

Ein GIS-basiertes Expertensystem zur Erzeugung dynamischer Lawinenrisikokarten

Andreas ZISCHG, Sven FUCHS, Margreth KEILER,
Gertraud MEISSL und Johann STÖTTER

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.

Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel stellt den Prototyp eines GIS-basierten Expertensystems für die Erzeugung dynamischer Lawinenrisikokarten vor. Die Abschätzung der zeitlich variablen Disposition für erwärmungsbedingte Nassschneelawinen erfolgt durch die Auswertung von numerischen und linguistischen Variablen zu Wetter- und Schneedeckenbeobachtungen auf der Basis eines Regelsystems. Output des Fuzzy-Logik-Inferenzverfahrens ist die Zugehörigkeit des betrachteten Zeitabschnitts zu den unscharfen Mengen „Disposition für große Nassschneelawinen“ und „Keine Disposition für Lawinen“. Die räumliche Interpolation der im Lawinenlagebericht enthaltenen topografischen Information erlaubt die Generierung einer dynamischen Lawinengefahrenkarte, die die zu erwarteten Prozessräume aufgrund der herrschenden Umwelteinflüsse und der Disposition darstellt. Die Überlagerung dieser Informationsebenen bildet die Basis für eine laufende Beobachtung des Todesfallrisikos durch Nassschneelawinen auf Verkehrsachsen. Mit diesem Instrument wird eine verbesserte Entscheidungsgrundlage für das Risikomanagement im Verkehrsachsenschutz geschaffen.

1 Einleitung

Die Analyse des Todesfallrisikos auf Verkehrsachsen aufgrund eines möglichen Lawinereignisses bildet eine wesentliche Entscheidungsgrundlage für das Risikomanagement im hochalpinen Raum. Die Methode zur Analyse des Todesfallrisikos auf Verkehrsachsen wurde erstmals von WILHELM (1997) aufgezeigt und von BORTER (1999) und WILHELM (1999) standardisiert. Im langfristigen Betrachtungszeitraum können mit dieser Methode Kosten und Nutzen von Sicherungsmaßnahmen gegenübergestellt werden und eine Optimierung bei der Risikoverminderung operationalisiert werden. Grundlegend basieren diese Überlegungen auf „Mittelwerten“ des Systemverhaltens, Risikosituationen zeigen jedoch im Zeitverlauf sehr unterschiedliche Ausprägungen. Einerseits variiert das Risiko aufgrund der herrschenden Umweltbedingungen und andererseits aufgrund der temporär veränderlichen Präsenzwahrscheinlichkeit von Personen in Gefahrengebieten. Beim kurzfristig variablen Systemverhalten gefährlicher Prozesse unterscheidet beispielsweise KIENHOLZ (2003) zwischen der zeitlich konstanten Grunddisposition, gegeben durch die topografischen, geologischen und klimatischen Rahmenbedingungen, und der variablen Disposition, die abhängig von den meteorologischen Bedingungen kurzfristigen Änderungen unterworfen ist. Bei

gegebener Grunddisposition und hoher variabler Disposition kann ein auslösendes Ereignis einen geomorphologischen Prozess verursachen, der eine Gefährdungssituation für Objekte hervorruft. Neben den Umweltbedingungen, die das kurzfristige Risiko beeinflussen, bestimmt die zeitlich variable Höhe des Schadenpotenzials die Variabilität des Risikos. Diese kurzfristigen Änderungen im Systemverhalten und in der Anzahl von potenziell betroffenen Werten und Personen spiegeln sich in „Risikospitzen“ wider (ZISCHG & STÖTTER 2004).

