



# Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

## OBJEKTORIENTIERTE BETRACHTUNG DES LAWINENRISIKOS

### OBJECT ORIENTED OBSERVATION OF AVALANCHE RISK

Andreas Zischg<sup>1</sup>, Johann Stötter<sup>2</sup>

#### ZUSAMMENFASSUNG

Vorliegender Artikel zeigt eine Möglichkeit für die Berechnung und Beobachtung des aktuellen Lawinenrisikos auf einer Verkehrsachse am Beispiel der Suldenstrasse im Südtiroler Teil des Nationalparks Stilsfer Joch auf. Bei gegebener Gefährdungssituation durch Neuschneezuwachs wird durch die Beobachtung des Verkehrsaufkommens täglich oder stündlich das kollektive Todesfallrisiko berechnet. Entscheidungen für das Treffen von Risikoverminderungsmaßnahmen müssen unter Einbezug dieses Wertes nicht mehr unter Unsicherheit, sondern unter Risiko gefällt werden, was den Entscheidungsprozess qualitativ erweitert. Das in ein Entscheidungsunterstützungssystem eingebaute Verfahren bildet eine objektive und nachvollziehbare, vor allem aber quantitative Entscheidungsgrundlage für die Sicherheitsverantwortlichen und eine Argumentationsbasis für die Risikokommunikation.

**Key Words:** Risikomanagement, Risikomonitoring, Entscheidungsunterstützungssystem, Lawinenwarnung, National Park Stilsfer Joch

#### ABSTRACT

This paper describes an approach to survey daily risk along traffic lines induced by avalanches. The investigation area was the Sulden road in the South Tyrolean Part of the Stelvio National Park. Based on the situation of avalanche hazard expressed by the new snow height within the last three days and the observation of the frequency of traffic, the decision support system calculates a daily or hourly avalanche induced risk of demise on the object under investigation. This procedure, included in a decision support system, enhances the decision process qualitatively. It supports the argumentation of the local authorities and leads to a better communication of risks.

**Key Words:** Risk management, risk monitoring, decision support system, avalanche warning, Stelvio National Park

---

1 Institut für Geographie Universität Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich (Tel.: +43 512 507 5417; Fax: +43 512 507 2895; email: andreas.zischg@uibk.ac.at)

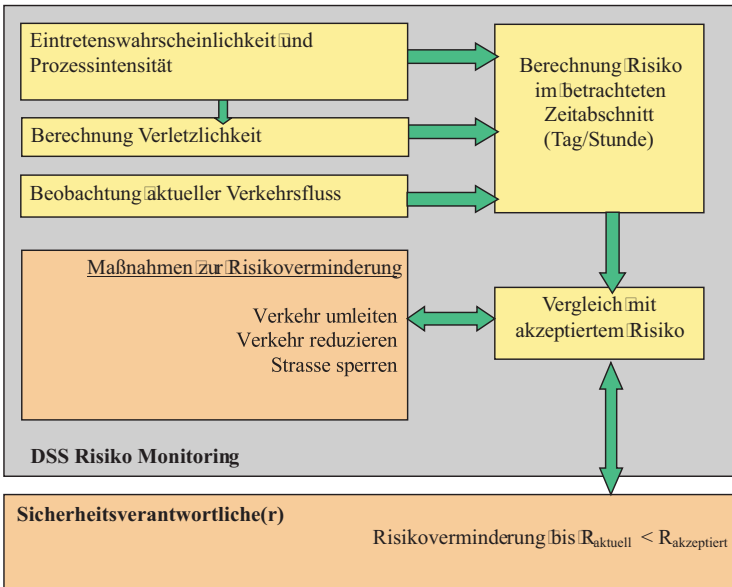
2 Institut für Geographie Universität Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich, (Tel.: +43 512 507 5403; Fax: +43 512 507 2895; email: hans.stoetter@uibk.ac.at)

## EINFÜHRUNG

Im Zuge der Erstellung der Risikozonenpläne in Italien und Südtirol wird für einige Objekte und Infrastruktureinrichtungen die Lage in potenziellen Gefahrenbereichen bestätigt werden. Handelt es sich um Einrichtungen, die nicht problemlos andersorts verlagert werden können, bzw. deren Schutz durch bauliche Maßnahmen nicht finanziert oder gewährleistet werden kann, sind Vorkehrungen für temporäre Maßnahmen zur Verringerung des Risikos zu planen. Die für die Sicherheit von Menschen und Infrastruktureinrichtungen verantwortlichen Personen sind bei der Entscheidung zur Durchführung von Risikoverminderungsmaßnahmen, wie beispielsweise der temporären Sperrung von Strassen oder Schigebieten, häufig verschiedenen Interessenskonflikten ausgesetzt. Diese Personen verfügen zumeist über einen langjährigen Erfahrungsschatz und sehr gute Kenntnisse über das Systemverhalten der betrachteten Naturgefahrenprozesse. Für die Begründung von Entscheidungen und deren Kommunikation gegenüber möglichen Betroffenen bedarf es zusätzlich zum Erfahrungsschatz objektiver und nachvollziehbarer Entscheidungsgrundlagen, um möglichen Beeinflussungsversuchen von Seiten verschiedener Interessensvertreter Stand zu halten. Die vorgestellte Methode zum Aufbau eines Risikobeobachtungssystems für Sicherheitsverantwortliche leistet hierzu einen Beitrag. Mittels eines Entscheidungsunterstützungssystems wird das Todesfallrisiko auf Basis der gegebenen Faktoren zum Gefährdungs- und Schadenpotenzial laufend berechnet bzw. prognostiziert. Dieser objektiv ermittelte Wert kann nachfolgend als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung gestellt werden. Entscheidungsunterstützungssysteme (Decision Support Systems DSS) bieten dem Benutzer nach Mittra (1986) oder Sprague & Watson (1986) Entscheidungsunterstützung durch problemspezifisch aufbereitete und dargestellte Information an. Komponenten von Entscheidungsunterstützungssystemen sind ein „Datenbank Management System“, ein „Modellbank Management System“ und eine Benutzerschnittstelle. Die Analyse der Daten in der Datenbank durch das „Modellbank Management System“ erfolgt im Allgemeinen nach problemspezifischen Bewertungs- oder Vergleichsvorgängen. Dies kann auf Basis von linguistisch formulierten Regeln erfolgen, am häufigsten werden statistische Verfahren und Beschreibungen des Systemverhaltens durch Prozessmodelle verwendet.

