



*Lawinenabgänge über Galerien auf der Gotthardautobahn bei Wassen; Foto Margreth SLF, 26.2.1999*

## **Mobilität und Naturgefahren**

### **Beiträge zu einem integralen Risikomanagement**

Christian Wilhelm, Michael Bründl, Bernhard Brabec, Stefan Margreth und Walter Ammann, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF Davos ([www.slf.ch](http://www.slf.ch))

**Conference paper STRC 2001**  
**Session Sustainability**

**STRC**

1<sup>st</sup> Swiss Transport Research Conference  
Monte Verità / Ascona, March 1.-3. 2001

# Mobilität und Naturgefahren

## Beiträge zu einem integralen Risikomanagement

Christian Wilhelm, Michael Bründl, Bernhard Brabec, Stefan Margreth und Walter Ammann  
Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung Davos

Flüelastr. 11

CH – 7270 Davos - Dorf

Phone: 081 417 02 58

Fax: 081 417 01 10

eMail: [wilhelm@slf.ch](mailto:wilhelm@slf.ch) (ab 1. 4. 2001: [christian.wilhelm@afw.gr.ch](mailto:christian.wilhelm@afw.gr.ch))

### Abstract

Der Lawinenwinter 1999, der Sturm Lothar und die verheerenden Überschwemmungen im Kanton Wallis im Herbst 2000 haben die Empfindlichkeit der Mobilität und der Verkehrsachsen im Speziellen gegenüber Naturgefahren aufgedeckt. Die Schweiz hat eine lange Tradition beim baulichen Schutz von Verkehrsachsen vor Naturgefahren. In jüngerer Zeit hat - dank den vielfältigen Modellen zur Simulation, Frühwarnung und Prognose von gefährlichen Prozessen - die temporäre Sperrung von Verkehrsachsen während Gefahrenzeiten an Bedeutung gewonnen.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Risikomanagement beim Schutz von Verkehrsachsen vor Naturgefahren mittels quantitativer Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung aufgezeigt. Dabei werden bauliche und organisatorische Massnahmen, wie temporäre Strassensperrungen, kombiniert. Ziel ist die Optimierung von Baukosten, Strassensperrungen und Restrisiken. Es lässt sich zeigen, dass dieses Sicherheitsoptimum bzw. die akzeptablen Restrisiken u.a. von der Verkehrsfrequenz abhängen. Mit der Erfassung und Anwendung von verschiedenen Bewertungsansätzen für die Risikoverminderung und die Sperrtage wird die Sensitivität des Modells transparent. Das oft geforderte ‚stake holder involvement‘ mit alternativen Bewertungsansätzen wäre somit gewährleistet.

Aus der Vielfalt von gefährlichen Prozessen werden in diesem Beitrag vielfach die Lawinen exemplarisch angesprochen und beim Management meist Schutzmassnahmen gegen Lawinen analysiert. Als Fallstudie dient hier die Flüelapassstrasse, die bis vor zwei Jahren von rund 1'000 Fahrzeugen pro Tag befahren wurde und im Mittel von 65 Lawinen pro Jahr betroffen war.

### Keywords

Natural hazard – risk management – economic valuation - optimisation

## 1. Einleitung

Im Katastrophenjahr 1999 waren allein auf Verkehrsachsen in der Schweiz mehr als 10 Todesfälle durch Lawinen und den Sturm Lothar zu beklagen. Im Oktober 2000 verursachten verheerende Unwetter mit Rutschungen und Murgängen grosse Schäden an Verkehrsinfrastrukturen mit enormen Folgewirkungen. Der Kanton Wallis war kurzzeitig von der Aussenwelt abgeschnitten. Die temporäre, vorsorgliche Sperrung von Hauptverkehrsachsen im Lawinenwinter 1999 hat zudem die generelle Verletzbarkeit heutiger Wirtschaftsaktivität und den hohen Anspruch an dauernd verfügbare Verkehrsverbindungen gezeigt. Die Gotthardautobahn war während einer Woche gesperrt und die Region Davos / Klosters mit rund 50'000 Einheimischen und Touristen während drei Tagen infolge sehr grosser Lawinengefahr von der Aussenwelt abgeschnitten. Was wäre passiert, wenn diese Situation zufälligerweise während des in Davos stattfindenden World Economic Forums eingetreten wäre? Die Wechselwirkungen zwischen Mobilität und Naturgefahren sind für ausgewählte Branchen wie z.B. den Tourismus von grosser wirtschaftlicher Bedeutung (Ammann 1998) und mit zunehmenden Risiken verbunden. Die Analyse des Lawinenwinters 1999 hat deutlich gemacht, dass diese schleichende Entwicklung bis anhin stark unterschätzt wurde (SLF 2000).

Der Schutz von Verkehrsverbindungen vor Naturgefahren mit baulichen und forstlichen Massnahmen hat eine lange Tradition in der Schweiz. Den grossen Erfolgen bei der Abwehr von Naturgefahren (Margreth et al. 2000) stehen heute auch die zunehmenden Kosten von Investitionen, Unterhalt und Landschaftsbeeinträchtigung gegenüber (Wilhelm 1997). Dies hat zur Folge, dass weitere Massnahmen wie die gezielte Sperrung von Verkehrsachsen in Gefahrensituationen immer bedeutender wird. Voraussetzung dazu sind Daten, Prognosemodelle und weitere Entscheidungsgrundlagen wie sie für den Lawinenschutz bereits weitgehend entwickelt sind (Russi et al. 1998). Gefordert ist nun ein umfassendes Risikomanagement für alle Naturgefahren, um Chancen, Risiken und Kosten zu optimieren. Dabei rücken Fragen zur Bewertung von Naturrisiken, zur Wahl von Schutzstrategien und zur Akzeptanz von Restrisiken ins Zentrum.

Im Kapitel 2 werden die Dynamik der Gefährdung und mögliche Schadensformen angesprochen sowie beispielhaft die Entwicklung von Lawinentodesfällen auf Verkehrsachsen analysiert. Entscheidungs- und bewertungstheoretische Grundlagen leiten sodann zur Erfassung von Systemgrenzen und Risiken in Kapitel 3 über. Die Optimierung der zwei grundlegenden Schutzstrategien nach Kosten- und Risikokriterien ist Inhalt von Kapitel 4 und 5.

## 2. Von Gefährdung und Schäden zu Entscheidung und Bewertung

### 2.1 Gefährdung und Schadensformen

Die Schäden auf Verkehrsachsen infolge Lawinen, Murgängen, Steinschlag und Hochwasser werden am Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos und an der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf seit Jahrzehnten erfasst und können betreffend der direkten Wirkungen für die Schweiz aufgezeigt werden. Die verschiedenen Naturgefahren haben sehr unterschiedliche Schadenarten zur Folge. Während z.B. bei Lawinen die Personentodesfälle im Vordergrund stehen, führen Hochwasser zu Verkehrsunterbrüchen und gesperrten Verkehrsachsen mit vielfältigen Folgewirkungen und indirekten Kosten. Grosse Schnee- und Regenfälle sowie extreme Temperatur- oder Windbedingungen können zudem über ein komplexes Wirkungsgefüge verschiedenste, gefährliche Prozesse auslösen. Die Wirkungsketten, *Schneefall* ® *Lawinen* ® *zerstörter Schutzwald* ® *Erosion* ® *Steinschlag* oder *rasche Schneeschmelze* ® *wassergesättigte Böden* ® *nachfolgende Starkniederschläge* ® *Rüfen* ® *Murgänge* sind Beispiele dieser komplexen Wechselwirkungen. Aber auch *Schneefall* ® *Wind* ® *Schneeverfrachtungen* oder *Schneeschmelze* ® *nasse Fahrbahn* ® *Eisglätte* widerspiegeln die Dynamik der Gefährdung von Verkehrsträgern in Alpenräumen.

Die möglichen Schäden auf Verkehrsachsen durch Naturgefahren betreffen die Bereiche Personen, Wirtschaftsaktivität und Sachwerte aber auch soziale Bereiche. Zur Erfassung von Schäden werden oft sogenannte Schadensindikatoren definiert. Diese können den volkswirtschaftlichen Gesamtschaden nie vollumfänglich abbilden und mit ihrer Auswahl sind implizit bereits wesentliche Bewertungen verbunden. Beispiele für Schadensindikatoren sind Todesfälle, verletzte und unterstützungsbedürftige Personen und im Bereich der Wirtschaftsaktivität z.B. die Zahl der Unterbrüche von Verkehrsachsen und deren Dauer. Bei den Sachwerten sind die physikalischen Grössen von zerstörten oder beschädigten Fahrzeugen, Kunstbauten, Fahrleitungen oder Fahrbahnen usw. eindeutig erfassbar wogegen indirekte Wirkungen in den sozialen Bereichen wie Angst, Unsicherheit, Versorgungsschwierigkeiten usw. schwierig zu erfassen sind. Für die eigentliche nachfolgende Bewertung der erfassten Schäden stehen eine Vielzahl von ökonomischen Bewertungsmethoden zur Verfügung (Pommerehne / Römer 1992), die sich bezüglich Aufwand, Praktikabilität und v.a. Validität beträchtlich unterscheiden. Eine besondere Herausforderung stellt diesbezüglich die Bewertung von Todesfallrisiken dar (Kapitel 5). Es muss darauf hingewiesen werden, dass mit Naturereignissen auch positive

Wirkungen verbunden sind. So konnten z.B. im Lawinenwinter 1999 zusätzliche Erträge für Schneeräumungsunternehmen oder teilweise Verlagerungen touristischer Aktivitäten in nicht gefährdete Regionen beobachtet werden (SLF 2000).

