K _i [Mio Fr./Jahr]	Kosten-Wirksamk. KW [Mio Fr./verh. Tf]
7.21	Lawiner God Ars	0.0301	4.3	2.000	0.080	2.7
7.24	Galaria	0.0360	5.1	2.750	0.110	3.0
7.26	Breiter Zug	0.0976	13.9	7.125	0.285	3.0
7.22	Lawiner God Ars	0.0164	2.3	2.000	0.080	4.9
7.27	Champsatsch	0.1248	17.7	15.750	0.630	5.0
7.3	Lawiner Sassè	0.0205	2.9	2.625	0.105	5.1
7.17	Lawiner Cadrtscha	0.0280	3.9	4.000	0.160	5.4
i	.....	.....	.....	.....	.....	.....
7.6	Lawiner da Roz	0.0031	0.4	17.500	0.700	223.6
total	47 LZ = Vollverbau	0.7034	100	250.125	10.005	14.2 (mittel)

passive Massnahmen

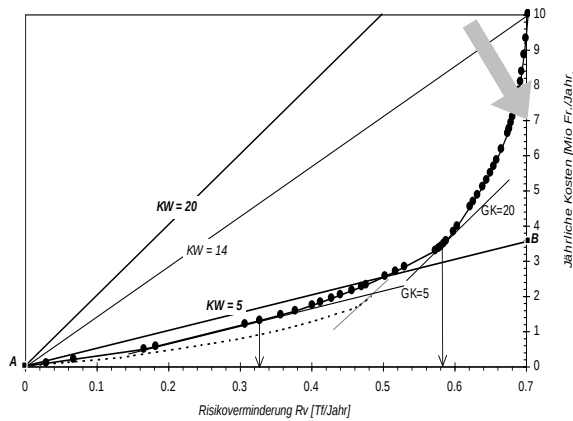
‘Sperrtage’-Wirksamkeit

Tab. 1.16, S. 33

Sperrereinheiten		Risikoverminderung Rv		jährl. Kosten	Kosten-Wirksamkeit KW
Nr.	[Sperrtage/Jahr]	[Tf/Jahr]	[%]	[Mio Fr./Jahr]	[Mio Fr./verh. Tf]
1 s	4.4	0.1583	22.5	0.400	2.5
2 s	4.4	0.0952	13.5	0.400	4.2
3 s	4.4	0.0745	10.6	0.400	5.4
4 s	4.4	0.0574	8.2	0.400	7.0
5 s	4.4	0.0506	7.2	0.400	7.9
i	.....	.....	.....	.....	.....
25 s	4.4	0.0008	0.1	0.400	501.8
total	110	0.7034	100	10.005	14.2 (mittel)

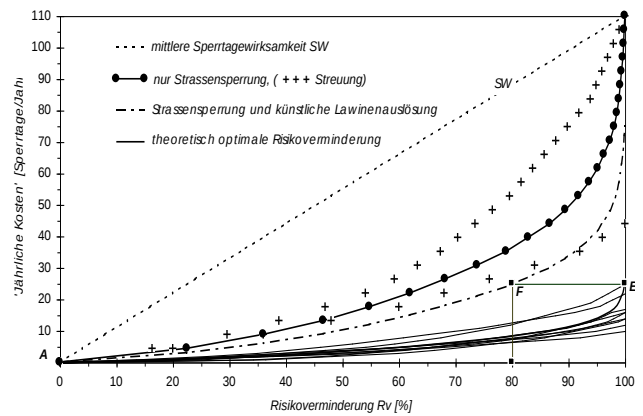
Kostenfunktion

Abb. 1.10, S. 31



Sperrtagefunktion

Abb. 1.11, S. 34



Kombination von Massnahmen (Risikomanagement im engeren Sinne)

Gl. 1.11, S. 37

$$\text{Gesamtkosten } K_g = (\text{Massnahmenkosten } K_m) + \text{Schadenkosten } K_s$$

$$K_{gi} = (K_i + S_i \cdot SKV) + R_{li} \cdot KW \text{ [Mio Fr. / Jahr]}$$

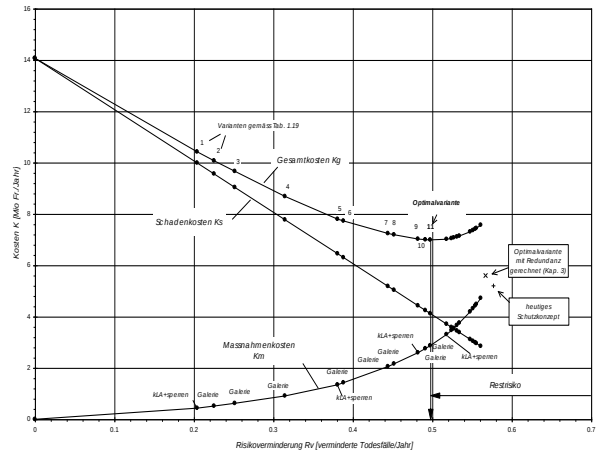
Optimierung zu Varianten

Tab. 1.19, S. 38

Einzelmassnahmen (gem. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. und Tab. 1.17)							Varianten			
Nr.	Art	K _i G	K _i M	S	K _i S	Rv	KW	Nr.	ΣK _i	ΣS
1	2	3	4	5	6=5·SKV	7	8=(3+4+6)·7	9	10=Σ(3+4)	11=ΣS
1 kLA+s	kLA+sperren	0.035	4.4	0.400	0.2040	2.1	1	0.035	4.4	0.
7.21	Galerie	0.080			0.0301	2.7	2	0.115	4.4	0.
7.26	Galerie	0.110			0.0384	2.9	3	0.225	4.4	0.
7.24	Galerie	0.285			0.0983	2.9	4	0.510	4.4	0.
2 kLA+s	kLA+sperren	0.035	4.4	0.400	0.1196	3.6	5	0.545	8.8	0.
7.22	Galerie	0.080			0.0164	4.9	6	0.625	8.8	0.
7.27	Galerie	0.630			0.1248	5.0	7	1.255	13.2	0.
7.3	Galerie	0.105			0.0205	5.1	8	1.360	13.2	0.
3 kLA+s	kLA+sperren	0.035	4.4	0.400	0.0844	5.2	9	1.395	13.2	0.
7.17	Galerie	0.160			0.0294	5.4	10	1.555	13.2	0.
7.16	Galerie	0.115			0.0204	5.6	11	1.670	13.2	0.
4 kLA+s	kLA+sperren	0.035	4.4	0.400	0.0703	6.2	12	1.705	17.6	0.
7.12	Galerie	0.160			0.0235	6.8	13	1.865	17.6	0.
7.11	Galerie	0.080			0.0116	6.9	14	1.945	17.6	0.
7.2	Galerie	0.115			0.0154	7.5	15	2.060	17.6	0.
7.25	Galerie	0.095			0.0125	7.6	16	2.155	17.6	0.
5 kLA+s	kLA+sperren	0.035	4.4	0.400	0.0563	7.7	17	2.190	22	0.
n	---	---	---	---	---	---	i	K _i	S _i	0.
total	72 Massnahmen	10.005	0.875	110	10.005	1.4068	73	10.880	110	0.

Sicherheitsoptimum

Abb. 1.12, S. 39



Folgerungen aus der Optimierung von Massnahmen

- Bei den aktiven Massnahmen sind nur Galerien berücksichtigt, wobei eine mittlere Kosten-Wirksamkeit mit einem Vollverbau von $KW \approx 14$ Mio Fr./verh. Tf erreicht würde.
- Bei den passiven Massnahmen wären rund 110 Tage erforderlich, um das ganze Risiko zu vermindern. Sie werden hier zuerst mit einem Ersatzkostenansatz bewertet (äquivalente Wirkung wie aktive Massnahmen)
- Die Kombination der Massnahmen zeigt, dass im Optimum 8 Galerien und drei Sperreinheiten (ca. 13 Sperrtage) kombiniert mit künstlicher Lawinenauslösung ausgeführt würden.
- Da Galerien in den Lawinenzügen Nr. 21, 24 und 26 zuerst ausgeführt werden (vgl. die Situationskarte am Anfang dieses Beispiels), wäre auch der Risikofall c) weitgehend entschärft.
- Diese Optimalvariante wäre aber mit Investitionskosten von 40 Mio Fr. behaftet, bei einem verbleibenden Restrisiko von 30 % und erfordert im Mittel rund 13 Sperrtage pro Winter.

Risikomanagement im weiteren Sinne (Alternative Bewertung, Sensitivität und Risikodialog)

Der Vorteil der hier angewandten Methode ist, dass alternative, nutzerseitige Bewertungsansätze einbezogen und das System damit erneut optimiert werden kann. Im Vordergrund stehen dabei die Fragen:

- Wieviel sind wir zur Verhinderung eines statistischen Todesfalles aufzuwenden bereit? (Risikobewertung)
- Wieviel sind wir durchschnittlich für die Verminderung der Sperrzeit um einen Tag zu zahlen bereit? (Massnahmenbewertung)

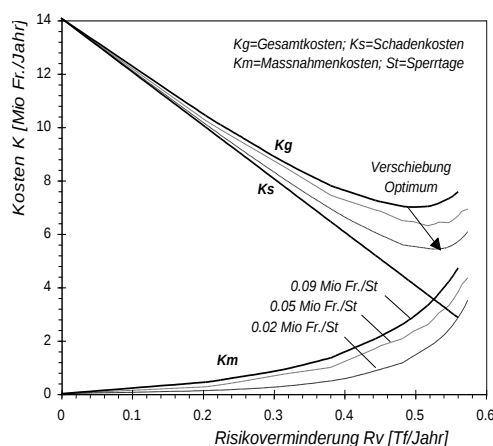
Die Sensitivität alternativer Bewertungsansätze wird ausgehend von der Optimalvariante (Alternative A) mit den Alternativen B-F aufgezeigt.

Alternative Bewertungsansätze

Tab. 1.20, S. 41

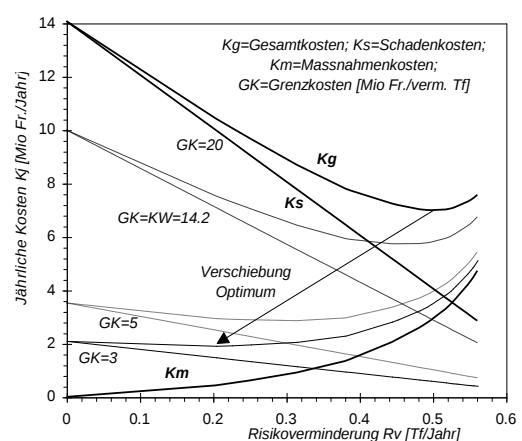
Alternativen	Art und Anzahl der Massnahmen	Invest.kosten [Mio Fr.]	Betriebskosten [Mio Fr./Jahr]			Sperrtage [Tg]	Gesamtkosten [Mio Fr./Jahr]	Restrisiken [%]
			Galerien	kLA	gesamt			
A	8 G + 3 SE	39.1	0.39	0.11	0.50	13.2	7.0	29
B	6 G + 2 SE	32.3	0.32	0.07	0.39	8.8	5.7	36
C	3 G + 1 SE	11.9	0.12	0.04	0.16	4.4	2.9	55
D	1 SE	0	0	0.04	0.04	4.4	1.9	71
A	8 G + 3 SE	39.1	0.39	0.11	0.50	13.2	7.0	29
E	6 G + 5 SE	32.3	0.32	0.18	0.50	22	6.2	26
F	5 G + 6 SE	29.6	0.30	0.21	0.51	26.4	5.4	25
G	6 SE (heute)	---	---	0.21	0.21	26.4	5.1	18

Massnahmenbewertung Abb. 1.14, S. 41



Risikobewertung

Abb. 1.13, S. 40

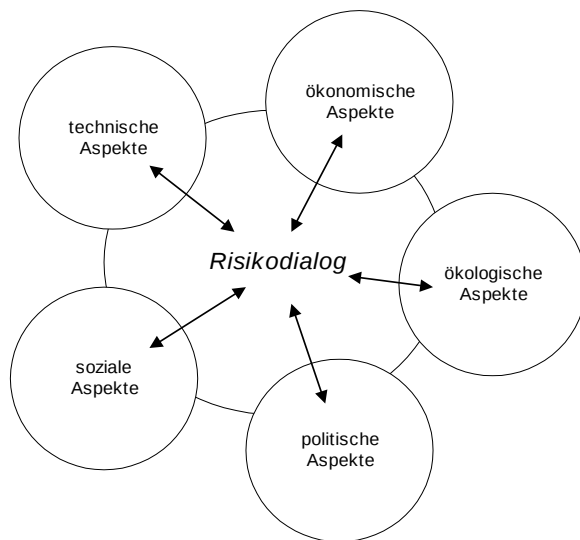


Folgerungen aus der alternativen Bewertung

- Ist die Gesellschaft weniger als 20 Mio Fr./verhinderten Tf (Alternative A) aufzuwenden bereit, so werden weniger Galerien und Sperrtage eingesetzt bei rasant ansteigendem Restrisiko (Alternativen B, C und D).
- Werden die Sperrtage weniger hoch bewertet als mit dem Ersatzkostenansatz, so werden weniger Galerien dafür mehr Sperrtage eingesetzt (und umgekehrt) bei ungefähr gleichbleibendem Restrisiko (Alternat. E, F).
- Sind diese Zusammenhänge erfasst, so kann - was die ökonomischen Aspekte der Schutzmassnahmen anbelangt - ein offener und transparenter Risikodialog geführt werden.

Weitere Diskussionsaspekte zuhanden des Risikodialogs

Neben den in diesem Leitfaden prioritär bearbeiteten technischen und ökonomischen Aspekten von Schutzmassnahmen sind eine Reihe weiterer Diskussionsaspekte in einen Risikodialog einzubeziehen. Nur kurz angesprochen werden im folgenden auch ökologische und soziale Gesichtspunkte und schliesslich politische Aspekte der Realisierung.



Technische Aspekte

- Ausgangsrisiken ohne Schutzmassnahmen
- Technische, organisatorische und planerische Möglichkeiten für Schutzmassnahmen
- Wirksamkeiten und Folgewirkungen von Schutzkonzepten

Ökonomische Aspekte

- Direkte Kosten und Nutzen der Winteroffenhaltung der zu beurteilenden Verkehrsachse
- Kosten-Wirksamkeit von Schutzmassnahmen
- Investitionskosten, Betriebskosten und Sperrtage von optimierten Varianten
- Budgetverfügbarkeiten und Finanzierung

Ökologische Aspekte

- Externe Effekte wie z.B. Landschaftsbeeinträchtigung durch bauliche Schutzmassnahmen
- Beeinträchtigung von Wald und Wild bei der künstlichen Lawinenauslösung
- Emissionen während der Bau- und Ausführungsphase von Projekten

Soziale Aspekte

- Verbleibende individuelle Risiken für bestimmte Nutzer und Strassensicherungsdienste
- Beeinträchtigung der Nutzungsmöglichkeiten für betroffene Grundeigentümer
- Aufteilung der Finanzierung und Restkosten für Bauherrschaften

Politische Aspekte

- Investitionen mit hohen Beiträgen von Bund und Kanton in einer Region (politischer Anreiz)
- Betrieb, Unterhalt und Reparatur von Schutzmassnahmen als Aufträge für das lokale Baugewerbe
- Verbesserte Entwicklungschancen für Regionen mit Lawinenschutz (z.B. Tourismus)

3 Grundlagen der Projektbeurteilung

Risiken sind modellhafte Konstrukte, die von einer Vielzahl von Einflussgrößen bestimmt werden. Die wahren Beweggründe im Umgang mit Risiken sind zudem oft schwierig transparent zu machen und die Kommunikation zur Projektbeurteilung in Risikobereichen ist entsprechend anspruchsvoll. Deshalb soll dem interessierten Benutzer hier über das Vorgehen (Kap. 1) und die Anwendung (Kap. 2) hinaus die Möglichkeit geboten werden, angewandtes Wissen zu vertiefen und wesentliche Zusammenhänge zu erfassen. Es werden also einerseits lawinentechnische Aspekte vertieft und andererseits Bewertungsmethoden in Bezug auf ihre Validität analysiert. Als Orientierungshilfe und zugleich auch Inhaltsübersicht von Kap. 3 dient Abb. 3.1 (Risikomanagement-Prozess im Lawinenschutz von Verkehrsachsen).

3.1 Generelle Aspekte des Risikomanagements

Der Risikomanagement-Prozess im Lawinenschutz von Verkehrsachsen

Um von einem Lawinenschutzproblem zu einer Beurteilung zu gelangen, werden grundsätzlich Analysen und Informationen mit Zielen und Werten konfrontiert. Diese Konfrontation findet sowohl bei der Beurteilung von Risiken als auch bei der Beurteilung von Massnahmen statt. Demzufolge können in einem generellen Modell des Risikomanagements die Risikoanalyse und -bewertung und die Massnahmenanalyse und -bewertung unterschieden werden (vgl. Abb. 3.1).

Inhalt, Risikosystem und Zeitpunkt der Beurteilung

In einem Risikosystem (z.B. Verbindungsstrasse, die von Lawinenzügen gefährdet ist) wird die Entwicklung mit und ohne Projekt ('with and without') prognostiziert. Sowohl Entwicklungen mit Projekt (Wirkungsprognosen) als auch Entwicklungen ohne Projekt (Status quo-Prognosen) sind bezüglich Lawinen und Verkehr meist nur mit Unsicherheiten abzuschätzen. Es interessieren die Projektwirkungen (als Differenz der beiden Entwicklungsprognosen), welche innerhalb eines bestimmten Zeithorizonts zu erwarten sind.

Zustand Z_0 (Referenz- oder Ausgangszustand ohne Projekt)

Eine Projektbeurteilung muss von einem Referenzzustand ausgehen, um die mit dem Projekt erzielten Veränderungen zu messen. Der Referenzzustand kann ein unbeeinflusster Ausgangszustand oder ein heutiger Zustand bei einem bestehenden Schutzkonzept sein. Sind in einem bestehenden Schutzkonzept nur ergänzende Massnahmen zu beurteilen, so wird der Referenzzustand Z_0 vorteilhaft mit dem heutigen Zustand erfasst. Müssen jedoch neue Massnahmen oder Ersatzmassnahmen beurteilt werden, so ist ein unbeeinflusster Ausgangszustand die Ausgangslage jeder Risikoabschätzung. In einem unbeeinflussten Ausgangszustand werden die Risiken R_0 erfasst, indem angenommen wird, dass eine Verkehrsachse dauernd geöffnet und befahrbar ist. Ohne jegliche Schutzmassnahmen und ungeachtet hoher Lawinengefahr wird dabei vorausgesetzt, dass auch nach einer Strassenverschüttung und -räumung sofort weitergefahren wird.

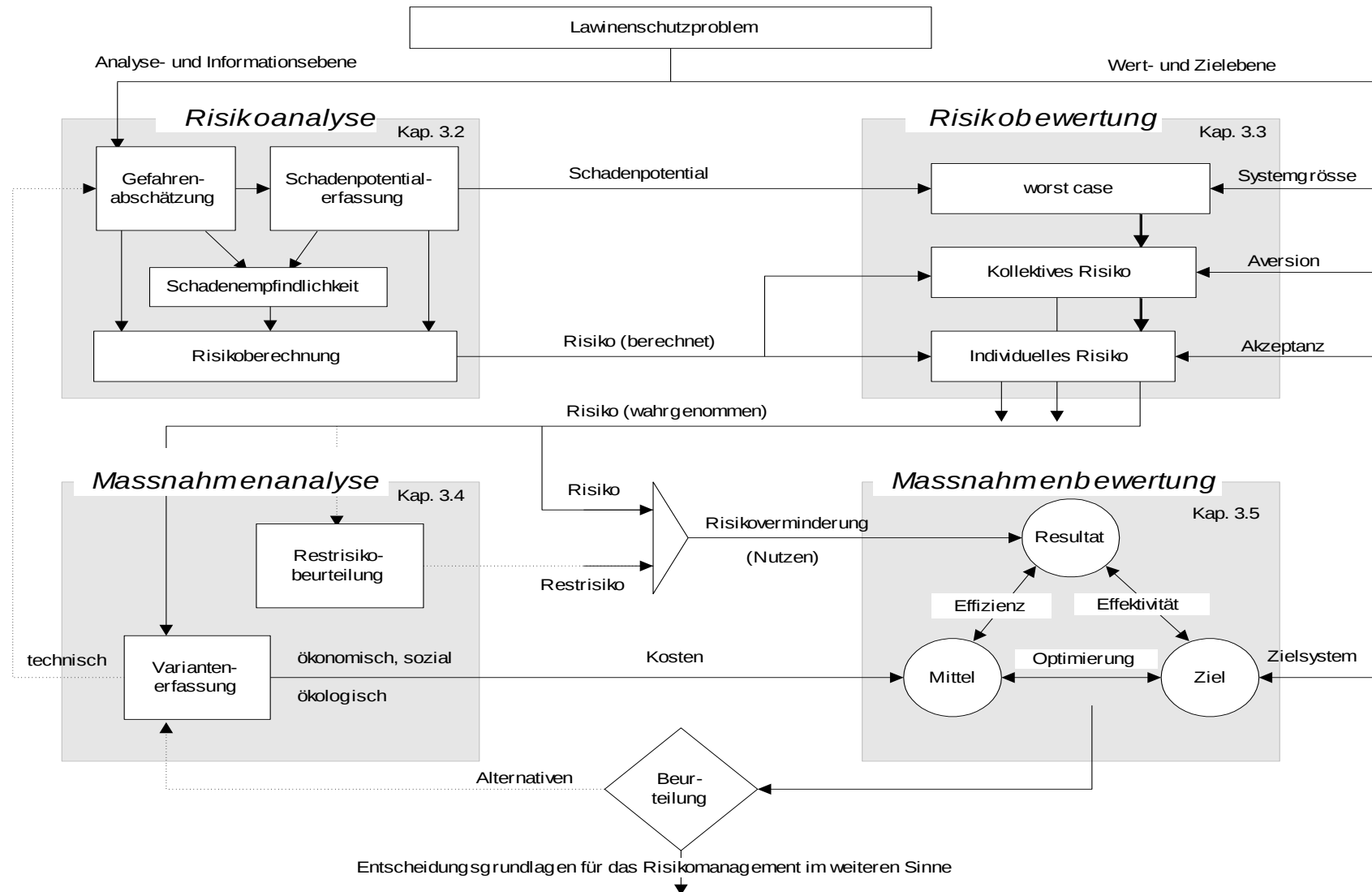
Zustand Z_1 (Restrisikozustand mit Projekt)

Zur Abschätzung des Restrisikozustandes mit Projekt wird im wesentlichen die gleiche Risikoanalyse und Risikobewertung wie im Zustand Z_0 mit Bezug auf die noch verbleibende Restlawinengefahr durchgeführt. Dieser Zustand wird schliesslich charakterisiert durch die Restrisiken auf kollektiver und individueller Ebene.

Projektwirkungen (Risikoverminderungen und Kosten)

Die Differenz von Ausgangsrisiken (ohne Projekt) und Restrisiken (mit Projekt) ergeben vereinfacht die positiven Projektwirkungen in Form von Risikoverminderungen. Die dabei anfallenden, negativen Projektwirkungen sind als Kosten zu identifizieren.

Abb. 3.1 Der Risikomanagement - Prozess im Lawinenschutz von Verkehrsachsen (Risikomanagement im engeren Sinne)



Mit der **Risikoanalyse** (Borter et al. 1999; Wilhelm 1997) werden die Zusammenhänge der naturräumlich gegebenen Lawinengefahr und der Raumnutzung gefährdeter Verkehrsachsen untersucht. Diese Lawinen-Gefahren-Raum-Nutzung äussert sich real durch ein Schadenpotential und potentiell durch ein Risiko, das in dieser Arbeit auf Todesfallrisiken beschränkt wird. Mit der Gefahrenabschätzung werden Lawinengefahren räumlich und zeitlich abgegrenzt bzw. identifiziert (Gefahr). Die Raumnutzung auf Verkehrsachsen wird mit Angaben zu den Verkehrsbewegungen erfasst und im Sinne einer Präsenzwahrscheinlichkeit von Fahrzeugen und Zügen auf gefährdeten Streckenabschnitten berechnet (Exposition). Treffen Lawinen auf exponierte Fahrzeuge, so sind Schadenempfindlichkeiten relevant, die hier mit statistischen Mittelwerten angenähert und als sog. Letalitäten in die Risikoberechnung einfließen.

Eine Voraussetzung für eine **Risikobewertung** (Berg et al. 1995) ist die Systemabgrenzung, worin der maximale Schadenfall (worst case) mit dem erfassten Schadenpotential bewertet werden kann. Das Risiko, d.h. hier der erwartete Mittelwert des Schadens in Todesfällen pro Jahr, kann für alle betroffenen Personen als Kollektiv einbezogen oder auf eine bestimmte Person (Individuum) fokussiert werden. Auf der Ebene des kollektiven Risikos werden Aversionsaspekte berücksichtigt, d.h. grosse Schadenausmasse überproportional gewichtet. Ausschlaggebend für die Akzeptabilität individueller Risiken sollen hier vorgegebene Zielsetzungen im Sinne von Grenzwerten sein. Output der Risikobewertung sind die wahrgenommenen Risiken.

Zentral für die **Massnahmenanalyse** (Margreth 1998; Stoffel 1996) ist die Erfassung der vielfältigen Wirkungen von alternativen Varianten (Massnahmenkombinationen). Wirkungen sollen in technischer, ökologischer, sozialer und ökonomischer Hinsicht analysiert und mit Indikatoren erfasst werden. Als quantifizierbare Indikatoren sind in diesem Leitfaden die Kosten und das nach erneuter Risikoanalyse und -bewertung verbleibende Restrisiko erfasst. Diese methodische Vereinfachung darf nicht zu einer frühzeitigen Verengung des Entscheidungsspielraumes führen. Ökologische und soziale Aspekte - wenn auch z.T. nur qualitativ erfassbar - sollten ebenfalls in einer Massnahmenoptimierung berücksichtigt werden. Schutzmassnahmen sind schliesslich aus ökonomischer Sicht immer mit Kosten verbunden, sei dies als monetäre Investition, als Nutzungsverzicht mit der Schliessung von Verkehrsachsen (Opportunitätskosten) oder als Landschaftsbeeinträchtigung durch bauliche Massnahmen (negative externe Effekte).

Mit der **Massnahmenbewertung** (Wilhelm 1997) werden quantitative und qualitative Aspekte so aufbereitet, dass sie einer Optimierung im Hinblick auf bestimmte Zielvorgaben (Zielsystem) zugänglich werden. Diese Optimierung fusst in der vorliegenden Arbeit vor allem auf einem Vergleich der Risikoverminderung mit den Kosten von Schutzmassnahmen (Effizienzgrösse) und wird als Kosten-Wirksamkeit in Mio Fr. pro verhinderten Todesfall gemessen. Hauptziel ist dabei, eine effiziente Ressourcenallokation anzustreben, d.h. vereinfacht mit dem eingesetzten Franken die grösstmögliche Sicherheit im Gesamtsystem zu erreichen (Risikomanagement im engeren Sinne). Als restriktive Vorgabe im Sinne von vorgegebenen Zielwerten dürfen zudem die individuellen Restrisiken bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Dem Risikomanagement im weiteren Sinne sollen schliesslich Entscheidungsgrundlagen in Form optimierter Varianten des Verkehrsachsenschutzes vorgelegt werden, die einen transparenten Nachvollzug der damit verbundenen Kostenelemente wie monetäre Investitionen, verbleibende Restrisiken und erforderliche Sperrtage ermöglichen sollen.

Ein **Risikodialog** (Haller 1992) kann u.a. dazu beitragen, dass breit abgestützte Wertungen und Interessen in die Optimierung und in den Entscheidungsprozess einfließen können. Das Vorgehen in Kap. 1 ermöglicht es, alternative Bewertungsansätze, sei dies zur Bewertung von Sperrtagen oder sei dies zur Bewertung von Todesfallrisiken, in eine Optimierung einzubeziehen. Der Entscheidungsträger kann also Varianten, die Resultat des engeren Risikomanagement sind, mit alternativen, nutzenseitigen Bewertungsansätzen konfrontieren und neue, optimierte Varianten berechnen lassen. Damit kann ein Entscheid - wie auch immer gefasst - transparent gemacht werden. Zudem erlaubt dieses Vorgehen, die Sensitivität des Entscheidungsmodells bezüglich bestimmter Eingangs- und Bewertungsgrössen zu veranschaulichen.