Hauptziel der Arbeit ist die Abbildung der kurzfristigen Änderungen des Todesfallrisikos durch Nassschneelawinen auf Verkehrsachsen. Dabei soll das Systemverhalten von Nassschneelawinen auf Basis der zur Verfügung stehenden Grundlagendaten in einem Prototyp eines wissensbasierten Expertensystems modelliert werden, um den Gefährdungsgrad durch diese Prozesse besser aufzeigen und visualisieren zu können. Neben der Frage nach der aktuellen Disposition für die Auslösung erwärmungsbedingter Nassschneelawinen steht die Lokalisierung der potenziellen Gefahrenbereiche im Vordergrund. Mit der Verknüpfung klimatischer, nivologischer und topografischer Faktoren wird dynamisch eine Lawinengefahrenkarte erstellt, die den aktuellen potenziellen Gefährdungsgrad für Verkehrsachsen darstellt. Damit soll eine Entscheidungsgrundlage für das Setzen temporärer Risikoreduktionsmaßnahmen geschaffen werden. Die Methode wird am Beispiel von Datensätzen im Südtiroler Teil des Ortlergebietes (Italien) aufgezeigt und evaluiert. Untersuchungsobjekt ist die Suldenstraße von Prad bis zur Talstation der Madritsch-Seilbahn in Sulden. Die Länge der Strecke beträgt 20,6 km. Gefahrenquellen für das betrachtete Objekt sind 17 Lawinenzügen, die im Beobachtungszeitraum des Lawinenkatasters der Autonomen Provinz Bozen Südtirol (seit 1975) mindestens je einmal die Straße erreicht haben (vgl. Abb. 1).

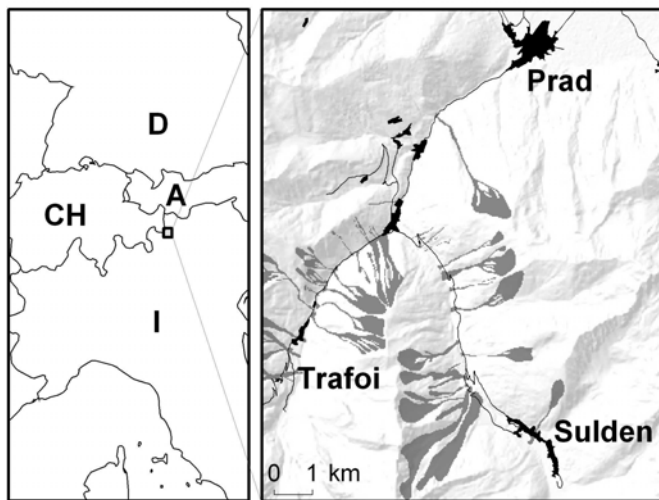


Abb. 1: Untersuchungsgebiet Suldenstraße zwischen Prad und Sulden, Südtirol, Italien. Kartengrundlagen: Autonome Provinz Bozen – Südtirol

1.1 Modellierung des zeitlich variablen Lawinenrisikos

Das Lawinenrisiko wird als Funktion der Eintretenswahrscheinlichkeit bestimmter Lawinenszenarien und deren korrespondierendes Schadenausmaß definiert. Untersuchungen im Südtiroler Teil des Ortlergebietes (Italien) zeigen, dass die auf Eintretenswahrscheinlichkeiten basierende Methode zur Ermittlung des Todesfallrisikos nur bedingt im kurzfristigen Zeitrahmen anwendbar ist (ZISCHG & STÖTTER 2004). Einerseits ist die Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeit von Lawinen für den Zeitraum von 24 Stunden aufgrund der Abhängigkeit der variablen Disposition im Sinne von KIENHOLZ (2003) von mehreren, statistisch nicht signifikanten Parametern in der Realität schwierig. Andererseits sind die Zeitreihen von Lawinenbeobachtungen zu kurz, um daraus repräsentative statistische Zusammenhänge zwischen den Umweltparametern und der Auslösung von Lawinen als Grundlage für die Abbildung des kurzfristigen Systemverhaltens ableiten zu können. Mangels fehlender Möglichkeiten zur statistischen Ableitung von Eintretenswahrscheinlichkeiten in kurzen Zeitabschnitten wird in vorliegender Arbeit Risiko in Anlehnung an RENN (1992) als „Möglichkeit des Eintretens eines unerwünschten Zustandes der Realität als Folge von natürlichen Ereignissen oder menschlicher Aktivität“ definiert. Dies setzt die Verwendung der aus der Fuzzy Logik hervorgegangenen Möglichkeitstheorie (ZADEH 1978) voraus. Mit Hilfe der Fuzzy Logik können Schlussfolgerungen aus einem in „Wenn-Dann-Aussagen“ abgebildeten Regelsystem gezogen werden. Die Theorie der Unschärfer Mengen erlaubt die Verarbeitung der in den beobachteten und gemessenen nivologischen und klimatologischen Daten enthaltenen Unsicherheiten und Unschärfen. Das fallspezifische Expertenwissen kann durch das Regelsystem abgebildet werden und bildet die Grundlage für eine ex ante-Quantifizierung des Gefährdungsgrades (ZIMMERMANN 1993). Wird diese Regelbasis als Fuzzy-Restriktion für die in der Regelbasis definierten Umweltbedingungen betrachtet, so kann der Erfülltheitsgrad der Konklusion nach ZADEH (1978) als Möglichkeitsmaß („possibility measure“) für das Eintreten der Bedingungen interpretiert werden.