Von den quantifizierten Gesamtschäden des Lawinenwinters 1999 von rund 620 Mio Fr. fallen rund ein Drittel auf die Mobilität im engeren Sinne, d.h. rund 100 Mio Fr. für direkte Sachschäden an Verkehrsträgern und ebenfalls rund 100 Mio Fr. für indirekte Betriebsausfälle und Wertschöpfungsverluste bei Bergbahnen usw. (SLF 2000). Aufschlussreich ist eine Beurteilung der Schadenhöhe aber v.a. in Bezug auf die Grösse und damit auf die Seltenheit des gefährlichen Prozesses, d.h. dessen Wiederkehrdauer muss analysiert werden. Nur damit lassen sich Schlüsse zur Risikosituation und eventuelle Handlungsbedürfnisse ableiten.

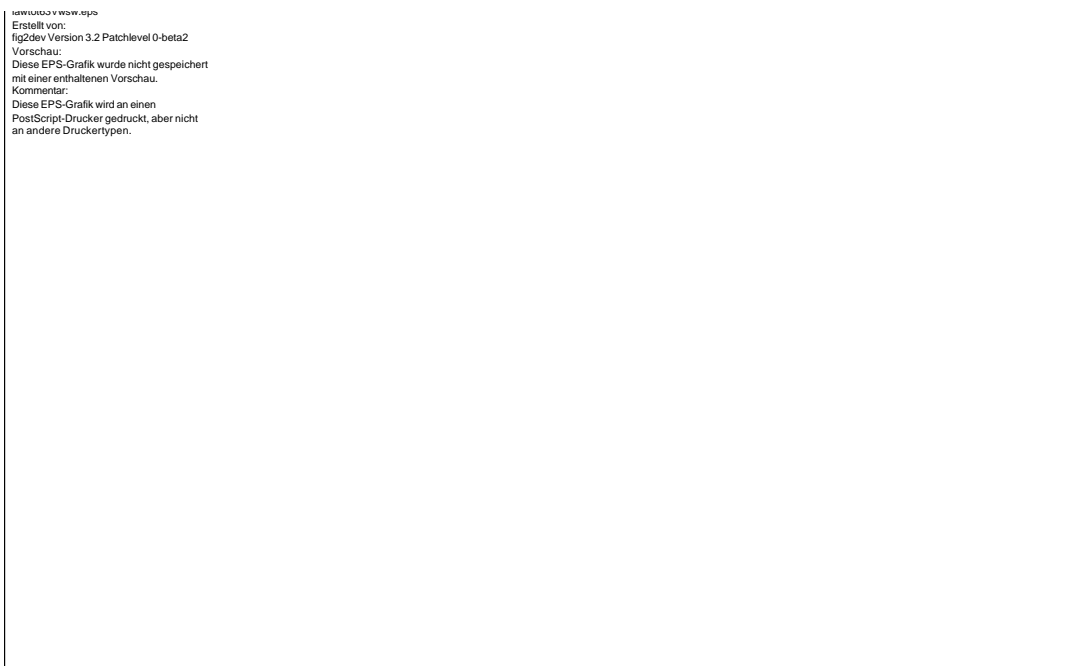
Die aufgetretenen Schäden können in längerfristiger Betrachtung als Ausdruck des gesellschaftlichen Umganges mit Naturgefahren im Sinne von ‚akzeptierten Restrisiken‘ interpretiert werden. Dabei ist aber unbedingt zu beachten, dass die Schadenentwicklung durch verschiedene Steuergrössen beeinflusst wird. Ursächlich ist die Überlagerung *der natürlichen Gefahrenräume* mit der *Raumnutzung* (hier Verkehrsentwicklung) die das Ausgangsrisiko (mögliches Potenzial für Schäden) bilden. Inwieweit dies zu Schäden führt wird längerfristig über Umfang und Wirkung der getroffenen *Schutzmassnahmen* gesteuert. Oft ist zu beobachten, dass unmittelbar nach grösseren Schadenereignissen Schutzmassnahmen getroffen werden, deren Umfang ein Ausdruck der gesellschaftlichen *Bewertung* von Schäden ist. Diesen retrospektiven ‚Schadenprozess‘ zu analysieren (vgl. Kapitel 2.2) und mit einem prospektiven Risikomanagement nach ökonomischen, ökologischen und sozialen Kriterien (vgl. Kapitel 4 und 5) zu ergänzen ist eine dauernde Herausforderung.

## 2.2 Entwicklung direkter Schäden

Um die Entwicklung der direkten Schäden zu beurteilen, werden hier beispielhaft die Todesfälle infolge Lawinen auf Verkehrsachsen analysiert (Abbildung 1). Gemäss den Erhebungen von Tschirky et al. 2000 sind zwischen 1937 und 1999 pro Jahr durchschnittlich knapp 5 Personen in Lawinen auf Verkehrswegen gestorben. Verkehrswege umfassen allerdings auch markierte Skipisten, so dass die Zahl der Todesfälle auf effektiven Verkehrsachsen noch geringer wäre. Seit Ende der 60-er Jahren ist ein signifikanter, rückläufiger Trend festzustellen. Zwischen 1980 und 1999 betrug der Durchschnitt der Lawinentoten auf Verkehrswegen pro Jahr noch rund 3 Personen. Auch der prozentuale Anteil der Lawinentoten auf Verkehrswegen

an den Lawinentoten insgesamt ist signifikant rückläufig. Über 63 Jahre betrug dieser Anteil rund 19%. Im Zeitraum von 1980 bis 1999 betrug er jedoch nur noch rund 12 %.

Abbildung 1: Entwicklung der Anzahl Lawinentote auf Verkehrswegen in der Schweiz 1937 – 1999 (Tschirky et al. 2000).



Zur Analyse des festgestellten Trends müssen die oben erwähnten Steuerungsgrößen für Schäden einzeln und in ihrem Zusammenwirken beurteilt werden. Bei der natürlichen d.h. unbeeinflussten Lawinenaktivität sind uns im betrachteten Zeitraum keine Trends bekannt (Schneebeili et al. 1998), was aber bei möglichen Klimaänderungen zukünftig dauernd verfolgt werden muss. Hingegen ist die Zunahme bei den für Lawinenrisiken massgebenden Verkehrsfrequenzen zwischen 1970 und 2000 mit rund 50 % sehr gross. Demgegenüber wirken die Schutzmassnahmen risikomindernd. In diesem Zeitraum wurde der Grossteil der Galerien und Stützverbauungen erstellt und zur Verbesserung der Qualität der organisatorischen Massnahmen werden v.a. in jüngerer Zeit zunehmend EDV-basierte Hilfsmittel zur Verfügung gestellt (Kapitel 4.2). Schliesslich kann aus den zunehmenden Aufwendungen für Lawinenschutz im besagten Zeitraum auch auf eine höhere gesellschaftliche Zahlungsbereitschaft (Bewertung) zur Verhinderung von Todesfällen geschlossen werden. Insgesamt dürften die getroffenen Schutzmassnahmen für den positiven d.h. abnehmenden Schadentrend massgebend sein.

Bei den indirekten Schäden für die Wirtschaftsaktivität aus gesperrten oder unterbrochenen Verkehrsachsen dürfte eher ein zunehmender Trend vermutet werden. Als Gründe könnten der zunehmende Verkehr, die Empfindlichkeit der Wirtschaftsbranche Tourismus auf Unterbrüche

von Verkehrsachsen, der hohe Anspruch an dauernd verfügbare Infrastrukturen und somit die geringe Akzeptanz bzw. die hohe Bewertung von Sperrtagen angeführt werden. Beispielhaft für die Empfindlichkeit der Tourismusbranche zeigt Nöthiger (2000) die direkten und indirekten Schäden der Gemeinde Elm im Kanton Glarus während des Lawinenwinters 1999. Der überwiegende Teil der indirekten Schäden für die Elmer Wirtschaft ist dabei auf die zehntägige Strassensperrung zurückzuführen.