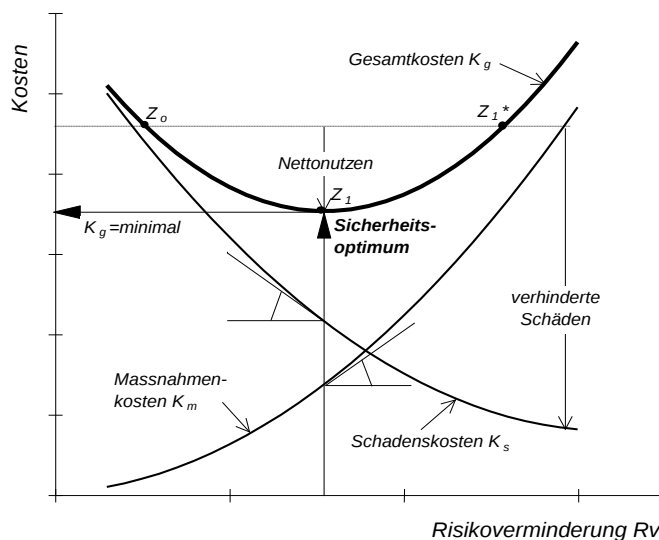
Hauptzielsetzung des Leitfadens

Die gesamtwirtschaftlichen Kosten K_g im Zusammenhang mit dem Lawinenschutz von Verkehrsachsen bestehen grundsätzlich aus zwei Komponenten:

- den Schadenkosten K_s (hier mit der Bewertung von Todesfallrisiken erfasst) und
- den Massnahmekosten K_m (hier mit den Kosten für bauliche Massnahmen und Sperrtagen erfasst)

Im folgenden sollen Lawinenzüge an Verkehrsachsen als geschlossene Risikosysteme definiert werden, indem die Risikoverminderung einzig durch Schutzmassnahmen erfolgt und Änderungen der Lawinengefahr und der Verkehrsnutzung vorerst unbeachtet bleiben. Von einem Ausgangszustand Z_0 ausgehend, können Massnahmen getätigt und Risiken vermindert werden. Die Massnahmekosten steigen mit zunehmender Risikoverminderung exponentiell an, d.h. je höher das erreichte Sicherheitsniveau, um so höher belaufen sich die Grenzkosten für eine weitere Risikoverminderungseinheit (Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs). Die hohen Schadenkosten K_s im Ausgangszustand nehmen in Funktion der Risikoverminderung durch Massnahmen degressiv ab. Das Abfallen der Schadenkosten mit abnehmender Rate ist im Gesetz des abnehmenden Grenznutzens begründet, d.h. dass mit zunehmender Risikoverminderung weitere Risikoverminderungseinheiten eine geringere Wertschätzung erfahren. Im Vergleich mit dem Ausgangszustand können somit auf jedem Risikoniveau die verhinderten Schäden als Differenz zur Schadenkostenfunktion abgelesen werden. Die Addition von Massnahmekosten und Schadenkosten ergibt schliesslich den zur Abszisse konkave Verlauf der Gesamtkosten.

Abb. 3.2 Optimierung der Sicherheit bei minimalen Gesamtkosten K_g (vgl. z.B. Starr et al. 1976)



Die Zielsetzung von minimalen Gesamtkosten ergibt ein Sicherheitsoptimum aus volkswirtschaftlicher Sicht mit dazugehörigem Restrisiko R_1 dort, wo die Summe aus Schadenkosten und Massnahmekosten minimal wird (Z_1). Der Nettonutzen an verhinderten Schäden (verhinderte Schäden minus Massnahmekosten) wird dabei im Zustand Z_1 maximiert. Eine Risikoverminderung ist somit nur wirtschaftlich, bis die Massnahmegrenzkosten den dadurch verhinderten Schädengrenzkosten (Grenznutzen) entsprechen. Werden die Risiken bis zum Zustand Z_1^* vermindert, so steigen die Gesamtkosten wieder bis auf das Ausgangsniveau, wobei jetzt v.a. die Massnahmekosten kostenbestimmend werden.

3.2 Risikoanalyse (vgl. Abb. 3.1)

3.2.1 Gefahrenabschätzung

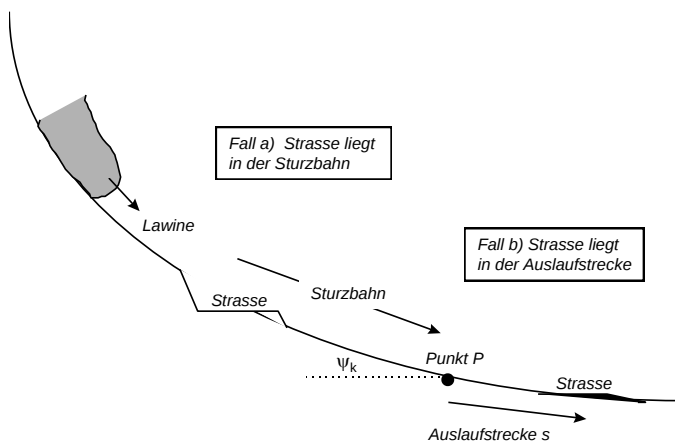
Das Management von Lawinenrisiken auf Verkehrsachsen erfordert meist die Abschätzung der langfristigen Lawinengefährdung (für die Beurteilung von permanenten baulichen Massnahmen) und die Berücksichtigung der aktuellen Lawinengefahr (für die temporäre Sperrung von Verkehrsachsen). Damit ist der Verkehrsachsenschutz ein klassischer Risikomanagementbereich an der Schnittstelle kurz- und langfristiger Betrachtungen.

Langfristige Lawinengefährdung (Salm et al. 1990; Margreth 1998)

Katasterangaben, d.h. zeitliche und räumliche Angaben zu den bereits aufgetretenen Lawinenereignissen sind für die langfristige Beurteilung von Lawinengefahren auf Verkehrsachsen von ausserordentlicher Bedeutung. Die Auswertung von konkreten Katasterangaben zu Handen der Risikoberechnung wird am Bsp. Nr. 1 im Kap. 2 erklärt. In Abb. 3.3 sind wesentliche topographische Bedingungen eines Lawinenzuges und die zwei Hauptlagen der Verkehrsachse im Lawinenzug im Querschnitt dargestellt.

Eine Lawine beginnt zu verzögern, wenn die Geländeneigung eine bestimmte kritische Neigung ψ_k unterschreitet. Oberhalb dieses Geländepunktes P ist die Sturzbahn, unterhalb ist die Auslaufstrecke s. Für Risiko- und v.a. für Restrisikoberechnungen ist es wesentlich zu unterscheiden, ob die Strasse den Lawinenzug im Bereich der Sturzbahn (Fall a) oder im Bereich der Auslaufstrecke (Fall b) quert. Der Tangens der kritischen Neigung $\tan \psi_k$ ist gleich dem Reibungskoeffizienten μ der Lawine, der v.a. aufgrund der Lawinengrösse, der Schneeeigenschaften und der Höhe über Meer variiert.

Abb. 3.3 Lage der Strasse im Lawinenzug



Wann liegt eine zu beurteilende Verkehrsachse in der Sturzbahn der Lawine?

Das Gelände oberhalb der Verkehrsachse weist im Lawinenzug auf einer Strecke von rund 50 - 100 m eine Hangneigung von:

$\psi > 8^\circ$ auf, wenn grosse Trockenschnee- oder Trockenschnee- und Nassschneelawinen auftreten

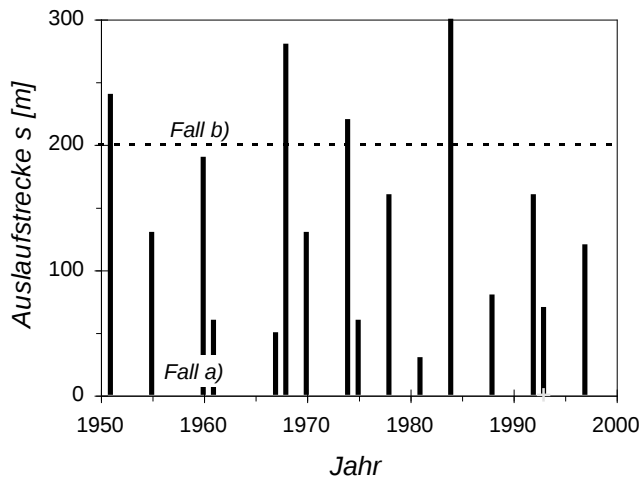
$\psi > 16^\circ$ auf, wenn kleine Lawinen oder nur Nassschneelawinen (v.a. Frühjahr an exponierten Südhängen) auftreten

Bei geringerer Neigung wird hier für praktische Abschätzungen angenommen, dass die Strasse in der Auslaufstrecke liegt. Sind keine Lawinenereignisse auf der Verkehrsachse bekannt und bestehen Zweifel, ob die Lawine überhaupt die Verkehrsachse erreicht, so sind lawinentechnische Berechnungen erforderlich.

Wiederkehrdauer T und Lawinenwahrscheinlichkeit p_L (BFF/EISLF 1984)

Die Häufigkeit einer Lawine in einem bestimmten Ausmass wird durch die Wiederkehrdauer T angegeben (reziproker Wert der Häufigkeit). Dies ist das mittlere Zeitintervall, in dem das Ereignis in einer bestimmten Grösse auftritt, wenn eine genügend lange Zeitspanne betrachtet wird. Abb. 3.4 zeigt ein Beispiel der zeitlichen Verteilung der Lawinenereignisse und deren Grösse gemessen an der Auslaufstrecke s. Typisch ist die Unregelmässigkeit der Grösse und der Häufigkeit des Auftretens innerhalb des Beobachtungszeitraumes 1950-1998. Innerhalb des Jahres muss für Risikoberechnungen das mögliche Auftreten von Lawinen (z.B. Dezember-April) mit dem Zeitraum für die Erfassung des durchschnittlichen täglichen Verkehrs DTV_w übereinstimmen. Das Risiko von Gletscherabbrüchen und daraus folgenden Staublawinen im Sommer muss separat und unter Einbezug des entsprechenden DTV_s berechnet werden.

Abb. 3.4 Lawinenereignisse im Lawinenzug Mustergraben



Beobachtungszeitraum 1950-1998=48 Jahre

Anzahl Lawinen = 16

Anzahl Lawinen mit $s > 200$ m = 4

Fall a) Verkehrsachse in der Sturzbahn

Wiederkehrdauer $T = 48 / 16 = 3$ Jahre

Fall b) Verkehrsachse in der Auslaufstrecke
 $s = 200$ m

Wiederkehrdauer $T = 48 / 4 = 12$ Jahre

Es werden also nur Lawinen gezählt, die bis über die Verkehrsachse vorgestossen sind! Die Häufigkeit von Ereignissen nimmt mit zunehmender Grösse (Auslaufstrecke) einer Lawine ab, die Wiederkehrdauer entsprechend zu.

Die Lawinenwahrscheinlichkeit p_L bzw. besser die erwartete mittlere Lawinenhäufigkeit berechnet sich mit:

$$p_L = \frac{1}{T} \quad \text{bzw.} \quad p_L = \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \quad [1/\text{Jahr}] \quad (3.1)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$ unabhängige Lawinenzüge, die die Verkehrsachse betreffen
falls $p_L > 1$ entspricht dies der erwarteten mittleren Lawinenhäufigkeit

Je nach untersuchtem Zustand sind folgende Kriterien bei der Erfassung der Lawinenereignisse bedeutend:

Unbeeinflusster Ausgangszustand:	Nur die natürlich ausgelösten Lawinen werden gezählt
Beurteilung Schutzmassnahmen:	Lawinen, die verhindert, abgelenkt und aufgefangen werden, oder diejenigen die bei geschlossener Verkehrsachse abgehen sind abzuschätzen
Restrisikozustand:	Nur die Lawinen, die noch auf die offene Verkehrsachse treffen, werden erfasst! (Abschätzungen nötig, wenn Daten nicht verfügbar)

Erfassung seltener, grosser Lawinenereignisse mit Lawinengefahrenzonen

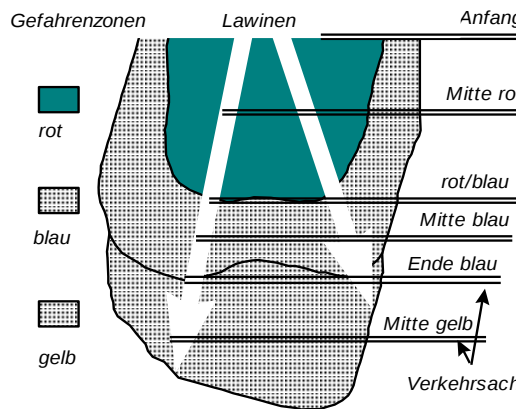
Mit lawinentechnischen Berechnungen und weiteren Angaben können Gefahrenzonen gemäss den Richtlinien (BFF/EISLF 1984) abgegrenzt werden. In Siedlungsbereichen bestehen diese z.T. bereits. Je nach Lage der Verkehrsachse in den Gefahrenzonen (Abb. 3.4) werden die Lawinenwahrscheinlichkeiten p_L pro Jahr in Tab. 3.1 massgebend. Bei Verkehrsachsen mit sehr hoher Bedeutung (Autobahnen, alpenquerende Bahnachsen usw.) oder bei Raststätten, Bahnhöfen und Orten mit hoher Personenpräsenz stellt sich oft die Frage: Wie hoch ist die Lawinenwahrscheinlichkeit $p_{L(n)}$ innerhalb eines Untersuchungszeitraumes n ? Diese Wahrscheinlichkeit lässt sich berechnen mit:

$$p_{L(n)} = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad [1] \quad (3.2)$$

T = Wiederkehrdauer [Jahre] z.B. $T = 30$ an der Zonengrenze rot / blau; n = Untersuchungszeitraum [Jahre]

Im folgenden sind charakteristische Werte von $p_{L(n)}$ als Zonenmittel tabelliert (Tab. 3.2). Die Werte gelten für Verkehrsachsen, die die rote bzw. die blaue Zone ungefähr in der Mitte queren (Wilhelm 1997). Innerhalb von $n=50$ Jahren wird in der roten Zone eine Lawine mit rund 96% Wahrscheinlichkeit auftreten (entsprechend innerhalb der blauen Zone noch mit rund 45%).

Abb. 3.5 Lage der Verkehrsachse in den Lawinengefahrezonen



Tab. 3.1 Jährliche Lawinenwahrscheinlichkeit p_L

Lage der Verkehrsachse	Lawinenwahrscheinlichkeiten	
	p_L (pro Jahr)	$p_{L(n)}$ (n=50)
Anfang rot	≈ 0.2	1.000
Mitte rot	0.100	0.963
rot / blau	0.033	0.816
Mitte blau	0.013	0.449
Ende blau	0.003	0.154
gelb	spezifisch	spezifisch

Tab. 3.2 Lawinenwahrscheinlichkeiten $p_{L(n)}$ für Standorte in der Mitte der Zonen innerhalb eines Zeitraumes n

Lage der Verkehrsachse	$T^1)$ [Jahre]	Untersuchungszeitraum (n) [Jahre]							
		1	5	10	20	30	50	70	100
Mitte rot	≈ 10	0.100	0.390	0.602	0.804	0.893	0.963	0.986	0.996
Mitte blau	≈ 80	0.013	0.064	0.123	0.226	0.313	0.449	0.549	0.658

¹⁾ Mittlere Wiederkehrdauer für ein typisches Ereignis

Differenzierung der Lawinenwahrscheinlichkeit p_L

Das Ereignis (Auftreten einer Lawine an einem bestimmten Geländepunkt) kann in ein Initialereignis (bestimmte Neuschneehöhe im Anrissgebiet) und beinahe beliebig viele Folgeereignisse (Lawine bricht an, Lawine folgt bei einer Aufteilung der Sturzbahn einer bestimmten Rinne usw.) aufgeteilt werden. Das Initialereignis tritt mit einer bestimmten Häufigkeit pro Jahr auf und die Folgeereignisse sind jeweils mit bedingten Wahrscheinlichkeiten verbunden und auch als solche erfassbar. Die 'Gesamtwahrscheinlichkeit' p_L kann multiplikativ z.B. wie folgt erfasst werden.:

$$p_L = p_{HN3} \cdot p_A \cdot p_R \quad \text{z.B.} = 0.9 \quad [1/\text{Jahr}] \quad (3.3)$$

p_{HN3} = Häufigkeit für bestimmte Neuschneesumme (z.B. innerhalb von 3Tg) pro Jahr z.B. = 5

p_A = Wahrscheinlichkeit pro Ereignis, dass bestimmte Neuschneesumme anbricht z.B. = 0.6

p_R = Wahrscheinlichkeit, dass Lawine in der Sturzbahn einer bestimmten Rinne folgt z.B. = 0.3

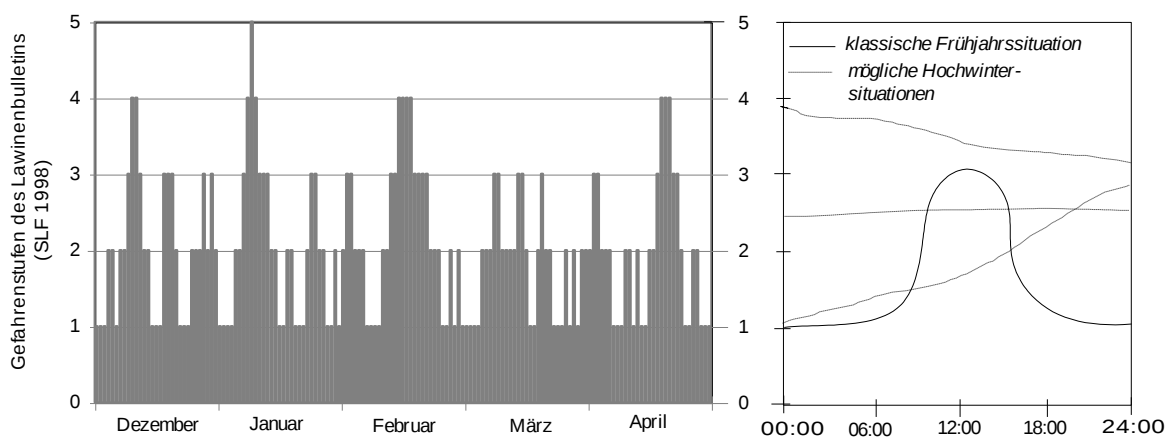
(sogenannte räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit (Borter et al. 1999))

Die Werte dürfen keinesfalls verallgemeinert werden, sondern müssten situationsspezifisch erfassbar sein. Mit der Häufigkeit einer bestimmten Neuschneesumme sind mögliche Lawinenanrisse in der Altschneedecke und klassische Frühjahrsereignisse (Erwärmung) noch nicht berücksichtigt. In Abb. 3.8, S. 71 unten ist ein Bsp. für 3-Tagesneuschneesummen aufgezeigt. Diesbezüglich kann die Häufigkeit von bestimmten Neuschneesummen p_{HN3} , die für Verkehrsachsen relevant sind (z.B. ≥ 50 cm innerhalb von 3 Tagen), am SLF in Davos nachgefragt und auf bestimmte Standorte angepasst werden.

Aktuelle Lawinengefahr (EISLF 1998, Brabec et al.1998)

Für das Management von Verkehrsachsen mit Strassensperrungen muss aber die Entwicklung der aktuellen Lawinengefahr einbezogen werden. Dies ist insbesondere bei den klassischen Frühjahrssituationen mit der tageszeitlichen Erwärmung oder bei einsetzendem Schneefall, Wind usw. von entscheidender Bedeutung. In Abb. 3.6 ist die Entwicklung der aktuellen Lawinengefahr über einen Winter beispielhaft aufgetragen. Wesentlich dabei ist, dass zwischen Hochwinter- und Frühjahrssituationen differenziert wird, da sich im Frühjahr die aktuelle Lawinengefahr tageszeitlich sehr viel schneller verändern kann. Rechts in Abb. 3.6 sind dazu die Entwicklungen der aktuellen Lawinengefahr für mögliche Hochwintersituationen und eine klassische Frühjahrssituation aufgetragen.

Abb. 3.6 Beispielhafte Entwicklung der aktuellen Lawinengefahr über einen Winter und über einen Tag



Auswertungen zum Lawinenbulletin zur Erfassung der Sperrtage für eine sog. Dauersperrung

Als sogenannte Dauersperrung soll diejenige Sperrzeit gelten, die praktisch gesehen das Risiko in einem System vollständig eliminiert (vergleichbar mit einem Vollverbau). Diese Sperrzeit in Tagen soll in beliebige Sperrzeitintervalle aufteilbar sein und muss situationsspezifisch abgeschätzt werden. Eine erste Annäherung kann mit den Gefahrenstufen des Lawinenbulletins gemacht werden, wobei eine Gefahrenstufe ≥ 2 (mässig) in einer der betrachteten Lawinenzüge fiktiv zur Schliessung der Verkehrsachse führen soll. Dies hat ausgehend von 150 Wintertagen im Mittel 79 - 110 Sperrtage je Klimaregion und Winter zur Folge:

Tab. 3.3 Auswertungen zum Lawinenbulletin nach Klimaregionen (1985/86 - 1994/95)

	<i>Klimaregionen der Schweiz (EISLF 1998, Anhang 7 und 8)¹</i>						
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
Gefahrenstufe gering [%]	34.8	28.7	33.5	27.6	29.7	47	26.7
Gefahrenstufe gering [Tg] ²	52	43	50	41	45	71	40
Gefahrenstufe ≥ 2 (mässig) [Tg] ³	98	107	100	109	105	79	110

¹ 1 = westlicher Alpennordhang

4 = Wallis

7 = Engadin mit Bergell,

2 = zentraler Alpennordhang

5 = Nord- und Mittelbüden

Puschlav und Münstertal

3 = östlicher Alpennordhang

6 = Tessin mit Calancatal und Misox

² Dabei wird von einer mittleren Winterdauer von 5 Monaten, d.h. rund 150 Tagen ausgegangen

³ Ausgangswert für die Erfassung der Sperrtage S_d für eine sog. Dauersperrung [Tg]

Abb. 3.7 Beispiel für ein nationales Lawinenbulletins

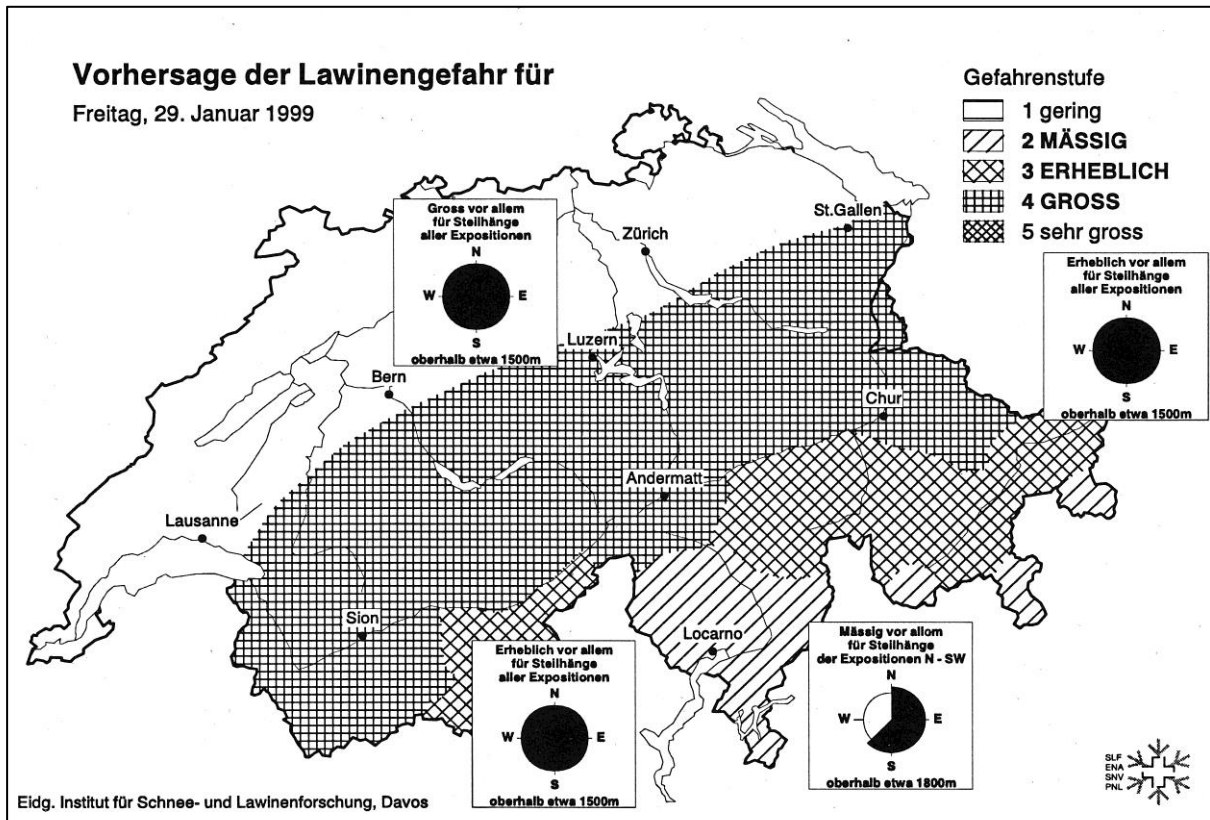
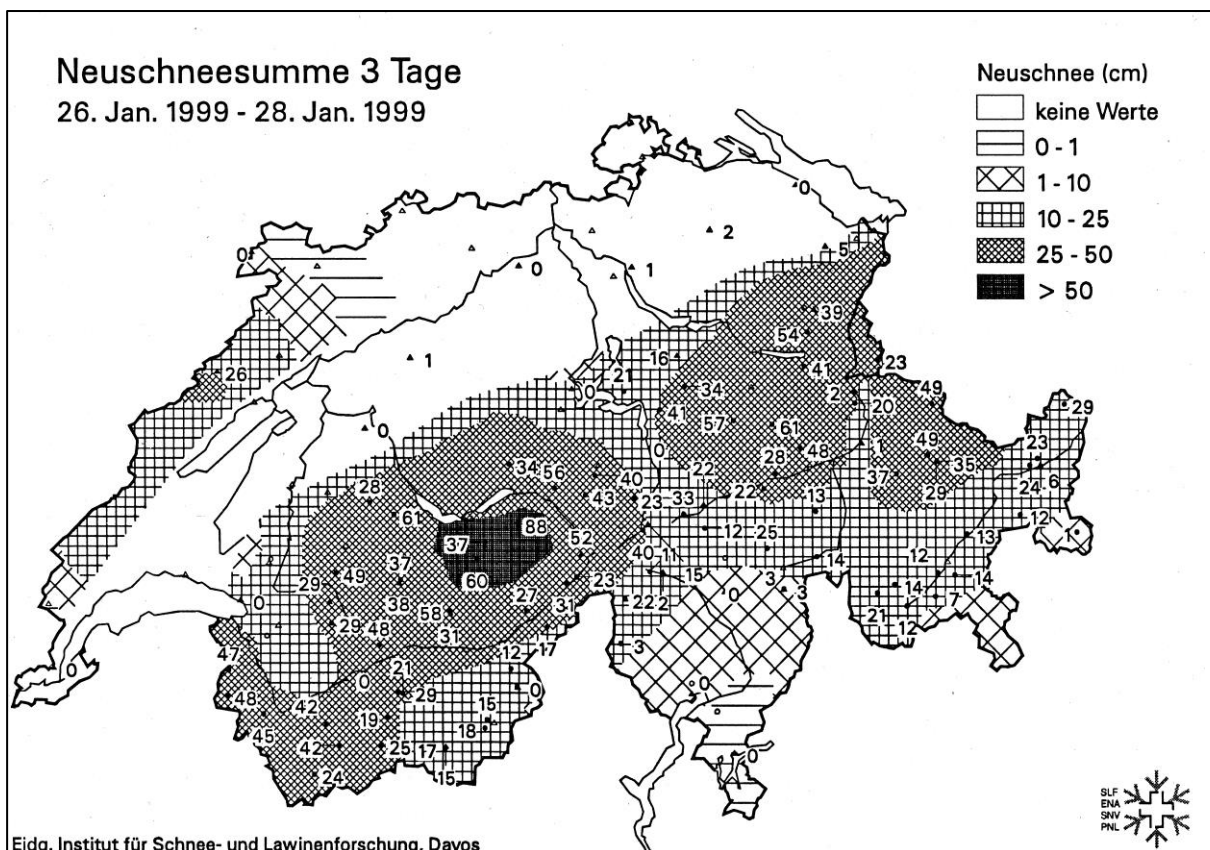


Abb. 3.8 Beispiel für 3-Tagesneuschneesummen



Tab. 3.4 Grobe Abschätzung der Wirksamkeiten von Strassensperrungen

Sperrtage in [%] von S_d ¹	Risikoverminderung [%]
10	40
30	70
50	90
100 (Dauersperrung)	100

¹ S_d = Sperrtage für sog. Dauersperrung = 100 %

von Strassensperrungen gemäss Tab. 3.4 zu Grunde gelegt werden. Die Werte müssen mit zukünftigen Praxiserfahrungen verbessert werden.