Vorausgesetzt, der betrachtete Zeitabschnitt u ist eine unscharfe Untermenge der Tage mit großem Gefährdungspotenzial durch Nassschneelawinen U für das betrachtete Objekt O , so lässt sich die durch die Regelbasis aufgrund der herrschenden Umweltbedingungen berechnete Disposition D zur Auslösung großer Lawinenereignisse $\mu_D(u)$ als der Zugehörigkeitswert des betrachteten Zeitabschnittes u zur unscharfen Menge der Tage mit großem Gefährdungspotenzial definieren. $\mu_D(u)$ kann nach ZADEH (1978) auch als der Kompatibilitätsgrad von u zum Konzept D (Disposition) definiert werden.

$$R_O \rightarrow S : \mu_D(u) \quad (1)$$

Damit lässt sich Risiko (R) in Anlehnung an ZADEH (1978) mathematisch als Grad der Möglichkeit (possibility π) abbilden, mit welcher der erwartete Schaden (S) eintreten kann.

$$R = \pi(S) \quad (2)$$

2 Vorgehen

Das für die Studie angewandte Verfahren besteht aus drei Modulen: Ein regelbasiertes Modul bestimmt auf Grundlage täglicher Schneebeobachtungsdaten und meteorologischer Daten den aktuellen Gefährdungsgrad durch Lawinen, die nicht auf die zunehmende Schneedeckenbelastung durch Neuschnee zurückgehen. Auf Basis der Ergebnisse der Datenverarbeitung des ersten Moduls und der topografischen Faktoren werden im zweiten, GIS-basierten Modul die potenziellen Gefährdungsbereiche kartographisch dargestellt. Im dritten Modul werden die Gefährdungsbereiche mit dem Schadenpotenzial überlagert, die Konsequenzen abgeschätzt und das resultierende Todesfallrisiko berechnet. Die Benutzeroberfläche des Expertensystems steuert die Dateneingabe, die Anpassung der Wissensbasis, die Inferenz der Regelbasis und die Ausgabe in Kartenform.