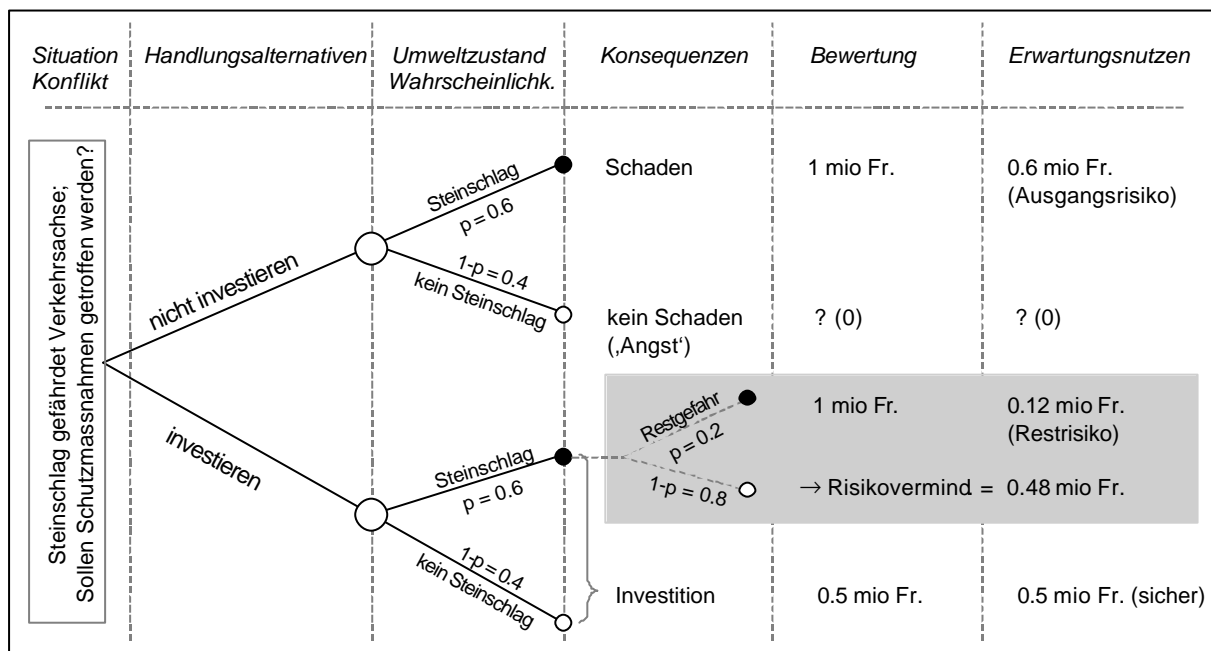
## 2.3 Entscheidung und Bewertung

Die Problemstellung Naturgefahren – Verkehrsachsen und die damit verbundene Frage nach Schutzmassnahmen wird hier im Sinne einer Auslegeordnung aus entscheidungs- und bewertungstheoretischer Sicht strukturiert, um die wesentlichen Arbeitsschritte und deren wissenschaftliche Fundierung kurz anzusprechen (Abbildung 2). Gefährdet Steinschlag eine Verkehrsachse, so führt dieser Konflikt zur Frage nach Schutzmassnahmen. Dabei bieten sich immer verschiedene Handlungsalternativen an, die hier vereinfacht mit ‚investieren‘ und ‚nicht investieren‘ abgebildet sind. Kombiniert mit den Umweltzuständen ‚Steinschlag‘ oder ‚kein Steinschlag‘, die ihrerseits mit Wahrscheinlichkeiten  $p$  oder  $1-p$  verbunden sind, ergeben sich verschiedene, mögliche Konsequenzen. In Abbildung 2 wird vorerst davon ausgegangen, dass dauernd Fahrzeuge präsent sind und jeder Steinschlag zu einem gleichhohen Schaden führt. Bei einer Investitionsentscheidung steht somit eine *sichere* Investition den *möglichen* Schäden gegenüber, falls nicht investiert wird.

Die Methoden zur Bewertung der vielfältigen Konsequenzen wie Schäden, Angst und Investitionen basieren auf wohlfahrtsökonomischen und verhaltenswissenschaftlichen Überlegungen und sie sind der Mikroökonomie zuzuordnen. Der Übergang von der Erfassung möglicher Schäden als physikalische Grösse (Entscheidung unter Unsicherheit) zu deren Bewertung mit einer Nutzenfunktion (Entscheidung unter Risiko) ist bedeutend und führt zu den bekannten Fragen der Erwartungsnutzentheorie. Kann die Multiplikation der Wahrscheinlichkeit in Abbildung 2 von  $p = 0.6$  mit dem bewerteten Schaden (unter Sicherheit) von 1 mio Fr. zum Ausgangsrisiko von 0.6 mio Fr. vorbehaltlos in Risiko- und Wirtschaftlichkeitsüberlegungen einbezogen werden? Spätestens wenn dieses Ausgangsrisiko mit Schutzmassnahmen eliminiert und als Risikoverminderung im Sinne eines Erwartungsnutzens den sicheren Investitionen der Schutzmassnahme gegenübergestellt wird, müsste auch die Risikoeinstellung des Entscheidungsträgers analysiert werden. Tätigt er eine Investition von 0.5 mio Fr. um die mit dem Erwartungsnutzenkonzept berechnete Risikoverminderung von 0.6 mio Fr. zu erreichen, ist seine Risikoeinstellung ungefähr neutral (Abbildung 2). Abweichende Entscheidungen

sind nicht a priori als irrational zu bezeichnen, sondern lassen auf eine risikoaverse oder risikoliebende Risikoeinstellung schliessen und sind Forschungsgegenstand subjektiver Erwartungsnutzenkonzepte der jüngeren Vergangenheit. Das Beispiel in Abbildung 2 lässt sich weitergehend differenzieren, wenn z.B. angenommen wird, dass die Massnahme nur zu 80 % wirkt und somit ein Restrisiko von  $0.6 \cdot 0.2 \cdot 1 \text{ mio Fr.} = 0.12 \text{ mio Fr.}$  bestehen bleibt.

Abbildung 2: Strukturierung eines Steinschlagschutzproblems entlang einer Verkehrsachse aus entscheidungs- und bewertungstheoretischer Sicht



### 3. Wechselwirkungen und Risikoerfassung

#### 3.1 Systemgrenzen und Risikooptimierung

Entscheidend für Definition, Erfassung und Umgang mit Risiken ist die Systemabgrenzung. Die enge naturgefahren-orientierte Abgrenzung wird im Folgenden auf eine verkehrsnutzungs-orientierte Systemabgrenzung ausgeweitet. Die erste umfasst das Lawinenrisiko im Sinne der erwarteten direkten Schäden, die monetären Kosten für Schutzmassnahmen und die technische Wirksamkeit der Massnahmen bezüglich Risikoverminderungen (Kapitel 4.1). Dieses Risikomanagement im engeren technischen Sinne, kann durch Öffnung des Fokus auf eine verkehrsnutzungs-orientierte Systemabgrenzung um ökonomische und politische Krite-



en erweitert werden (Risikomanagement im weiteren Sinne). Anschaulich dazu sind die Folgen einer temporären Strassensperrung (Kapitel 4.2), die neben der beabsichtigten Lawinenrisikoverminderung ebenfalls die mit der Verkehrsachse verfolgten Ziele der Nutzenseite beeinträchtigen und somit neue Risiken generieren. Zu erwähnen sind v.a. die Mobilitäts- und Umsatzziele der Tourismusbranche mit den entsprechenden Markt- und Absatzrisiken.

Tabelle 1: Beurteilungskriterien der naturgefahren- und verkehrsnutzungsorientierten Systemabgrenzung für ein Risikomanagement im weiteren Sinne (Wilhelm 1997)

<i>Beurteilungskriterien</i>	<i>Systemabgrenzung</i>	
	<i>naturgefahren orientiert</i>	<i>verkehrsnutzungsorientiert</i>
<i>Störungsquelle</i>	Lawinen	Temporäre Strassensperrungen
<i>Störungsobjekt</i>	Personen, Infrastruktur	z.B. Tourismusbranche
<i>Beeinträchtigte Ziele</i>	Sicherheitsziele	Mobilitäts- und Umsatzziele
<i>Risiken</i>	Todesfallrisiken	Markt- und Absatzrisiken, Imageverluste
<i>Massnahmen</i>	Kostenseite	Nutzenseite
<i>Wirksamkeit</i>	Verminderung des Lawinenrisikos	Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit
<i>Umwelt</i>	Evtl. lokale Landschaftsbeeinträcht.	Überregionale negative externe Effekte

Werden die Wirkungen einer Verkehrsachse vereinfacht mit den gesamtgesellschaftlichen oder sozialen Nutzen  $N$  und Kosten  $K$  erfasst so kann generell eine Maximierung der Differenz gemäss  $N - K \rightarrow \text{maximal}$  zum Ziel gesetzt werden. Die Kosten  $K$  können vorliegend in direkte Kosten  $K_d$ , externe Kosten  $K_e$  und weitere Kostenbestandteile  $K_w$  wie z.B. die Schadenkosten  $K_s$  aus Naturrisiken unterteilt werden und es soll maximiert werden gemäss:

$$N - (K_d + K_e + K_w + \dots) - K_s \rightarrow \text{maximal} \quad (\text{Nettonutzenmaximierung}) \quad (1)$$

Die Schadenkosten aus Naturrisiken  $K_s$  lassen sich mit Schutzmassnahmen d.h. Massnahmenkosten  $K_m$  bis auf die Schadenkosten der Restrisiken  $K_{sr}$  vermindern. Optimal wird diese Risikoverminderung dort, wo die Grenzkosten der Schutzmassnahmen den Grenznutzen der Risikoverminderung entsprechen, d.h. Kostenminimierung (vgl. Abbildung 10) gemäss:

$$K_m + K_{sr} \rightarrow \text{minimal} \quad (\text{Kostenminimierung}) \quad (2)$$

Das ganze System ist somit optimiert unter den Bedingungen von Gl. 1 und 2 mit:

$$N - (K_d + K_e + K_w + \dots) - (K_m + K_{sr}) \rightarrow \text{optimal} \quad (\text{Risikooptimierung}) \quad (3)$$