## METHODE

Ausgehend von einer Analyse des Systemverhaltens der für das betrachtete Objekt gefährlichen Prozesse wird eine Analyse des Todesfallrisikos im Ausgangszustand durchgeführt. Anschließend werden für jeden Lawinenzug jene Umweltparameter ermittelt, die für das Eintreten eines Lawinenereignisses erforderlich sind. Das Systemverhalten wird in einem Regelsystem abgebildet, das die (manuell oder automatisch) eingegebenen Parameter der herrschenden Umweltverhältnisse und des tatsächlich vorhandenen Schadenpotenzials im Gefahrenbereich verarbeitet und den aktuellen Risikowert berechnet. Erreicht dieser Wert ein nicht mehr akzeptiertes Maß, so sind Maßnahmen zur Verminderung des Objektrisikos zu treffen (vgl. Abb. 1). Mangels eines gesetzlich vorgeschriebenen Schwellenwertes für das durch Lawinen bedingte Todesfallrisiko wird das durch Verkehrsunfälle bedingte durchschnittliche Todesfallrisiko auf Südtirols Strassen als Vergleichswert für die Risikobewertung verwendet (Autonome Provinz Bozen-Südtirol - ASTAT 2003). Das Regelsystem wird durch Auswertungen der Schneebeobachtungsdaten der letzten 25 Jahre formuliert und an den Aufzeichnungen der Klimaparameter im Südtiroler Teil des Ortlergebiets verifiziert.



**Abb. 1:** Konzept und Aufbau des Entscheidungsunterstützungssystems Risikomonitoring  
**Fig. 1:** Conception and structure of the Decision Support System and Risk Monitoring

## RISIKOANALYSE SULDENSTRASSE, SÜDTIROL

### Systemabgrenzung

Gegenstand der Untersuchungen ist die Suldenstrasse von Prad bis zur Talstation der Madritsch-Seilbahn in Sulden im Südtiroler Teil des Ortlergebietes. Die Länge der Strecke beträgt 20,6 km. Fünf Kilometer vor der Ortschaft Sulden verzweigt sich die Strecke an der "Karnenbrücke", über den orographisch rechten Hangbereich führt die sog. „Winterstrasse“ und über den „Marlt-Murkegel“ die „Sommerstrasse“. Die erhebliche Gefährdung der Strasse im Bereich des „Marlt-Murkegels“ durch Lawinen bewirkte den Bau der Strasse am gegenüberliegenden Hang. Gefahrenquellen für das betrachtete Objekt sind 22 bekannte Lawinenzüge, die in den 25 Beobachtungsjahren des Lawinenkatasters der Autonomen Provinz Bozen Südtirol mindestens je einmal die Strasse erreicht haben. Nach Sicherungsmaßnahmen in den 1970er und 1980er Jahren gefährden 17 Lawinen in elf Bahnen die Strasse.

Um einen generellen Überblick über die Gefährdungssituation zu bekommen, wird eine Analyse des kollektiven Risikos nach dem in Wilhelm (1997) und Borter (1999) vorgestellten Verfahren durchgeführt. Als möglicher Schaden werden ausschließlich Personenschäden, die aufgrund der von Lawinen ausgehenden Gefährdung am betrachteten Streckenabschnitt entstehen können, in Betracht gezogen. Sachschäden wie der Verlust von Sachwerten, Schäden an der Infrastrukturanlage Strasse, Folgekosten der Straßenspernung, Wiederherstellungs- und Räumungskosten werden nicht untersucht.

## Risikoanalyse

Die Analyse des Todesfallrisikos basiert auf dem Produkt der Schadenhäufigkeit, als Ergebnis quantifiziert durch Eintretenswahrscheinlichkeit und räumlicher Ausdehnung der zu erwartenden Prozesse und der Höhe des zu erwartenden Schadens. Nachfolgend werden die Beziehungen der Risikoparameter aufgezeigt (vgl. Formel 1, Borter 1999, 70f):

$$R_0 = \frac{n}{i=1} \frac{1}{T_i} \cdot p_{rA} \cdot (1 - p_{Sp}) \cdot \frac{DTV_w \cdot g_i}{v_i \cdot f} \cdot \lambda_i \cdot \beta \quad (1)$$

$T$ ...	Wiederkehrdauer
$p_{rA}$ ...	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit
$p_{Sp}$ ...	Sperrwahrscheinlichkeit
$DTV_w$ ...	Durchschnittlicher täglicher Verkehr im Winter [Fahrzeuge]
$g_i$ ...	Gefährdeter Streckenabschnitt [km]
$v_i$ ...	Geschwindigkeit im Gefahrenbereich [km/h]
$f$ ...	Umrechnungsfaktor [= 24000 h]
$\beta$ ...	Besetzungsgrad [Personen/Fahrzeug]
$\lambda_i$ ...	Letalität [Todesfälle/erfasste Personen]