Ausgehend von den Werten in der untersten Zeile von Tab. 3.3 kann eine Verminderung für tiefe Höhenlagen, schneearme Standorte oder für Risikosysteme mit wenigen oder gleichexponierten Lawinenzügen bis auf $S_d = 30 - 50$ Sperrtage pro Winter gemacht werden. Für das Beispiel Nr. 2 in Kap. 2 (Flüelapass mit 47 Lawinenzügen, Anrissgebiete aller Expositionen und Höhenlagen über 2000 m.ü.M.) wird der Maximalwert der Region 7 gemäss Tab. 3.3 mit $S_d = 110$ Sperrtagen ohne Verminderung beibehalten. Mit den Sperrtagen S_d und der 'Sperrfunktion' in Abb. 1.11 können grob die Wirksamkeiten

3.2.2 Schadenpotentialerfassung

Von den verschiedenen Verkehrsträgern wie Strasse, Bahn, Seilbahn, aber im weiteren Sinne auch Skipisten, Langlaufloipen und Wanderwegen werden hier exemplarisch nur Verkehrsgrössen für den Verkehrsträger Strasse (und z.T. Bahn) vertieft. Risikoanalysen und Wirtschaftlichkeitsbeurteilungen von Schutzmassnahmen können für weitere Verkehrsträger grundsätzlich mit der hier vorgestellten Methodik für Verkehrsachsen durchgeführt werden. Wird ein Lawinengefahrenbereich mit einem Fahrzeug durchfahren, so ist der zeitliche Aufenthalt im Gefahrenbereich für das einzelne Individuum relativ kurz. Die Analyse kollektiver Risiken zeigt aber, dass bei stark befahrenen Strassen oder bei hohem Busanteil am Gesamtverkehr beträchtliche durchschnittliche Personenzahlen gleichzeitig auf gefährdeten Streckenabschnitten präsent sein können.

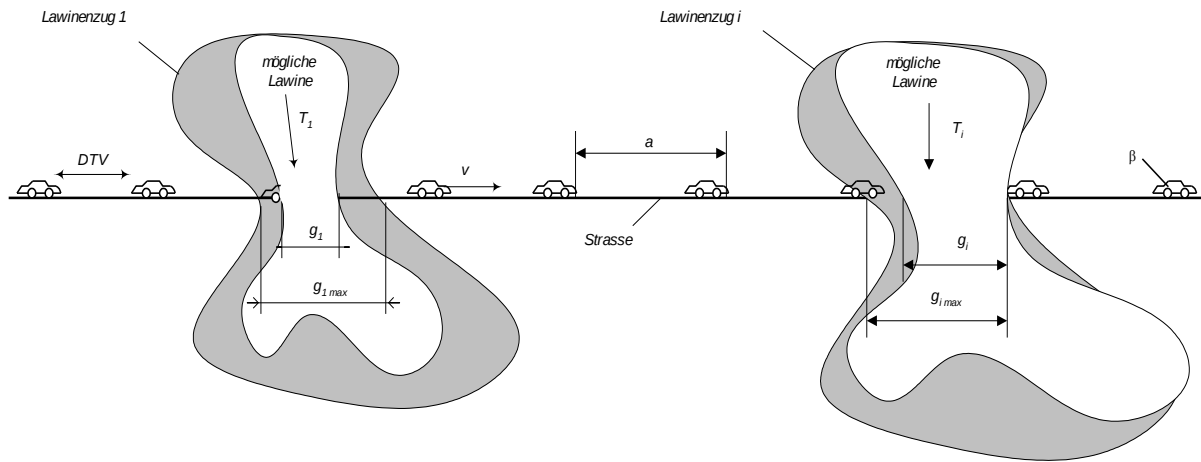
Relevante Verkehrsgrössen zur Erfassung des Schadenpotentials SP

Für die Erfassung des Schadenpotentials, d.h. hier die mittlere und die maximale Personenzahl, die gleichzeitig auf gefährdeten Streckenabschnitten präsent sind, werden nur die wesentlichen Grössen erklärt. Diese können in Bezug auf Zeitdauer, Verkehrsregime, Verkehrsart usw. beliebig weiter differenziert werden. Für fachliche Grundlagen zu den Verkehrsgrössen vgl. die Schweizer Norm SN 641 230a der Vereinigung Schweizer Strassenfachleute VSS. Wesentlich sind gemäss Abb. 3.9:

- Durchschnittlicher täglicher Verkehr	DTV	$[Fz/Tg]$	auf Winter DTV_w beziehen
- Mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit	v	$[km/h]$	Mittelwert im Lawinenzug
- Gefährdeter Streckenabschnitt			
→ mittlere Breite von Lawinen im Strassenbereich	g	$[km]$	für Risikoberechnung
→ maximale Breite des Lawinenzuges im Strassenbereich	g_{max}	$[km]$	für Massnahmenbeurteilung
- Besetzungsgrad	β	$[Pers./Fz]$	meist Mittelwerte
- Busanteil am Gesamtverkehr	DTV_{Bus}	$[\%]$	bei $> 2\%$ → $R_{0 Bus}$ separat erfassen
- Faktor zur Berücksichtigung der Zuglängen	γ	$[1]$	nur bei Bahnen

In einer ersten Näherung wird der durchschnittliche tägliche Verkehr während 24h gleich verteilt angenommen und die Fahrzeuge sollen alle mit der konstanten Geschwindigkeit v in Bewegung sein. Damit ergibt sich der mittlere Zeitabstand t von Fahrzeug zu Fahrzeug gemäss $t = 24h / DTV_w$ und der mittlere Fahrzeugabstand mit $a = v \cdot t$.

Abb. 3.9 Verkehrsgrößen zur Erfassung des Schadenpotentials



Die Fahrzeugpräsenzwahrscheinlichkeit p_F bzw. die mittlere erwartete Häufigkeit von Fahrzeugen auf gefährdeten Streckenabschnitten g kann nun definiert werden als Verhältnis von gefährdeter Strassenstrecke g zu mittlerem Fahrzeugabstand a und ergibt sich mit:

$$p_F = \frac{g}{a} = \frac{g \cdot DTV_w}{v \cdot 24h} \quad \text{bzw.} \quad p_F = \frac{DTV_w}{v \cdot 24h} \sum_{i=1}^n g_i \quad [Fz] \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ Lawinenzüge} \quad (3.4)$$

mit: $a > g = 0 < p_F < 1$; Wahrscheinlichkeit bzw. erwartete mittlere Häufigkeit für Fahrzeuge auf gef. Streckenabschnitt

mit: $a = g = p_F = 1$; Im Mittel befindet sich ein Fahrzeug auf gefährdeten Streckenabschnitten

mit: $a < g = p_F > 1$; Anzahl Fahrzeuge, die sich im Mittel auf gefährdeten Streckenabschnitten befinden

Es zeigt sich in fast allen Situationen, dass a grösser als g ist. Bei mehreren Lawinenzügen im Risikofall b) kann a jedoch durchaus kleiner als $\sum g_i$ werden kann. Im letzten Fall befinden sich im Mittel mehrere Fahrzeuge auf gefährdeten Streckenabschnitten, die aber äusserst unwahrscheinlich gleichzeitig von verschiedenen Lawinen getroffen werden. Deshalb wird die Präsenzwahrscheinlichkeit p_F nicht zum Schadenausmass S , sondern zur Schadenwahrscheinlichkeit p_S gezählt (vgl. Kap. 3.2.4) und ist somit auch nicht relevant für die Beurteilung der Aversion.

Bei Bahnstrecken erhöht sich die Präsenzwahrscheinlichkeit p_F noch um den Faktor γ bzw. $\gamma_i = (L_z/g_i) + 1$. Bei mehreren Lawinenzügen i mit unterschiedlich langen gefährdeten Strassenabschnitten g_i variiert nämlich auch das Verhältnis der Zuglänge L_z zu g_i .

Die individuelle Präsenzwahrscheinlichkeit p_{Fj} einer bestimmten Person j auf den gefährdeten Streckenabschnitten ergibt sich mit:

$$p_{Fj} = \frac{g \cdot z}{v \cdot 24h} \gamma \quad \text{bzw.} \quad p_{Fj} = \frac{z}{24h} \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{v_i} \gamma_i \quad [\text{pro Jahr}] \quad (3.5)$$

$z = \text{Anzahl Durchfahrten pro Tag}$

Das mittlere Schadenpotential SP kann berechnet werden, wenn die Präsenzwahrscheinlichkeit p_F mit dem Besetzungsgrad β multipliziert wird. Dies sagt aber noch nichts über die Wahrscheinlichkeit eines Schadens aus. Das maximale Schadenpotential $SP_{\max}$ ist jedoch meist im Risikofall c) zu erwarten (vgl. Kap. 1.3.3).

Differenzierungen zum durchschnittlichen Verkehr

Der DTV entspricht einem Jahresmittel und bezieht sich auf den Durchschnittsverkehr (Summe beider Richtungen) während 24 Stunden. Der DTV soll hier innerhalb der massgebenden Winterzeit (z.B. Dezember-April) als DTV_w erfasst werden. Wichtig ist, dass auch die Lawinenwiederkehrdauer T auf den gleichen Zeitraum wie der DTV_w bezogen wird. Zur Beurteilung von kurzfristigen Schutzmassnahmen (wie Sperrung, künstliche Lawinenauslösung usw.) nach Risikokriterien geben auch spezifische Tageswerte wie der DTV_{14} (z.B. von 07.00 bis 21.00 Uhr, der durchschnittliche Stundenverkehr DSV und der Spitzenstundenverkehr SSV) wertvolle Hinweise zum täglichen Verkehrsaufkommen. Bei einer Strassensperrung ist zu berücksichtigen, dass der Spitzenstundenverkehr (SSV) unmittelbar vor oder nach der Sperrzeit verschoben auftreten kann. Zudem sind stark erhöhte Verkehrsbelastungen an Wochenenden, neuralgische Staupunkte, Oertlichkeiten, wo Personen die Fahrzeuge verlassen (Aussichtspunkte, Raststellen usw.) oder die mit Grossveranstaltungen in Zusammenhang stehenden Verkehrsaufkommen in die kurzfristigen Risikokalküle einzubeziehen.

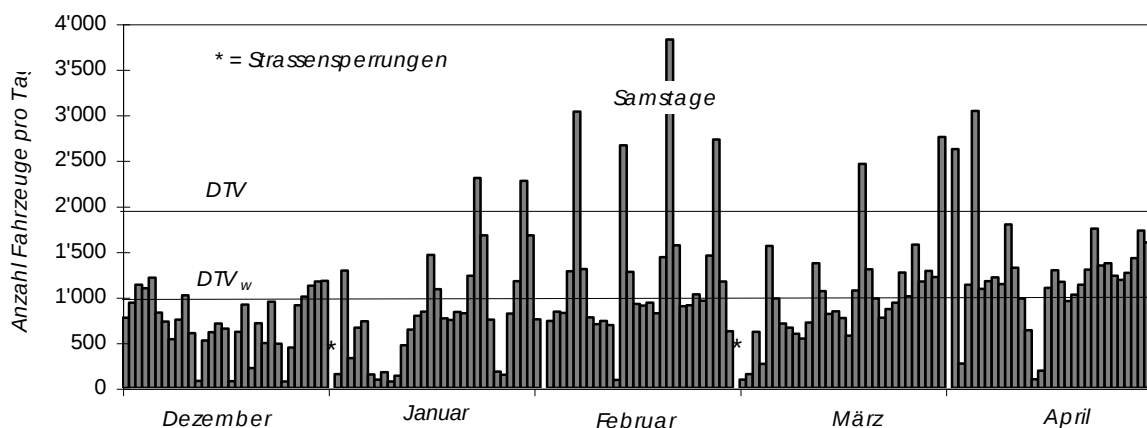
Ganglinientypen

Die Ganglinien zeigen den zeitlichen Verlauf von Verkehrsbelastungen. Damit werden die Zusammenhänge zwischen den Verkehrsmengen unterschiedlicher Bezugszeitpunkte sichtbar. Entsprechend den Ueberlegungen beim durchschnittlichen Verkehr sind auch hier bestimmte Zeitabschnitte bzw. innerhalb der massgebenden Lawinenzeit liegende Tagessequenzen von Bedeutung. Die Ganglinien beziehen sich ebenfalls auf den Querschnittsverkehr, d.h. auf die Summe beider Richtungen. Eine Analyse der Verkehrsdaten nach Fahrzwecken erlaubt die Unterteilung in Ganglinientypen (z.B. Schweizer Norm SN 641 230a S.2 f), die die spezifischen Gesetzmässigkeiten des Verkehrs auf den Strassen wiedergeben.

In Abb. 3.10 wird für die Flüelapassstrasse eine Jahresganglinie und in Abb. 3.11 eine Tagesganglinie aufgezeigt. Die Jahresganglinie der täglichen Verkehrsmengen entspricht dem Typ 'Freizeitverkehr' mit ausgeprägter Sommerspitze. Beispielhafte Grössen dazu sind:

<i>Der durchschnittliche tägliche Verkehr</i>	<i>DTV (1993)</i>	<i>1'969 Fz pro Tag</i>
<i>Der durchschnittliche tägliche Verkehr im Winter</i>	<i>DTV_w (1993/94)</i>	<i>1'002 Fz pro Tag</i>
<i>Spitzen des Samstagsverkehrs im Februar</i>		<i>mehr als 300% des DTV_w</i>

Abb. 3.10 Jahresganglinie der täglichen Verkehrsmengen am Flüelapass (nur Dezember 1993 - April 1994)



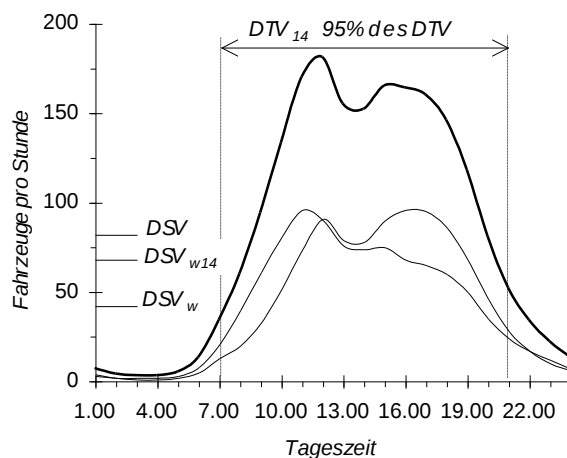
Bei den Tagesganglinien kann nach Wochentagen, z.B. Werktagsganglinien (Mo - Fr) oder Samstags- und Sonntagsganglinien unterschieden werden, die auch am Flüelapass stark differieren können. Obwohl deutlich vom Freizeitverkehr geprägt, sind die Vormittags- und Nachmittagspitzen - verursacht durch die zeitliche

Verschiebung des Hin- und Rückreiseverkehrs - eher dem Werktagsganglinientyp 'Fernverkehr' ähnlich. Wesentliche Grössen sind:

Der 14-Stunden-Wert DTV_{14} (07.00 bis 21.00)	rund 95% des DTV
Der 14-Stunden-Wert im Winter DTV_{w14}	947 Fz pro Tag
Der durchschnittliche stündliche Verkehr im Winter DSV_w	42 Fz pro Tag
Der durchschnittliche stündliche Verkehr im Winter während 14 Stunden DSV_{w14}	68 Fz pro Tag

Wird anstelle des DTV_w der DTV_{w14} , der DSV oder der DSV_{w14} berücksichtigt, so muss bei den Risikoberechnungen die Wiederkehrdauer T auf den gleichen Zeitraum bezogen werden!

Abb. 3.11 Tagesganglinie des durchschnittlichen Verkehrs am Flüelapass (Mittelwert über alle Wochentage 1993)



Die Variation der Objektpräsenz in Funktion der Tageszeit ist beträchtlich. Wird zusätzlich noch der tageszeitliche Verlauf der Lawinengefahr (z.B. im Frühling ähnlich der Objektpräsenz verlaufend) berücksichtigt, so können die Abweichungen der Risikospitzen von den durchschnittlichen Risikowerten grosse Ausmasse annehmen. Der erforderliche Tiefgang der Datenerfassung für Risikoberechnungen kann nicht allgemein, sondern nur in Bezug auf die spezifischen Fragestellungen beurteilt werden. Durchschnittswerte sollten jedoch der zeitlichen Dynamik des Risikoverlaufes durch geeignete Datenauswahl Rechnung tragen.

Fahrzeuggeschwindigkeit v

In den meisten Fällen kann mit einer sogenannten Reisegeschwindigkeit, d.h. einer mittleren Geschwindigkeit im Lawinenzug, unter Berücksichtigung von unfreiwilligen Haltezeiten (z.B. Staus) und spezifischen Erschwerissen (z.B. schneebedeckte Fahrbahn, Glatteis) gerechnet werden. Es besteht die Tendenz, die Fahrzeuggeschwindigkeit zu überschätzen und somit das Risiko zu unterschätzen. Bei mehreren Lawinenzügen kann es sinnvoll sein, für jeden Lawinenzug die Geschwindigkeit separat abzuschätzen.

Besetzungsgrad β

Der mittlere Besetzungsgrad der Personenwagen PW beträgt gesamthaft 1,6 Personen pro PW (Dienst für Gesamtverkehrsfragen). Er kann gemäss Tab. 3.5 (letzte Spalte) differenziert werden nach dem Fahrzweck, was Werte zwischen 1.3 und 2.1 ergibt. Wird noch ein geringer Busverkehr berücksichtigt, so können allenfalls angepasste Werte für β von 1.5 [Pers./Fz] für vorwiegend Pendler- und Geschäftsverkehr bis 2.0 [Pers./Fz] für vorwiegend Freizeit- und Reiseverkehr angenommen werden.

Ebenfalls differenziert ist in Tab. 3.5 der gesamte PW-Verkehr nach dem Fahrzweck und der Anzahl Insassen pro PW. Es zeigt sich, dass der Pendlerverkehr rund 40 % des PW-Verkehrs ausmacht und dabei in 30 % der PW's nur eine Person im Wagen ist. Gesamthaft beinhalten sogar 62.3 % aller PW's nur eine Person. Die Wahrscheinlichkeit, dass in irgendeinem PW genau 4 Insassen sind, beträgt gemäss Tab. 3.5 rund 4.5 % oder 0.045.

Tab. 3.5 Gesamter Personenwagenverkehr nach Fahrzweck und Anzahl Insassen differenziert

Fahrzweck	Anzahl Insassen						Totalverkehr [% PW]	mittlerer Besetzungs- grad β [Personen/PW]
	1	2	3	4	5	≥ 6		
Pendler [% PW]	30.2	5.3	1.0	0.5	0.3	0.1	37.4	1.3
Einkauf [% PW]	10.5	6.5	1.9	0.9	0.3	0.1	20.2	1.7
Geschäft [% PW]	11.1	2.3	0.6	0.3	0.1	0.0	14.4	1.3
Freizeit [% PW]	10.5	10.1	3.4	2.8	0.9	0.3	28.0	2.1
Totalverk. [% PW]	62.3	24.2	6.9	4.5	1.6	0.5	100	1.6

Bus- und Caranteil DTV_{Bus} am Gesamtverkehr DTV_w

Die Verkehrszählungen grenzen im allgemeinen nur den Anteil Schwerverkehr ab, der neben den Cars auch die Lastwagen und Sattelzüge enthält. Am Flüelapass kann z.B. mit einem Schwerverkehrsanteil von rund 6 % und mit einem Caranteil von 1,2% gerechnet werden (Bundesamt für Strassenbau). Bei mehr als 2 % Busanteil soll das Risiko Bus R_{o_Bus} separat berechnet werden, wozu auch ein spezifischer Besetzungsgrad β_{Bus} abgeschätzt wird.

Faktor γ zur Berücksichtigung der Zuglänge l_z bei Bahnen

Bei Bahnen können die Züge nicht wie bei der Strasse die Fahrzeuge als Punkte modelliert werden. Die Zuglänge l_z hat eine Verlängerung der Präsenzzeit des Zuges (als Ganzes betrachtet) auf gefährdeten Streckenabschnitten g zur Folge, was einfach als fiktive Verlängerung derselben um l_z vorstellbar ist. Sieht der Lokomotivführer bei einer Zuggeschwindigkeit v_z eine Lawine in Bewegung erst dann, wenn er sich bereits innerhalb der notwendigen Anhaltedistanz vor dem seitlichen Lawinenrand befindet, so muss ebenfalls mit einer Kollision (Lawine-Zug) gerechnet werden. Zusätzlich zur Anhaltedistanz müsste also ebenfalls die Zeitdauer t_L , während der die Lawine die Bahnlinie quert (Lawinenlänge l_L und Lawinengeschwindigkeit v_L) berücksichtigt werden. Die Distanz $s = v_z \cdot t_L$ wäre bei der Berechnung der Präsenz fiktiv ebenfalls noch zu g und l_z zu addieren, was aber - wie bei den meisten Bahnsituationen - nur mit spezifischen Erfassungen gemacht werden soll. Für eine erste allgemeine Berechnung wird hier vorgeschlagen, bahnspezifische Aspekte zu erfassen mit:

$$\gamma = \frac{l_z}{g} + 1 \quad [1] \quad (3.6)$$

γ = Bahnfaktor; l_z = Zuglänge [km]; g = mittlere Breite von Lawinen im Strassenbereich [km]

3.2.3 Schadenempfindlichkeit (Letalität)

Trifft eine Lawine auf ein stehendes oder fahrendes Fahrzeug (top event oder Ausgangsereignis), so sind in probabilistischer Betrachtung immer mehrere Folgewirkungen denkbar. Somit sind bestimmte Schäden S_i (beschädigtes Fahrzeug, verschüttete Personen oder Todesfälle) auch mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten p_i verbunden. Das Ausmass des entstehenden Schadens an einem bestimmten Standort für ein Fahrzeug mit vorgegebener Personenzahl ist grundsätzlich abhängig von der Lawineneinwirkung einerseits und der Verschüttungsauswirkung andererseits (Dosis-Wirkungs- oder Einwirkungs-Auswirkungs-Beziehungen). Sowohl auf der Einwirkungs- als auch auf der Auswirkungsseite sind mehrere Faktoren abgrenzbar, die die Letalität λ d.h. die Schadenempfindlichkeit für Todesfälle bestimmen (vgl. Abb. 3.12).

Werden Personen in Fahrzeugen von Lawinen erfasst, so können diese unverletzt, verletzt oder im schlimmsten Fall nur noch tot 'geborgen' werden. Eine explizite Auswertung von Lawinenereignissen hinsichtlich des Schadensausmasses an Personen zeigt, dass die Letalität auch von der Rettungszeit abhängig ist. Die in Tab. 3.6 auf-

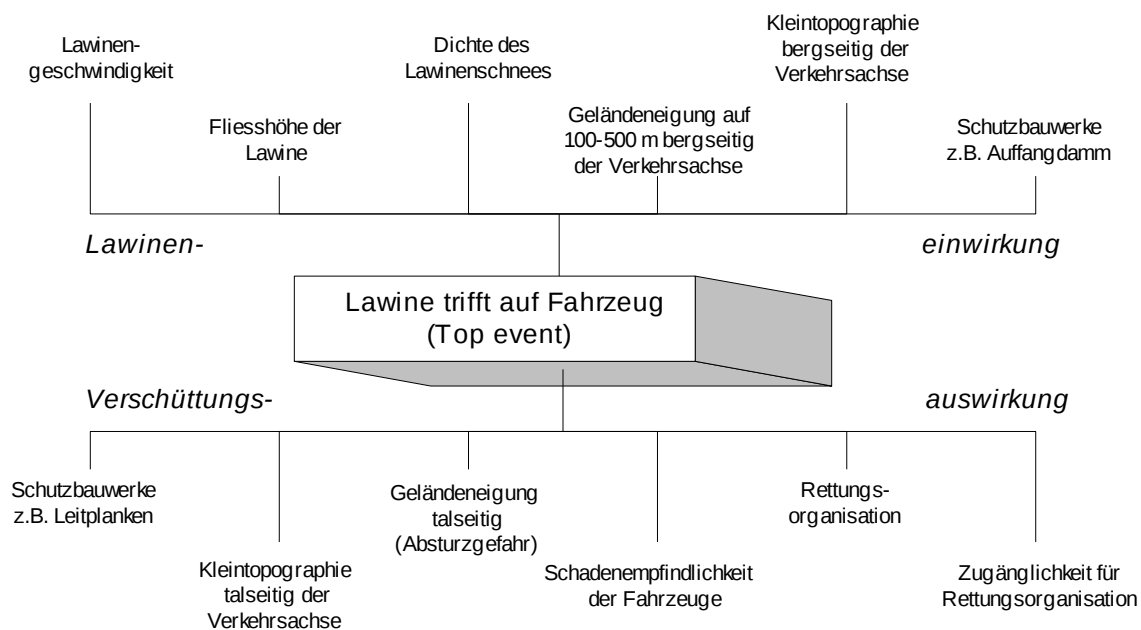
geführten Schadenempfindlichkeiten bei Personen in Fahrzeugen sind aufgrund der Schadenlawinendatenbank des SLF (Latenser et al. 1995) berechnet und als Mittelwert über alle bekannten Schadenereignisse zu verstehen. Die Auswertung orientiert sich an der Zahl von Todesfällen bzw. Verletzten im Verhältnis zur Anzahl Ganzverschütteter.

Tab. 3.6 Lawinenverschüttete Personen in Fahrzeugen ausgewertet nach der Schadenempfindlichkeit (Letalität) (Auswertungszeitraum 1946/47 - 1992/93)

	<i>verschüttet</i>	<i>unverletzt</i>	<i>verletzt</i>	<i>tot</i>
<i>Anzahl Personen</i>	149	76	46	27
<i>Anzahl Personen [%]</i>	100	51	31	18 ¹⁾

1) Letalität λ für Personentodesfälle in Fahrzeugen in [%]

Abb. 3.12 Faktoren, die die Letalität λ bei Lawinenunfällen auf Verkehrsachsen bestimmen



Abweichungen vom Mittelwert können grundsätzlich mit den Faktoren gemäss Abb. 3.12 begründet werden. Vorgeschlagen sind für die Letalität λ die folgenden Differenzierungen nach verschiedenen Kriterien.

	<i>Letalität λ</i>	
	<i>Strasse</i>	<i>Bahn</i>
<i>Staublawinen (Mittelwert)</i>	0.09	0.05
<i>Mittelwert insgesamt</i>	0.18	0.09
<i>Nassschneelawinen (Mittelwert)</i>	0.27	0.13
<i>bergseitig sehr steil (Stützmauer)</i>	≥ 0.3	≥ 0.15
<i>Absturzgefahr talseitig</i>	≥ 0.4	≥ 0.2

Sind z.B. bei einer Strasse nur Staublawinen zu erwarten, so ist bei talseitig flachem Gelände ein Mittelwert (0.09) und bei talseitiger Absturzgefahr hingegen ein Wert ≥ 0.4 zu wählen. Für Bahnen sind meist situations- und szenariospezifische Werte abzuschätzen. Als erste Näherung und zu Vergleichszwecken sollte zuerst mit einem Mittelwert gerechnet werden.

3.2.4 Risikoberechnung

Jeder Risikoberechnung liegt ein Modell zu Grunde, welches unter Einbezug von verschiedenen, bereits aufgetretenen Schadenereignissen verbessert werden kann. Eine Risikosituation kann auf eine einzelne Person (Individuum), auf ein bestimmtes Objekt (Fahrzeug) oder auf grössere Einheiten (Verkehrsträger in einer Region oder der ganzen Schweiz) bezogen werden. Die Analyse einer Risikosituation sollte die folgenden drei Fragen beantworten:

Was (für ein Schaden) kann eintreten?	(Szenario, O)
Wie häufig wird dieser Schaden passieren?	(Wahrscheinlichkeit, p)
Wie gross ist das Ausmass dieses Schadens?	(Ausmass, S)

Wird die Risikosituation rückblickend beurteilt so entspricht dies einer *statistischen Schadenerfassung*. Sobald von dieser Schadenentwicklung und weiteren Grössen auf den heutigen Zeitpunkt oder auf die zukünftige Entwicklung geschlossen wird, kann von einer *probabilistischen Risikoerfassung* gesprochen werden, die entsprechend zu modellieren versucht wird.

Die statistische Schadenerfassung und Aussagen zum aktuellen Risiko

Beispielhaft wird im folgenden das Lawinenrisiko auf Verkehrsachsen (Bahn und Strasse) in der Schweiz für einen Beobachtungszeitraum von 47 Jahren erfasst. In Abb. 3.13 ist die zeitliche Verteilung der Todesfälle aufgetragen, wobei nach drei Schadenskategorien (Fahrzeuge fahrend, Fahrzeuge stehend, Schneeräumung) differenziert wird. Die Entwicklung zeigt, dass kein Trend zu einer Zu- bzw. Abnahme von Todesfällen feststellbar ist. Die Verteilung der Schadenereignisse nach der Anzahl Todesfälle in Abb. 3.14 kann jedoch bereits einen ersten Hinweis zum Risikoprofil, d.h. zur Wahrscheinlichkeit (Häufigkeit) und zum Ausmass der Schäden im betrachteten System geben.