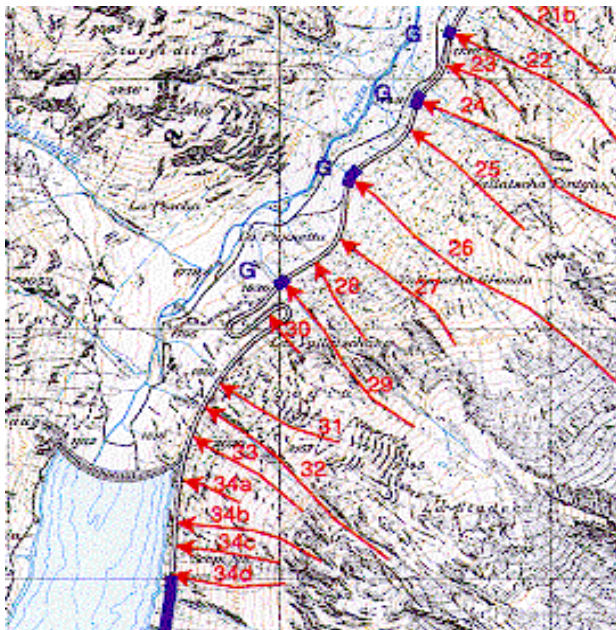
Diese Optimierung ist vorerst Inhalt des engeren Risikomanagements mit vorwiegend baulichen Schutzmassnahmen. Der sich ergebende Restrisikozustand im Optimum ist abhängig von der gesellschaftlichen Zahlungsbereitschaft für Risikoverminderung z.B. in Fr. pro verhinderten Todesfall.

Mit der temporären Sperrung von Verkehrsachsen sind alle Nutzen- und Kostenaspekte in Gleichung 3 betroffen. Das bereits erwähnte Risikomanagement im weiteren Sinne muss also zusätzlich die gesellschaftliche Zahlungsbereitschaft zur Akzeptanz bzw. Verminderung von Sperrtagen miteinbeziehen.

Damit wird ersichtlich, dass die *akzeptablen Restrisiken* aus gesellschaftlicher Sicht von der Zahlungsbereitschaft zur Risikoverminderung, den Gesamtnutzen des betreffenden Verkehrssystems und der Akzeptanz von Sperrtagen abhängen. Auf einem bestimmten Level der Mobilität ist somit eine davon abhängige optimale (nicht maximale) Sicherheit vor Naturgefahren mit dazugehörigem Restrisiko anzustreben.

### 3.2 Ausgangszustand und Risikoerfassung

Abbildung 3: Lawinenzüge am Lukmanierpass



Im Folgenden wird die räumliche Verteilung und das zeitliche Auftreten von Lawinenrisiken und dessen Erfassung mit einem einfachen Modell angesprochen. Die Abfolge von Lawinenzügen entlang von Passstrassen kann derart dicht sein, dass von der gesamten Strecke bis zur Hälfte ihrer Länge gefährdet ist (vgl. Abbildung 3). Dem Tiefbauamt des Kantons Graubünden sind etwa 450 Gefahrenstellen bekannt, wo Strassen durch Lawinen, Rufen, Steinschlag und Rutschungen permanent gefährdet sind (Dicht 2000). Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt vom Lukmanierpass, wo einzelne der rund neunzig Lawinenzüge mit Galerien G abgesichert sind, andere die Strasse gleich mehrmals gefährden. Sehr entscheidend für die Letalität von Personen in Fahrzeugen ist zudem die Topographie berg- und talseits der Strasse (z.B. Absturzgefahr). Eine Auswer-

zele der rund neunzig Lawinenzüge mit Galerien G abgesichert sind, andere die Strasse gleich mehrmals gefährden. Sehr entscheidend für die Letalität von Personen in Fahrzeugen ist zudem die Topographie berg- und talseits der Strasse (z.B. Absturzgefahr). Eine Auswer-

tung der Lawinenschadendaten des SLF mit Personen in Fahrzeugen ergibt eine mittlere Letalität von 18% (Wilhelm 1997). Im Vergleich dazu beträgt die Letalität für alle von Lawinen erfassten Personen weniger als 13 % bzw. für alle ganzverschütteten Personen rund 50% (Tschirky et al. 2000).

Lawinenrisiken – erfasst als zeitliche Überlagerung von gefährlichen Prozessen und Verkehr - variieren in ihrem Ausmass sehr stark und würden so nur in einem unbeeinflussten Ausgangszustand ohne Massnahmen auftreten (Abbildung 4). Zum einen variieren die zeitbezogenen relativen Häufigkeiten gefährlicher Naturprozesse sehr stark (Kapitel 4.2) und sind z.T. nur mit grossen Unsicherheiten abschätzbar, zum andern können kurzzeitig in Gefahrenbereichen z.B. bei Bahnstrecken oder Strassen mit Verkehrsstau sehr viele Personen präsent sein. Extreme Risikospitzen dürften somit sehr kurzzeitig (ähnlich den Störfällen bei technischen Risiken) bis 1'000 mal höher sein als der Mittelwert des Risikos bei Normalbetrieb. Die Verminderung von letzterem ist eher Ziel der baulichen Massnahmen, während die Elimination von Risikospitzen mit effektiven organisatorischen Massnahmen angestrebt wird.

Abbildung 4: Schematisches Beispiel der zeitlichen Entwicklung von Lawinenrisiken

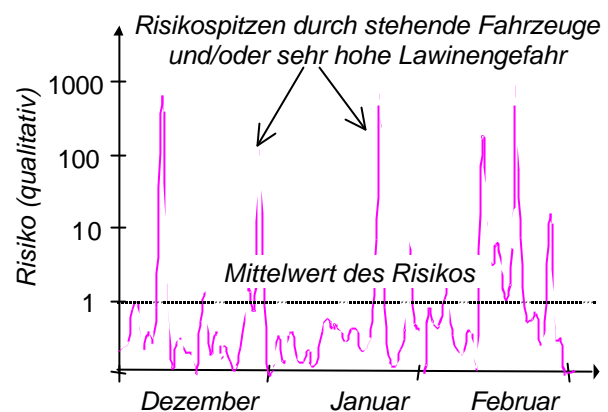
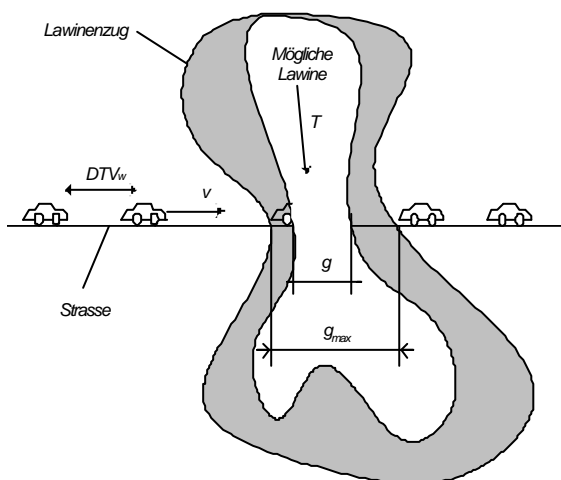


Abbildung 5: Modell zur Risikoerfassung



Ein einfaches, aber auf verschiedene Naturprozesse anpassbares Modell, zur Erfassung von Todesfallrisiken auf Verkehrsachsen zeigt Abbildung 5 (Wilhelm 1999). Massgebend sind die Lawinenwiederkehrdauer  $T$ , der durchschnittliche tägliche Verkehr im Winter  $DTV_w$ , die mittlere Breite von Lawinen im Strassenbereich  $g$  und die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$ . Ebenfalls einbezogen werden statistische Mittelwerte zum Besetzungsgrad der Fahrzeuge und zur Letalität, sowie empirisch erfasste Faktoren zur Berücksichtigung der Aversion. Das Modell kann beliebig verfeinert werden, indem die Entwicklungen von Verkehrsaufkommen und Gefahr differenziert erfasst werden.

## 4. Die zwei grundlegenden Schutzstrategien

Beim Risikomanagement betreffend Naturgefahren auf Verkehrsachsen sind bauliche und organisatorische Massnahmen optimal aufeinander abzustimmen (Kapitel 5). Voraussetzung dazu ist jedoch vorerst, die Wirkung der einzelnen Massnahmen auf die Risikoverminderung separat zu erfassen (Kapitel 4.1 und 4.2).

### 4.1 Schutz mit baulichen Massnahmen

Bauliche Lawinenschutzmassnahmen an Verkehrsachsen verfolgen das Ziel, Menschen und Sachwerte langfristig vor Lawineneinwirkungen zu schützen und eine weitgehende Erreichbarkeit von bewohnten Siedlungen bzw. Passierbarkeit von wichtigen Transitachsen zu gewährleisten. Im Vergleich zu den organisatorischen Massnahmen, die auf die Beurteilung der aktuellen Lawinensituation abzielen, werden die baulichen Massnahmen auf extreme Ereignisse mit Wiederkehrdauern von typischerweise 100 Jahren ausgelegt. Der grosse Vorteil der baulichen Massnahmen liegt darin, dass die Unsicherheit bei der Beurteilung der Restgefährdung im Vergleich zu temporären, organisatorischen Sicherungsmassnahmen bedeutend kleiner ist. Bei sehr weitgehender Sicherung mit baulichen Massnahmen sind praktisch keine Sperrungen mehr notwendig, was jedoch meist auch mit hohen Kosten verbunden ist (Abbildung 6). Deshalb werden bauliche Massnahmen dort realisiert, wo Lawinen sehr häufig auftreten und der zu schützende Verkehrsträger von grosser Bedeutung ist.