2.1 Ermittlung der variablen Disposition zur Auslösung von Nassschneelawinen

Als erster Schritt wird die zeitlich variable Disposition zur Auslösung von Nassschneelawinen berechnet. Diese stellt neben den durch die topografischen Faktoren gegebene Grunddisposition den Hauptfaktor für den Gefährdungsgrad eines geomorphologischen Prozesses dar (KIENHOLZ 2003). Nach MCCLUNG & SCHAERER (1993) können die Faktoren und Daten für die Interpretation der Schneedeckenstabilität und der Lawinenaktivität in drei Klassen eingeteilt werden: Meteorologische Faktoren, wie Niederschlag, Wind, Temperatur, Sonneneinstrahlung, sind meist numerische Daten und können mit Unschärfen in beliebigen Zeitintervallen gemessen werden. Daten zur Schneedecke, wie Aufbau, Struktur, Festigkeit, Belastung, Wassergehalt und Temperatur, sind meist qualitativ und nur z.T. numerisch erfassbar. Direkte Beobachtungen der Stabilitätsfaktoren wie Belastungstests und auftretende Lawinen sind für die Lawinenprognose am evidentesten, sind jedoch aufwändig in der Datenbeschaffung, liegen zudem nur punktuell vor und werden hier nicht beachtet. Folgende Faktoren für die Schneedeckenstabilität werden in der Modellierung der zeitlich variablen Disposition zur Auslösung von Nassschneelawinen berücksichtigt: Durchfeuchtung der Schneedecke, Niederschlag in flüssiger oder fester Form, Schneetemperatur in 10 und 30 cm Tiefe sowie Minimum, Maximum und Mittelwert der Lufttemperatur. Die Modellierung der zeitlich variablen Disposition zur Auslösung von Nassschneelawinen erfolgt mithilfe eines Inferenzverfahrens, das die oben genannten nivologischen und meteorologischen Faktoren für die Schneedeckenstabilität nach der Regelbasis interpretiert und hinsichtlich des Gefährdungsgrades bewertet. Die Regelbasis besteht aus dem überregionalen Expertenwissen, das durch statistische Auswertungen der die Lawinenaktivität beeinflussenden Faktoren auf die Verhältnisse im Untersuchungsgebiet angepasst wurde (vgl. Tabelle 1). Wie in Tabelle 1 ersichtlich, sind die Regeln auf der Basis unscharfer Variablen definiert. Einerseits existieren keine scharfen Grenzwerte für die Parameter, ab denen auf eine hohe Disposition für Lawinen geschlossen werden kann, andererseits können die an der Messstation punktuell gemessenen Werte nur mit einem Schwankungsbereich auf einen größeren zusammenhängenden Raum übertragen werden. Aus diesen Gründen finden die Eingangsvariablen in unscharfer Form (fuzzyfiziert) Eingang in das Inferenzverfahren. Die Grundlagen hierzu beschreiben z.B. ZIMMERMANN (1993), BOTHE (1995), BANDEMER (1997) und JACKSON (1999).

Tabelle 1: Regelbasis zur Bestimmung der zeitlich variablen Disposition für erwärmungsbedingte Nassschneelawinen

1. WENN „TH03“ IST „Warm“ UND „Tmed“ IST „Warm“ UND „Tmin“ IST „Warm“ UND „Durchfeuchtung“ IST „ja“
DANN „Ergebnis“ IST „Grosse Lawinen“, 1
2. WENN „TH03“ IST „Warm“ UND „Tmed“ IST „Warm“ UND „Tmin“ IST „Kalt“ UND „Durchfeuchtung“ IST „ja“
DANN „Ergebnis“ IST „Grosse Lawinen“, 1
3. WENN „TH03“ IST „Warm“ UND „Tmed“ IST „Kalt“ UND „Tmin“ IST „Warm“ UND „Durchfeuchtung“ IST „ja“
DANN „Ergebnis“ IST „Grosse Lawinen“, 1
4. WENN „TH03“ IST „Mittel“ UND „Durchfeuchtung“ IST „ja“
DANN „Ergebnis“ IST „Keine Lawinen“, 1
5. WENN „TH03“ IST „Kalt“ UND „Durchfeuchtung“ IST „ja“
DANN „Ergebnis“ IST „Keine Lawinen“, 1
6. WENN „Durchfeuchtung“ IST „nein“
DANN „Ergebnis“ IST „Keine Lawinen“, 1
7. WENN „TH03“ IST „Warm“ UND „Tmed“ IST „Warm“ UND „Tmin“ IST „Kalt“ UND „Durchfeuchtung“ IST „ja“
DANN „Ergebnis“ IST „Keine Lawinen“, 0,8
8. WENN „TH03“ IST „Warm“ UND „Tmed“ IST „Kalt“ UND „Tmin“ IST „Kalt“ UND „Durchfeuchtung“ IST „ja“
DANN „Ergebnis“ IST „Keine Lawinen“, 0,8
9. WENN „TH03“ IST „Mittel“ UND „Tmed“ IST „Warm“ UND „Tmin“ IST „Warm“ UND „Durchfeuchtung“ IST „ja“
DANN „Ergebnis“ IST „Keine Lawinen“, 1
10. WENN „TH03“ IST „Kalt“ UND „Tmed“ IST „Warm“ UND „Tmin“ IST „Warm“ UND „Durchfeuchtung“ IST „ja“
DANN „Ergebnis“ IST „Keine Lawinen“, 1