Abb. 3.13 Lawinentodesfälle auf Verkehrsachsen der Schweiz (Quelle SLDB, SLF / L. Stoffel)

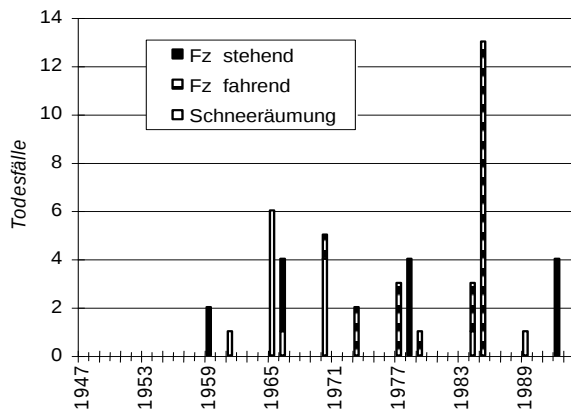
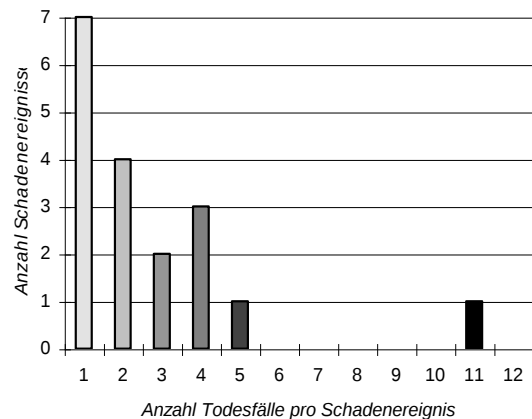


Abb. 3.14 Verteilung der Lawinenereignisse aus Abb. 3.13 nach Todesfällen pro Schadenereignis



Die Risikodarstellung mit Wahrscheinlichkeits-Ausmass-Diagramm (KATANOS 1995)

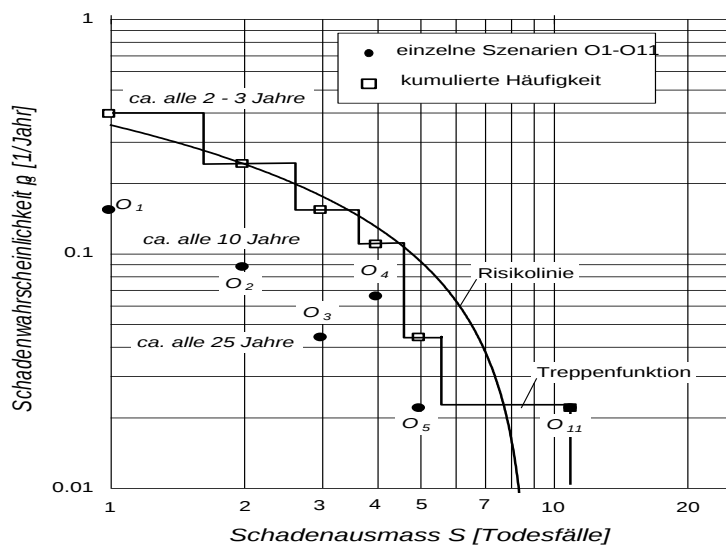
Unter der Annahme, dass sich die Schadenentwicklung zukünftig nicht verändern wird, lassen sich die erfassten Schadenereignisse als Risiken in einem Wahrscheinlichkeits-Ausmass-Diagramm (Abb. 3.15) darstellen, indem:

- 1.) Szenarien gebildet (hier 12 Szenarien, O_1 - O_{12} mit O_1 =Ereignisse mit 1 Todesfall; O_2 =Ereignisse mit 2 Todesfällen usw.)
- 2.) jährliche Wahrscheinlichkeiten der Szenarien p_0 berechnet (Anzahl Schadenereignisse pro Szenario dividiert durch den Beobachtungszeitraum, z. B. für Szenario $O_1 = 7 / 48 = 0.15$)

- 3.) die kumulative Häufigkeit der Szenarien berechnet (angefangen mit dem Szenario mit dem grössten Schadenausmass werden die jährlichen Wahrscheinlichkeiten aufaddiert mit $p_{O11}+p_{O5}+p_{O4}+..=1/48+1/48+3/48+...$)
- 4.) die Schadenausmasse und die kumulierten Wahrscheinlichkeiten im Risikodiagramm aufgetragen (Treppenfunktion) und mit einer stetigen Funktion (Risikolinie) angenähert werden.

Bei der Beurteilung einer Risikosituation interessiert in der Regel die Frage nach der Häufigkeit/Wahrscheinlichkeit p_j , mit der ein bestimmtes Schadenausmass S_j erreicht oder übertroffen wird. Abb. 3.15 zeigt, dass im Mittel alle 2-3 Jahre Ereignisse mit Todesfällen auftreten. Durchschnittlich alle 10 Jahre müssen Ereignisse mit ≥ 5 Todesfällen erwartet werden. Der statistische Schadenerwartungswert ergibt sich mit rund einem Todesfall pro Jahr und entspricht der Fläche unter der Risikolinie in Abb. 3.15.

Abb. 3.15 Lawinentodesfallrisiko auf Verkehrsachsen in der Schweiz



Stärken des Risikodiagrammes:

Berechnete Risikozahlen können nach Wahrscheinlichkeit und Ausmass differenziert und verglichen werden.

Der Einfluss von Faktoren der Risikowahrnehmung (z.B. Aversion) auf das Risikoprofil kann visualisiert werden.

Schwächen des Risikodiagrammes:

Die zeitliche Risikoentwicklung ist nicht ersichtlich.

Ob Risiken latent oder in ausgeprägten Spitzen auftreten ist nur bedingt erfassbar.

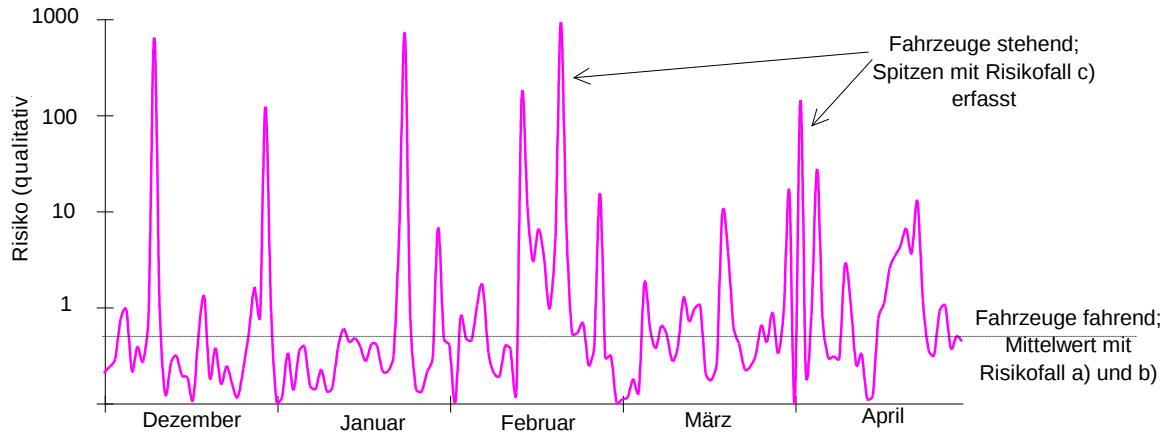
Weitere Darstellungsmöglichkeiten sind mit dem Risiko in Funktion der Zeit in Abb. 3.16 und mit dem Risiko in Bezug auf die zu befahrende Strecke z.B. in BUWAL 1992 aufgezeigt. Bei der statistischen Erfassung des Risikos wird ein Mittelwert über den Beobachtungszeitraum erfasst, der allein wenig auszusagen vermag über das aktuelle Risiko. Für eine entsprechende Beurteilung müsste ebenfalls Abb. 3.13 herangezogen werden. Zur Beurteilung von Massnahmen muss sogar die zukünftige Risikoentwicklung, die mit und ohne Massnahmen auftreten dürfte, probabilistisch, d.h. wahrrscheinlichkeitsbehaftet abgeschätzt werden, wozu die folgende Modellierung notwendig ist.

Die probabilistische Risikoerfassung

Das Lawinenrisiko kann grundsätzlich durch Überlagerung der Lawinengefahr (Abb. 3.6) mit den Verkehrsmengen (Abb. 3.10) modelliert werden. Damit ergibt sich die in Abb. 3.16 qualitativ aufgezeigte Risikoentwicklung. Charakteristisch ist eine Art Grundpegel, der durch Spitzen überlagert ist. Diese können einerseits bei hoher Lawinengefahr und gleichzeitig hohem Verkehrsaufkommen auftreten oder sind andererseits als sehr kurzzeitige Spitzen mit enormem Ausmass zu erwarten, falls die offene Strasse von einer Lawine verschüttet wird und aufgestaute Fahrzeuge in benachbarten Lawinenzügen gefährdet werden. Die Schadenskategorien aus Abb. 3.13 haben folgende Auswirkungen auf die Modellierung der Risikosituation:

- Fahrzeuge fahrend → gilt hier als Grundannahme für die Modellierung und Erfassung von mittleren Erwartungswerten des Risikos (Risikofall a) und b) = 'Grundpegel' in der Betriebsphase)
- Fahrzeuge stehend → dieser sogenannte Störfall tritt nur in bestimmten Situationen auf, ist meist von kurzer Dauer und dessen Modellierung ist mit grossen Unsicherheiten verbunden. Da Massnahmen für die Betriebsphase auch die Risikospitzen vermindern, wird der Störfall separat und nur bei Bedarf ergänzend erfasst (Risikofall c) vgl. Kap. 1.3.3).
- Schneeräumung → die individuellen Arbeitsrisiken von Personen der Schneeräumungsequipen können grosse Ausmasse annehmen und müssen auf Grenzwerte überprüft werden (Tab. 1.9).

Abb. 3.16 Probabilistische Abschätzung der Lawinenrisikoentwicklung auf einer Verkehrsachse



Risikoberechnung

Ein Risiko R_a kann allgemein mit der Multiplikation von Wahrscheinlichkeit und Ausmass eines Schadens als Risikozahl mit der Risikogrundgleichung 3.7 geschrieben werden. Zur Berechnung des Lawinenrisikos R werden die risikobestimmenden Faktoren der Lawinengefahr und des Verkehrs in Gleichung 3.8 multipliziert. Mit den Pfeilen wird angedeutet, welche Faktoren die Schadenwahrscheinlichkeit und welche das Schadenausmass beeinflussen. Das Zusammenwirken von Lawinenausmass (A_L) und Schadenempfindlichkeit der Fahrzeuge (SE_F) wird gemäss Abb. 3.12 und Gleichung 3.9 pauschal mit der Letalität λ für Todesfälle erfasst. Da hier nur Todesfallrisiken erfasst werden, wird die Bewertung der Fahrzeuge und Personen V_F mit dem Besetzungsgrad β und bei grossem Besetzungsgrad zusätzlich mit dem Aversionsfaktor δ berücksichtigt. Damit werden Sachschäden nicht berücksichtigt und Todesfälle unbewertet erfasst. Zudem wird angenommen, dass sich nur ein Fahrzeug gleichzeitig in einem Lawinenzug auf der gefährdeten Strassenstrecke befindet, was im vorliegenden Modell (Risikofall a) und b)) beinahe ausschliesslich der Fall ist. Andernfalls, d.h. bei einer Fahrzeugpräsenz von $p_F \geq 1$ wird p_F ebenfalls als Faktor des Schadenausmasses S einbezogen. Die Schadenwahrscheinlichkeit p_s ist dann gegeben durch die Lawinenwahrscheinlichkeit p_L .

$$R_a = p_s \cdot S \quad (3.7)$$

$$R = p_L \cdot p_F \cdot f(A_L, SE_F) \cdot V_F \quad (3.8)$$

$$R = p_L \cdot p_F \cdot \lambda \cdot \beta \cdot \delta \quad (3.9)$$

In Kap. 1 verwendet	Nur zur Herleitung
R = Lawinenrisiko	R_a = Risiko allgemein
p_s = Schadenwahrscheinlichkeit	A_L = Lawinenausmass
S = Schadenausmass	SE_F = Schadenempfindlichkeit der Fahrzeuge
p_L = Lawinenwahrscheinlichkeit	V_F = Wert der Fahrzeuge und Personen
p_F = Fahrzeugpräsenz-wahrscheinlichkeit	
λ = Letalität für Todesfälle	
β = Besetzungsgrad	
δ = Aversionsfaktor	

Bei der Lawinenwahrscheinlichkeit p_L und der Fahrzeugpräsenzwahrscheinlichkeit p_F gemäss dem vereinfachten Modell in Abb. 3.9 und Gleichung 3.8 und 3.9 handelt es sich streng genommen nicht um Wahrscheinlichkeiten, sondern um erwartete Häufigkeiten. Dies hat bei Hochwintersituationen, wo zumindest die Lawinengefahr sich nicht tageszeitlich systematisch ändert trotzdem eine gute Annäherung zur Folge. Im Frühjahr, wo die Fahrzeugpräsenz und die Lawinengefahr tageszeitlich systematisch ändern kann, wäre eine bessere Näherung durchaus erwünscht.

Im folgenden ist beispielhaft die Erfassung der Fahrzeugpräsenzwahrscheinlichkeit P_F mit einer Poisson-Verteilung angesprochen. Die Poisson-Verteilung ist ein gutes Modell für die Erfassung von geringem bis mittlerem Verkehrsaufkommen, und sie wurde in der Literatur auch verschiedentlich für die Erfassung der Lawinenwahrscheinlichkeit vorgeschlagen. Die Poisson-Verteilung ergibt sich mit:

$$P_F[X = k] = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (3.10)$$

X = Zufallsvariable, z.B. Anzahl eingetretener Ereignisse (variiert in Abhängigkeit von zufälligen Faktoren)

k = effektiv beobachtete Ereignisse (z.B. Anzahl Fahrzeuge auf der gefährdeten Strassenstrecke g)

λ = mittlere Anzahl Fz auf gef. Strassenstrecke (z.B. gef. Strassenstrecke dividiert durch mittleren Fahrzeugabstand g/a)

$P[X=k]$ = Wahrscheinlichkeit, dass sich k -Autos auf der gefährdeten Strassenstrecke g befinden = P_F

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Lawine nieder geht und dabei kein Auto davon betroffen wird, lässt sich somit folgendermassen berechnen:

$$P[X = 0] = P_L \cdot P_F[X = 0] = P_L \cdot e^{-\lambda} \quad (3.11)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass Autos in der Lawine sind bzw, dass überhaupt Schaden entstehen kann ergibt sich mit:

$$P[X \geq 1] = P_L \cdot P_F[X \geq 1] = P_L \cdot (1 - P_F[X = 0]) = P_L \cdot (1 - e^{-\lambda}) \quad (3.12)$$

Somit ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass k -Autos von einer Lawine betroffen sind (mit $k \geq 1$) unter der Bedingung, dass überhaupt Schaden entsteht, folgendermassen:

$$P[X = k | X \geq 1] = \frac{P[X = k]}{P[X \geq 1]} = \frac{P_L \cdot P_F[X = k]}{P_L \cdot (1 - e^{-\lambda})} = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot \frac{e^{-\lambda}}{(1 - e^{-\lambda})} = \frac{\lambda^k}{k!(e^\lambda - 1)} \quad (3.13)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass z.B. 4 oder mehr Autos betroffen sind, unter der Bedingung, dass überhaupt Schaden entsteht, ist:

$$P[X \geq 4 | X \geq 1] = P[X = 4 | X \geq 1] + P[X = 5 | X \geq 1] + \dots = \sum_{k=4}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!(e^\lambda - 1)} = 1 - \sum_{k=1}^3 \frac{\lambda^k}{k!(e^\lambda - 1)} \quad (3.14)$$

Schliesslich ergibt sich die Schadenwahrscheinlichkeit P_s für einen Schaden mit $\geq k$ Autos mit:

$$P_s[X \geq k] = P[X \geq k | X \geq 1] \cdot P[X \geq 1] = \left(1 - \sum_{i=1}^{k-1} \frac{\lambda^i}{i!(e^\lambda - 1)}\right) \cdot P_L \cdot (1 - e^{-\lambda}) \quad (3.15)$$

Im Kapitel 1 (Vorgehen) werden sogenannte Aversionsfaktoren berücksichtigt, d.h. Risiken mit grossen Schadenaussmassen werden überproportional gewichtet. Dieses Vorgehen ist vorteilhaft, um kleine und grosse Risiken

zu addieren, es kann aber in bestimmten Fällen zu beträchtlichen Über- oder Unterschätzungen des Risikos führen. Adäquater wäre wieder die Erfassung von Wahrscheinlichkeiten für Risiken, die bestimmte Schadenausmasse übertreffen, was mit der Poisson-Verteilung gemäss Gleichung 3.13 einfach zu bewerkstelligen wäre. Dazu müssten bestimmte Grenzwerte für bestimmte Schadenausmasse festgelegt werden, was aber eine Aggregation mit den geringen und mittleren Risiken nicht mehr zulässt. Schwierig dürfte sich zudem die Kommunikation mit den Entscheidungsträgern gestalten, zumal der expliziten Gewichtung von Wahrscheinlichkeiten für grosse Schadenausmasse bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Projekten in Sicherheitsbereichen noch keine empirische Erfahrungsbasis zu Grunde gelegt werden kann.

3.3 Risikobewertung (vgl. Abb. 3.1)

Berechnete Risiken sind nackte Zahlen, die als Entscheidungsgrundlagen betreffend den individuellen und gesellschaftlichen Umgang mit Risiken um Chancen- und Nutzenaspekte ergänzt werden müssen. Einen ersten, expliziten Beitrag hierzu soll die Risikobewertung leisten, die im folgenden bezüglich worst case und Systemgrösse, kollektivem Risiko und Aversion und schliesslich bezüglich individuellem Risiko und Akzeptanz diskutiert wird.

3.3.1 Worst case und Systemgrösse

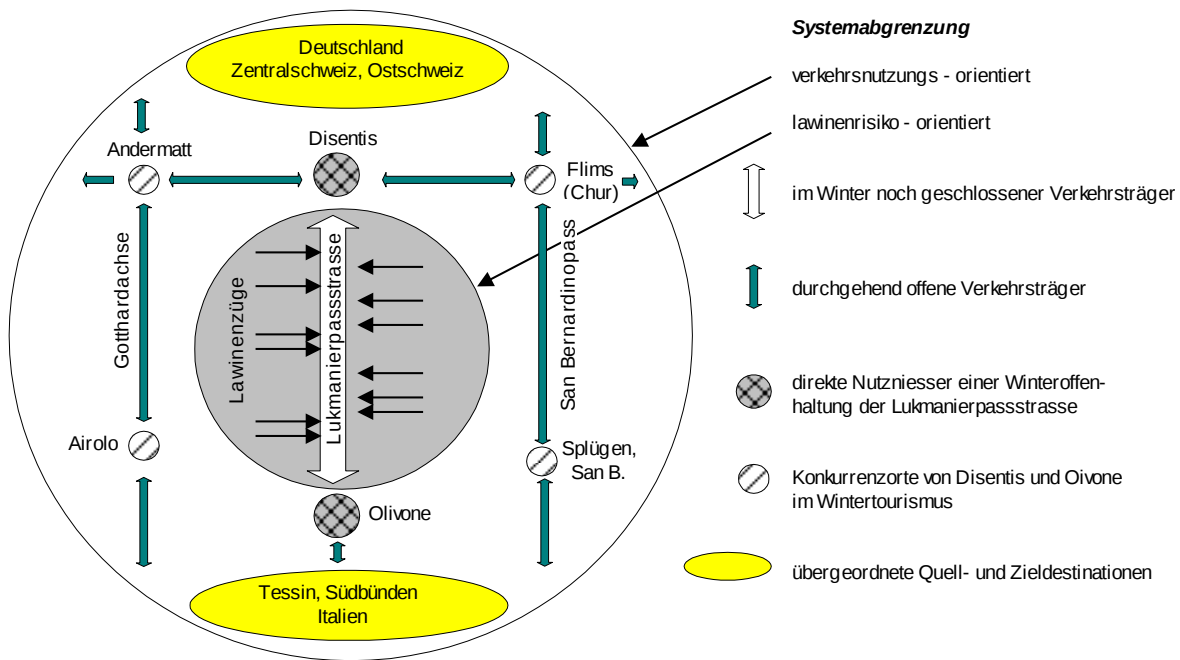
Schadenpotential und schlimmster Fall (worst case) sind Begriffe, die nach einer räumlichen und zeitlichen Abgrenzung verlangen, bzw. in Bezug auf eine Systemgrösse definiert werden müssen. Für die Beurteilung der Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutzmassnahmen auf Verkehrsachsen kann eine lawinenrisiko-orientierte oder eine verkehrsnutzungs-orientierte Systemabgrenzung zu Grunde gelegt werden. Dies wird am Beispiel der Lukmanierstrasse in Abb. 3.17 aufgezeigt und in Tab. 3.7 nach den dafür wesentlichen Kriterien beurteilt.

Bei der bis anhin geschlossenen Lukmanierpassstrasse wird zur Zeit geprüft, ob sie zukünftig im Winter geöffnet werden kann (SLF 1998 und Wilhelm1998). Eine lawinenrisiko-orientierte Systemabgrenzung stellt das Lawinenrisiko (92 Lawinenzüge, 25 km Strasse und rund 1'000 Fahrzeuge pro Tag), die Kosten für Massnahmen (monetäre Aufwendungen und Sperrtage) und die Wirksamkeit der Massnahmen (Risikoverminderungen) ins Zentrum. Die damit verbundene, eng definierte Kosten-Wirksamkeit wird aber letztlich im politischen Entscheidungsprozess vor allem nach verkehrsnutzungs-orientierten Kriterien beurteilt. Diese erweiterte Systemabgrenzung beinhaltet im vorliegenden Beispiel die Mobilitäts- und Umsatzziele der Tourismusbranche und die entsprechenden Markt- und Absatzrisiken innerhalb der zu erwartenden Konkurrenzsituation. Zentral sind also nutzenseitige Bewertungskriterien, die in Tab. 3.7 v.a. für ein vertieftes Verständnis der Risiko- und Entscheidungssituation qualitativ aufgelistet sind. In diesem Sinne könnten weitere Lawinenschutzprobleme an Verkehrsachsen (Erschliessung abgelegener Weiler, Zufahrt zu Baustellen usw.) vor dem Hintergrund verkehrsnutzungs-orientierter Systemabgrenzungen charakterisiert werden.

Tab. 3.7 Beurteilung der Systemabgrenzung nach lawinenrisiko- und verkehrsnutzungsorientierten Kriterien

<i>Beurteilungskriterien</i>	<i>Systemabgrenzung</i>	
	<i>lawinenrisiko - orientiert</i>	<i>verkehrsnutzungs - orientiert</i>
<i>Störungsquelle</i>	Lawinen	Strassensperrungen
<i>Störungsobjekt</i>	Personen, Infrastruktur	Tourismusbranche
<i>beeinträchtigte Ziele</i>	Sicherheitsziele	Mobilitäts- und Umsatzziele
<i>Risiken</i>	Todesfallrisiken	Markt- und Absatzrisiken
<i>Massnahmen</i>	Kostenseite	Nutzenseite
<i>Wirksamkeit</i>	Verminderung des Lawinenrisikos	Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit
<i>Umwelt</i>	Beeinträchtigung der Landschaft im Passbereich	Negative externe Effekte, die überregional wirken

Abb. 3.17 Systemabgrenzung am Beispiel der Lukmanierpassstrasse



3.3.2 Kollektives Risiko und Aversion

Im vorliegenden Zusammenhang beschränkt sich das kollektive Risiko auf die Summe der Todesfallrisiken der betroffenen Verkehrsachsenbenutzer und der Sicherungsdienste. Dieses Risiko kann innerhalb eines abgegrenzten Systems modellhaft berechnet bzw. gemäss Abb. 3.18 an das reale Risikoprofil angenähert werden. Von den berechneten Risiken ausgehend zeigt sich jedoch, dass je nach Art, Häufigkeit und Ausmass der Risiken verschiedene Aspekte der Wahrnehmung für gesellschaftliche und politische Entscheidungen sehr bedeutend sein können. Im folgenden wird der Aspekt der Aversion, d.h. der überproportionalen Gewichtung von Risiken mit grossem Schadenausmass erläutert. Dabei wird nicht auf die Erfassung von Aversionen (Wilhelm 1997), sondern nur auf deren Einbezug gemäss Kap. 1 und die damit verbundenen Wirkungen eingegangen.

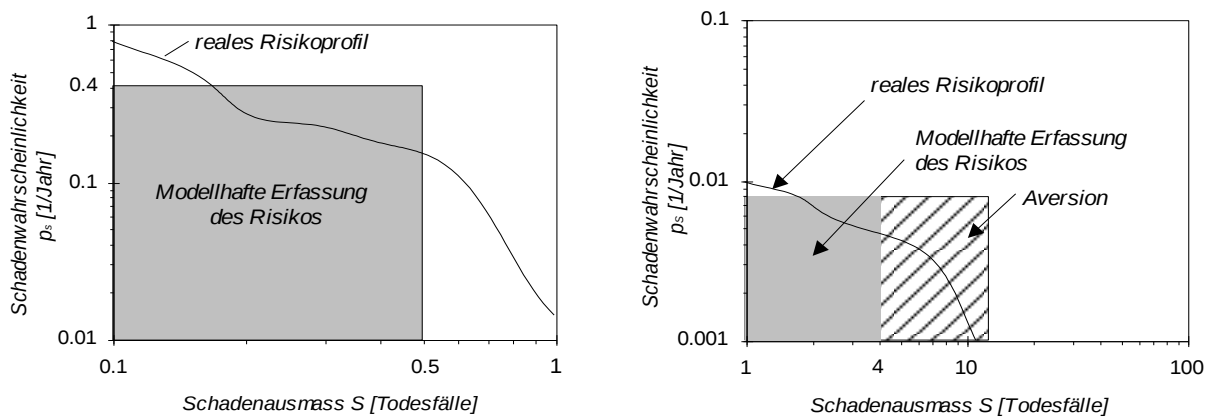
In Abb. 3.18 links ist die Erfassung des kollektiven Risikos in der Betriebsphase aufgezeigt, d.h. im Schadenfall wird meist nur ein Personenwagen von einer Lawine verschüttet. Das kollektive Risiko ergibt sich gemäss Gleichung 3.7 mit $R = p_s \cdot S = 0.4 \cdot 0.5 = 0.2$ Tf/Jahr. Das mittlere Schadenausmass S , als Multiplikation der Letalität λ (z.B. $\lambda = 0.3$) mit dem mittleren Besetzungsgrad β ($\beta = 1.6$), ergibt 0.5 Todesfälle und ist so zu interpretieren, dass z.B. nur jedes zweite Schadenereignis zu einem Todesfall führt.

In Abb. 3.18 rechts ist die Erfassung des kollektiven Risikos bei einem hohen mittleren Schadenausmass S (hier z.B. $S = 4$ Todesfälle) aufgezeigt. Schadenereignisse mit grossem Schadenausmass werden mit einem Aversionsfaktor δ gewichtet und treten auf bei:

- Störfällen, wenn z.B. eine Lawine die Verkehrsachse unterbrochen hat (vgl. Kap. 1.3.3),
- Bahnstrecken, wo viele Personen kurz- aber gleichzeitig im Gefahrenbereich sind oder
- Strassen mit $> 2\%$ Caranteil, wo der Besetzungsgrad der entsprechenden Fahrzeuge hoch ist.

Solche Ereignisse treten selten auf oder die Disposition dafür ist nur während kurzer Zeit gegeben, d.h. die Schadenwahrscheinlichkeit p_s ist im Vergleich mit der Betriebsphase gering. Das kollektive Risiko ergibt sich wieder gemäss Gleichung 3.7 mit $R = p_s \cdot S = 0.008 \cdot 4 = 0.032$ Tf/Jahr. Da grosse Schadenausmass S überproportional gewichtet werden sollen, wird dieses Risiko gemäss Gleichung 3.9 noch mit dem Aversionsfaktor δ multipliziert (für $S = 4 \rightarrow \delta = 3$ gemäss Tab. 1.3). Das berechnete kollektive Risiko (graue Fläche) wird also mit Aversionsberücksichtigung um die gestreifte Fläche ergänzt und es kann von einem wahrgenommenen oder empfundenen Risiko gesprochen werden.

Abb. 3.18 Erfassung des kollektiven Risikos unter Einbezug von Aversionsaspekten



3.3.3 Individuelles Risiko und Akzeptanz (vgl. Merz et al. 1995)

Individuelle Risiken können rückwirkend am Verhalten von Personen bzw. von Personengruppen als sogenannte akzeptierte Risiken erfasst werden. Grosse auftretende Differenzen werden sodann mit qualitativen Determinanten der Risikoneigung (wie Unmittelbarkeit der Nutzenempfindung, Freiwilligkeit der jeweiligen Aktivität, Beeinflussungsmöglichkeit des Risikos usw.) zu erklären versucht. Davon ausgehend können normativ Grenz- bzw. Zielwerte abgeleitet werden, die bei zukünftigen Aktivitäten und Tätigkeiten nicht überschritten werden sollten. Es besteht weitgehend Konsens darüber, dass die Beurteilung individueller Todesfallrisiken in einem Bereich (z.B. Lawinenschutz von Verkehrsachsen) im Vergleich mit einer mittleren, gesamten Sterbewahrscheinlichkeit sinnvoll erscheint (Fritzsche 1992, Merz et al. 1995). Dabei können absolute Grenzwerte oder relative Anteile an der Sterbewahrscheinlichkeit festgelegt werden. Sollen z.B. die Lawinenrisiken nicht mehr als 1 % am gesamten Sterberisiko betragen, so könnte mit Bezug auf das kleinste Sterberisiko im Alter von 10-15 Jahren (10^{-4} pro Jahr) ein maximal zulässiges, individuelles Lawinentodesfallrisiko im Bereich von 10^{-6} pro Jahr abgeschätzt werden.