#### 4.1.1 Ausgestaltung und Wirkung bewährter Massnahmen

*Lawinengalerien* werden im Verkehrsachsenschutz am häufigsten verwendet. Lawinen oder andere gefährliche Prozesse werden über den durch die Galerie geschützten Verkehrsträger hinweggeleitet oder sie lagern sich auf dem Dach ab, ohne den Verkehr zu beeinträchtigen. Die Gefahr wird praktisch eliminiert. Eine Galerie wird primär durch das Gewicht der natürlichen Schneedecke oder Lawinenablagerungen sowie durch die Belastung der fliessenden Schneemassen beansprucht. Die Berechnungen zur Bestimmung der Einwirkungen gemäss geltenden Richtlinien (Literatur) weisen grosse Unsicherheiten auf. Die für die Dimensionierung von Galerien sehr bedeutenden Horizontalkräfte können z.B. nur mit auf Erfahrung beruhenden Näherungsformeln grob abgeschätzt werden. Neben der fachgerechten Bestimmung der Lawineneinwirkungen ist die Festlegung der Galerielänge von grosser Bedeutung. Oft wird die Galerielänge auf die Breite des Fliessanteils einer Lawine ausgelegt und der breitere

Staubanteil als Restgefährdung akzeptiert (vgl.  $g_{\max}$  in Abbildung 5). Mit Leitdämmen über den Portalbereichen kann die Länge einer Galerie oft reduziert werden (vgl. Foto auf Titelblatt). Wenn das Gelände unterhalb der Verkehrsachse nicht über eine längere Strecke steil abfällt, ist die Galerie talseitig zu schliessen, um ein Zurückfliessen von Lawinenschnee zu verhindern. Die Kosten für eine einspurige Galerie betragen rund 20'000 Fr. pro Laufmeter. Die Unterhalts- und Betriebskosten von Lawinengalerien können insbesondere bei grossen Längen und geschlossenen Querschnitten recht hoch sein.

*Stützverbauungen* werden im Anrissgebiet von Lawinen erstellt. Die starren Stahl- oder flexiblen Drahtseilkonstruktionen stützen die Schneedecke ab, so dass Lawinenanbrüche verhindert werden können. Kleine Rutsche, die nie völlig auszuschliessen sind, werden von den Stützwerken abgebremst und aufgefangen. In Kombination mit Aufforstungen werden auch temporäre Stützwerke aus Holz eingesetzt. Gemäss „Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet“ (BUWAL/WSL 1990) werden Stützverbauungen auf 100-jährliche Schneehöhen ausgelegt. Lange, geschlossene horizontale Reihen mit einem hangparallelen Abstand von rund 20 bis 30 m haben sich bewährt. Für die Dimensionierung ist der Druck infolge des Kriechens und Gleitens der Schneedecke massgebend. Bei einer Werkhöhe von 3.0 m betragen die Kosten rund 0.8 Mio Fr. pro verbauter Hektare.

Mit *Ablenkdämmen* aus Erdmaterial oder Beton werden Lawinen vom zu schützenden Verkehrsträger weggelenkt. In Ablenkrichtung erhöht sich jedoch die Gefährdung. Die oft ungenügenden Platzverhältnisse lassen zudem einen Einsatz selten zu. Mit *Auffangdämmen* wird eine abstürzende Lawine abgebremst und aufgefangen. Wesentlich sind Lage, Höhe und Anpassung der Dämme in der umgebenden Topographie und bezüglich der zu erwartenden Lawinengeschwindigkeiten und Fliesshöhen. Bei grossen Lawinengeschwindigkeiten werden oft Dammhöhen von mehr als 20 Meter notwendig. Auffangdämme müssen einen genügenden Stauraum aufweisen, damit der in einem Winter abstürzende Lawinenschnee vollständig aufgenommen werden kann. Der Unterhalt von Ablenk- und Auffangdämmen ist nicht aufwändig, aber es ist eine dauernde Überprüfung während Lawinenperioden erforderlich.

#### **4.1.2 Geländetypologie und Restgefahren**

Um mögliche Massnahmen zum Schutze eines Verkehrsträgers zu eruieren, sind neben den Kosten insbesondere die Topographie (Geländeprofile und -form) und die Lawinensituation (Lawinenkataster, vorherrschender Lawinentyp, Schneesituation, Modellrechnungen) im Detail zu analysieren. Die Geländebedingungen sind oft massgebend für die Kosten von

Schutzmassnahmen. Mündet ein grosses Anrissgebiet in eine enge Sturzbahn mit geringer Breite im Bereich des zu schützenden Verkehrsträgers ist eine Galerie meist günstiger als ein Stützverbau. Ist hingegen die Sturzbahn flächenhaft ausgebildet, die Höhendifferenz im Anrissgebiet klein und kann die Lawine auf grosser Breite anbrechen, so steht ein Stützverbau im Vordergrund. Ein Stützverbau kann auch eine interessante Variante darstellen, wenn mehrere Verkehrsträger oder andere Objekte flächenhaft geschützt werden müssen. Auffangdämme kommen dann zum Einsatz, wenn vor dem Verkehrsträger das Gelände über eine grössere Distanz flach ist und für den Dammquerschnitt ein genügender Freiraum besteht.

Die Restgefahren aus Stützverbauungen bestehen darin, dass die Schneedecke die Stützwerke überragt und eine Lawine über den Stützwerken anbricht oder dass eine Lawine zwischen den Werkreihen anbricht und aus der Verbauung herausfließt. Befindet sich der zu schützende Verkehrsträger in steilem Gelände, so kann die Gefahr von Strassenverschüttungen reduziert werden, in dem die Werkabstände verkleinert und die untersten Werkreihen als eigentliche Auffangwerke mit einer dichten Stützfläche ausgebildet werden. Günstig wirkt sich eine flache Auslaufstrecke bergseits der Verkehrsachse aus. Aus steilem Gelände hingegen können bereits kleine Rutsche Fahrzeuge gefährden.

### 4.1.3 Kosten und Risikoverminderung

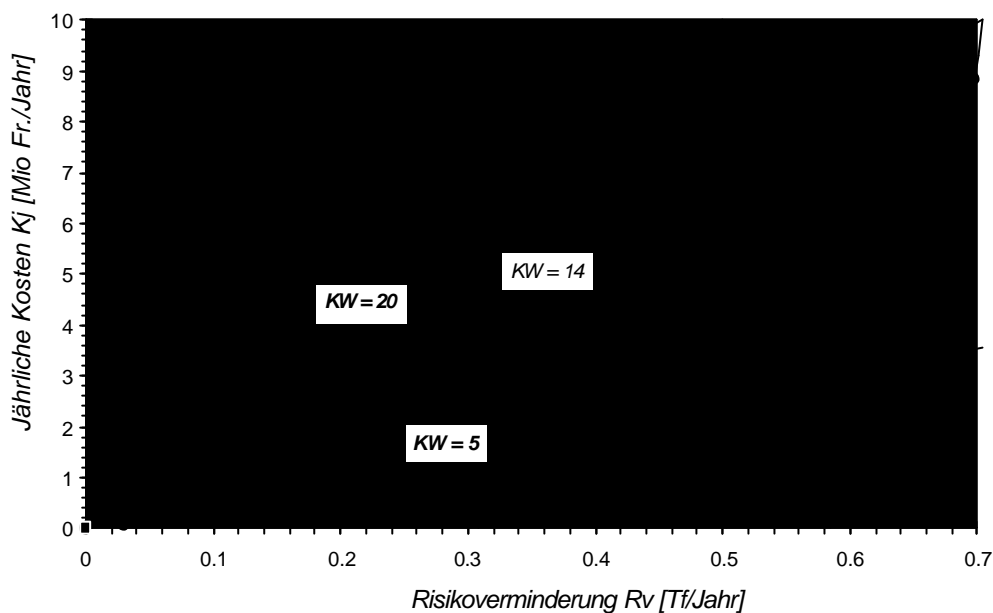
Eine fortgesetzte Risikoverminderung mit ausschliesslich baulichen Massnahmen hat exponentiell ansteigende Kosten zur Folge. Abbildung 6 zeigt diesen Sachverhalt für den Flüelapass wobei das gesamte Risiko im Ausgangszustand von 0,7 Todesfällen pro Jahr mit Galerien in den 47 Lawinenzügen vermindert wird.<sup>1</sup> Die Reihenfolge der auszuführenden Galerien (schwarze Punkte in Abbildung 6) orientiert sich an der Kostenwirksamkeit KW d.h. am Verhältnis der Kosten und damit erzielter Risikoverminderung pro Galerie. Damit wird bei jährlichen Kosten von 10 Mio Fr. eine vollständige Risikoverminderung  $R_v = 0.7 \text{ Tf/Jahr}$  erreicht, was einer mittleren Kostenwirksamkeit des ganzen Systems (oder Durchschnittskosten) von  $KW \approx 14 \text{ Mio Fr./verhindertem Todesfall}$  ergibt (10/0.7).