Das Inferenzverfahren des vorgestellten Systems verarbeitet die Daten vorwärtsgerichtet. Zu den gegebenen Fakten (unscharfe Variablen) werden die passenden Regeln gesucht und durch deren Verarbeitung neue Fakten in Form unscharfer Ausgangsvariablen, den Termen des Konklusionsteils der Regelbasis, geschaffen. Ein Inferenzschritt besteht in der Auswertung einer Regel und beinhaltet die Aggregation, die Implikation und die Akkumulation der Erfülltheitsgrade von Prämissen und Konklusion. Im Aggregationsteil werden die Erfülltheitsgrade der einzelnen Prämissenausdrücke einer Regel zum Erfülltheitsgrad der Gesamtprämisse zusammengefasst. Dies entspricht der logischen UND-Verknüpfung (ZIMMERMANN 1993). Hier wird der Verknüpfungoperator Minimum verwendet. Aufbauend auf dem berechneten Erfülltheitsgrad der Prämisse wird im Implikationsverfahren der Erfülltheitsgrad der Konklusion unter Beachtung des Sicherheitsgrades ermittelt. Der für diesen Arbeitsschritt verwendete Operator ist der Minimum-Operator (BOTHE 1993). Existieren im Konklusionsteil mehrere Regeln mit dem selben Term einer unscharfen Variablen, so müssen die verschiedenen Erfülltheitsgrade zu einem Erfülltheitsgrad zusammengefasst werden (ZIMMERMANN 1993). Der hier implementierte Operator für diesen Akkumulationsschritt ist das Maximum. Das Ergebnis der Inferenz eines Fuzzy-Logik-basierten Systems ist eine unscharfe Menge für jede der Ausgangsgrößen. Im Falle des dargestellten Beispiels ist das Ergebnis des ersten Moduls zur Abschätzung der zeitlich variablen Disposition für Nassschneelawinen die Zugehörigkeit des betrachteten Zeitraums (abgebildet durch die Inputdaten) zu den unscharfen Mengen „Lawinentag ohne Belastungszunahme durch Neuschnee – Große Lawinen zu erwarten“ oder „Keine Nassschneelawinen zu erwarten“ auf der Grundlage der formulierten Regelbasis (ZISCHG 2004).

2.2 Abgrenzung der räumlichen Disposition und der Gefahrenbereiche

Nach der Ermittlung der zeitlich variablen Grunddisposition wird diese räumlich interpoliert. Durch die Kombination mit zusätzlichen linguistischen Variablen aus dem Lawinenlagebericht, die Auskunft über die Lokalität möglicher Gefahrenstellen geben, werden im