Ergebnis ist das kollektive Objektrisiko, ausgedrückt in Todesfällen pro Jahr. Dabei wird die Wiederkehrdauer der Lawinen durch die Auswertung von Katasteraufzeichnungen abgeschätzt (Wilhelm 1997). Für die Untersuchungen an der Suldenstrasse sind dies jene Lawinen, die die Strasse mit rekonstruierbarer hoher Intensität erreichten. Das Schadenausmaß berechnet sich aus der Anzahl der betroffenen Fahrzeuge, der Letalität und dem Besetzungsgrad. Angaben über den durchschnittlichen täglichen Verkehr im Winter werden von Autonome Provinz Bozen-Südtirol - ASTAT (2002) übernommen. Für die Letalität von Personen in Fahrzeugen werden die auf Basis von statistischen Untersuchungen an den Schadenlawinen der Schweiz (Margreth et al. 2002) ermittelten Werte von 0.18, bzw. bei absturzgefährdetem Gelände hangabwärts der Strasse von 0.4 angenommen. Das kollektive Objektrisiko (alle Einzelrisiken am betrachteten Objekt summiert) für die Suldenstrasse von Prad bis Sulden über die Winterstrasse ergibt, basierend auf den oben genannten Parametern ohne die Beachtung der Sperrwahrscheinlichkeit,  $7.98 \cdot 10^{-2}$  Todesfälle pro Jahr bzw. alle 12.5 Jahre ein Todesopfer durch Lawineneinwirkung. Für die Strecke von Prad nach Sulden über die Sommerstrasse beträgt das kollektive Objektrisiko  $1.13 \cdot 10^{-1}$  Todesfälle pro Jahr oder alle 8.8 Jahre einen Todesfall. Das individuelle Todesfallrisiko für eine Person, die die Strecke Prad-Sulden über die Sommerstrasse ("Marl-Murkegel") zwei Mal pro Tag befährt, beträgt  $1.16 \cdot 10^{-4}$  Todesfälle pro Jahr. Vergleicht man die kollektiven Objektrisiken der zwei Streckenvarianten, so ergibt sich für die Variante Prad-Sulden über die Sommerstrasse ein 1.4-faches Risiko relativ zur Verbindung Prad-Sulden über die Winterstrasse. Vergleicht man die zwei Teilstrecken, so ergibt sich für die Sommerstrasse ein 11.7-fach höheres kollektives Objektrisiko als auf der Winterstrasse. Auf der Sommerstrasse wurden seit den 1970er Jahren 12 Personen von Lawinen erfasst und getötet (Autonome Provinz Bozen-Südtirol - Hydrographisches Amt 2003, Martinelli 1993, Hurton 1991). Nur für diesen kurzen Streckenabschnitt ergibt dies ein tatsächliches Risiko von 0.4 Todesfällen pro Jahr oder ca. alle 2.5 Jahre einen Todesfall, also ein höherer Wert als das berechnete Risiko. Der Unterschied zwischen dem berechneten und dem historischen Risiko kann mit der Durchführung von Sperrmaßnahmen und dem Bau der Ausweichstrecke begründet werden.

## Risikobewertung

Das berechnete kollektive Objektrisiko wird aufgrund der Planung von Schutzmassnahmen als nicht akzeptiert betrachtet. Im Vergleich zum berechneten kollektiven Todesfallrisiko durch Lawinen ist das jährliche Risiko aufgrund eines Verkehrsunfalls auf der untersuchten Strecke mit einem Wert von 1.4 Todesfällen pro Jahr (Autonome Provinz Bozen-Südtirol - ASTAT 2003) deutlich höher. Das individuelle Risiko von  $1.16 \cdot 10^{-4}$  Todesfällen pro Jahr liegt über dem in Wilhelm (1999) angegebenen, geduldeten Risiko für Verkehrsteilnehmer von  $10^{-5}$  bis  $10^{-6}$  Todesfällen pro Jahr. Nach dem Vorschlag von Merz et al. (1995) zur Bestimmung von Grenzwerten für das individuelle Todesfallrisiko in Abhängigkeit von der Freiwilligkeit der Risikoübernahme und der persönlichen Kontrollmöglichkeiten über das Risiko liegt der ermittelte Wert für die Suldenstrasse hingegen im Akzeptanzbereich, wenn eine geringe Selbstbestimmungsmöglichkeit des Verkehrsteilnehmers vorausgesetzt wird. Betrachtet man das Lawinenrisiko auf Strassen als unfreiwillig eingegangenes Risiko, liegt der ermittelte Wert nach Merz et al. (1995) im Verantwortungsbereich der Allgemeinheit. Das individuelle Risiko auf der Suldenstrasse liegt nach dem oben beschriebenen Vorgehen im Übergangsbereich zwischen gerade noch akzeptiertem und gerade nicht mehr akzeptiertem Risiko. In diesem Übergangsbereich zwischen akzeptiertem und nicht akzeptiertem Risiko lässt sich durch temporäre Sperrungen der Strasse oder des gefährdeten Teilstücks auf dem „Marlt-Murkegel“ eine effiziente Risikoreduktion erreichen. In die Risikoformel geht die Risikoreduktion durch Sperrung der Strasse mit der Verwendung des Risikofaktors der Sperrwahrscheinlichkeit linear in die Berechnung des Endresultats ein und weist somit eine direkte Beeinflussungsmöglichkeit des Risikos auf. Dies bestätigt den Bedarf einer laufenden Überwachung des Risikos. Vor allem bei gefährdeten Objekten, deren Schutz durch Verbauungsmaßnahmen zu kostspielig wäre, kann mit der Erhöhung der Sperrwahrscheinlichkeit eine kostengünstige Risikoverminderung erreicht werden.