Ohne auf die verschiedenen Determinanten der individuellen Risikoneigung einzugehen, ist es für die praktische Beurteilung oft hilfreich sogenannte Risikokategorien abzugrenzen (vgl. Kap 1, Tab. 1.10). Gemäss verschiedenen Literaturhinweisen scheint bezüglich der Grenzwerte von individuellen Todesfallrisiken für unbeteiligte Dritte ein Konsens im Bereich von 10^{-5} - 10^{-6} pro Jahr zu bestehen. Als 'unbeteiligte Dritte' könnten im vorliegenden Zusammenhang Bahnbenutzer bezeichnet werden, da sie keinen entscheidenden Einfluss auf das Mass des individuellen Todesfallrisikos nehmen können. Bei den Strassenbenutzern wird angenommen, dass noch eine geringe Selbstbestimmung bzw. direkte Beeinflussbarkeit des eingegangenen Risikos besteht. Der Grenz- bzw. Zielwert des individuellen Todesfallrisikos wird dabei mit 10^{-5} pro Jahr etwas höher als bei Bahnbenutzern vorgeschlagen.

Arbeitsrisiken werden im vorliegenden Zusammenhang vor allem von Personen eingegangen, die mit der Strassensicherung und der Schneeräumung betraut sind. Es ist zu vermuten, dass die z.T. sehr hohen individuellen Risiken in diesem Zusammenhang nicht bewusst eingegangen werden. Um so mehr darf dieser Aspekt bei der Projektbeurteilung nicht unberücksichtigt bleiben. Vorgeschlagen werden eine Art flankierende Massnahmen, die für jedes detaillierte Schutzkonzept zu prüfen und allenfalls durchzusetzen sind. Die Modellierung der individuellen Risiken der Sicherungsdienste ist nicht generell möglich. Als Annäherung wird in Kap. 1 angenommen, dass diese Personen die Gefahrenstrecken den ganzen Winter zweimal täglich befahren und dabei ein Grenzwert für individuelle Todesfallrisiken von 10^{-4} pro Jahr nicht übertroffen werden sollte. Wird zudem berücksichtigt, dass die Lawinensicherung nur maximal das halbe Jahr anfällt, könnte zukünftig allenfalls ein tieferer Wert mit z.B. $5 \cdot 10^{-5}$ pro Jahr angestrebt werden.

Für Risikovergleiche kann es auch hilfreich sein, das individuelle Todesfallrisiko pro km oder auf eine andere Einheit bezogen zu berechnen. Das individuelle Todesfallrisiko infolge Verkehrsunfälle (Mittelwert ausserorts) liegt z.B. zurzeit bei ca. $2 \cdot 10^{-8}$ pro km und Autofahrer. Solche Grössenordnungen können sich auf Passstrassen mit vielen Lawinenzügen auch für individuelle Lawinenrisiken ergeben. Interessante Vergleiche sind ebenfalls mit sogenannten Unfallraten (BUWAL 1992) möglich, wobei für Bahnen auf offener Strecke und in Tunnel Unfallraten von $0.12 \cdot 10^{-6} / \text{Zug} \cdot \text{km}$ bis $0.3 \cdot 10^{-6} / \text{Zug} \cdot \text{km}$ (Schmalspurbahnen) sowie für den Gesamtverkehr auf Hauptstrassen ausserorts eine Unfallrate von $1.2 (\pm 0.40) \cdot 10^{-6} / \text{Fz} \cdot \text{km}$ berechnet wurden.

3.4 Massnahmenanalyse (Abb. 3.1)

3.4.1 Technische Wirkungsweise und Restrisiko

Massnahmen können grundsätzlich nach der Eingriffsart (in aktive und passive Massnahmen) und nach dem Wirkungszeitraum (in temporäre und permanente Massnahmen) unterteilt und deren Kombinationen als Schutzstrategien bezeichnet werden (Wilhelm 1997). Im Lawinenschutz von Verkehrsachsen sind die Schutzstrategien permanent/aktiv (z.B. Galerien), temporär/aktiv (z.B. künstliches Lawinenauslösen) und temporär/passiv (z.B. Strassensperrung) von Bedeutung. Im vorliegenden Zusammenhang ist es wesentlich zu überlegen, wie die einzelnen Massnahmen auf die Faktoren des Risikos einwirken und ob letztlich die Schadenwahrscheinlichkeit, das Schadenausmass oder beides zusammen vermindert werden kann.

In Tab. 3.8 sind verschiedene Schutzmassnahmen aufgelistet, die Beeinflussung der Risikofaktoren identifiziert und schliesslich die Risikoverminderungen qualitativ beurteilt. Es zeigt sich auch, dass mit geschickter Kombination von Schutzmassnahmen sowohl die Schadenwahrscheinlichkeit als auch das Schadenausmass gleichzeitig vermindert werden können.

Tab. 3.8 Wirkungsweise von Schutzmassnahmen und Beeinflussung des Risikos

Schutzstrategie	Schutzmassnahme	Beeinflussung der Risikofaktoren					Risikoverminderung	
		p_L	p_F	λ	β	δ	p_S	S
'te'/pa	Automatische Schneemessstation		(+)				(+)	
te/pa	Lawinenbulletin		(+)				(+)	
'te'/pa	Alarmanlage mit Rotlichtsignal		(+)				(+)	
te/pa	Strassensperrung		+				+	
te/pa	Verkürzung Interventionszeit		(+)			(+)	(+)	(+)
te/pa	Schulung Rettungsorganisation			+				+
te/pa	Bus- und Carfahrverbot				+	(+)		+
te/ak	künstliche Lawinenauslösung	+					+	
pe/ak	Galerien	+					+	
pe/ak	Stützverbau, Auffangdamm	+					+	(+)
pe/ak	baulicher Direktschutz am Verkehrsträger oder an Räumungsfahrzeugen			+				+

Wirkungsanalyse: + = direkte, positive Wirkung

(+) = indirekte, positive Wirkung

Schutzstrategie: te = temporär (kurzfristig)

pe = permanent (langfristig)

ak = aktiv

pa = passiv

Risikofaktoren:

p_L = Lawinenwahrscheinlichkeit

β = Besetzungsgrad

p_F = Fahrzeugpräsenzwahrscheinlichkeit

δ = Aversionsfaktor

λ = Letalität für Todesfälle

Risikoverminderung:

p_S = Schadenwahrscheinlichkeit

S = Schadenausmass

Sind die technischen Wirkungen von Massnahmen auf die Risikoverminderung qualitativ abgeschätzt, so muss die Risikoanalyse und die Risikobewertung gemäss den gestrichelten Pfeilen in Abb. 3.1 nochmals durchgeführt werden, um das Restrisiko bzw. die Risikoverminderung zu bestimmen. Praktische Hinweise zur Beurteilung des Restrisikos sind im Kap. 1.2.2 gegeben (vgl. auch Margreth 1998, Stoffel 1996 und Wilhelm 1997). Entscheidend für die Abschätzung der Restrisiken von bestehenden Schutzvarianten sind meist die verfügbaren Daten. Deshalb sollen insbesondere folgende Ereignisse und Schäden erfasst bzw. dokumentiert werden:

- Lawinen, die bei offener Verkehrsachse aufgetreten sind (Schlüsselgrösse zur Abschätzung des Restrisikos!)
- Schäden an Personen, an Fahrzeugen, am Verkehrsträger und an Waldbeständen oder Schutzbauten
- Lawinen oder Schneebewegungen, auch wenn sie den Verkehrsträger nur beinahe erreicht haben
- Zeitliche Verkehrsverlagerungen (Spitzen), die als Folge von Strassensperrungen auftreten

Wie sicher ist sicher genug? oder: Welches Restrisiko soll akzeptiert werden?

Es stellt sich die Frage, auf welches Mass bestehende Risiken vermindert werden sollen. Eine vollständige Risikoreduktion ist praktisch oft nicht durchführbar oder mit zu hohen Kosten verbunden, so dass ein bestimmtes Restrisiko (bewusst und unbewusst) bestehen bleibt. Eine Möglichkeit, diese Fragen zu beantworten, ist die normative Festlegung von Grenzwerten bzw. von Akzeptabilitätslinien. Dazu wird das Wahrscheinlichkeits-Ausmass-Diagramm (Abb. 3.19) mit zwei parallelen Linien in drei Bereiche unterteilt: einen akzeptablen Bereich, einen Uebergangs- und einen nicht akzeptablen Bereich. Diese Linien verlaufen von links oben nach rechts unten, d.h. tendenziell wie eine Linie, auf der Punkte mit gleichem, berechnetem Risiko (Farmer-Gerade) liegen, ohne mit dieser identisch zu sein. Da beide Achsen (Schadenausmass und Schadenwahrscheinlichkeit) logarithmisch dargestellt sind aber auch bestimmte Schadenwahrscheinlichkeiten und -ausmasse akzeptabel oder nicht mehr akzeptabel sein sollen, ist links und rechts eine Beschränkung erforderlich (gestrichelt dargestellt in Abb. 3.19).

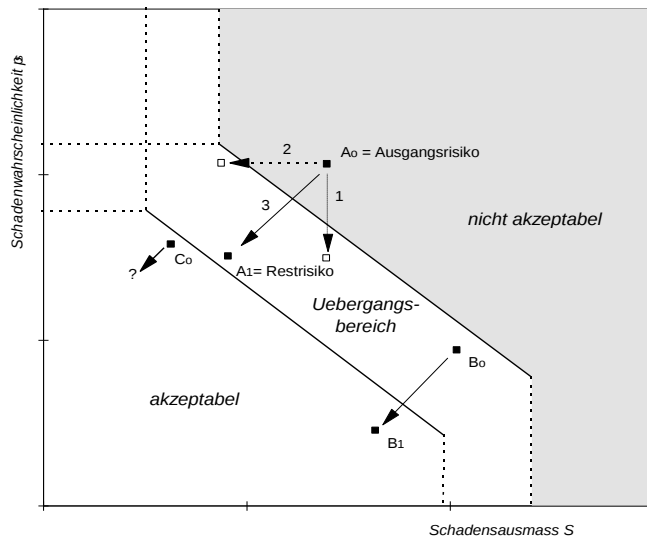
Die Bewertung von (Rest-) Risiken im W-A-Diagramm ist eine sehr praktikable Methode auf eindeutiger und restriktiver Entscheidungsbasis. Die Schwierigkeiten bei der Festlegung der Lage der Akzeptabilitätslinien im W-A-Diagramm für eine bestimmte Systemgrösse sind beträchtlich, es wird darauf hier nicht eingetreten. Das W-A-Diagramm erlaubt es zwar Risiken (auch sehr unterschiedliche) zu positionieren. Deren Vergleich und deren Beurteilung in Bezug auf die Akzeptabilitätslinien ist aber nur bei ähnlichen Systemgrössen sinnvoll und valide. Die Grösse von Risikosystemen im Lawinenschutz von Verkehrsachsen (beurteilt nach Lawinenhäufigkeit und Verkehrsmengen gemäss Abb. 2.1) variiert aber enorm.

Das Risiko A_0 im nicht akzeptablen Bereich gemäss Abb. 3.19 kann grundsätzlich wie folgt vermindert werden:

- 1.) Separate Verminderung der Schadenwahrscheinlichkeit p_s , z.B. mit einer Strassensperrung
- 2.) Separate Verminderung des Schadenausmasses S , z.B. mit einer verbesserten Rettungsorganisation
- 3.) Verminderung der Schadenwahrscheinlichkeit p_s und des Schadenausmasses S , z.B. mit einem Stützverbau.

Ohne Einbezug der anfallenden Kosten sind aber keine Aussagen zur Effizienz der Massnahmen möglich, d.h. die Verminderung von Risiko B_0 könnte z.B. effizienter sein. Ein Risiko C_0 - obwohl bereits im akzeptablen Bereich gemäss Abb. 3.19 und somit nicht prioritär - könnte sogar noch effizienter als die Risiken A_1 und B_0 weiter vermindert werden. Die Prioritäten werden mit dem W-A-Diagramm also primär nach der Grösse der Ausgangsrisiken gesetzt, ungeachtet der Effizienz der Risikoverminderung. Da Lawinengefahr meist Lebensgefahr bedeutet, können auch kleine Risiken wie das Risiko C_0 , zu Todesfällen führen und eine Unterschätzung ist zu befürchten gemäss der täuschenden Vorstellung: Grenzwert eingehalten = nicht gefährlich. Zusammenfassend sind folgende Gründe massgebend, dass in dieser Arbeit zur Beurteilung von Risiken und Massnahmen Effizienzkriterien (und nicht Grenzwertkriterien) im Vordergrund stehen:

Abb. 3.19 Häufigkeits-Ausmass-Diagramm mit sogenannten Akzeptabilitätsbereichen (Grenzwertkriterien)



- 1.) Die Verminderung auf sogenannte akzeptable Bereiche ist aus ökonomischer Sicht nicht effizient, d.h. gesamthaft wird mit dem eingesetzten Franken nicht die grösstmögliche Wirkung erzielt.
- 2.) Die Grösse der Risikosysteme im Lawinenschutz von Verkehrsachsen sind extrem variabel, d.h. es müssten Klassen gebildet und schwierig zu begründende, unterschiedliche Grenzwerte je Klasse definiert werden.
- 3.) Es besteht die Tendenz, dass Risiken, die zwar knapp im akzeptablen Bereich liegen, in ihrer Gesamtheit unterschätzt und nicht weiter vermindert werden, obwohl damit eine gute Kosten-Wirksamkeit verbunden sein kann.

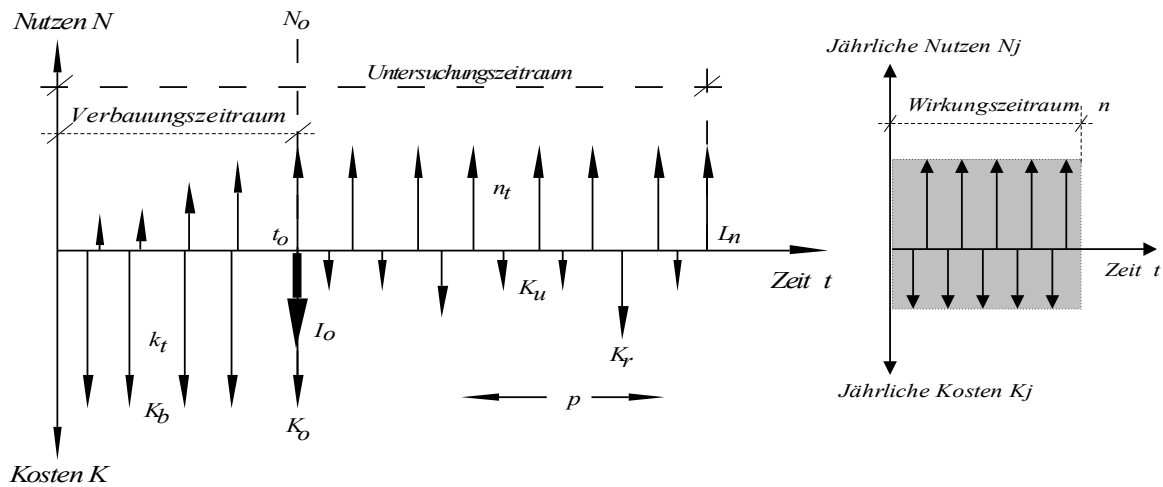
3.4.2 Kosten und Folgewirkungen

Schutzmassnahmen sind mit Folgewirkungen verbunden, die positiver Art (Nutzen) und negativer Art (Kosten) sein können. In Abb. 3.20 sind solche Wirkungen von baulichen Lawinenschutzmassnahmen innerhalb eines Untersuchungszeitraumes aufgetragen. Dabei sind Kosten k_t nach unten und Nutzen n_t (Risikoverminderungen) nach oben mit Pfeilen markiert. Wesentlich für die Kostenerfassung sind Kalkulationsgrössen wie:

I_0	Investitionskosten	Fr.	als Gesamtbetrag zum Zeitpunkt t_0 (Kostenvoranschlag) oder als Baukosten K_b während eines Verbauungszeitraumes berücksichtigt
K_b	Baukosten	Fr./a	Betriebskosten, die weder als Unterhalt noch als Reparatur bezeichnet werden (z.B. Beleuchtung, Lüftung, Munitionskosten, usw.)
K_u	Unterhaltskosten	Fr./a	jährlich anfallend und wenig schwankend; diesbezügliche Aufwände beeinflussen wesentlich den Restwert
K_r	Reparaturkosten	Fr./a	unregelmässig anfallend und meist mit der Zeit zunehmend; wird auch als Mittelwert pro Jahr abgeschätzt
L_n	Restwert	Fr.	kann positiv (Nutzen für Ersatzinvestition) oder negativ (Kosten für Abtransport und Entsorgung) sein
p	Zinssatz	%	hier als langfristiger Realzinssatz abgeschätzt (Nominalzinssatz minus mittlere Teuerung)

Alle Nutzenströme n_t und Kostenströme k_t könnten - auf einen bestimmten Zeitpunkt t_0 abgezinst (Zinssatz p) - als Gegenwartskosten K_0 und -nutzen N_0 mit gängigen Methoden der Investitionsrechnung verglichen werden. In dieser Arbeit werden bekanntlich die Nutzen nicht monetär bewertet, sondern als Mittelwert der Risikoverminderung in Todesfällen /Jahr erfasst. Auf der Kostenseite sind ebenfalls mittlere Kosten pro Jahr gesucht, welche gemäss Abb. 3.20 (rechts) mit den jährlichen Kosten K_j innerhalb eines Wirkungszeitraumes n angenähert werden.

Abb. 3.20 Nutzen-Kosten-Profil für bauliche Schutzmassnahmen (links) und vereinfachte Annäherung der jährlichen Kosten und Nutzen für die vorliegende Beurteilung im Verkehrsachsenschutz (rechts)



Die jährlichen Kosten K_j setzen sich grundsätzlich aus Betriebskosten K_B und Kapitalkosten K_K zusammen.

- Betriebskosten K_B bestehen aus:
 - Baukosten K_b (in Kap. 1 vereinfacht als Betriebskosten K_b bez.)
 - Unterhaltskosten K_u
 - Reparaturkosten K_r
- Kapitalkosten K_K bestehen aus:
 - Abschreibungen K_a pro Zeitperiode
 - Zinskosten K_z aus dem durchschnittlich gebundenen Kapital

Die gesamten jährlichen Kosten (K_j) ergeben sich zu:

$$K_j = K_B + K_K = K_b + K_u + K_r + K_a + K_z \quad [\text{Fr./Jahr}] \quad (3.16)$$

mit $K_a = \frac{(I_o - L_n)}{n}$ (lineare Abschreibung) und mit $K_z = \frac{(I_o + L_n)}{2} \cdot \frac{p}{100}$ (mit durchschnittlich gebundenem Kapital gerechnet) ergeben sich die gesamten jährliche Kosten mit:

$$K_j = K_b + K_u + K_r + \frac{(I_o - L_n)}{n} + \frac{(I_o + L_n)}{2} \cdot \frac{p}{100} \quad [\text{Fr./Jahr}] \quad (3.17)$$

Indexierung / Teuerung

Die Teuerung betreffend baulichen Lawinenschutzmassnahmen ist über die letzten 20 Jahre gesehen nicht sehr gross und wird z.T. noch durch verbesserte und effektiver wirkende Massnahmen 'ausgeglichen'. Für die rückblickende Beurteilung von ausgeführten Projekten müssen jedoch die jährlichen K_j und die Daten zum durchschnittlichen täglichen Verkehr DTV und zur Lawinewiederkehrdauer T auf den gleichen Zeitpunkt bezogen werden.

Standardannahmen

Zum Teil wird bei den Beispielen im Kapitel 2 zur Umrechnung der Investitionskosten I_o in jährliche Kosten K_j auf sog. Standardannahmen verwiesen, die aber nicht beliebig verallgemeinert werden dürfen. Mit den Standardannahmen sollen hier Baukosten $K_b = 0$ Fr./Jahr, Unterhaltskosten $K_u = 0.5 \%$ von I_o , Reparaturkosten $K_r = 0.5 \%$ von I_o , ein Restwert $L_n = 0$ Fr., ein Zinssatz $p = 2\%$ /Jahr und ein Wirkungszeitraum $n = 50$ Jahren verbunden sein.

Oekologische Folgewirkungen

Bei weitem nicht alle Folgewirkungen von Lawinenschutzmassnahmen lassen sich monetär bewerten. Trotzdem sollten sie ebenfalls erfasst und als Entscheidungsgrundlagen aufbereitet werden. Dies wäre Inhalt einer umfassend verstandenen Kosten-Nutzen Analyse. Wesentliche ökologische Folgewirkungen von Lawinenschutzmassnahmen, die überwiegend negativ bewertet werden, sind z.B.:

- Beeinträchtigung von Landschaften durch bauliche Massnahmen (Stützverbau, Galerien, Dämme usw.)
- Mögliche Waldschäden bei künstlichen Lawinenauslösungen
- Emissionen während der Bauphase von Lawinenschutzprojekten

Soziale Kosten

Unter dem Begriff der sozialen Kosten ist meist eine umfassende Berücksichtigung der Kosten für die gesamte Gesellschaft verstanden. Darin enthalten wären z.B. negative externe Effekte der Mobilität wie Lärm, Luftverschmutzung usw., falls diese Mobilität durch den Lawinenschutz ermöglicht oder initiiert wurde. Zu denken wäre auch an die Opportunitätskosten, d.h. an den Nutzenentgang in andern Lebensbereichen, falls Ressourcen im Lawinenschutz alloziert werden. Ein grosses Projekt mit einer bestimmten Kosten-Wirksamkeit bindet Investitionskapital, welches z.B. in mehreren kleinen Projekten mit gleich guter Kosten-Wirksamkeit fehlen kann (Budgetbeschränkung und -optimierung). Schliesslich sind auch Folgewirkungen als Risiken zu identifizieren, falls diese zu neuen oder erhöhten Gefährdungen führen.

3.4.3 Kombination von Schutzmassnahmen und Redundanzerfassung

Bei der Kombination von Schutzmassnahmen und somit zur Erfassung von Redundanzen (Überlappungen) ist es hilfreich, punktuell und generell wirkende Massnahmen zu unterscheiden. Während punktuell wirkende Massnahmen (z.B. eine Galerie an einem Lawinenzug innerhalb eines Systems mit mehreren Lawinenzügen) einen abgrenzbaren Teil des gesamten Risikos vollständig vermindern, haben generell wirkende Massnahmen (z.B. Strassensperrungen) eine teilweise Verminderung des Systemgesamtrisikos zur Folge. In Kap.1.3 wird ein vereinfachtes, praktikables Vorgehen zur Berücksichtigung der Redundanz angewendet. Dessen Unsicherheiten sind beträchtlich und werden deshalb im folgenden mit einer dazu entwickelten Methodik abzuschätzen versucht. Als Beispiel dient der Flüelapass (Nr. 6 im Kapitel 2), der von Giebenhain (1998) diesbezüglich analysiert wurde.

Zur Verminderung des Gesamtrisikos im Ausgangszustand am Flüelapass von $R_0 = 0.70 \text{ Tf/Jahr}$ stehen 47 Galerien G und 25 (Strassen-) Sperreinheiten S (gesamthaft also $i=1,2,3,\dots,n=72$ Einzelmassnahmen) zur Verfügung, die kostenoptimal kombiniert werden sollen. Bei der Anwendung beider Massnahmen kommt nicht mehr die volle Risikoverminderung R_v der Einzelmassnahmen zum Tragen, da vorausgehende Massnahmen die Wirksamkeit nachfolgender Massnahmen beeinträchtigen; diese Überlappung wird nachfolgend als Redundanz der Risikoverminderung Z_{R_v} erfasst. Dementsprechend ist auch auf der Kostenseite (zumindest theoretisch) eine Redundanz der Kosten Z_K erfassbar, die nicht wirksam ist. Wird z.B. der Bau einer Galerie G_i geplant, so ist die Risikoverminderung R_v der bereits getätigten Sperreinheiten S bis zur Massnahme $i-1$ ($\sum_{n=1}^{i-1} R_{v_{S_n}}$) zu berücksichtigen und umgekehrt. Somit lässt sich die Redundanz Z berechnen für den Fall, dass:

- Galerie G_i folgt auf Sperreinheit S_{i-1}

Redundanz der Risikoverminderung:

$$Z_{Rv,G_i} = \frac{\sum_{n=1}^{i-1} Rv_{S_n}}{R_o} Rv_{G_i} \quad [\text{Tf/Jahr}]$$

Kostenredundanz:

$$Z_{K,G_i} = \frac{\sum_{n=1}^{i-1} K_{S_n}}{K_o} K_{G_i} \quad [\text{Fr./Jahr}] \quad (3.18)$$

- Sperreinheit S_i folgt auf Galerie G_{i-1}

Redundanz der Risikoverminderung:

$$Z_{Rv,S_i} = \frac{\sum_{n=1}^{i-1} Rv_{G_n}}{R_o} Rv_{S_i} \quad [\text{Tf/Jahr}]$$

Kostenredundanz:

$$Z_{K,S_i} = \frac{\sum_{n=1}^{i-1} K_{G_n}}{K_o} K_{S_i} \quad [\text{Fr./Jahr}] \quad (3.19)$$

K_o entspricht hier den jährlichen Gesamtkosten für einen Vollverbau mit Galerien, die eine vollumfängliche Verminderung des Ausgangsrisikos R_o zur Folge haben. Es wird ersichtlich, dass die Grösse der Redundanz entscheidend von den schon getätigten Massnahmen abhängt. Ist z.B. ein hoher Verbauungsgrad erreicht, besitzen Strassensperrungen eine grosse Redundanz und somit nur noch einen geringen Anteil an der Verminderung des Risikos. Für jede Einzelmassnahme i ergeben sich nun unter Berücksichtigung der bereits getätigten Sperr-einheiten S bzw. Galerien G modifizierte Risikoverminderungen Rv_i^* und veränderte Einzelkosten K_i^* an einer bestimmten Stelle in der Kombinationsabfolge. Diese bestimmen sich als Differenz von Rv_i (K_i) der Einzel-massnahme und der Redundanz Z_{Rv_i} (Z_{K_i}) gemäss:

$$Rv_i^* = Rv_i \left(1 - \frac{\sum_{n=1}^{i-1} Rv_{S_n, \text{bzw. } G_n}}{R_o} \right) = Rv_i \frac{\sum_{n=1}^n Rv_{S_n \text{ bzw. } G_n}}{R_o} \quad K_i^* = K_i \left(1 - \frac{\sum_{n=1}^{i-1} K_{S_n \text{ bzw. } G_n}}{K_o} \right) \quad (3.20)$$

Für die optimale Ausführungsreihenfolge ist - abgesehen der ersten, d.h. kostenwirksamsten Massnahme - nach-folgend nicht mehr die Kostenwirksamkeit KW der Einzelmassnahmen entscheidendes Kriterium, sondern die Kostenwirksamkeit KW_Z , berechnet als Quotient aus Kosten und Risikoverminderung unter Berücksichtigung der Redundanz gemäss:

$$KW_{Z_i} = \frac{K_i - Z_{K_i}}{Rv_i - Z_{Rv_i}} \quad [\text{Mio Fr./verh. Tf}] \quad (3.21)$$

Für die Abfolge bedeutet dies, dass nach Ermittlung der besten, d.h. kostenwirksamsten Einzelmassnahme für alle übrigen jeweils an einer bestimmten Stelle in der Kombinationsabfolge die entsprechende Redundanz und damit KW_Z bestimmt werden muss. Diese Prozedur ist nach jeder Massnahmenauswahl durchzuführen, da sich abhängig hiervon eine veränderte Redundanz ergibt.

Kostenoptimale Massnahmenkombination mit Berücksichtigung der Redundanz

In Tab. 3.9 ist eine Massnahmenkombination mit Berücksichtigung der Redundanz gemäss den Gleichungen 3.18 - 3.21 für 72 Einzelmassnahmen, d.h. 47 Galerien ($G_1 \dots G_{47}$) und 25 Sperreinheiten ($S_1 \dots S_{25}$) durchgeführt. Je mehr Massnahmen ausgeführt werden, um so grösser wird die Summe der wirksamen Risikoverminderung ΣRv_i^* , bzw. um so kleiner wird das Restrisiko R_1 . Die Schadenkosten K_s entsprechen dem Restrisiko multipliziert (bewertet) mit konstanten Grenzkosten von 20 Mio Fr./Tf (vgl. auch die linear abfallenden Schadenkosten K_s in Abb. 3.21). Die Summe der wirksamen Kosten ΣK_i^* entspricht den Massnahmekosten K_m , die sich aus

Galeriekosten und aus den - mit einem Ersatzkostenansatz bewerteten - Sperrtagekosten zusammensetzen. Die Massnahmekosten K_m steigen mit zunehmender Risikoverminderung zuerst leicht und dann exponentiell an. Die Gesamtkosten K_g , als Summe von Schaden- und Massnahmenkosten, werden zuerst geringer, erreichen schliesslich bei der Massnahme Nr. 22 ein Minimum mit 5.47 Mio Fr. und steigen anschliessend wieder an. Bei diesem Kostenminimum bzw. Sicherheitsoptimum überschreitet die Kosten-Wirksamkeit mit Berücksichtigung der Redundanz KW_Z den Wert von 20 Mio Fr./Tf, der ja als Grenzkosten zur Bewertung der Restrisiken zu Grunde gelegt wurde.