GIS-Modul die potenziellen Prozessbereiche ermittelt. Folgende Ausdrücke werden im Lawinenlagebericht in Bezug auf erwärmungsbedingte Nassschneelawinen häufig verwendet und hier fuzzyfiziert in das System eingearbeitet: Durchfeuchtung der Schneedecke nach Höhenlage und Exposition, Hanglage (Sonnenhänge, Schattenhänge), Lage der geschlossenen Schneedecke (Höhenlage, Exposition), Verteilung der Schneemächtigkeit, Höhenlage der 0 °C-Grenze der Lufttemperatur und der Schneefallgrenze. Für die Anrissgebiete werden rasterbasierte Informationsebenen mithilfe der Zugehörigkeitsfunktion in unscharfe Variablen umgewandelt. Die Variable „Hanglage“ wird z.B. in die zwei Termen „Schattenhang“ und „Sonnenhang“ unterteilt. Die Hanglage wird mithilfe von GIS-Funktionen an repräsentativen Tagen im Winterhalbjahr mit modelliert. Aus den daraus resultierenden Graustufenwerten werden die Zugehörigkeitswerte zu den Termen der Variablen berechnet (vgl. Abb. 2).

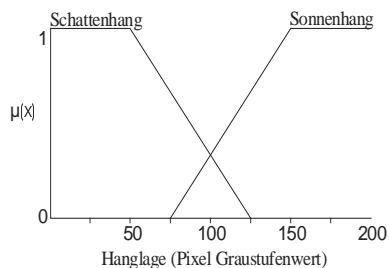


Abb. 2: Fuzzy-Zugehörigkeits-Funktion „Hanglage“

Die Verknüpfung aller räumlichen Faktoren erlaubt eine Auswahl der potenziell in Frage kommenden Anrissgebiete aus der Gesamtmenge der Anrissgebiete im Untersuchungsgebiet. In jedem Berechnungsdurchgang (bei sich ändernden Eingabeparametern) ergibt sich durch die Bildung der Schnittmenge der unscharfen Mengen (das Minimum der Zugehörigkeitswerte) der Zugehörigkeitswert jedes Pixels zur unscharfen Menge der Anrissgebiete mit Disposition für einen Anriss der Schneedecke. Ergebnis ist die Zugehörigkeit jedes Pixels zum Grad der potenziellen Disposition für den Anbruch einer Nassschneelawine nach den jeweils im betrachteten Zeitraum geltenden naturräumlichen Bedingungen (vgl. Abb. 3, linkes Bild). Die Auswahl der mit gegebener Grunddisposition in Frage kommenden Anrissgebiete erlaubt die Ableitung der potenziellen Prozessbereiche. Grundlage für diesen Arbeitsschritt sind Analysen der im Lawinenkataster aufgezeichneten Lawinenereignisse: Für jeden Lawinenstrich werden die Umweltbedingungen, die eine Reichweite bis zur Straße ermöglichen (Anrissmächtigkeit, Anrissfläche, Anbruchvolumen), ermittelt. Diese Umweltparameter werden mit den in der Wissensbasis definierten Umweltbedingungen, die eine Reichweite bis zur Straße ermöglichen, verglichen. Ergebnis dieses Vergleichs ist eine Auswahl jener Lawinen, welche unter den gegebenen Umweltbedingungen im betrachteten Zeitraum die Straße erreichen können. Diese potenziellen Prozessbereiche werden als Vektorumriss aus dem Datensatz des Lawinenkatasters ausgewählt und dargestellt (vgl. Abb. 3, rechtes Bild). Ein Berechnungsvorgang überprüft die auftretenden Drücke im Bereich der Straße. Dabei wird angenommen, dass die ganze Schneedecke als Grundlawine anreißen kann. Die Anrissmächtigkeit wird somit der Schneemächtigkeit gleich gesetzt. Mit den so ermittelten potenziellen Prozessbereichen lassen sich durch Überlagerung mit dem betrach-

teten Schadenobjekt die Konsequenzen berechnen (vgl. WILHELM 1997, ZISCHG & STÖTTER 2004).