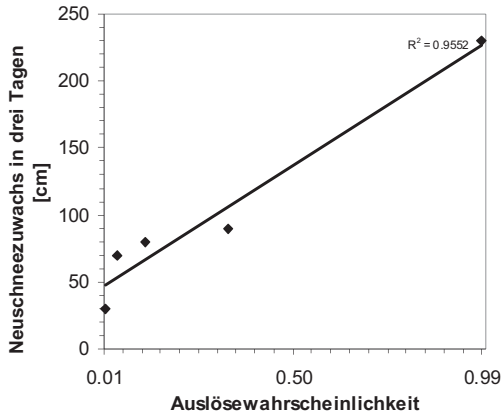
## ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNGSSYSTEM LAWINENMONITORING

Im Folgenden wird der Aufbau eines Verfahrens zur laufenden Berechnung des Risikos am betrachteten Objekt als Entscheidungsunterstützung für das Risikomanagement vorgestellt. Methodisch wird zwischen zwei Berechnungsschritten unterschieden, der Berechnung des Gefahrenpotenzials sowie des Schadenpotenzials.

### Modellierung des Gefahrenpotenzials

Für jeden die Suldenstrasse gefährdenden Lawenstrich wird auf Basis von Analysen des digitalen Geländemodells eine Datenbank mit den topographischen Faktoren der Teilabschnitte der Lawine erstellt. In die Datenbank werden die maximale Ausdehnung und die mittlere Neigung des Anrissgebietes sowie Neigung, Breite, Rauigkeit und Kanalisierung der Sturzbahn der Lawine eingegeben. In einem weiteren Schritt werden aus den Aufzeichnungen der beobachteten Lawinenergebnisse im Ortlergebiet, die für das betrachtete Schadenobjekt relevanten und auf Neuschneezuwachs basierenden Ereignisse gefiltert. Der Datensatz umfasst die Katasteraufzeichnungen der Jahre 1980 bis 2001. Die Reihe der Niederschlagsaufzeichnungen an der Station Sulden weist in diesem Zeitabschnitt Messlücken auf. Aus diesem Grund werden die Beobachtungen des Neuschneezuwachses an der nächstgelegenen Schneemessstation Weissbrunn in Beziehung zu den durch Neuschneezuwachs ausgelösten Lawinenergebnissen

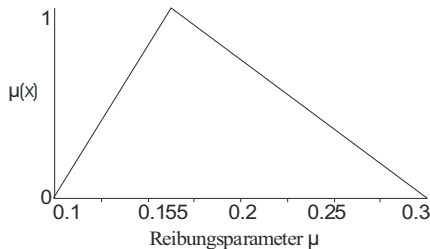
gesetzt. Aus einem Teil des Datensatzes (Winter 1983/84 – 1999/2000) wird untersucht, ab welcher Neuschneehöhe Lawinen ausgelöst werden, die eine Dimension mit Gefährdungspotenzial für das betrachtete Schadenobjekt erreichen. Diese Relation zwischen Neuschneezuwachs in drei Tagen und der Auslösewahrscheinlichkeit von Lawinen (vgl. Abb. 2) stellt die Grundlage für die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Lawinen dar (Bakkehöi 1987). Die für die meisten Lawinenstriche zu geringe Anzahl an aufgezeichneten Ereignissen lässt keine statistisch abgesicherte Berechnung der Auslösewahrscheinlichkeit für jeden einzelnen Lawinenstrich zu. Im Augenblick bildet diese gemittelte Funktion die Grundlage für die Bestimmung der Eintretenswahrscheinlichkeit für alle Lawinen, unabhängig von der topographischen Situation der einzelnen Lawinenstriche.



**Abb. 2:** Auslösewahrscheinlichkeit von Lawinen in Abhängigkeit von der Summe des Niederschlags in drei Tagen. Datengrundlage: Autonome Provinz Bozen-Südtirol – Hydrographisches Amt (2002)

**Fig. 2:** Cumulative probability distribution on avalanche releases vs. three-day precipitation. Database: Autonome Provinz Bozen-

Die Intensität der mit gegebener Eintretenswahrscheinlichkeit zu erwartenden Prozesse wird nach dem Verfahren von Salm et al. (1990) abgeschätzt. Das von Voellmy (1955) entwickelte und von Salm et al. (1990) modifizierte Modell zur Berechnung der Auslaufweiten von Lawinen ist heute in der Schweiz und Österreich das am häufigsten angewandte Berechnungsmodell (Harbitz 1998). Die wichtigsten Größen für die Berechnung von Fließlawinen nach Salm et al. (1990) sind die mittlere Anrissmächtigkeit, der Faktor der turbulenten Reibung und der Reibungskoeffizient  $\mu$ . Für die Berücksichtigung der Schwankungsbreite bei den für die Berechnung des Drucks erforderlichen Parametern wird eine Möglichkeitsverteilung nach Zadeh (1978) in Anlehnung an die Richtlinien von Salm et al. (1990) formuliert (vgl. Abb. 3). Die erwartete Breite der Anrissgebiete wird aufgrund der topographischen Situation als konstant angenommen. Mit den oben genannten Parametern werden nach dem Verfahren von Salm et al. (1990) die Durchflussmenge und damit der auftretende Druck am Kreuzungspunkt der Lawinenbahn mit der Strasse ermittelt. Die Berechnung erfolgt in mehreren Durchläufen mit verschiedenen Werten für die Reibungsparameter auf Basis der oben angegebenen Möglichkeitsverteilung. Die Berechnung der Reichweite der Lawinen entfällt in diesem Fall, weil die Strasse alle Lawinenstriche im