Vergleichend sind in der dritten Spalte die Kosten-Wirksamkeiten der Einzelmassnahmen aufgelistet, wobei Galerien und Sperreinheiten recht gemischt in der Abfolge auftreten. Die Berücksichtigung der Redundanz hat hingegen eine Gruppierung von gleichartigen Massnahmen zur Folge (erste Spalte in Tab. 3.9), was zu den bedeutungsvollen Aussagen für die Praxis führt, dass:

- grundsätzlich eine Sicherungsstrategie mit gleichartigen Massnahmen im Vordergrund stehen soll, die je nach Risikosystem und Bewertung der Sperrtage aus passiven Massnahmen (hier Strassensperrungen) oder aktiven Massnahmen (hier Galerien) bestehen kann und
- die Entscheidung über die beste zu tätigende Massnahme zu jedem Zeitpunkt stets von dem schon bestehenden Sicherungskonzept abhängt.

Tab. 3.9 Reihung der kombinierten Einzelmassnahmen nach der Kosten-Wirksamkeit KW_Z mit Berücksichtigung der Redundanz der Risikoverminderung und der Kostenredundanz

Nr.	Massn.	Rv_i [Tf/a]	Z_{Rvi} [Tf/a]	Rv_i^* [Tf/a]	ΣRv_i^* [Tf/a]	R_l [Tf/a]	K_s [MioFr.]	K_i [MioFr.]	Z_{Ki} [MioFr.]	K_i^* [MioFr.]	ΣK_i^* [MioFr.]	K_g [MioFr.]	KW_Z [MioFr./Tf]	Massn.	KW [MioFr./Tf]
0		0	0	0	0		14.068	0	0	0	0	14.068	0		0
1	S1	0.1583	0	0.1583	0.1583	0.5451	10.901	0.400	0.000	0.400	0.400	11.301	2.53	S1	2.53
2	G1	0.0301	0.0068	0.0233	0.1816	0.5218	10.435	0.080	0.003	0.077	0.477	10.912	3.30	G1	2.66
3	G2	0.0384	0.0086	0.0297	0.2114	0.4920	9.841	0.110	0.004	0.106	0.583	10.423	3.55	G2	2.87
4	G3	0.0983	0.0221	0.0762	0.2875	0.4159	8.317	0.285	0.011	0.274	0.856	9.173	3.59	G3	2.90
5	S2	0.0952	0.0226	0.0726	0.3602	0.3432	6.865	0.400	0.019	0.381	1.237	8.102	5.25	S2	4.20
6	S3	0.0745	0.0177	0.0568	0.4170	0.2864	5.728	0.400	0.019	0.381	1.619	7.347	6.71	G4	4.89
7	G4	0.0164	0.0076	0.0087	0.4257	0.2777	5.553	0.080	0.010	0.070	1.689	7.242	8.06	G5	5.05
8	G5	0.1248	0.0582	0.0666	0.4923	0.2111	4.222	0.630	0.076	0.554	2.243	6.465	8.33	G6	5.12
9	G6	0.0205	0.0096	0.0109	0.5033	0.2001	4.003	0.105	0.013	0.092	2.336	6.339	8.45	S3	5.37
10	G7	0.0294	0.0137	0.0157	0.5190	0.1844	3.689	0.160	0.019	0.141	2.477	6.165	8.97	G7	5.44
11	G8	0.0204	0.0095	0.0109	0.5298	0.1736	3.471	0.115	0.014	0.101	2.578	6.049	9.30	G8	5.64
12	G9	0.0235	0.0109	0.0125	0.5424	0.1610	3.221	0.160	0.019	0.141	2.719	5.939	11.24	G9	6.81
13	G10	0.0116	0.0054	0.0062	0.5486	0.1548	3.097	0.080	0.010	0.070	2.789	5.886	11.35	G10	6.88
14	G11	0.0154	0.0072	0.0082	0.5568	0.1466	2.932	0.115	0.014	0.101	2.890	5.822	12.33	S4	6.97
15	G12	0.0125	0.0058	0.0067	0.5635	0.1399	2.799	0.095	0.011	0.084	2.974	5.772	12.51	G11	7.48
16	G13	0.0161	0.0075	0.0086	0.5721	0.1313	2.627	0.125	0.015	0.110	3.084	5.711	12.80	G12	7.59
17	G14	0.0134	0.0063	0.0072	0.5792	0.1242	2.484	0.110	0.013	0.097	3.181	5.664	13.52	G13	7.76
18	G15	0.0063	0.0029	0.0033	0.5826	0.1208	2.417	0.055	0.007	0.048	3.229	5.646	14.49	S5	7.92
19	G16	0.0264	0.0123	0.0141	0.5966	0.1068	2.135	0.240	0.029	0.211	3.440	5.575	15.00	G14	8.20
20	G17	0.0147	0.0069	0.0078	0.6045	0.0989	1.978	0.140	0.017	0.123	3.563	5.542	15.71	G15	8.78
21	G18	0.0127	0.0059	0.0068	0.6112	0.0922	1.843	0.130	0.016	0.114	3.678	5.521	16.92	G16	9.10
22	G19	0.043	0.0201	0.0230	0.6342	0.0692	1.384	0.460	0.055	0.405	4.083	5.466	17.63	S6	9.20
23	G20	0.0047	0.0022	0.0025	0.6367	0.0667	1.334	0.065	0.008	0.057	4.140	5.474	22.83	G17	9.53
24	G21	0.0034	0.0016	0.0018	0.6385	0.0649	1.298	0.050	0.006	0.044	4.184	5.482	24.58	S7	10.03
25	S4	0.0574	0.0475	0.0099	0.6484	0.0550	1.100	0.400	0.136	0.265	4.448	5.548	26.67	G18	10.26
i	...	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
71	S25	0.0008	0.0008	0	0.7034	0	0	0.400	0.372	0.028	10.005	10.005	7888.63	S24	501.81
72	G47	0.0031	0.0031	0	0.7034	0	0	0.700	0.700	0	10.005	10.005	0	S25	501.81

Rv_i = Risikoverminderung der Einzelmassnahmen

Z_{Rvi} = Redundanz der Risikoverminderung

Rv_i^* = Wirksame Risikoverminderung

ΣRv_i^* = Summe der wirksamen Risikoverminderung

R_l = Restrisiko

K_s = Schadenkosten

K_i = Kosten der Einzelmassnahmen

Z_{Ki} = Kostenredundanz

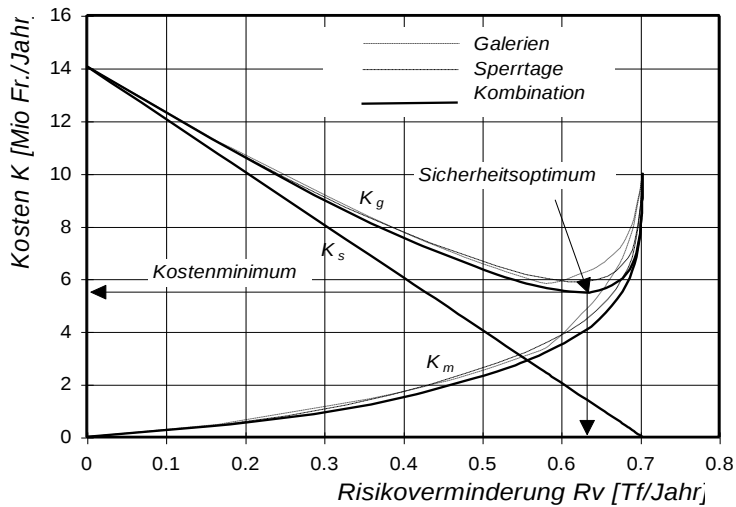
K_i^* = Wirksame Kosten

ΣK_i^* = Summe der wirksamen Kosten = K_m = Massnahmenkost.

K_g = Gesamtkosten

KW_Z = Kosten-Wirksamkeit mit Redundanz gerechnet

Abb. 3.21 Kostenfunktionen für Einzelmassnahmen und deren Kombination zur kostenoptimalen Risikoverminderung (fett)



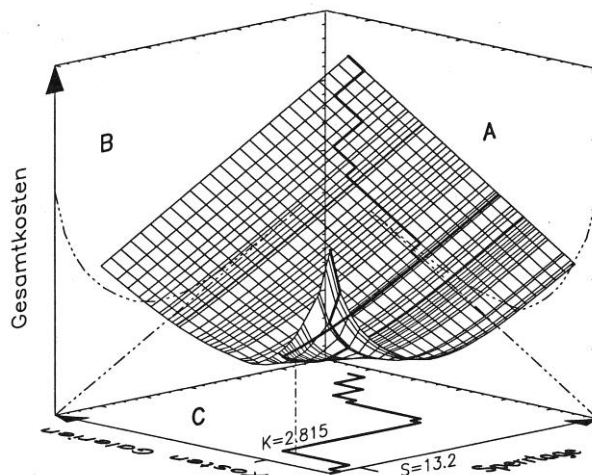
In Abb. 3.21 sind die Schadenkosten K_s , die Massnahmenkosten K_m und die Gesamtkosten K_g für eine Risikoverminderung nur mit Galerien, nur mit Sperrtagen und schliesslich mit der optimalen Massnahmenkombination gemäss Tab. 3.9 aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Kombination von Massnahmen die kostenoptimalste Risikoverminderung erbringt, d.h. mit weniger Kosten im Optimum eine grössere Risikoverminderung erzielt werden kann. Erstaunlicherweise ist der Unterschied von den Einzelmassnahmen und der kostenoptimalen Kombination der Massnahmen nicht allzu gross.

Einfluss der Bewertung und der Redundanzberücksichtigung auf die Massnahmenabfolge

Bis anhin wurden die Sperrtage mit einem Ersatzkostenansatz bewertet, d.h. ein Vollverbau mit Galerien und Kosten $K_j=10.005$ Mio Fr. wurde den 110 Sperrtagen gleichgesetzt, die eine äquivalente Wirkung erzielen. Die resultierenden Kosten von rund 90'000 Fr./Sperrtag können alternativ auch durch die Nutzniesser oder durch den Entscheidungsträger festgelegt (bewertet) werden, was zu einer neuen Kombinationsabfolge führt. Werden die Sperrtage geringer bewertet, so liegen mehr Sperrtage am Anfang der Kombinationsabfolge und umgekehrt. In diesem Fall müssen aber in Gl. 3.18 anstelle der jährlichen Kosten K_o eines Vollverbaus mit Galerien die jährlichen Kosten für eine Dauersperrung (z.B. 110 Sperrtage * 50'000.- Fr./Sperrtag = 5.5 Mio Fr.) eingesetzt werden.

Werden alle Galerien und Sperreinheiten gemäss Tab. 3.9 getätigt, so fallen - praktisch gesehen - die doppelten Kosten an, d.h. das Ausgangsrisiko wird doppelt (überlappend = redundant) vermindert. Dies wird in Abb. 3.22

Abb. 3.22 Gesamtkosten der optimalen Massnahmenabfolge (Giebhain 1998)



dreidimensional dargestellt, indem die Gesamtkosten K_g als Funktion der Sperrtage und der Galerien aufgetragen sind. Die jährlichen Kosten der Sperrtage sind linear ansteigend in Ebene B projiziert (Gitter äquidistant, weil mit einem konstanten Betrag pro Sperrtag bewertet wurde) und diejenigen der Galerien in Ebene A ebenfalls linear ansteigend (Gitter nicht äquidistant, weil jede Galerie mit unterschiedlichen Kosten verbunden ist) abgebildet. Eingetragen sind ebenfalls die jährlichen Kosten im Optimum mit 2.815 Mio Fr. für Galerien und 13.2 Sperrtagen (3 Sperreinheiten). Praktisch gesehen ist es jedoch unsinnig eine Kosten-

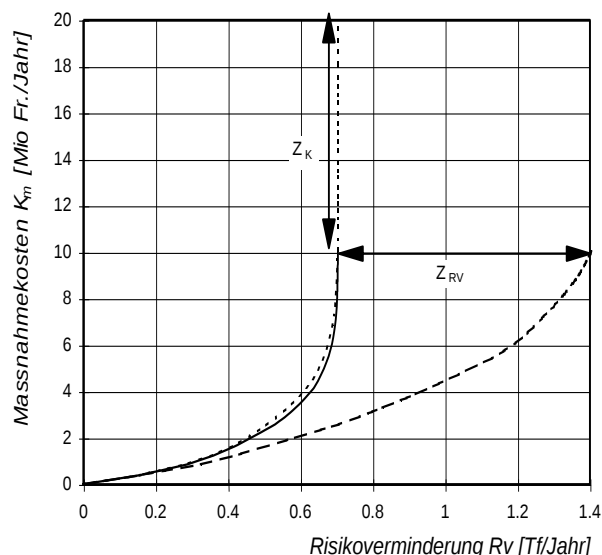
redundanz zu berücksichtigen, da redundant getätigte Kosten nicht wieder zurückgenommen werden können. Ohne Kostenredundanz ergibt sich aber wieder eine andere Massnahmenabfolge (vgl. Tab. 3.10), deren Auswir-

kungen bezüglich der Massnahmenkosten in Abb. 3.23 dargestellt werden. Bei diesem Beispiel kommen die Sperreinheiten weitgehend an den Anfang der Kombinationsabfolge zu liegen.

Tab. 3.10 Kombinationsabfolge ohne Berücksichtigung der Kostenredundanz Z_K

Nr.	Massn.	R_1	K_g	KW_Z	KW
1	S1	0.5451	11.301	2.5	2.5
2	G1	0.5218	10.915	3.4	2.7
3	G2	0.4920	10.431	3.7	2.9
4	G3	0.4159	9.192	3.7	2.9
5	S2	0.3432	8.140	5.5	4.2
6	S3	0.2864	7.404	7.0	5.4
7	S4	0.2426	6.928	9.1	7.0
8	S5	0.2040	6.557	10.4	7.9
9	S6	0.1709	6.294	12.1	9.2
10	S7	0.1404	6.085	13.1	10.0
11	S8	0.1127	5.931	14.4	11.0
12	S9	0.0917	5.912	19.1	14.5
13	S10	0.0714	5.905	19.7	15.0
14	S11	0.0565	6.006	26.8	20.4
15	S12	0.0441	6.159	32.3	24.7
i	...	...	...	...	...
27	S24	0.0006	10.092	657.7	501.8
28	S25	0	10.480	657.7	501.8
29	G4	0	10.560	0.0	4.9
i	...	...	...	...	...
71	G46	0	19.310	0.0	173.3
72	G47	0	20.010	0.0	223.6

Abb. 3.23 Kosten der optimalen Massnahmenkombination (ausgezogen), ohne Berücksichtigung der Kostenredundanz Z_K (punktirt) oder ohne Redundanz der Risikoverminderung Z_{RV} (gestrichelt)



Wird die Kostenredundanz Z_K nicht berücksichtigt, so ergeben sich bis zur massgebenden Risikoverminderung von $R_v = 0.7$ Tf/Jahr keine erheblichen Abweichungen zur theoretisch optimalen Kurve. Der massgebende Anteil der „zusätzlichen“ Kosten zwischen 10 und 20 Mio Fr. ist praktisch gesehen nicht mehr relevant, da er erst bei einer kompletten Reduktion des Ausgangsrisikos auftritt. Demgegenüber würde eine Nichtberücksichtigung der Redundanz der Risikoverminderung Z_{RV} zu fehlerhaften Aussagen hinsichtlich der Risikoverminderung und damit indirekt auch der Kosten von Schutzmassnahmen führen. Dabei ist zu beachten, dass die drei Kurven in Abb. 3.23 auf unterschiedlichen Massnahmenabfolgen basieren, jeweils gereiht nach der massgebenden Kostenwirksamkeit. Auch wenn den verschiedenen Berechnungsmodellen willkürlich die gleiche Massnahmenreihung zu Grunde gelegt wird, ergeben sich nur geringfügige Veränderungen des Verlaufs, die die prinzipielle Wirkung der Redundanz nicht beeinflussen (Giebenhain 1998).

Sind die Unsicherheiten der vereinfachten Redundanzfassung gemäss Kap. 1.3 abschätzbar?

Diese Frage wird ebenfalls am Datensatz der Flüelapassstrasse überprüft, wobei die 25 Sperreinheiten in Anlehnung an das heutige Schutzkonzept mit künstlicher Lawinenauslösung kombiniert sind und eine verbesserte Wirksamkeit gemäss Tab. 1.17 aufweisen. Unterschieden werden 5 Vorgehen (A, B, C, D und E), die die Unsicherheiten des vereinfachten Vorgehens A (Tab. 1.19 und Abb. 1.12) eingrenzen und den Spielraum für den Variantenentscheid transparent machen. Die entscheidungsrelevanten Daten der Optimalvarianten gemäss den 5 Vorgehen werden im folgenden diskutiert, in Tab. 3.11 zusammengestellt und in Abb. 3.24 visualisiert. Als entscheidungsrelevante Daten sind im folgenden Art und Anzahl der Massnahmen, Investitionskosten, Betriebskosten, Sperrtage, Gesamtkosten und Restrisiken erfasst.

Vorgehen A (Vorgehen für die Praxis gemäss Kap. 1.3, Tab. 1.19 und Abb. 1.12)

Die Optimalvariante bei diesem praktikablen Vorgehen beinhaltet acht Galerien und dreizehn Sperrtage kombiniert mit künstlicher Lawinenauslösung. Damit verbunden sind jährliche Gesamtkosten von rund 7 Mio Fr. und ein Restrisiko von ca. 30 %. Wesentliches Entscheidungskriterium sind dabei die Investitionskosten, die mit

rund 40 Mio Fr. sehr hoch ausfallen würden. Dabei betragen die Investitionskosten von einer Galerie allein rund 16 Mio Fr., und über deren Ausführung müsste bei dieser Variante vertieft diskutiert werden.

Vorgehen B

Vorgehen B zeigt, welche Ergebnisse tatsächlich mit dem vereinfachten Vorgehen A erreicht werden, indem die Redundanz der Risikoverminderung Z_R mit dem vertieften Vorgehen gem. Kap. 3 berücksichtigt wird. Nur die Massnahmen der Optimalvariante gemäss Vorgehen A, d.h. acht Galerien und 3 Sperreinheiten, sind hier Gegenstand einer Optimierung mit Berücksichtigung der Redundanz der Risikoverminderung. Damit ergibt sich eine neue Reihung dieser Massnahmen und ein kleineres Restrisiko von rund 20 % bei Gesamtkosten von 5.6 Mio Fr. Dies sind die Werte, die mit den Massnahmen der Optimalvariante gemäss Vorgehen A tatsächlich erreicht werden, aber aufgrund der vereinfachten Beurteilung nur ungenau angenähert werden können.

Vorgehen C

Im Unterschied zum Vorgehen B werden hier alle verfügbaren Massnahmen (47 Galerien und 25 Sperreinheiten) mit Berücksichtigung der Redundanz der Risikoverminderung kostenoptimal kombiniert. Daraus folgt eine Optimalvariante, die nur geringfügig bessere Gesamtkosten und Restrisiken aufweist als diejenige mit Vorgehen B (vgl. Tab. 3.11). Wesentlich ist hingegen, dass diese Optimalvariante aus drei Galerien und fünf Sperreinheiten zusammengesetzt ist. Gegenüber Vorgehen B stehen einer Erhöhung der Sperreinheiten um rund 9 Tage einerseits Verminderungen bei den Investitionskosten von rund 28 Mio Fr. andererseits gegenüber.

Vorgehen D

Ergänzend zu Vorgehen C wird hier auch die Kostenredundanz Z_K berücksichtigt d.h. in Abzug gebracht. Dieses rein theoretische Vorgehen besagt, dass eine theoretische Optimalvariante mit Gesamtkosten von 5 Mio Fr. das Restrisiko auf beinahe 10 % zu minimieren vermag. Dazu würden aber wieder 8 Galerien mit entsprechenden Investitionskosten benötigt.

Vorgehen E (heutige Schutzvariante)

Ausgedrückt in Sperreinheiten gemäss Vorgehen A bis D, ist die heutige, aktuelle Schutzvariante mit ca. 6 Sperreinheiten d.h. rund 26 Sperrtagen - teilweise kombiniert mit künstlicher Lawinenauslösung - verbunden. Bauliche Massnahmen wurden bis heute bekanntlich keine getätigt. Bei einem Restrisiko von 18 % berechnen sich die Gesamtkosten zu 5.0 Mio Fr. Dabei sind die Sperrtage mit einem Ersatzkostenansatz, d.h. 0.091 Mio Fr. pro Sperrtag gemäss Gl. 1.10 bewertet. Die 'Optimalvariante' gemäss Vorgehen E entspricht einem Punkt in Abb. 3.24 und beruht v.a. auf der Erfahrung des heutigen Sicherheitsverantwortlichen.

Tab. 3.11 Beurteilungskriterien für den Variantenentscheid (dargestellt an fünf Vorgehensmöglichkeiten A, B, C, D und E)

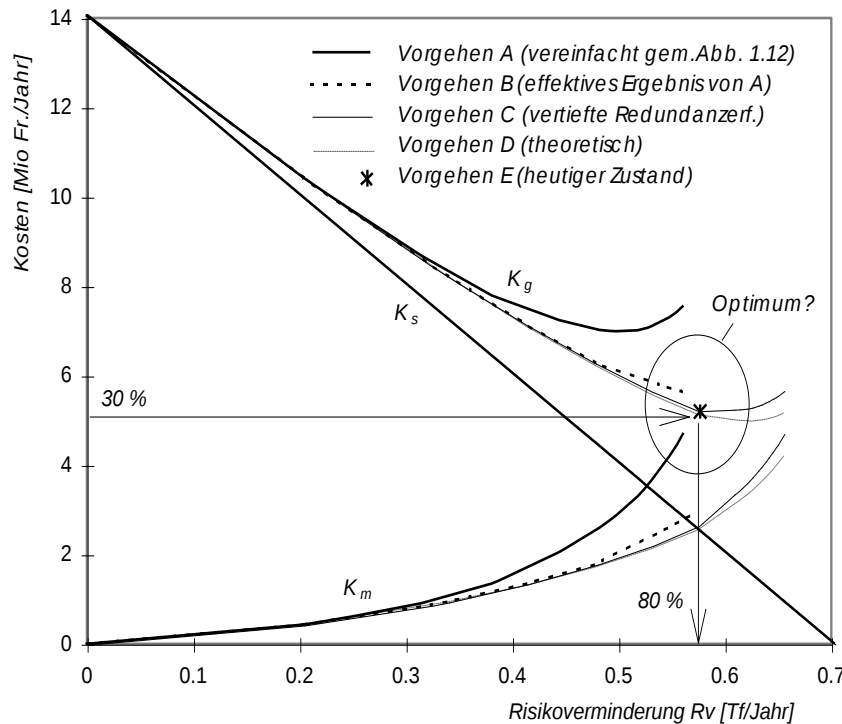
Vor- gehen	Art und Anz. Massnahmen	Invest.kosten [Mio Fr.]	Betriebskosten [Mio Fr./Jahr]			Sperrtage [Tg]	Gesamtkosten [Mio Fr./Jahr]	Restrisiken [%]
			Galerien	kLA	gesamt			
A	8 G + 3 SE	39.1	0.39	0.11	0.50	13.2	7.0	29
B	8 G + 3 SE	39.1	0.39	0.11	0.50	13.2	5.6	19
C	3 G + 5 SE	11.9	0.12	0.18	0.30	22.0	5.2	18
D	8 G + 5 SE	39.1	0.39	0.18	0.57	22.0	5.0	11
E	ca. 6 SE (heute)	---	---	0.21	0.21	ca. 26	5.0	18

G = Galerie; SE = Sperreinheit; kLA = künstliche Lawinenauslösung

Variantenvergleich und Fazit

Verglichen werden die Varianten gemäss Vorgehen B, C und E. In dieser Reihenfolge werden die Sperrtage von ca. 13 Tg auf 26 Tg praktisch verdoppelt und die Investitionskosten von rund 40 Mio Fr. auf praktisch null reduziert. Dabei vermindern sich auch die jährlichen Betriebskosten von 0.5 Mio Fr. auf rund 0.2 Mio Fr., während

Abb. 3.24 Vergleich der Optimalvarianten mit den Vorgehen A bis E aufgrund ihrer Lage im Kosten-Risikoverminderungs-Diagramm



die Gesamtkosten nur unwesentlich geringer werden. Mit diesen Gesamtkosten wird bei allen Vorgehen praktisch das gleiche Restrisiko von rund 20 % erreicht. Umgekehrt kann gezeigt werden, dass ausgehend vom heutigen Schutzkonzept (Vorgehen E) mit dem zusätzlichen Bau von drei Galerien die Sperrzeit um rund vier Tage vermindert werden könnte (Vorgehen C). Zusammenfassend ergibt sich, dass in diesem System (Flüelapassstrasse) mit rund 30 % der Massnahmenkosten ca. 80 % des Risikos vermindert werden kann. Es zeigt sich aber v.a., dass das vereinfachte Vorgehen A bereits eine gute Annäherung ergibt.

Wieviele Sperrtage können mit zusätzlichen Galerien eingespart werden?

Bis anhin wurde angenommen, dass einmal getätigte Massnahmen irreversibel seien. Für den konkreten Sicherungsentscheid gilt dies nur für permanente bauliche Massnahmen (hier Galerien). Die Sperreinheiten hingegen werden beim kontinuierlichen Ausführen aller Massnahmen (Galerien und Sperreinheiten) zunehmend unwirksam bis sie bei einem Vollverbau mit Galerien vollends eliminiert (reduziert) werden können. Aufbauend auf der Massnahmenkombination gemäss Tab. 3.9 wird nachfolgend ein modellhaftes Vorgehen beschrieben, wie an einem beliebigen Punkt in der Kombinationsabfolge die Redundanzen der Risikoverminderung Z_{RV} in äquivalente (redundante) Sperrtage umgerechnet und in Abzug gebracht werden können. Es wird dazu also von der kostenoptimalen Reihenfolge von 47 Galerien und 25 Sperreinheiten à 4.4 Tage ausgegangen.

Vorgehen und Annahmen (vgl. Abb. 3.25 und Abb. 3.26)

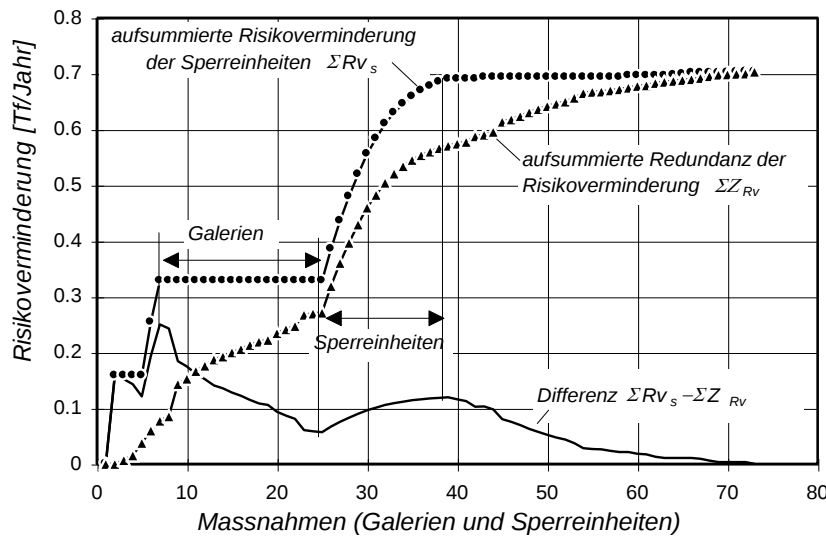
- 1.) Die aufsummierte Risikoverminderung der getätigten Sperreinheiten $\sum R_{VS}$ steigt mit abnehmender Rate und entspricht schliesslich dem Ausgangsrisiko R_o von 0.7034 Tf/Jahr.
- 2.) Die aufsummierte Redundanz der Risikoverminderung $\sum Z_{RV}$ (infolge Galerien und Sperreinheiten) kann in redundante Sperreinheiten umgerechnet werden.
- 3.) Die getätigten Sperreinheiten abzüglich der redundanten Sperreinheiten ergeben die verbleibenden (erforderlichen) Sperreinheiten

In Abb. 3.25 und Abb. 3.26 sind auf der X-Achse die 72 Massnahmen in kostenoptimaler Reihenfolge aufgetragen. Die Risikoverminderung auf der Y-Achse in Abb. 3.25 in Todesfällen/Jahr wird in Abb. 3.26 in entsprechenden (äquivalenten) Sperrtagen dargestellt. Bis zur Massnahme Nr. 10 werden sowohl Galerien als auch

Sperreinheiten ausgeführt. Von Massnahme Nr. 10 bis Massnahme Nr. 20 folgen z.B. 10 Galerien hintereinander und die aufsummierte Risikoverminderung der Sperreinheiten ΣRv_s bleibt dort konstant; die Redundanz der Risikoverminderung ΣZ_{Rv} hingegen nimmt zu. Die Differenz entspricht der noch wirksamen Risikoverminderung der bereits getätigten Sperreinheiten, welche dementsprechend abnimmt. Es wird hier angenommen, dass diese, nur noch an Lawinenzügen ohne Galerien wirksame Risikoverminderung mit einer geringeren Anzahl Sperreinheiten erreicht werden kann. Diese Annahme kann teilweise mit dem Rückgang der noch nicht mit Galerien verbauten Lawinenzüge und mit spezifischen Auswertungen von Lawinenkatasterdaten (Giebenhain 1998)

begründet werden.