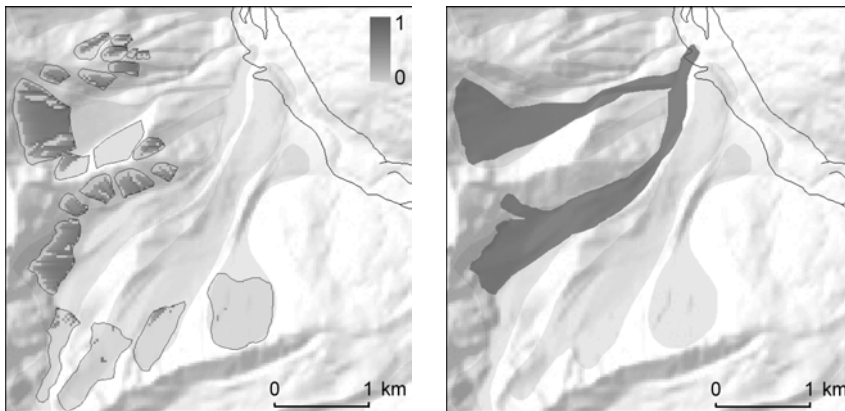


Abb. 3: Potenzielle Anrissgebiete mit Grad der Disposition für große Nassschneelawinen (links) und daraus abgeleitete Gefährdungsbereiche (rechts). Situation am 02.05.2001.

2.3 Abschätzung der Konsequenzen und Berechnung des Risikos

Für jedes Anrissgebiet wird der Zugehörigkeitswert für die Disposition zur Auslösung einer Lawine ermittelt. Am Beispiel der Situation für den 02.05.2001, dargestellt in Abb. 3 (rechtes Bild), zeigt sich, dass mit den gegebenen Umweltbedingungen (Schneemächtigkeit 180 cm, Disposition für Grundlawinen an Sonnenhängen unterhalb von 2.800 m ü.d.M.) die zwei in dunklem Grauton dargestellten Lawinen, gemäß Lawinenkataster mit ähnlichen Bedingungen wie bei früheren Ereignissen, die Straße erreichen können. Die in hellem Grauton dargestellten Lawinenstriche sind jene Lawinen, die unter den gegebenen Bedingungen nicht die Straße erreichen können. Mögliche Konsequenzen der Lawinenereignisse sind eine Verschüttung der Straße und der darauf befindlichen Fahrzeuge. Das Schadensausmaß, die Anzahl der betroffenen Personen, errechnet sich aus dem Produkt der durchschnittlichen Anzahl betroffener Fahrzeuge, der Letalität und dem mittleren Besetzungsgrad der Fahrzeuge. Die Anzahl der betroffenen Fahrzeuge ergibt sich aus dem Verhältnis von durchschnittlichem täglichen Verkehr, multipliziert mit der Länge der gefährdeten Streckenabschnitte, zur mittleren Geschwindigkeit der Fahrzeuge in den Gefahrenbereichen (WILHELM 1997). Die Letalität weist den Wert 1 auf, wenn die aus dem berechneten Lawinendruck resultierende Kraft auf ein Auto dessen Haftreibungskräfte übersteigt, andernfalls 0. Ergebnis ist die erwartete Höhe des Schadensausmaßes auf der Verkehrsachse im betrachteten Zeitraum, ausgedrückt in Todesfällen. Der zugehörige Möglichkeitswert zeigt den Grad der Disposition für diesen Schaden auf und stellt damit das Lawinenrisiko im betrachteten Zeitabschnitt eines Tages dar.