**Abb. 3:** Möglichkeitsverteilung des Reibungskoeffizienten  $\mu$   
**Fig. 3:** Possibility distribution of the friction coefficient  $\mu$

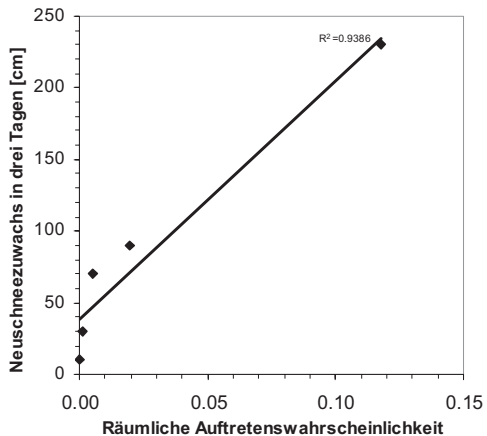
Transitgebiet quert. Ergebnis dieses Arbeitsschrittes ist die Angabe der erwarteten Prozessintensität im Bereich der Strasse bei gegebener Eintrittswahrscheinlichkeit.

### Modellierung des Schadenpotenzials

Für die Berechnung der potenziellen Konsequenzen bei gegebenem Gefährdungspotenzial an der betrachteten Strecke bedarf es der Beobachtung des Straßenverkehrs und der Abschätzung des Risikoparameters „Letalität“ (Wilhelm 1999). Das Verkehrsaufkommen kann entweder durch Zählungen direkt beobachtet oder auf Basis der bisherigen Zählstatistiken modelliert werden. Aufgrund der momentan noch fehlenden Infrastruktur für das Verkehrsmonitoring wird die Verkehrsdichte zum Zeitpunkt der Entwicklungsphase auf Basis der Verkehrsstatistiken von Autonome Provinz Bozen-Südtirol - ASTAT (2002) modelliert. Wird im Monitoring des Risikos der Zeitabschnitt einer Stunde betrachtet, so wird der durchschnittliche Stundenverkehr in die Modellierung des Verkehrsaufkommens mit einbezogen. Der Verkehr ist an Wochenenden und Feiertagen aufgrund der Benützung der Strasse als Zufahrt zum wichtigsten Schigebiet im Oberen Vinschgau deutlich höher (130 %) als wochentags. Der Risikoparameter Letalität wird auf der Basis des auf ein Fahrzeug einwirkenden Drucks abgeschätzt. Nach Salm et al. (1990) werden für jeden Lawenstrich die auf ein Auto wirkenden Staudrucke berechnet. Überschreiten die auf das Auto wirkenden Kräfte die Reibungskräfte zwischen Auto und Fahrbahn, wird die Letalität als 1, andernfalls als 0 angenommen. Dies erfolgt unter der Annahme, dass ein Auto von der Fahrbahn gedrückt wird. Im Falle der Suldenstrasse, die zum größten Teil am Hang oberhalb des Bachbetts liegt, führt dies zu Absturz und zum möglichen Tod der Insassen. Die Haftreibungskraft des Autos ergibt sich als Produkt des Haftreibungskoeffizienten und der senkrecht gerichteten Gewichtskraft des Wagens. Die Werte für die Haftreibung reichen von 0,6 bei nasser bis 1,2 bei trockener Strasse ([http://www.physik.rwth-aachen.de/ group/ IIIphys/ INFOS/ Exscript/ 7Kapitel/ VII2Kapitel.html](http://www.physik.rwth-aachen.de/group/IIIphys/INFOS/Exscript/7Kapitel/VII2Kapitel.html)).

### Risikomonitoring

Für die Berechnung des aktuellen Risikos im betrachteten Zeitabschnitt wird die Risikoformel (vgl. Formel 1) dahingehend modifiziert, dass die Eintretenswahrscheinlichkeit pro Jahr durch die Eintretenswahrscheinlichkeit im betrachteten Zeitabschnitt ersetzt wird. Nach Eingabe des Parameters „Neuschneezuwachs in drei Tagen“ berechnet das in Visual Basic programmierte Verfahren das Todesfallrisiko jedes einzelnen Lawinenzugs. Anschließend werden die Einzelrisiken zum kollektiven Risiko für jeden Straßenabschnitt summiert. Nicht jedes Neuschneeereignis ist für das gleichzeitige Auslösen aller Lawinen verantwortlich. Um dieses



**Abb. 4:** Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit von Lawinen in Abhängigkeit von der Summe des Niederschlags in drei Tagen. Datengrundlage: Autonome Provinz Bozen-Südtirol – Hydrographisches Amt (2002)