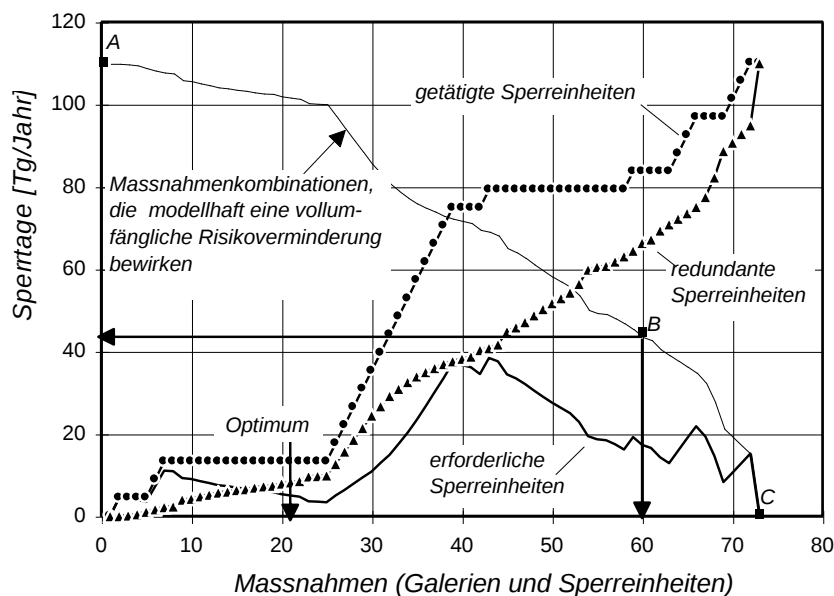
Abb. 3.25 Aufsummierte Risikoverminderung der Sperreinheiten ΣRv_s , aufsummierte Redundanz der Risikoverminderung ΣZ_{Rv} und Differenz derselben



Entsprechend kann die abgeschwächte Zunahme der noch erforderlichen Sperrtage zwischen Massnahme 25 und 38 begründet werden, wo nur Sperreinheiten vorgesehen sind. Wird die Risikoverminderung in Abb. 3.25 durch äquivalente Sperrtage ausgedrückt, so hat dies bei der Risikoverminderung durch Sperreinheiten die linearen Anstiege in Abb. 3.26 zur Folge. Schwierigkeiten ergeben sich diesbezüglich bei der Redundanz der Risikoverminderung, da diese in

der Kombinationsabfolge pro Sperreinheit zunehmend geringer wird. Zur Umrechnung in Sperrtage wird schliesslich zwischen zwei Sperreinheiten eine lineare Interpolation durchgeführt.

Abb. 3.26 Getätigte, redundante und verbleibende (erforderliche) Sperrtage bei der kostenoptimalen Massnahmenkombination



Folgerungen:

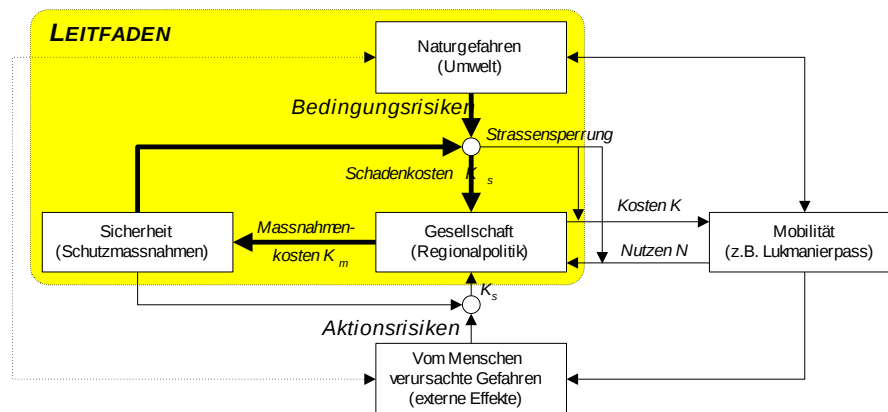
Im Optimum wären von den drei getätigten Sperreinheiten (13.2 Sperrtage) gemäss diesem Modell nur noch rund die Hälfte erforderlich. Die Linie mit den Punkten A (110 Sperrtage / 0 Galerien), B (45 Sperrtage / 41 Galerien) und C (0 Sperrtage / 47 Galerien) hat modellhaft eine vollumfängliche Risikoverminderung zur Folge. Die Schere zwischen getätigten Sperreinheiten und erforderlichen Sperreinheiten wird in der Kombinationsabfolge zunehmend grösser.

3.5 Massnahmenbewertung (vgl. Abb. 3.1)

Eine gesamtheitliche Massnahmenbewertung muss die umfassende Risiko- und Entscheidungslage aufzeigen und den Bezug zur gewählten Systemabgrenzung herstellen (Risikomanagement im weiteren Sinne). Der Massnahmenbewertung in diesem Leitfaden liegt eine Kostenminimierung zu Grunde, die als Risikomanagement im engeren Sinne bezeichnet werden kann. Die Systemabgrenzung ist vorwiegend lawinenrisikoorientiert und bezieht sich vor allem auf den Sicherungskreislauf (vgl. breite Pfeile in Abb. 3.27). Im folgenden soll diese begrenzte Sichtweise im Rahmen einer umfassenderen Darstellung der Risiko- und Entscheidungslage positioniert werden. Dies kann einerseits die mit diesem Leitfaden erzielten Aussagen relativieren. Es soll aber andererseits Möglichkeiten aufzeigen, wo und wie ein erweitertes Risikomanagement ansetzen kann. Nicht zuletzt sind deshalb auch Akteure angesprochen, die in einen entsprechenden Risikodialog einzubeziehen sind. Die stark gerafften Aussagen werden am Beispiel der Winteröffnung der Lukmanierpassstrasse gemacht (Wilhelm 1998).

Es wird davon ausgegangen, dass gesellschaftliche Präferenzen zur Bereitstellung und Nutzung des Gutes Mobilität - im vorliegenden Falle vertreten durch Exponenten der Regionalpolitik und Wirtschaft - den Antrieb und die Ursache (Motor) zur Winteröffnung der bis anhin geschlossenen Lukmanierpassstrasse darstellen. Dabei erhofft man sich direkte Nutzen durch eine gesteigerte Wertschöpfung im Hotel- und Bergbahnbetrieb und eine qualitative Aufwertung des Wirtschaftsstandortes Obere Surselva im Kanton Graubünden. In Abb. 3.27 ist dieser Sachverhalt mit den direkten Nutzen N abgebildet und den direkten Kosten K (z.B. Kosten der Winteröffnung) gegenübergestellt. Die Winteröffnung der Lukmanierstrasse in alpiner Umgebung ist aber auch mit Naturgefahren konfrontiert, die als Bedingungsrisiken eine entscheidende Rahmenbedingung für das vorliegende Vorhaben darstellen. Ebenfalls damit verbunden sind vom Menschen verursachte Gefahren (Lärm, Luftverschmutzung, Verkehrsunfälle usw.), die sich meist in Form externer Effekte manifestieren. Bei der Zielerreichung - hier insbesondere Erhöhung der touristischen Wertschöpfung - können solche Gefahren als Aktionsrisiken identifiziert werden. Wie die

Abb. 3.27 Massnahmenbewertung im Kosten-Risiko-Nutzen Kalkül



meisten Aktivitäten überhaupt, ist auch das Streben nach mehr Mobilität mit Bedürfnissen nach Schutz und Sicherheit verknüpft, d.h. sowohl Aktions- und Bedingungsrisiken werden in einem umfassenden Kosten-Risiko-Nutzen-Kalkül abgewogen, mit Schutzmassnahmen beeinflusst und auf sog. Restrisiken vermindert (Sicherungskreislauf). Die Kosten für Schutzmassnahmen K_m und die Schadenkosten der Restrisiken K_s repräsentieren also neben den direkten Kosten K und direkten Nutzen N nur einen Teil der entscheidungsrelevanten Grössen im Gesamtkontext. In Abb. 3.27 ist die im Leitfaden vorgenommene Begrenzung auf den Sicherungskreislauf und dabei auf die Kostenminimierung im Umgang mit Lawinenrisiken (Bedingungsrisiken) hervorgehoben. Interessant aber auch anspruchsvoll zu bewerten sind die Massnahmen der Strassensperrung, deren Ausmass im Sinne einer klassischen Wechselwirkung die direkten Kosten K und die direkten Nutzen N beeinflusst. Zwischen den Naturgefahren und den vom Menschen verursachten Gefahren sind noch Wechselwirkungen aufgezeigt (gestrichelter Pfeil in Abb. 3.27), die aber in der vorliegenden Arbeit auch nicht thematisiert werden.

In Tab. 3.12 sind wesentliche Akteure, Ziele und Optimierungsstrategien am Beispiel der Winteröffnung der Lukmanierpassstrasse aufgelistet. Für die Initianten einer Winteröffnung dürften sicher die Chancen im Wintertourismus, d.h. die direkten Nutzen N von gesteigerten Logiernächten und Frequenzen auf Bergbahnen ausschlaggebend sein. Diese eingeschränkte Sichtweise kommt einer engeren Investitionsentscheidung gleich

($N - K \rightarrow \text{maximal}$), wobei die Kosten und Nutzen weitgehend monetär bewertbar sind, deren Unsicherheiten aber enorm differieren (Kosten weitgehend kalkulierbar, Nutzen nur grob prognostizierbar).

Inhalt von Kapitel 1 dieses Leitfadens ist die Risikoverminderung unter der Zielsetzung der Kostenminimierung. Garant für die Risikoverminderung ist letztlich der Sicherungsverantwortliche vor Ort dessen Hauptziel ein minimales Restrisiko für Strassenbenutzer und Sicherungsdienste ist ($K_s \rightarrow \text{minimal}$). Wieviel an Massnahmekosten K_m für die Sicherheit vor Lawinen aufgewendet werden soll, betrifft Fragen, die im Zuständigkeitsbereich der kantonalen Fachstellen liegen, welche mit dem beschränkten öffentlichen Budget ein Maximum an Lawinensicherheit auf Strassen gewährleisten möchten ($K_m + K_s \rightarrow \text{minimal}$). Während die Massnahmekosten K_m - zumindest die direkten Aufwendungen für Lawinengalerien, Stützverbauungen, Aufforstungen usw. - weitgehend kalkulierbar sind, stehen bei den Restrisikokosten K_s Personentodesfallrisiken im Vordergrund. Deren Bewertung ist mit Schwierigkeiten verbunden und Aussagen zur Kosten-Wirksamkeit, die auf einer Addition der Massnahmen- und Schadenkosten beruhen, sind letztlich immer von begrenzter Aussagekraft.

Tab. 3.12 Akteure, Ziele und Optimierungsstrategien am Beispiel der Winteröffnung der Lukmanierpassstrasse

Akteure	Hauptziele	Optimierungsstrategien
Initianten einer Winteröffnung	Logiernächte und Frequenzen auf Bergbahnen steigern, Standortbedingungen verbessern	(Netto-) Nutzenmaximierung $N - K \rightarrow \text{maximal}$
Sicherungsverantwortlicher für Strassenöffnung / -sperrung	Sicherheit von Strassenbenutzern und Arbeitern der Sicherungsdienste gewährleisten	Risikominimierung $K_s \rightarrow \text{minimal}$
Strassenfachstelle, kantonales Tiefbauamt	Verkehrsinfrastruktur sicherheits- und kostenoptimiert bereitstellen und unterhalten	Kostenminimierung $K_m + K_s \rightarrow \text{minimal}$
gesamtwirtschaftliche Sicht (Gesellschaft)	optimale Mobilität zur nachhaltigen Raumnutzung ermöglichen	Nettonutzenmaximierung $N - (K + K_m + K_s) \rightarrow \text{maximal}$

N = direkte Nutzen (Wertschöpfungen im Wintertourismus)

K_m = Massnahmekosten (Kosten für Lawinenschutzbauten)

K = direkte Kosten (Aufwendungen für Strassenöffnung)

K_s = Schadenkosten (Lawinentodesfälle)

Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht wäre schliesslich eine Nettonutzenmaximierung zu postulieren, bei der die Nutzen N abzüglich der verschiedenen Kosten K , K_m und K_s maximal resultieren ($N - (K + K_m + K_s) \rightarrow \text{maximal}$). Diese Zielsetzung könnte Grundlage einer effizienten und nachhaltigen Investitionspolitik der öffentlichen Hand, einer Unternehmung oder eines Individuums sein, wobei bei den Kosten eine umfassende Internalisierung externer Effekte einbezogen sein soll. Zu unterscheiden wäre weiter, ob unter der öffentlichen Hand das öffentliche Interesse einer Region, eines Kantons oder des Bundes verstanden wird, da damit die Kosten- und Nutzenbestandteile wesentlich abweichen dürften. Denn was z.B. an touristischer Wertschöpfung in einem Kanton gewonnen wird, dürfte bei bestimmten Vorhaben andern Kantonen abgehen, und es ist u.a. zu fragen, ob gesamtwirtschaftlich auf der Nutzenseite nicht ein Nullsummenspiel resultiert, das schliesslich noch vom Bund mitfinanziert wird.

Die Massnahmenbewertung gemäss Abb. 3.1 wird als Mittel - Resultat - Ziel Vergleich dargestellt, wobei die entscheidungsrelevante Kosten-Wirksamkeit KW von Kap. 1 demzufolge als Effizienzgrösse (Kosten dividiert durch Risikoverminderung oder Mittel dividiert durch Resultat) zu verstehen ist. Einzig die individuellen Risiken und allenfalls die Kosten zu deren Verminderung werden mit Bezug auf explizit vorgegebene Ziele (Grenzwerte) beurteilt. Diese Grenzwerte, aber auch Angaben zur Kosten-Wirksamkeit (was ist sehr kostenwirksam, was wenig kostenwirksam) verlangen normative Vorgaben, die auf Wertungen beruhen und sich dementsprechend im Zeitablauf verändern können. Um die Aussagen von Kap. 1, basierend auf der Kosten-Wirksamkeit, den individuellen Risiken und den Grenzkosten in diesem Kontext zu verstehen, werden nachfolgend die entsprechenden Bewertungsmethoden vertieft.

3.5.1 Bewertung der Kosten

Sobald negative Wirkungen als monetäre Kosten erfasst werden, ist damit immer eine Bewertung verbunden. Bei der Beurteilung von Aussagen ist es also vorteilhaft zu fragen: *WER bewertet WAS und WIE?*

Das WER (die Akteure) und das WAS (die Risiken und Aufwendungen im Lawinenschutz) wurden bereits angesprochen. Das WIE, d.h. die Bewertungsmethodik wird nachfolgend nur soweit behandelt, als sie für eine Vertiefung von Kap. 1 hilfreich ist und kann keineswegs umfassend sein (zu den Bewertungsmethoden allgemein vgl. Pommerehne 1987 und mit Bezug zum Lawinenschutz Wilhelm 1997).

Massnahmenkosten

Als Massnahmenkosten werden hier sowohl Aufwendungen für bauliche Schutzwerke als auch temporäre zeitliche Strassensperrungen explizit bewertet. Die Strassensperrungen könnten auch als Schadenkosten interpretiert werden, was hier zur Vereinfachung aber nicht gemacht wird. Dies beeinflusst das - auf einer Kostenminimierung basierende - Entscheidungskalkül nicht und es können auch nachfrageseitige Bewertungsansätze für die Sperrtage einbezogen werden.

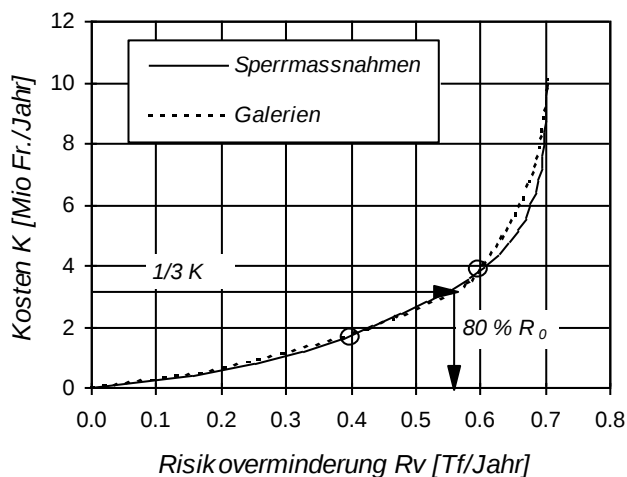
Bewertung mit Marktpreisen

Werden die Kosten von baulichen Schutzmassnahmen an ausgeführten Projekten erfasst, so dürften sie mehr oder weniger gut Marktpreise widerspiegeln. Wesentlich ist, dass solche Angaben auf einen Zeitpunkt (z.B. Abrechnungszeitpunkt der effektiven Baukosten = Preisbasis) bezogen werden. Ebenfalls auf den gleichen Zeitpunkt müssen Angaben zum durchschnittlichen täglichen Verkehr DTV und zur Lawinenwahrscheinlichkeit p_L Bezug nehmen. Die Teuerung betreffend baulichen Lawinenschutzmassnahmen ist über die letzten 20 Jahre gesehen nicht sehr gross und sie wird z.T. noch durch verbesserte und effektiver wirkende Massnahmen 'ausgeglichen'. Somit sind auch Kostenvoranschläge und Kostenberechnungen mit Einheitspreisen im vorliegenden Zusammenhang meist brauchbare Ansätze der Kostenbewertung.

Bewertung mit Ersatzkosten

Da die Kosten von Strassensperrungen schwierig zu erfassen sind, können für eine erste Optimierung die Kosten einer alternativen, gleichwertigen Leistungsbereitstellung herangezogen werden. Ist die Leistung ausschliesslich mit der Verminderung von Lawinenrisiken definiert, so bieten die Kosten von baulichen Massnahmen (z.B. Galerien) Ansätze zur Bewertung von Sperrtagen mit äquivalentem Leistungsausput. Da aber Galerien und Sperrtage neben dem gemeinsamen Leistungsziel der Lawinenrisikoverminderung zu sehr differierenden Auswirkungen auf der Nutzerseite führen (v.a. gesperrte Verkehrsachse), müssen in einer zweiten Optimierung unbedingt nachfrageseitige Bewertungen der Sperrtage (z.B. direkte Zahlungsbereitschaften) oder modifizierte Bewertungen des Entscheidungsträgers (wie auch immer erfasst) berücksichtigt werden. In Abb. 3.28 sind die Kosten der Risikoverminderung mit Galerien (aus Abb. 1.10) aufgetragen und ebenfalls die Sperrtage mit äquivalenter Wirkung (Abb. 1.11) damit bewertet. Dabei wurde angenommen und in Kap. 1 begründet, dass 10 Mio Fr. infolge Galerien die gleiche Wirkung bei der Risikoverminderung erzielen wie 110 Sperrtage. Dies hat gemäss der Ersatzkostenmethode einen Bewertungsansatz von rund 90'000 Fr. pro Sperrtag zur Folge. Zufälligerweise

Abb. 3.28 Bewertung von Sperrtagen mit den Kosten für Galerien bei äquivalenter Wirkung (Ersatzkostenansatz)



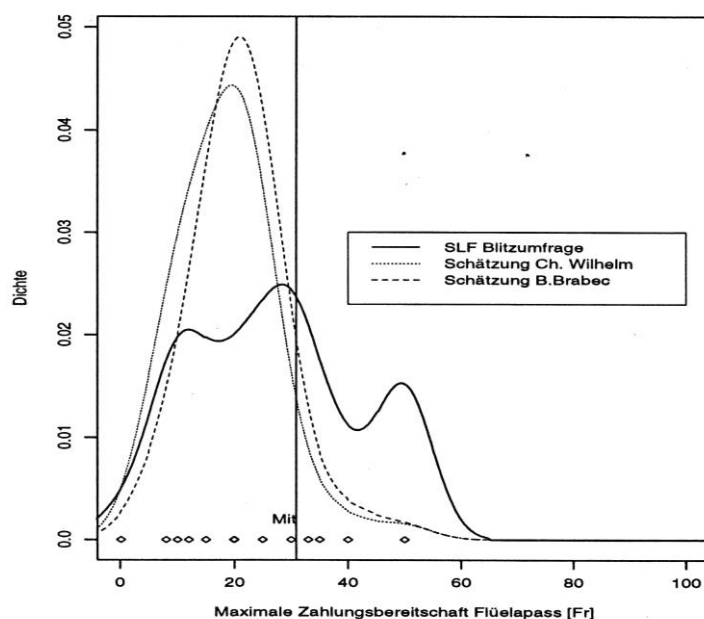
ausgewählte Verkehrsachse), müssen in einer zweiten Optimierung unbedingt nachfrageseitige Bewertungen der Sperrtage (z.B. direkte Zahlungsbereitschaften) oder modifizierte Bewertungen des Entscheidungsträgers (wie auch immer erfasst) berücksichtigt werden. In Abb. 3.28 sind die Kosten der Risikoverminderung mit Galerien (aus Abb. 1.10) aufgetragen und ebenfalls die Sperrtage mit äquivalenter Wirkung (Abb. 1.11) damit bewertet. Dabei wurde angenommen und in Kap. 1 begründet, dass 10 Mio Fr. infolge Galerien die gleiche Wirkung bei der Risikoverminderung erzielen wie 110 Sperrtage. Dies hat gemäss der Ersatzkostenmethode einen Bewertungsansatz von rund 90'000 Fr. pro Sperrtag zur Folge. Zufälligerweise

zeigen die sich ergebenden Kostenfunktionen betreffend den Flüelapass in Abb. 3.28 einen sehr ähnlichen Verlauf, was bei andern Risikosystemen weit mehr differieren kann. Bei einer Risikoverminderung von 0.4 Tf/Jahr und 0.6 Tf/Jahr fallen sogar gleich hohe Kosten an (break-even point), vorher und nachher zeigen die Sperrtage den kostenoptimaleren Verlauf. Mit rund 1/3 der Kosten für eine vollständige Risikoverminderung lassen sich mit beiden Massnahmen rund 80% des Ausgangsrisikos R_o eliminieren.

Bewertung mit nachfrageseitiger Zahlungsbereitschaft

Verkehrsachsen können mit geringem Aufwand vom Sicherungsverantwortlichen gesperrt werden (Angebot von sicherer Mobilität), was aber beträchtliche Auswirkungen bei den Nutzen und Kosten der Nachfrager (Nachfrage von Mobilität) zur Folge haben kann. Eine Bewertungsmethode besteht vereinfacht darin, dass die aufsummierte Zahlungsbereitschaft (willingness to pay) der Verkehrsachsenbenutzer, z.B. für eine Verminderung der Sperrzeit, erfasst und als Bewertungsansatz herangezogen wird (Contingent Valuation Method). Ist dies zu aufwendig, so kann auch eine Expertenschätzung gemacht oder die Bewertung der Entscheidungsträger in eine Optimierung eingebracht werden. Nachfolgend wird ein kleines Experiment beschrieben, das in diesem Sinne eine nachfrageseitige Bewertung repräsentieren kann.

Abb. 3.29 Nachfrageseitige Zahlungsbereitschaft für die Bewertung von verminderten Sperrtagen



Anlässlich eines Kolloquiums am SLF wurden rund 40 Teilnehmerinnen und Teilnehmer mit folgender Situation und Blitzumfrage konfrontiert: „Stellen Sie sich vor, Sie wollen von Davos via Flüelapass (vgl. Bsp. Nr. 5 im Kap. 2) und Ofenpass ins Tirol fahren und kehren nicht am selben Tag zurück. Sie fahren am Passanfang zu einer Barriere, wo Ihnen für eine Passüberfahrt mit dem PW ein bestimmter Frankenbetrag abverlangt wird. Wie hoch darf dieser Frankenbetrag maximal sein (maximale individuelle Zahlungsbereitschaft), damit Sie noch bezahlen? Als Alternativen stehen Ihnen die Julierpassstrasse (zusätzliche Fahrzeit ca. eine Stunde) und der Vereinatunnel (zusätzliche Kosten für einen PW-Verlad > 30 Fr.) zur Verfügung“

In Abb. 3.29 sind die Ergebnisse der oben beschriebenen Blitzumfrage mit zwei Einzelschätzungen ergänzt (Brabec, Wilhelm), die im Sinne der subjektiven Bewertung eines Entscheidungsträgers unabhängig voneinander zu werten sind. Dargestellt ist eine gewichtete Dichtefunktion über die geäußerten Zahlungsbereitschaften, die bei der SLF Blitzumfrage bei 10 Fr., 30 Fr. und 50 Fr. Maximalwerte aufweist. Der Mittelwert (Mit) liegt bei rund 30 Fr. pro Fahrzeug und Überfahrt (bei den Einzelschätzungen bei je rund 20 Fr.). Ohne das Vorgehen und die Verteilungen weiter zu interpretieren, soll hier nur der zentrale Bewertungsgedanke aufgenommen werden. Mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehr im Winter DTV_w von rund 1'000 Fahrzeugen und 30 Fr. pro Fahrzeug und Überfahrt wäre demzufolge eine aggregierte Zahlungsbereitschaft von 30'000 Fr. pro (Sperr-)Tag als Bewertungsansatz zu postulieren. Damit kann also ausgehend von einer ersten angebotsseitigen Optimierung (vgl. Abb. 1.12 im Kap. 1, wobei die Sperrtage noch mit einem Ersatzkostenansatz bewertet wurden) ein sog. ökonomisches Optimum angestrebt werden (vgl. die Verschiebung des Optimums in Abb. 1.14, Kap. 1).

3.5.2 Bewertung der Risikoverminderung

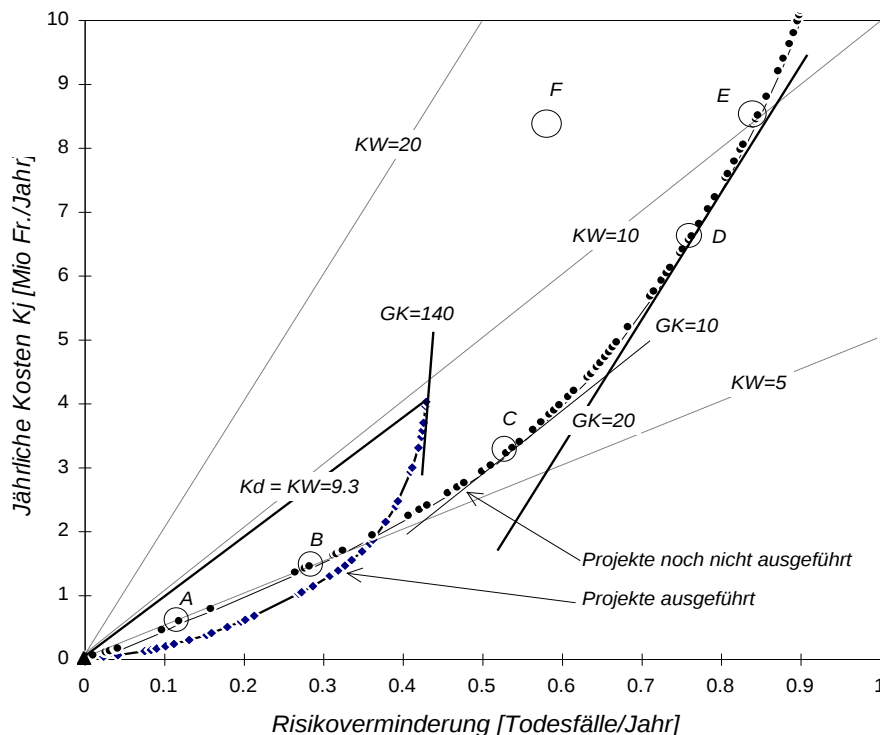
Die Bewertung eines Gutes oder einer Leistung (z.B. einer Risikoverminderung) kann grundsätzlich mit den Kosten der Bereitstellung oder mit der Zahlungsbereitschaft der Nachfrager erfolgen. Die hier zu bewertende Leistung betrifft eine Risikoverminderung und sie wird in statistischen Todesfällen pro Jahr erfasst. Da die Bewertung von Todesfallrisiken bekanntlich nicht sinnvoll über die Zahlungsbereitschaft der Nachfrager vorgenommen werden kann, verbleibt die Bewertung mit den Bereitstellungskosten. Dabei wird aus gesamtwirtschaftlicher Sicht von den Kosten auf den Nutzen geschlossen, was sehr praktikabel aber keinesfalls unproblematisch und grundsätzlich mit geringer Validität verbunden ist.

Erfassung von Durchschnitts- und Grenzkosten

Ein erster Schritt besteht in der Erfassung von Durchschnitts- und Grenzkosten pro verhinderten statistischen Todesfall. Obwohl in Sicherheitsbereichen sehr oft auf Grenzkosten Bezug genommen wird, sind explizite Auswertungen von Projekten und Massnahmen nach Durchschnitts- und Grenzkosten äusserst selten. Oft werden Werte aus der Literatur - wie auch immer erfasst - herangezogen und ungeachtet des Gültigkeitsbereiches als Bewertungsansätze stipuliert. Es ist jedoch wesentlich, Projekte aus denselben oder nahe verwandten Sicherheitsbereichen auszuwerten und sogenannte Kostenfunktionen abzuleiten (vgl. Abb. 3.30).