---

<sup>1</sup> Die quantitativen Ergebnisse, dargestellt in Abbildung 6, Abbildung 7 und Abbildung 10, betreffen alle das Risikosystem Flüelapass. Diese Passstrasse von Davos ins Engadin war bis vor zwei Jahren auch im Winter geöffnet und wies einen durchschnittlichen täglichen Verkehr im Winter von 1'000 Fahrzeugen auf..

Die exponentielle Kostenfunktion (oder kostenminimale Risikoverminderungslinie) kann an beliebiger Stelle nach den Grenzkosten GK abgeleitet werden. Bei Grenzkosten von 20 Mio Fr./verhinderten Todesfall würden demzufolge 23 und bei  $GK = 5$  Mio Fr./verhinderten Todesfall noch 5 Galerien zur Ausführung empfohlen (Abbildung 6).

Abbildung 6: Kosten von baulichen Massnahmen in Funktion der Risikoverminderung am Beispiel der Flüelapassstrasse (Wilhelm 1999)



## 4.2 Schutz mit organisatorischen Massnahmen

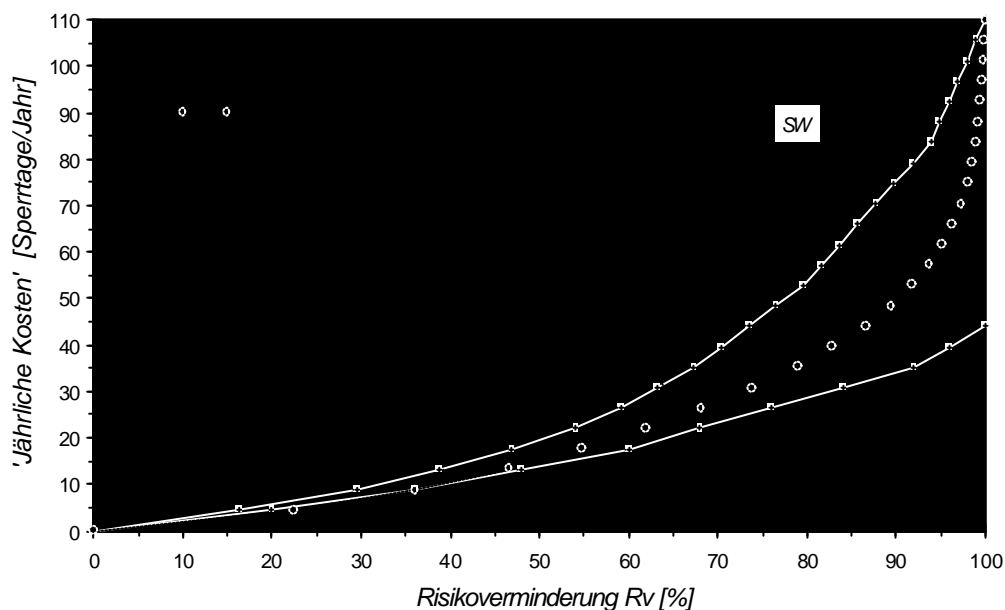
Als Beispiel einer organisatorischen Massnahme soll im folgenden die präventive, temporäre Sperrung von Verkehrsachsen in Gefahrensituationen genauer analysiert werden. Diese Massnahme zur Risikoverminderung ist a priori mit den negativen Wirkungen der Sperrzeit verbunden, was als Kosten interpretiert und bewertet werden muss (Kapitel 5). Dazu ist vorerst die Wirkung der Strassensperrung auf die Risikoverminderung zu erfassen.

### 4.2.1 Strassensperrung und Risikoverminderung

Analog den baulichen Massnahmen kann ein Risiko im Ausgangszustand auch separat mit Strassensperrungen vermindert werden. In Abbildung 7 ist die zu erwartende Risikoverminderung in Funktion der Sperrtage – erfasst gemäss Wilhelm (1999) – aufgetragen. Um eine praktisch vollumfängliche Risikoverminderung, analog einem Vollverbau mit Galerien, zu er-

halten, wären demzufolge am Flüelapass S=110 Sperrtage pro Winter erforderlich. Diese wurden fiktiv in 25 Sperreinheiten à 4.4 Tage ( $25 \cdot 4.4 = 110$ ) im Sinne von abgrenzbaren Einzelmassnahmen aufgeteilt und bezüglich Wirksamkeit gereiht (vgl. die schwarzen rechteckigen Punkte auf der sperrtage-minimalen Risikoverminderungslinie in Abbildung 7). Es zeigt sich, dass die drei sperrtage-wirksamsten Einheiten allein beinahe 50 % des Ausgangsrisikos  $R_0 = 0.7$  Todesfälle pro Jahr vermindern. Die mittlere Sperrtagewirksamkeit SW ergibt sich mit rund 156 Sperrtagen pro verhinderten Todesfall ( $110/0.7$ ). Da die Risikoverminderung mit Strassensperrung nur mit grossen Unsicherheiten abgeschätzt werden kann, ist ebenfalls die mit zunehmender Risikoverminderung grösser werdende Streuung aufgetragen.

Abbildung 7: Sperrtage (‚jährliche Kosten‘) in Funktion der Risikoverminderung am Beispiel der Flüelapassstrasse (Wilhelm 1999). Es wird angenommen, dass die sperrtage-minimale Risikoverminderungslinie der 100 % - Risikoverminderung asymptotisch annähert



Eine rückwärtige Auswertung der Lawinenabgänge zwischen 1986-1995 hat gezeigt, dass theoretisch mit Sperreinheiten von einem Tag Länge durchschnittlich nur 25 Tage pro Winter erforderlich gewesen wären, um alle Lawinenabgänge abzudecken bzw. das gesamte Risiko zu vermindern. Die Auswertung des tatsächlich angewandten Schutzkonzeptes (Strassensperrung inkl. künstliche Lawinenauslösung) im gleichen Zeitraum zeigt, dass mit 25 Sperrtagen pro Winter noch ein Restrisiko von rund 20% verblieben ist. Die im folgenden Kapitel 4.2.2 beschriebenen Entscheidungshilfen haben zum Ziel, die Sperrtagefunktion derart zu verbessern, dass mit immer weniger Sperrtagen noch grössere Risikoverminderungen erreicht werden.

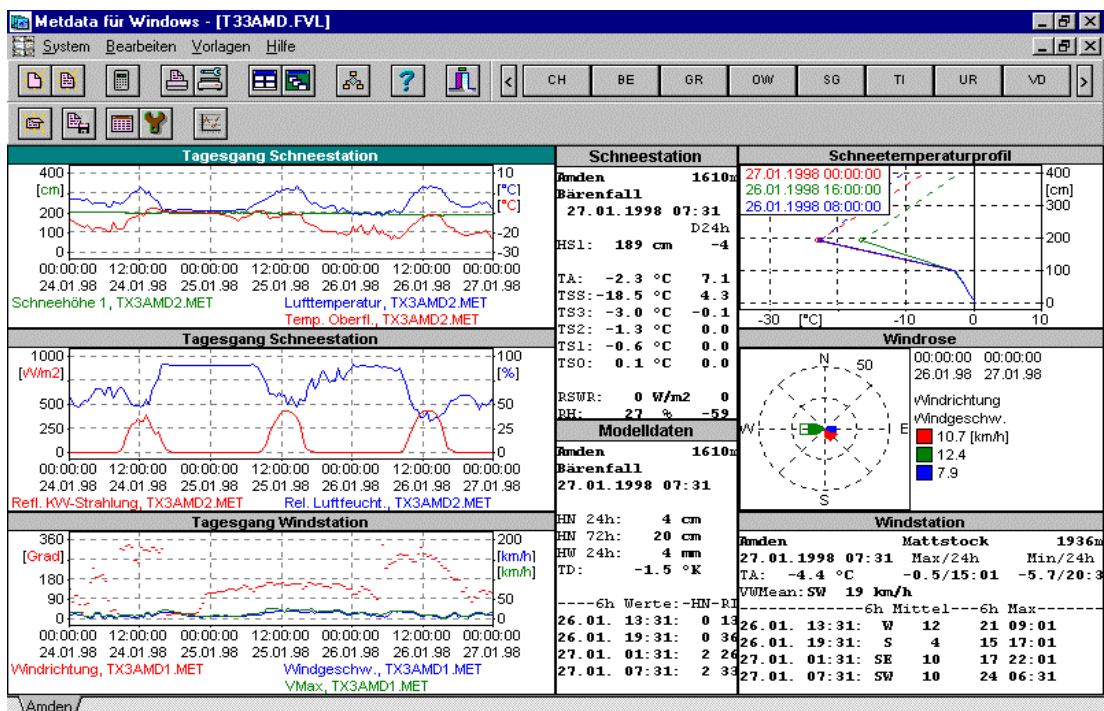


### 4.2.2 Entscheidungshilfen zur Optimierung der Sperrtage

Die zeitliche und örtliche Genauigkeit der Lawinenprognose zu verbessern ist nach wie vor ein Hauptziel, um ein optimales Risikomanagement von Verkehrsachsen mit organisatorischen Massnahmen zu gewährleisten. Seit 1996 sind dazu am SLF eine Reihe von Projekten gestartet worden. Jedes für sich leistet einen wesentlichen Beitrag zum Gesamtziel.