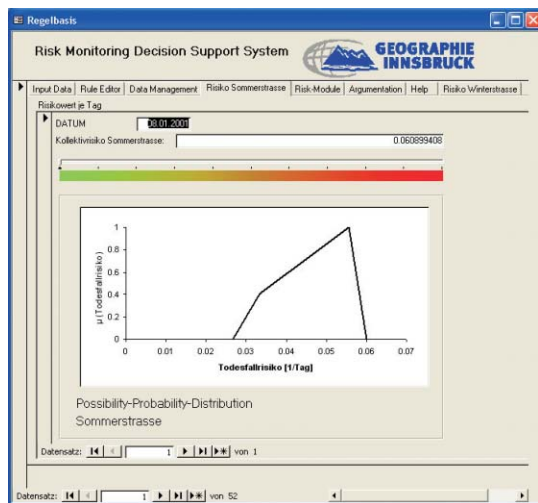
**Fig. 4:** Spatial release probability of avalanches vs. precipitation within three days. Database: Autonome Provinz Bozen-Südtirol – Hydrographisches Amt (2002)



Faktum zu berücksichtigen, fließt die Verteilungsfunktion der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Niederschlagssumme in drei Tagen (vgl. Abb. 4) in die Risikoformel ein. Das Diagramm zeigt das Verhältnis von den auf der Suldenstrasse aufgetretenen Ereignissen zur Anzahl der Ereignisse am gesamten Streckenabschnitt, normiert durch die Anzahl der Tage mit den jeweiligen Niederschlagswerten (räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit). Ergebnis des Verfahrens ist das Todesfallrisiko im betrachteten Zeitabschnitt (Tag) an den verschiedenen Teilstrecken. Die in die Berechnung eingehenden Unschärfen der Eingabeparameter werden im Ergebnis durch eine Möglichkeitsverteilung nach Zadeh (1976) dargestellt (vgl. Abb. 5). Diese Möglichkeitsverteilung des Resultates ergibt sich nach Bothe (1995) oder Cox (1999) aus dem Supremum der einzelnen Möglichkeitsfunktionen der Reibungsparameter und eignet sich nach Chongfu (1996) für die nähere Beschreibung des Wahrscheinlichkeitsrisikos (possibility-probability-distribution), wenn große Unschärfen in den Risikoparametern vorhanden sind.

## ERGEBNIS UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

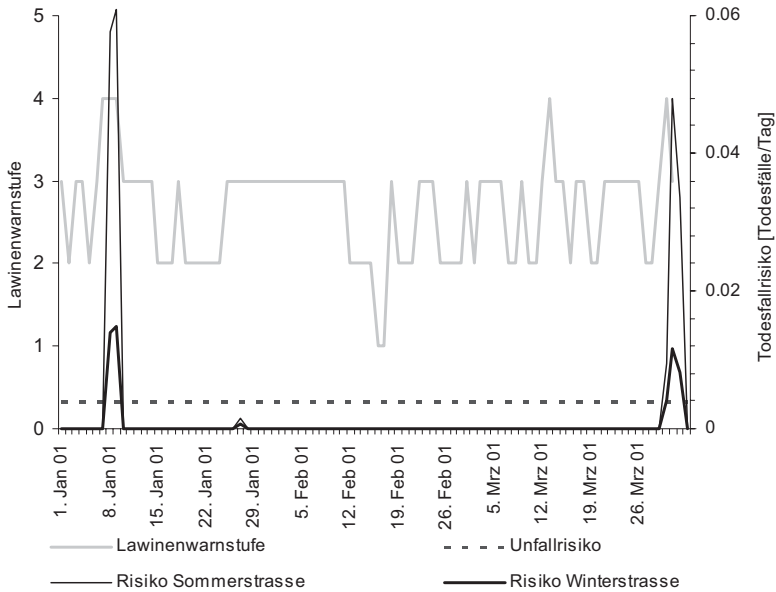
Ergebnis des Verfahrens ist ein unscharfer Risikowert mit gegebenem Schwankungsbereich, der sich aus den Unschärfen der einzelnen Parameter ergibt (Zimmermann 1993). Die Qualität des Berechnungsergebnisses kann vom Benutzer durch die Abbildung der Möglichkeitsverteilung im Ausgabedialogfenster bewertet werden. Dies ist neben der Interpretation des Ergebnisses für die Entscheidungsfindung sowie für die Risikokommunikation wichtig. Das Verfahren wurde anhand eines Datensatzes aus dem Winter 2000/2001 getestet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der Schwankungsbreite in Abbildung 6 verzichtet. Dies bedeutet, dass in nachfolgendem Diagramm nur die auf die Mittelwerte der Parameter basierenden Risikowerte mit dem plausibelsten Wert (Möglichkeit 1) aufgezeigt werden. Eine quantitative Bewertung der Aussagegenauigkeit des vorgestellten Verfahrens kann mangels vergleichbarer Indikatoren in den historischen Datensätzen nicht vollzogen werden. Die starke Abhängigkeit vom Eingabeparameter Neuschneezuwachs bewirkt eine hohe Sensitivität des Systems für diesen Wert. Dies eröffnet jedoch Möglichkeiten zur Prognose des Lawinenrisikos auf Basis der Niederschlagsvorhersagen. Die Wahl der Reibungsparameter hingegen hat relativ geringe Auswirkungen auf das Endresultat, da die berechnete Krafteinwirkung zu meist viel höhere Werte als die maximal zulässige Kraft auf das Schadenobjekt aufweist und Lawenstriche an den Kreuzungspunkten mit der Strasse relativ



**Abb. 5:** Benutzeroberfläche des Risikomonitoring Entscheidungsunterstützungssystems – Ergebnisdarstellung  
**Fig. 5:** Graphical user interface of the Risk Monitoring Decision Support System – display of outcome



hohe Neigungen aufweisen. Die Abbildung des Risikos auf beiden Streckenabschnitten erlaubt eine stufenweise Sperrung der Strasse. Übersteigt das Risiko nur auf der Sommerstrasse den Schwellenwert, so kann diese bei Offenhalten der Winterstrasse gesperrt werden.