Werden die ausgeführten Projekte und die zur Bewertung anstehenden Projektvorhaben (noch nicht ausgeführte Projekte) mit denselben Modellen beurteilt, so kann der eigentliche Bewertungsvorgang transparent gemacht werden.

Abb. 3.30 Kostenfunktionen von ausgeführten und noch nicht ausgeführten Massnahmen (Erfassung von Durchschnittskosten K_d und Grenzkosten GK)



In Abb. 3.30 sind rund 40 Lawinenzüge mit baulichen Schutzmassnahmen (Projekte ausgeführt) gemäss dem Vorgehen in Kapitel 1.3.2 ausgewertet. Demnach wurden in der Vergangenheit Durchschnittskosten K_d von 9.3 Mio Fr. pro verhinderten Todesfall mit Lawinenschutzprojekten an Verkehrsachsen aufgewendet oder anders ausgedrückt, beträgt die mittlere Kosten-Wirksamkeit KW über alle diese Projekte rund 10 Mio Fr. pro verhinderten Todesfall. Die Grenzkosten GK, als Tangente an die Kostenfunktion der ausgeführten Projekte, sind ausgehend von Null zuerst sehr klein und steigen bis maximal auf GK=140 Mio Fr. pro verhinderten Todesfall an. Im folgenden sind die Bewertungsstrategien A-E (vgl. Abb. 3.28) erläutert.

Die Grenzkosten GK, als Tangente an die Kostenfunktion der ausgeführten Projekte, sind ausgehend von Null zuerst sehr klein und steigen bis maximal auf GK=140 Mio Fr. pro verhinderten Todesfall an. Im folgenden sind die Bewertungsstrategien A-E (vgl. Abb. 3.28) erläutert.

Bewertung mit Durchschnitts- und Grenzkosten

Es sollen hier beispielhaft bauliche Massnahmen in rund 100 Lawinenzügen zur Bewertung anstehen deren Kostenfunktion ebenfalls in Abb. 3.30 dargestellt ist (Projekte noch nicht ausgeführt). Wieviele dieser Projekte sollen nun ausgeführt werden? Im folgenden werden 5 Bewertungsstrategien besprochen, deren Auswirkungen mit den Punkten A bis E in Abb. 3.30 aufgezeigt sind.

Bewertungsstrategie A

Es sollen zukünftig direkt nur Projekte bis zu Grenzkosten von $GK=5$ baulich ausgeführt werden (Parallele zu $KW=5$ als Tangente an die Kostenfunktion). Dieses Entscheidungskalkül wurde implizit dem Vorgehen auf der Stufe 1 im Kap. 1.1 für bauliche Massnahmen zu Grunde gelegt.

Bewertungsstrategie B

Die mittlere Kosten-Wirksamkeit der zukünftig auszuführenden Projekte soll mit $KW=5$ doppelt so gut sein wie diejenige der in der Vergangenheit ausgeführten Projekte mit $KW=10$ (Schnittpunkt von $KW=5$ mit der Kostenfunktion). Dieses Entscheidungskalkül wurde implizit dem Vorgehen auf der Stufe 2 im Kap. 1.2 für aktive und passive Einzelmassnahmen zu Grunde gelegt.

Bewertungsstrategie C

Die maximalen Grenzkosten GK aller zukünftig auszuführenden Projekte zusammen sollen die Durchschnittskosten der ausgeführten Projekte mit $K_d = KW=10$ nicht übersteigen (Parallele zu $KW=10$ als Tangente an die Kostenfunktion). Damit wären in der Vergangenheit nur rund die Hälfte der Projekte ausgeführt worden, was als zu restriktive Vorgabe für die Zukunft angesehen wurde.

Bewertungsstrategie D

Die maximalen Grenzkosten GK aller zukünftig auszuführenden Projekte zusammen sollen sich höchstens doppelt so hoch belaufen, wie die Durchschnittskosten der ausgeführten Projekte mit $K_d = KW=10$ (Parallele zu $KW=20$ als Tangente an die Kostenfunktion). Dieses Entscheidungskalkül wurde implizit dem Vorgehen auf der Stufe 3 im Kap. 1.3 für Massnahmenkombinationen zu Grunde gelegt.

Bewertungsstrategie E

Die mittlere Kosten-Wirksamkeit KW der zukünftig auszuführenden Projekte soll mindestens so gut sein, wie diejenige der in der Vergangenheit ausgeführten Projekte (Schnittpunkt von $KW=10$ mit der Kostenfunktion). Dies wäre eine zu 'einfache' Vorgabe, denn schliesslich sollen mit dem vorliegenden Leitfaden Verbesserungen erzielt werden, indem dauernd nur die besten anstehenden Projekte zur Ausführung gelangen und somit gesamthaft ein besseres Resultat erreicht wird als ohne Leitfaden.

Es sind theoretisch auch Kostenfunktionen denkbar mit einer mittleren Kosten-Wirksamkeit von $KW>10$ und maximalen Grenzkosten von $GK<20$ (vgl. den Punkt F in Abb. 3.30). Dies dürfte jedoch praktisch kaum existieren und die vorgeschlagenen Bewertungsansätze können zukünftig zu einer Verbesserung der Effizienz im Lawinenschutz führen. Welche Grenzkosten letztlich akzeptiert werden, muss aber dem politischen Prozess unterliegen. Deren Höhe dürfte u.a. sicher massgebend von den verfügbaren Mitteln abhängen. Zusammenfassend wird festgehalten, dass hier ausgehend von den in der Vergangenheit getätigten Durchschnittskosten auf maximale Grenzkosten für zukünftige Projekte geschlossen wird. Dies repräsentiert zum einen den über den politischen Entscheidungsprozess geäusserten Willen (Bewertung) aus der Vergangenheit. Zum anderen wird vom Autor und der Begleitkommission mit den vorgeschlagenen Grenzkosten von 20 Mio Fr. pro verhinderten Todesfall eine 'Grössenordnung' vorgegeben, um zukünftig noch effizientere Projekte anzustreben.

Schadenkostenbewertung

Die Bereitstellung des Gutes 'Risikoverminderung' oder allgemeiner des Gutes 'Sicherheit' ist mit einem Nutzen verbunden, d.h. je grösser die Risikoverminderung desto grösser der Nutzen daraus. Ursache für diesen Nutzenzuwachs sind die abnehmenden Schadenkosten, die direkt aus der Risikoverminderung folgen. Diese Verknüpfung von abnehmenden Schadenkosten und zunehmenden Nutzen wird mit Abb. 3.31 und Abb. 3.32 aufgezeigt.

Abb. 3.31 Grenz- und Gesamtnutzenprinzip der Schadenkostenbewertung

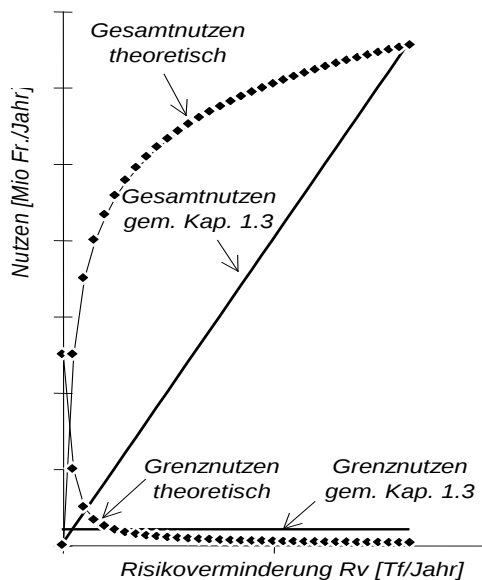
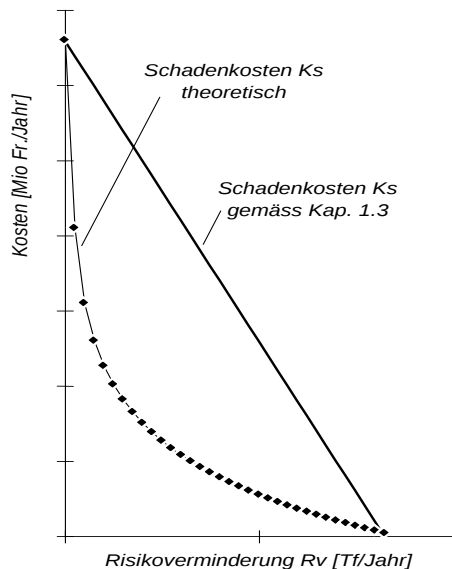


Abb. 3.32 Schadenkostenbewertung (theoretisch und gem. Vorgehen in Kap. 1.3)



In Abb. 3.31 sind die Grenz- und Gesamtnutzen in Funktion der Risikoverminderung qualitativ aufgetragen. Das Gut Risikoverminderung lasse sich in beliebig kleine Einheiten gleicher Grösse unterteilen. Individuen und Gesellschaften bewerten nun eine Gütermenge (Grenznutzen) meist so, dass sie die erste Einheit desselben Gutes höher bewerten als die nächstfolgenden Einheiten. Dies führt theoretisch zu den abnehmenden Grenznutzen mit fortgesetzter Risikoverminderung. Die Aufsummierung der Grenznutzen ergibt bekanntlich die mit abnehmender Rate steigende Gesamtnutzenfunktion. Dieser theoretische Sachverhalt lässt sich im Lawinenschutz noch nicht praktikabel erfassen. Deshalb werden zur Vereinfachung in diesem Leitfaden konstante Grenznutzen angenommen, deren Aufsummierung ein linearer Anstieg der Gesamtnutzen in Funktion der Risikoverminderung ergibt (vgl. Abb. 3.31).

In diesem Leitfaden wird zudem der Nutzen nur indirekt über die abnehmenden Schadenkosten mit fortgesetzter Risikoverminderung erfasst! Die Aussagen aus Abb. 3.31 sind deshalb in Abb. 3.32 in Bezug auf die Schadenkosten zu machen. Sollen Kosten das Gegenteil von Nutzen sein, so müssen die Gesamtnutzenfunktionen in Abb. 3.31 an der X-Achse (Risikoverminderung) gespiegelt werden, was zu den entsprechenden Schadenkosten in Abb. 3.32 führt.

Die lineare Abnahme der Schadenkosten in Kap. 1.3 basiert auf einer konstanten Bewertung einer Risikoverminderungseinheit mit 20 Mio Fr. pro verhinderten Todesfall. Dieser Wert wurde bekanntlich ausgehend von den Durchschnittskosten K_d der ausgeführten Projekte abgeleitet (vgl. Bewertung mit Durchschnitts- und Grenzkosten) und der Schadenkostenbewertung zu Grunde gelegt.

Es muss hier nochmals darauf hingewiesen werden, dass mit den Schadenkosten 'nur' die Risikoverminderung bezüglich Todesfällen erfasst wird. Die Schadenkosten infolge gesperrter Verkehrsachsen wurden bereits bei den Massnahmekosten berücksichtigt, was ein einfacheres Vorgehen ermöglicht und innerhalb einer Gesamtkostenminimierung zum gleichen Resultat führt.

Weitere Methoden zur Bewertung der Risikoverminderung

Neben den oben dargestellten Methoden zur Bewertung der Risikoverminderung (z.B. angebotsseitige Erfassung von Durchschnitts- und Grenzkosten und Bewertung von Todesfallrisiken mit daraus abgeleiteten Grössen oder: nachfrageseitige Erfassung der Zahlungsbereitschaft zur Verminderung von Sperrtagen) wären weitere, valide Ansätze mit Marktpreisen, Vermeidungskosten und Rangierungen sowie die Multi-Attributive Nutzentheorie MAUT, der Analytische Hierarchie Prozess AHP und Methoden im Bereich der 'Economic Impact Analysis' zu erwähnen (vgl. Wilhelm 1997), die aber allesamt

meist mit hohem Aufwand und geringer Praktikabilität verbunden sind. Methoden mit hohen Ansprüchen an naturwissenschaftliche Daten und wenig ökonomischen Annahmen (z.B. Grenzkostenmethode) stehen Methoden mit geringen Ansprüchen an das zu fundierende Mengengerüst aber zahlreichen ökonomischen Annahmen gegenüber (z.B. direkte Erfassung der Zahlungsbereitschaft). Schliesslich zeigt sich, dass zur Risikobewertung keine Methode durchgehend sehr geeignet erscheint, sondern dass sich Stärken und Schwächen diesbezüglich 'ergänzen' (Methodenpluralismus).

3.5.3 Entscheidungskriterien, Budgetbeschränkung und Risikodialog

Nach der Bewertung von Risikoverminderung und Kosten stellt sich die Frage nach den Entscheidungskriterien. Vorgeschlagen sind in Abb. 3.1 zur Massnahmenbewertung und zu Handen der entscheidenden, politischen Bewertung Effizienz-, Effektivitäts- und Optimierungskriterien. Ihre Anwendung wird im folgenden unter dem Aspekt der Budgetbeschränkung und als Beitrag zum Risikodialog interpretiert.

Effizienz im Umgang mit kollektiven Risiken

Die in dieser Arbeit definierte Kosten-Wirksamkeit, als Verhältnis von Kosten zu Risikoverminderung, ist als Mittel-Resultat Vergleich grundsätzlich ein Effizienzkriterium. Entscheidungen zu den kollektiven Risiken auf dieser Basis folgen dem Leitsatz: Mit den verfügbaren Mitteln wird gesamthaft die maximale Sicherheit angestrebt! Der Begriff der Kosten-Wirksamkeit in diesem eingeschränkten Sinne, wird dem Begriff der Effizienz vorgezogen, zumal der vorliegende Leitfaden allein eine Effizienz nach ökonomischen und politischen Kriterien nicht abzubilden vermag.

Effektivität und Grenzwerte (Zielwerte) zur Beschränkung individueller Risiken

Zum Umgang mit individuellen Risiken - und dabei insbesondere mit den individuellen Arbeitsrisiken - werden Grenzwerte im Sinne von anzustrebenden Zielwerten vorgeschlagen. Die Haltung ist mit Bezug zum Begriff der Effektivität zu sehen, indem der erforderliche Aufwand zur Erreichung der individuellen Risikogrenzwerte nicht entscheidungsrelevant sein soll. Dies begründet sich mit den z.T. immer noch sehr hohen individuellen Lawinenrisiken von Personen der Verkehrsachsensicherung, mit der weitgehenden Unfreiwilligkeit (und z.T. Unwissenheit) der Risikoübernahme und schliesslich mit den neuen technischen und organisatorischen Möglichkeiten, die meist auch eine kostenwirksame Risikoverminderung ermöglichen. Auch wenn die individuellen Risiken meist nur mit grossen Unsicherheiten modelliert und erfasst werden können, ist deren Nachweis (ob rein quantitativ oder um qualitative Aspekte ergänzt) als ultimativer Check gefordert.

Optimierung unter Budgetbeschränkung

Im Kap. 1.3 ist die Optimierung bezüglich minimaler Gesamtkosten aufgezeigt. Da aber Teile der Gesamtkosten wie Schadenkosten oder Massnahmekosten von verschiedenen Akteuren und Institutionen getragen werden, sind die minimalen Gesamtkosten nicht a priori das wesentlichste Entscheidungskriterium im konkreten Fall (vgl. im folgenden Tab. 1.20). Besonders deutlich wird dies unter Budgetbeschränkungen, wobei die Investitions- und Betriebskosten für die Bereitstellung (Angebot) von Lawinenschutzleistungen als öffentliche Güter ins Zentrum rücken. In bestimmten Situationen kann auch eine Forderung (Nachfrage) nach möglichst wenig Sperrtagen bestehen, wobei dieser Aspekt im Vordergrund steht. Schliesslich wird oft nach Lawinenunfällen die Diskussion über zulässige Restrisiken entfacht, und dieser Aspekt kann sodann entscheidungsrelevant sein.

Im Kap. 1.3.2.1 ist das Vorgehen zur Optimierung unter Budgetbeschränkung beschrieben, wobei hier unvermeidlich die Diskussion auf andere Lebensbereiche (z.B. Gesundheit) ausgeweitet werden muss. Was in diesem Leitfaden speziell mit den Kosten zur Verhinderung eines statistischen Todesfalles fokussiert wird, steht z.B. im Gesundheitswesen mit sogenannten QUALYS aktuell zur Diskussion. QUALY bedeutet 'quality adjusted life year' und ist ein Faktor mit dem die Wirksamkeit einer therapeutischen Intervention angegeben wird. Neben

dem quantitativen Aspekt (Verlängerung des Lebens) wird bei der Berechnung der Wirksamkeit einer Therapie auch versucht den qualitativen Aspekt (Verbesserung der Lebensqualität) mit in die Berechnung einzubeziehen. In diesem Sinne kann dieser Leitfaden durch die Transparenz der Bewertung zu einer fairen Mittelverteilung beitragen, die die Bereitstellung von möglichst vielen öffentlichen Gütern und Leistungen umfasst.

Transparenz der Bewertung und Risikodialog für eine faire Mittelverteilung

Am Ziel der fairen Mittelverteilung leitet sich letztlich auch der Bedarf ab, technische und ökonomische Analysen auszuführen und Wechselwirkungen aufzuzeigen, um bereits im Planungsprozess Entscheidungsgrundlagen für ein ganzheitliches Risikomanagement bereitzustellen. Generell führt eine weitgehende Erfassung, Bewertung und Aggregation zu eindeutigen Ergebnissen im Planungsprozess, die aber eine Verengung des Bewertungsspielraumes im nachfolgenden Entscheidungsprozess bewirken und umgekehrt. Die hier erarbeiteten Entscheidungsgrundlagen sollen dem Risikodialog und schliesslich den politischen Entscheidungsträgern zur Verfügung stehen, sie können und sollen aber den politischen Prozess nicht ersetzen. Angestrebt wird dies mit der Transparenz der Risikobewertung auf zwei Stufen:

1.) Engeres Risikomanagement (technisch-ökonomische Optimierung im Planungsprozess)

- Risiken und Massnahmen werden mit dem Ziel der Gesamtkostenminimierung optimiert (Varianten)
- Das Minimum ist meist eine Kombination aus monetären Aufwendungen, Sperrtagen und Restrisiken
- Die explizite Bewertung erfolgt transparent mit Marktpreisen, Ersatzkosten und Grenzkosten

2.) Erweitertes Risikomanagement (ökonomisch-politische Bewertung im Entscheidungsprozess)

- Die Resultate des engeren Risikomanagements stehen dem Entscheidungsprozess zur Verfügung
- Ein Risikodialog soll verschiedene Interessen und alternative Bewertungsansätze einbeziehen
- Eine erneute Optimierung der Gesamtkosten mit Beurteilung der Sensitivität wird durchgeführt
- Die Grundlagen des erweiterten Risikomanagements erlauben es schliesslich dem Entscheidungsträger, die Auswirkungen seiner Gewichtung (Bewertung) abzuschätzen

Konkret heisst dies auch, dass dieser Leitfaden allein keinesfalls eine umfassende Abwägung von Schutzmassnahmen an Verkehrsachsen erlaubt. Werden jedoch die angewandten Grenzkosten zur Verhinderung von Todesfällen, die verbleibenden individuellen Restrisiken und die entscheidenden Bewertungsansätze für Sperrtage offengelegt, ist ein Beitrag in Richtung faire Mittelverteilung geleistet.

4 Anhang

4.1 Begriffe

Bedeutung	Bezeichnung	Dimension
Anzahl Durchfahrten der gefährdeten Strassenstrecke	z	1
Aversionsfaktor	δ	1
Baukosten (in Kap. 1 vereinfacht = Betriebskosten)	K_b	Fr./Jahr
Besetzungsgrad	β	Pers./Fz
Betriebskosten	K_B	Fr.
Durchschnittliche, max. Breite der Lawinenzüge im Strassenbereich	$g'_{\max}$	km
Durchschnittliche, mittlere Breite von Lawinen im Strassenbereich	g'	km
Durchschnittliche, sichere Strassenstrecken	s'	km
Durchschnittlicher täglicher Verkehr im Winter	DTV_w	Fz
Durchschnittskosten	K_d	Mio Fr./verh. Tf
Erwartete Anzahl Risikofälle c) pro Jahr	m	1
Fahrzeuggeschwindigkeit im Bereich des Lawinenzuges	v	km/h
Faktor zur Berücksichtigung der Zuglänge bei Bahnen	γ	1
Galerien	G	1
Gesamtkosten	K_g	Fr.
Grenzkosten	GK	Mio Fr./verh. Tf
Hangneigung (kritisch)	ψ_k	°
Individuelles Restrisiko nach getätigten Massnahmen	r_{j1}	1/Jahr
Individuelles Risiko der Person j im Ausgangszustand Z_o	r_{jo}	1/Jahr
Investitionskosten	I_o	Fr.
Jährliche Kosten	K_j	Fr./Jahr
Kapitalkosten	K_K	Fr.
Kosten-Wirksamkeit	KW	Mio Fr./verh. Tf
Künstliche Lawinenauslösung	kLA	1
Länge der beurteilten Verkehrsachse (System)	Q	km
Lawinenzüge $i = 1, 2, 3, \dots, n$	LZ_i	1
Letalität	λ	Tf/erf. Pers.
Massnahmekosten	K_m	Fr.
Maximale Breite des Lawinenzugs im Strassenbereich	$g_{\max}$	km
Mittlere Breite der Lawinen im Strassenbereich	g	km
Mittlere Länge von Bahnen (Zuglänge)	l_z	km
Bedeutung	Bezeichnung	Dimension

Mittlere Lawinenwahrscheinlichkeit in benachbarten LZ während Δt	p_L'	1
Mittlerer Fahrzeugabstand stehender Fahrzeuge	l_f	km/Fz
Mittleres Zeitintervall für einen Risikofall c)	Δt	h
Redundanz	Z	Tf/Jahr
Reibungskoeffizient (für Lawinauslaufberechnung)	μ	1
Reparaturkosten	K_r	Fr./Jahr
Restrisiko nach getätigten Massnahmen	R_1	z.B. Fr./Jahr
Restwert (Liquidationserlös am Ende des Wirkungszeitraumes)	L_n	Fr.
Risiko im Ausgangszustand	R_o	z.B. Fr./Jahr
Risikoverminderung	R_v	z.B. Fr./Jahr
Schadenausmass	S	Tf/Ereignis
Schadenausmassklassen	AK	1
Schadenkosten	K_s	Fr.
Schadenpotential	SP	Tf
Schadenwahrscheinlichkeit	p_s	1/Jahr
Sperreinheiten	s	Tg
Sperrtage	S	Tg
Sperrtage-Kosten-Vergleich	SKV	Mio. Fr./Tg
Sperrtagewirksamkeit	SW	Tg/verh. Tf
Stützwerkhöhe (lotrecht gemessen)	H_K	m
Todesfall	Tf	1
Unterhaltskosten	K_u	Fr./Jahr
Wiederkehrdauer der Lawine	T	Jahre
Wirksame Rost- bzw. Netzhöhe von Stützwerken	D_K	m
Wirkungszeitraum	n	Jahre
Zinssatz (Realzinssatz = Nominalzinssatz - Teuerung)	p	%/Jahr

4.2 Literatur

Lawinenschutz:

- BFF/EISLF 1984: Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Forstwesen, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, EDMZ Bern 1984.
- Brabec B., Gassner M., Lehning M., Russi T., Steiniger M., Stöckli U., Zimmerli M. 1998: Lawinenwarnung CH-2000. Konzept und Realisierung. Davos, November 1998.
- Burkard, A. 1990: Lawinenverhältnisse auf der SBB - Gotthard - Nordrampe (Sisikon - Göschenen). Gutachten G 90.01 des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung.
- EISLF 1998: Interpretationshilfe zum nationalen Lawinenbulletin des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung, Davos. 2. Überarb. Aufl. Mitt. Eidgenöss. Inst. Schnee- Lawinenforsch. 50: 32 S.
- Giebenhain, S. 1998: Kombination von Schutzmassnahmen. Ansätze zur Erfassung der wechselseitigen Beeinflussung von Schutzmassnahmen an Verkehrsachsen. Diplomarbeit, TU Darmstadt /SLF Davos.
- Gubler, H. 1983: Künstliche Auslösung von Lawinen durch Sprengungen. Mitt. Eidgenöss. Inst. Schnee- Lawinenforsch. Nr. 36.
- Gruber, U. 1998: Der Einsatz numerischer Simulationsmethoden in der Lawinengefahrenkartierung - Möglichkeiten und Grenzen. Diss. Universität Zürich.
- Issler D. 1999: Leitfaden für die Beurteilung der Staublawinengefahr in der Gefahrenzonenkartierung. Mitteilungen des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung Davos, (in Bearbeitung).
- Latenser, M., Lentner, S., Meier, R., Schneebeli, M., Utelli, H.-H., 1995: Dokumentation zur Schadenlawinen-Datenbank (SLDB). Institut für Schnee- und Lawinenforschung Davos, IB Nr. 690.
- Margreth, S. 1996: Experiences on the use and the effectiveness of permanent supporting structures in Switzerland. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Banff, Canada.
- Margreth, S. 1998: Bewährte und neue Erkenntnisse für die Ausarbeitung von Lawinengefahrenkarten. Bündner Wald 1/98, S.44-50.
- Norem, Harald 1994: Snow Engineering for Roads. In: Norwegian Public Roads Administration (edit.) Handbook Serial No. 174, ISBN 82-7207-353-6, Oslo.
- Salm, B., Burkard, A., Gubler, H. 1990: Berechnung von Fliesslawinen - Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. Mitteilungen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung Nr. 47.
- Schär, M. 1997: Verbindungsstrasse Mesocco - Deira, Lawinentechnisches Gutachten, Mesocco (GR). Gutachten G 97.09 des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung.
- Schärer, Peter 1989: The Avalanche-Hazard Index. Annals of Glaciology, 13 p. 241-247.
- Sommerhalder E. 1981: Grenzen im Lawinenschutz. Interner Bericht des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung Nr. 591.
- Stoffel, L. 1996: Künstliche Lawinenauslösung. Hinweise für den Praktiker. Mitt. Eidgenöss. Inst. Schnee- Lawinenforsch. 53.
- Troxler, Christoph; Günter, Rudolf; Bohnenblust, Hans 1989: Schutz vor Naturgefahren. In: Schweizer Ingenieur und Architekt, Sonderdruck aus Heft 39/1989.
- Wilhelm C. 1997: Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz - Methodik und Erhebungen zur Beurteilung von Schutzmassnahmen mittels quantitativer Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung. Mitteilungen des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung Davos Nr. 54.
- Wilhelm C. 1998: Quantitative risk analysis for evaluation of avalanche protection projects. In: Hestnes Erik (edit.) Proc. Int. Conf. for Snow Avalanche Research, NGI publication Nr. 203, p.288-293.

Weitere Literatur:

- Berg, M. et al. 1994: Was ist ein Schaden? Zur normativen Dimension des Schadensbegriffs in der Risikowissenschaft. Verlag der Fachvereine vdf an der ETH Zürich, ISBN 3 7281 2086 3.
- Berg, M., Erdmann, G., Leist, A., Renn, O., Schaber, P., Scheringer, M., Seiler, H.J., Wiedenmann, R. 1995: Risikobewertung im Energiebereich. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, ISBN 3 7281 2191 6.
- Borter, P., Bart, R., Egli, T., Gächter, M. 1999: Eine Methode zur Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. Umwelt-Materialien, Naturgefahren, Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft, BUWAL (in Bearbeitung).
- Bündner Wald 1998: Schnee und Lawinen. Aktuelle Beiträge zur Schnee und Lawinenforschung, 1/98.
- BUWAL 1992: Handbuch III zur Störfallverordnung StFV - Richtlinien für Verkehrswege. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Dezember 1992.
- Fritzsche, A. F. 1992: Wie gefährlich leben wir? Der Risikokatalog, Verlag TUEV Rheinland.
- Haller, M. 1992: Risikomanagement und Versicherung. In: Haller, M., Ackermann, W., (Hrsg.) 1992: Versicherungswirtschaft - kundenorientiert, Zürich 1992.
- Heinimann H.R. et al. 1998: Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85, Naturgefahren, Hrsg.: BUWAL, Bern. 248 S.
- Kanton, Uri 1992: Richtlinie für den Hochwasserschutz. Bauamt Uri, Abteilung Wasserbau, Altdorf.
- KATANOS 1995: Katastrophen und Notlagen in der Schweiz, KATANOS. Eine vergleichende Uebersicht bearbeitet durch Basler & Partner Zürich, Bundesamt für Zivilschutz.
- Merz H.A., Schneider T., Bohnenblust H. 1995: Bewertung von technischen Risiken - Beiträge zur Strukturierung und zum Stand der Kenntnisse - Modelle zur Bewertung von Todesfallrisiken. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1995, ISBN 3 7281 2178 9.
- Pommerehne, W. W. 1987: Präferenzen für öffentliche Güter. Mohr (Siebeck) Tübingen.
- Starr, C., Rudmen, R., Whipple, C., 1976: Philosophical Basis for Risk Analysis. In: Annual Review of Energy Vol. 1, p. 629 - 662.
- Stiefel, U., Schneider, J., 1985: Was kostet Sicherheit? In: Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 47/1985.
- Zangemeister, C. 1988: Grundzüge, Entwicklung und Stand der Bewertungsmethodik. In: Universität Zürich, ETH Zürich (Hrsg.) Mehrdimensionale Bewertungsverfahren und Umweltverträglichkeitsprüfung im Verkehr. IVT Bericht 70/1988.