Im Rahmen des *IMIS-Projekts* wird in den Gebirgskantonen der Schweiz ein Messnetz, bestehend aus rund 60 automatischen Messstationen aufgebaut. Die IMIS-Stationen ergänzen die bestehenden SLF- und MeteoSchweiz-Messnetze und erlauben es, Schnee- und Wetterdaten direkt in den Höhenlagen der typischen Anrissgebiete rund um die Uhr zu erfassen. Messgrößen wie Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Schneehöhe, Lufttemperatur, Strahlung oder Temperaturen in der Schneedecke werden kontinuierlich gemessen und ermöglichen dem Experten eine Einschätzung der Lawinengefahr (Abbildung 8). Die Daten könnten in Zukunft ebenfalls für die Beurteilung weiterer Gefahren an Verkehrsachsen genutzt und die Messnetze entsprechend ergänzt werden. Alle IMIS-Stationen arbeiten autonom und sind über Funk und Telefon mit den lokalen, regionalen und nationalen Zentralen verbunden.

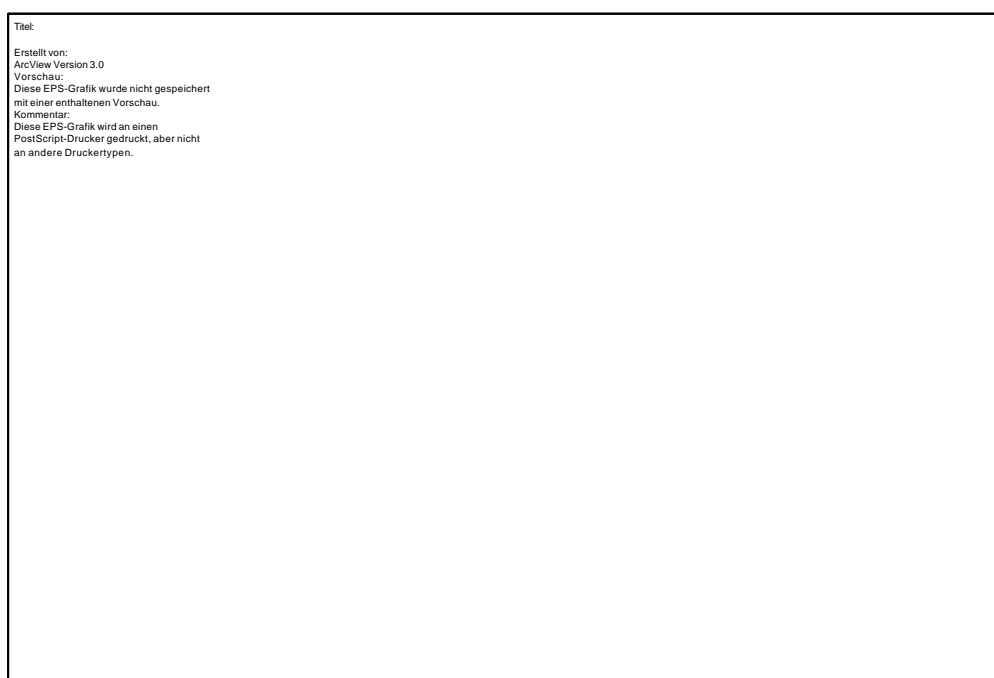
Abbildung 8: Anzeigebeispiel der InfoBOX-Software mit gemessenen, berechneten und für die Entwicklung über drei Tage visualisierten Daten einer automatischen Messstation



Die richtige Information zur Zeit am richtigen Ort kann Unfälle verhindern. Mit Hilfe von modernen Kommunikationsmedien wie zum Beispiel dem Internet, SMS oder WAP (wap.slf.ch) soll erreicht werden, dass aktuelle Informationen über Schnee und Lawinen schnell übermittelt und auf benutzerfreundliche Weise jederzeit und überall abgerufen werden können. Die Dienstleistung „InfoBOX“ erlaubt es den Verantwortlichen von Verkehrsachsen und Gemeindelawinendiensten mittels PC und Modem die Messdaten der automatischen Messstationen rund um die Uhr abzurufen sowie weitere Informationen über die aktuelle Schnee-, Wetter- und Lawinensituation direkt vom SLF zu beziehen (Abbildung 8). Damit stehen die Messnetze des SLF den Verantwortlichen vor Ort als Grundlage für ihre Entscheidungen zur Verfügung.

Das SLF gibt in den Wintermonaten täglich um 17 Uhr ein *Nationales Lawinenbulletin* als Prognose der Lawinengefahr für den kommenden Tag heraus (Abbildung 9). Um 8 Uhr morgens werden *Regionale Lawinenbulletins* mit graphisch gut aufbereiteter Information publiziert. Für Verkehrsachsen ebenfalls bedeutend ist *die Frühwarnung Schnee und Lawinengefahr* von SLF und SMA MeteoSchweiz, die 72 Stunden zum voraus von möglichen Schneefällen über 100 cm warnt.

Abbildung 9: Beispiel für die Visualisierung der Gefahrenstufen mit dem Nationalen Lawinenbulletin und zusätzlichen Ergänzungen zu Höhenlage und Exposition



Die Einschätzung der Lawinengefahr auf nationaler und regionaler Ebene ist aber auch ein wichtiger Ausgangspunkt der lokalen Beurteilung. Die oft heikle Ja/Nein Entscheidung für die Schliessung oder Öffnung von Verkehrsachsen erfordert zudem eigene Beobachtungen und Erfahrungen der lokalen Verhältnisse. Die enorme Datenflut macht es unmöglich, alle Informationen manuell zu verarbeiten und zu interpretieren. So können beispielsweise die Bildung von Schwachschichten und Oberflächenreif oder die Verfrachtung von Schnee durch den Wind aus den Messdaten nur schwierig abgeleitet werden. Diese für die Lawinenbildung und die Schneeverfrachtung auf Verkehrsachsen wichtigen Prozesse können aber durch physikalische Modellierung auf dem Computer nachgebildet werden. Das am SLF entwickelte Schneedeckenmodell *Snowpack* (Lehning et al., 1999) führt diese Simulation für alle automatischen Messstationen durch. Die Ergebnisse dieser Prozessmodelle zusammen mit direkten Messungen und Beobachtungen vor Ort bilden sodann die Grundlage für Prognosemodelle.

Für die lokale Lawinenprognose hat das SLF seit den achtziger Jahren *Prognosemodelle* entwickelt, die im Wesentlichen auf dem Ansatz der „nächsten Nachbarn“ beruhen: Mit dem Programm *NXD2000* steht heute eine kommerziell verfügbare Software für die lokale Lawinenprognose zur Verfügung. In einer Datenbank von Schnee- und Wetterdaten wird für den zu prognostizierenden Tag nach möglichst ähnlichen Tagen gesucht. Für die zehn nächsten Nachbarn wird dem Entscheidungsträger dann die Lawinenaktivität an diesen Tagen präsentiert. Aus der Art der benötigten Zusatzbelastung für die Auslösung der Lawinen (z.B. Neuschnee oder Sprengungen) und Charakteristika der Anrissgebiete (z.B. Exposition und Höhenlage) können wichtige Erkenntnisse für die zu erwartenden Lawinen gezogen werden. Die Funktionsweise des Modells hängt in starkem Masse von einer vollständigen Aufzeichnung aller Lawinen an den beobachteten Tagen ab. Mit der im Aufbau begriffenen, nationalen EDV-Datenbank *StorMe* zu Naturereignissen wie Lawinen, Steinschlag, Murgängen usw., wird der Einsatz von *NXD2000* zunehmend verbessert und ausgedehnt werden.

Neben dem Einsatz von computergestützten Werkzeugen zur Optimierung von Entscheidungen spielt die Kommunikation und Verbreitung der Informationen im Krisenfall eine bedeutende Rolle. Dies hat sich insbesondere auch im Lawinenwinter 1999 gezeigt, als z.B. Tiefbauämter gewisse Verkehrsachsen gesperrt haben und anschliessend Verantwortliche von abgeschnittenen Gemeinden gewisse Wohngebiete nicht mehr evakuieren konnten. Der Einsatz moderner Kommunikations- und Informationstechnologie wie zum Beispiel Internet, WAP und SMS erlauben heute die zielgruppenorientierte Verteilung von Informationen zu eingetretenen Naturereignissen, Gefahrenwarnungen, Entscheidungen von Krisenstäben usw. auf lokaler, regionaler und nationaler Ebene. Mit dem Interkantonalen Frühwarn- und Kriseninformationssystem *IFKIS* wird ein internetbasiertes Informationssystem erarbeitet.

## 5. Optimierung aus ökonomischer Sicht

### 5.1 Bewertung von Kosten und Risikoverminderung

Zur Optimierung der Kosten von Sperrtagen, baulichen Massnahmen und verbleibenden Restrisiken (vgl. Abbildung 10) ist eine Bewertung derselben notwendig. Werden die Kosten von baulichen Schutzmassnahmen an ausgeführten Projekten erfasst, so dürften sie mehr oder weniger gute *Marktpreise* bzw. Bewertungsansätze widerspiegeln. Die Teuerung betreffend baulichen Lawinenschutzmassnahmen ist über die letzten 20 Jahre gesehen nicht gross, und sie wird z.T. noch durch verbesserte und effektiver wirkende Massnahmen 'ausgeglichen'.