**Abb. 6:** Kollektives Todesfallrisiko an der Suldenstrasse – dargestellt am Beispiel der Situation zwischen 01.01. und 02.04.2001. Die punktierte Linie zeigt das Todesfallrisiko durch Verkehrsunfall auf der Suldenstrasse

**Fig. 6:** Collective death risk along the Sulden road – example for the situation between January 1<sup>st</sup> and April 2<sup>nd</sup>, 2001. The dotted line shows the average traffic accident induced death risk along the Sulden road

Trotz der Vereinfachungen im Modell spiegelt das berechnete Resultat die Risikosituation im Wesentlichen wider. Abbildung 6 zeigt, dass trotz der gleich bleibenden Gefährdungssituation Risikospitzen auftreten können. Der Lawinenlagebericht vom 07.01. und 08.01.2001 weist auf die „Gefährdung von exponierten Verkehrswegen“ hin. An diesen Tagen überstieg das durch Lawinen bedingte Todesfallrisiko das statistische Unfallrisiko auf der Strasse um ein Vielfaches. Am 07.01.2001 wurde die Strasse gesperrt, am Nachmittag desselben Tages kam es zu einem Lawinenereignis, das die Suldenstrasse betraf. Zu einer weiteren Sperrung der Strasse aufgrund eines Lawinenereignisses kam es am Morgen des 12.03.2001. Diese Risikosituation wird in Abbildung 6 nicht wiedergegeben, Auslösungsursache war der Festigkeitsverlust der Schneedecke aufgrund Erwärmung und Durchfeuchtung ohne Belastungszunahme durch Neuschnee. Ende März kam es zu einer weiteren Gefährdungssituation durch Neuschneezuwachs, die sich aufgrund Setzung und Verfestigung der Schneedecke am folgenden Tag ohne den Anbruch einer Lawine am untersuchten Objekt rasch beruhigte. In diesem Fall zeigt das Berechnungsresultat eine Risikospitze erst am folgenden Tag. Das Lawinenrisiko bei Frühjahrsituationen und eintägigen Schneefallereignissen kann mit dem hier vorgestellten Verfahren nicht oder nur bedingt berechnet werden.

Mit der Berechnung und Beobachtung des im Betrachtungszeitraum herrschenden Risikos wird für den Sicherheitsverantwortlichen eine objektive und nachvollziehbare Entscheidungsgrundlage bei Gefährdungssituationen durch Neuschneezuwachs geschaffen. Der Entscheidungsprozess wird mit dieser zusätzlichen Information von der „Entscheidung unter Unsicherheit im engeren Sinne“ nach Laux (2003) zur „Entscheidung unter Risiko“ und gewinnt wesentlich an Qualität.

## **DISKUSSION UND AUSBLICK**

Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den in der Praxis erfolgreichen Konzepten zur Analyse des jährlichen Todesfallrisikos (BFF & SLF 1984, Wilhelm 1997, Borter 1999) findet im vorgestellten Verfahren der Ansatz zur Ermittlung der Eintretenswahrscheinlichkeit von Lawinen aus der Summe des Neuschneezuwachses in drei Tagen Anwendung. Die Abhängigkeit der Risikoberechnung von der Summe des Niederschlags in drei Tagen ist ein sehr vereinfachtes Modell. In der Realität bestimmt die Bindung des Neuschnees mit der Unterlage die Auslösewahrscheinlichkeit von Schneebrettlawinen. Eine geringe Stabilität der Altschneedecke bedingt durch eine tief liegende Schwachschicht kann das Anreißen größerer Schneemächtigkeiten verursachen als die Mächtigkeit der Neuschneesicht (vgl. z.B. McClung & Schaerer 1993, Davis et al. 1999, Schweizer 1999). Zudem ist die statistische Ableitung der Anbruchwahrscheinlichkeit und der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeiten aus den vorhandenen Datengrundlagen mit großen Unsicherheiten verbunden. Die getroffene Vereinfachung stellt damit nur teilweise befriedigend das Systemverhalten und die davon abgeleitete Risikosituation dar. Eine wesentliche Verbesserung für die kurzfristige Modellierung des Systemverhaltens könnte durch die Einbeziehung weiterer Faktoren zur Auslösung von Lawinen wie Windverfrachtung und der Schneedeckenaufbau vor dem Schneefallereignis erreicht werden. In einem weiteren Schritt muss die Auslösebereitschaft für einzelnen Lawinenstrich durch ein wissenschaftsbasiertes Regelsystem betrachtet werden. Das vorgestellte System ist so konzipiert, dass eine Erweiterung um zusätzliche Modellbausteine wie z.B. ein computergestütztes Schneedecken-, ein Schneeverfrachtungs- oder ein Lawinenprognosemodell möglich ist. Priorität hat die Erweiterung der Methode durch ein Expertensystem zur Ermittlung der Eintretenswahrscheinlichkeit von erwärmungsbedingten Nassschneelawinen, die ohne erhebliche Belastungszunahme durch Neuschneezuwachs ausgelöst werden, als Basis für die Analyse des durch diese Art von Lawinen induzierten Risikos. Trotz der zum jetzigen Zeitpunkt getroffenen Vereinfachungen kann das Monitoring des täglichen Risikos auf andere Objekttypen übertragen werden.