Da die Kosten von Strassensperrungen schwierig zu erfassen sind, können für eine erste Optimierung die Kosten einer alternativen, gleichwertigen Leistungsbereitstellung herangezogen werden. Dieser *Ersatzkostenansatz* bietet sich an, da die 10 Mio Fr. infolge Galerien (Abbildung 6) die praktisch gleiche Wirkung bei der Risikoverminderung erzielen wie 110 Sperrtage (Abbildung 7). Ein Sperrtag wird gemäss diesem Vergleich mit 90'000 Fr. bewertet. Wird bei gesperrter Verkehrsachse von einer Stunde Umweg, 50 Fr. *Zeitkosten* pro Stunde und 1'000 Fahrzeugen pro Tag ausgegangen, ergibt sich ein alternativer Bewertungsansatz von 50'000 Fr. pro Sperrtag.

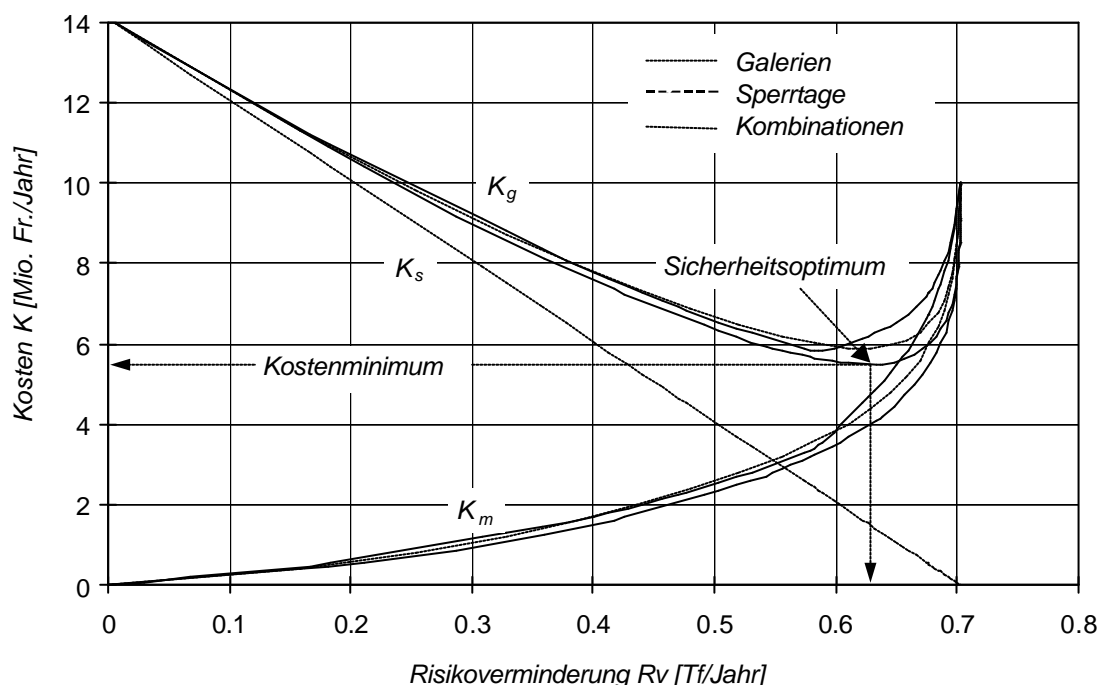
Eine weitere Bewertungsmethode besteht vereinfacht darin, dass die aufsummierte *Zahlungsbereitschaft* (willingness to pay) der Verkehrsachsenbenutzer, z.B. für eine Verminderung der Sperrzeit, erfasst und als Bewertungsansatz herangezogen wird (Contingent Valuation Method). Ein kleines Experiment zur Zahlungsbereitschaft am Flüelapass hat einen Mittelwert von 20 Fr. pro Person und Sperrtag und somit 20'000 Fr. pro Sperrtag ergeben.

Untersuchungen an ausgeführten Projekten des Verkehrsachsenschutzes vor Lawinen zeigen, dass die Gesellschaft zur Verminderung von Todesfallrisiken durchschnittlich rund 10 Mio Fr. pro verhinderten Todesfall aufgewendet hat, wobei diesbezügliche Grenzkosten von über 40 Mio Fr. pro verhinderten Todesfall ermittelt wurden (Wilhelm 1997). Inwieweit von diesen Kosten auf die gesellschaftliche Zahlungsbereitschaft - ohne nutzerseitige Bewertungsansätze einzubeziehen - geschlossen werden kann, ist Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen. In Wilhelm 1999 werden dahingehende Vorschläge zur *Bewertung der Risikoverminderung* gemacht.

## 5.2 Minimierung der Gesamtkosten

Ein am SLF entwickeltes Modell zur Risiko- und Kostenoptimierung, versucht die Investitionen für bauliche Massnahmen, die erforderlichen Sperrzeiten und die verbleibenden Restrisiken von Schutzvarianten zu bewerten und die anfallenden Kosten zu minimieren. Für die in Abbildung 10 aufgezeigte Optimierung wurden die baulichen Massnahmen an 47 Lawinenzügen mit den 25 Sperreinheiten aus organisatorischen Massnahmen kostenoptimal kombiniert. Neu ist dabei die Berücksichtigung der Redundanz mit modellhaften Überlegungen. Diese beschreibt die überlappende Risikoverminderung mit verschiedenen Massnahmentypen, die auch in andern Sicherheitsbereichen gewinnbringend angewendet werden könnte.

Abbildung 10: Optimierung des Risikos auf einer Verkehrsachse mit der optimalen Kombination von 72 verfügbaren Einzelmassnahmen (Wilhelm 1999)



In Abbildung 10 sind die Schadenkosten  $K_s$  (bzw.  $K_{sr}$  gem Gl. 2), die Massnahmenkosten  $K_m$  und die Gesamtkosten  $K_g$  für eine Risikoverminderung nur mit Galerien, nur mit Sperrtagen und schliesslich mit der optimalen Massnahmenkombination aufgetragen. Als Bewertungsansätze wurden bei den Kosten für Sperrtage 0.09 Mio Fr. pro Sperrtag (Ersatzkostenansatz) und bei der Risikoverminderung bzw. den Schadenkosten 20 Mio Fr. pro verhinderten Todesfall (Gesellschaftliche Zahlungsbereitschaft) angewendet. 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.

Wenn die verschiedenen Bewertungsansätze gemäss Kapitel 5.1 alternativ in die Optimierung einbezogen werden, kann die Sensitivität der Bewertung überprüft werden. Dies ermöglicht es den Entscheidungsträgern ihre eigenen oder nutzerseitige Bewertungsansätze (stakeholder involvement) einzubringen und das System erneut zu optimieren. Damit wird die Sensitivität des Modells offengelegt und Transparenz in der Bewertung gewährleistet. Das Modell, das der Praxis im Lawinenschutz bereits zur Verfügung steht, wird aus wissenschaftlicher Sicht weiterentwickelt, mit einem EDV-Tool ergänzt und auf andere Naturgefahren ausgeweitet.

## 6. References

- Ammann, W. (1998) Schnee und Lawinen: Bestimmende Wirtschaftsfaktoren im Alpenraum. *Université alpine d'été*, IKB Sion 1998: Le rôle de l'eau dans le développement socioéconomique des Alpes, 15 S.
- BUWAL / WSL (1990) Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet. Ausgabe 1990/ergänzt 2000. *EDMZ Bern*.
- Dicht, H. (2000) Sicherheit des Strassennetzes. *Bündner Wald* 5/2000, 53. Jg, 7-11.
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Russi, T., Stöckli, U. und Zimmerli, M., 1999: SNOWPACK model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations. *cold regions science and technology*, **30**, 145-157.
- Margreth S., S. Harvey und C. Wilhelm (2000) Effectiveness of long term avalanche defense measures in winter 1999 in Switzerland. *Proceedings ISSW 2000*.
- Nöthiger, C.J., 2000. Der Lawinenwinter 1999. Fallstudie Elm. Indirekte Auswirkungen auf die lokale Wirtschaft. Davos, *Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung*. 40 S.
- Pommerehne, Werner W. und A. Römer (1992) Ansätze zur Erfassung der Präferenzen für öffentliche Güter. *Jahrbuch für Sozialwissenschaft* **43**, 171-210, Vandenhoeck.
- Russi T., W. Ammann, B. Brabec, M. Lehning und R. Meister (1998) Avalanche Warning Switzerland 2000. *Proceedings ISSW 1998*, Sun river, Oregon.
- Schneebeili, M., M. Laternser, P. Föhn und W. Ammann (1998) Wechselwirkungen zwischen Klima, Lawinen und technischen Massnahmen. *NFP 31 Schlussbericht*, vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich.
- SLF (2000) Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse. *Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung Davos*, 588 S. ISBN 3-905620-80-4.
- Tschirky, F., B. Brabec und M. Kern (2000) Avalanche Rescue systems in Switzerland: Experience and Limitations. *Proceedings ISSW 2000*, Big sky, Montana.
- Wilhelm, C (1999) Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutzmassnahmen an Verkehrsachsen. Vorgehen, Beispiele und Grundlagen der Projektevaluation. *Vollzug Umwelt, Praxishilfe, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL*, 1999, 110 S.
- Wilhelm, C. (1997) Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz. Methodik und Erhebungen zur Beurteilung von Schutzmassnahmen mittels quantitativer Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung. *Mitt. Eidgenöss. Inst. Schnee- Lawinenforsch.* **54**: 309 S.