## **Danksagung**

Die Autoren möchten sich bei den Mitarbeitern des Hydrographischen Amtes der Autonomen Provinz Bozen Südtirol für die Bereitstellung der Datengrundlagen bedanken. Ein besonderer Dank gebührt dem „Verein zur Förderung der Ausbildung und wissenschaftlichen Tätigkeit von Südtiroler Studierenden“ für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens.

## LITERATUR

- Autonome Provinz Bozen-Südtirol - ASTAT (2002): "Verkehrsstatistik in Südtirol 2001". Bozen.
- Autonome Provinz Bozen-Südtirol - ASTAT (2003): "Statistisches Jahrbuch für Südtirol". Bozen.
- Autonome Provinz Bozen-Südtirol - Lawinenwarndienst (1983): "Schlüssel für Meteorometrische Beobachtungen an Schneemessfeldern". Bozen.
- Autonome Provinz Bozen-Südtirol - Lawinenwarndienst (1997): "Kodex für Wetter und Schnee Beobachtungen". Bozen.
- Autonome Provinz Bozen-Südtirol - Hydrographisches Amt (2003): "Lawinenkataster Autonome Provinz Bozen-Südtirol. Grafischer Teil und Datenbankauszug".
- Autonome Provinz Bozen-Südtirol - Hydrographisches Amt (2002): "Niederschlagsaufzeichnungen der Messstationen 0910, 2820, 1620. Digitaler Auszug aus der Datenbank".
- Bakkehoi, S. (1987): "Snow avalanche prediction using a probabilistic method". *Proceedings of the Symposium Avalanche Formation, Movement and Effects, Davos 1986. IAHS Publ. no. 162.* 549-555.
- BFF & SLF (1984): "Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten". Bundesamt für Forstwesen & Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung. Davos und Bern.
- Borner, P. (1999): "Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren - Methode". Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (ed.): *Umwelt-Materialien Nr. 107/I Naturgefahren.* Bern.
- Bothe, H. H. (1995): "Fuzzy Logic. Einführung in Theorie und Anwendungen". Berlin, Heidelberg.
- Chongfu, Huang (1996): "Fuzzy risk assessment of urban natural hazards". *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 83. 271-282.
- Cox, E. (1999): "The Fuzzy Systems Handbook". New York.
- Davis, R.E., Elder, K., Howlett, D., Bouzaglou, E. (1999): "Relating storm and weather factors to dry slab avalanche activity at Alta, Utah, and Mammoth Mountain, California, using classification and regression trees". *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 30 (1-3); 79-80.
- Harbitz, C.B. (1998): "A survey of computational models for snow avalanche motion". - *NGI Technical report*, Nr. 581220-1. Oslo.
- Heinimann, H., Hollenstein, K., Kienholz, H., Krummenacher, B., Mani, P. (1998): "Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren". Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (ed.): *Umwelt-Materialien Nr. 85 Naturgefahren.* Bern.
- Hurton, J. (1991): "Sulden. Geschichte, Land, Leute und Berge". Bozen.
- Kienholz, H. (2003): "Early warning systems related to mountain hazards". In: Zschau, J., Küppers, A.N. (eds.): "Early warning systems for natural disaster reduction". Berlin; 555-564.
- Laux, H. (2003): "Entscheidungstheorie". Berlin, Heidelberg.
- Margreth, S., Stoffel, L., Wilhelm, C. (2002): "Winter opening of high alpine pass roads - analysis and case studies from the Swiss Alps". In: J.R. Stevens (ed.): *Proceedings International Snow Science Workshop Penticton, BC, Canada, 29 Sept - 4 Oct 2002*; 59-66.
- Martinelli, M. (1993): "Schede di rivelamento sul terreno per la realizzazione della carta di localizzazione probabile delle valanghe". Autonome Provinz Bozen-Südtirol - Lawinenwarndienst (ed.): "Lawinengefahrenkarte der Gemeinde Stilfs". Bozen.

- McClung, D. M. Schaerer, P. A. (1993): "The Avalanche Handbook". Seattle.
- Mittra, S. S. (1986). "Decision Support Systems. Tools and Techniques". New York.
- Peschel, G. J., Mocosch, M. (1991): "Künstliche Intelligenz in den Geowissenschaften". *Beiträge zur mathematischen Geologie und Geoinformatik*, Band 2. Köln.
- Salm, B., Burkard, A., Gubler, H. U. (1990): "Berechnung von Fließlawinen. Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen". *Mitteilungen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung*, Nr. 47. Davos.
- Schweizer, J. (1999): "Review of dry snow slab avalanche release". *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 30; 43-57.
- Sprague, R. H. J., Watson, H. J. (1986): "Decision Support Systems. Putting Theory into Practice". London.
- Voellmy, A. (1955): "Über die Zerstörungskraft von Lawinen". *Schweizerische Bauzeitung*, Nr. 73, S. 159-165, 212-217, 246-249, 280-285.
- Wilhelm, Ch. (1997): "Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz". *Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Mitteilungen*, Nr. 54. Davos.
- Wilhelm (1999): "Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutzmassnahmen an Verkehrsachsen". Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (ed.): *Praxishilfe*. Bern.
- Zadeh, L.A. (1975): "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning I". *Information Sciences*, Vol. 8 (3); 199-249.
- Zadeh, L.A. (1978): "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility". *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 1 (1); 3-28.
- Zimmermann, H.J. (1993): "Fuzzy Technologien. Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale". Düsseldorf.