3 Ergebnis

Ergebnis des in dieser Studie angewandten Verfahrens ist ein unscharfer Wert für das Todesfallrisiko durch Lawinen aufgrund der aktuellen Umweltbedingungen. In Abbildung 4 ist das Ergebnis des Schlussfolgerungsverfahrens aus einer Regelbasis mit drei Regeln und vier unscharfen Variablen zur Disposition für „Große Nassschneelawinen“ und sieben Regeln zur Disposition „Keine Lawinen“ für den Zeitraum 01.03.2001 bis 02.05.2001 dargestellt. Für diese Periode sind sowohl die im Modell berücksichtigten Parameter als Datensatz als auch die Lawinenlageberichte, Aufzeichnungen über Nassschneelawinenereignisse und über Straßensperrungen vorhanden. An diesem Zeitabschnitt kann deshalb die Aussagequalität des Modells verifiziert und bewertet werden. Die grauen Balken im Hintergrund der Abbildung stellen das berechnete Schadensausmaß, ausgedrückt in Todesfällen, dar. Die dicke schwarze Linie zeigt den Verlauf der berechneten Disposition für große Nassschneelawinen im betrachteten Zeitabschnitt auf. Diese Kurve stellt den Möglichkeitsgrad für das Eintreten des berechneten Schadensausmaßes und somit das Todesfallrisiko auf der Suldstraße dar. Die punktierte Linie zeigt die Konklusion der Regeln auf, die auf hohe Schneedeckenstabilität und somit auf die Sicherheit auf der Straße hinweisen. Jene Tage, an denen die Verkehrsachse aufgrund der Lawinengefahr gesperrt werden musste, sind am oberen Rand der Abbildung vermerkt.

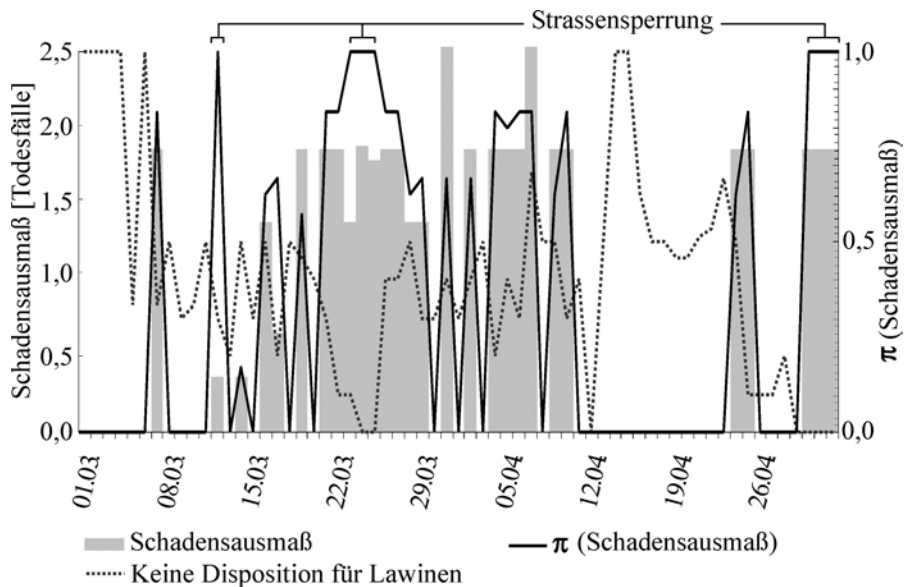


Abb. 4: Verlauf des erwarteten Schadensausmaßes und des Todesfallrisikos π (Schadensausmaß) auf der Suldstraße im Zeitraum vom 01.03.2001 bis 02.05.2001

Die Abbildung 4 zeigt erhebliche Schwankungen des Risikos im betrachteten Zeitabschnitt. Während die Disposition die Umweltbedingungen widerspiegelt, sind die Schwankungen im Schadensausmaß auf die Verteilung des täglichen Verkehrsaufkommens zurückzuführen. Im Gegensatz zur Produktformel (WILHELM 1997) wird hier das Risiko durch die getrennte Darstellung von Gefahren- und Schadenpotenzial abgebildet. Dies erlaubt eine detaillierte

Betrachtung des Risikos. Es zeigt sich, dass bei beobachteten Ereignissen und daraufhin gesperrter Straße der Erfülltheitsgrad der Regelbasis zur Disposition für „Große Nassschneelawinen“ Werte von 1 und zur Disposition „Keine Lawinen“ von $< 0,35$ aufweist.

In der Abbildung wird der Vorteil der dualen Logik verdeutlicht: Ein Tag mit gegebenen Umweltbedingungen kann mit einem bestimmten Erfülltheitsgrad zur Menge der Tage mit erwärmungsbedingten Nassschneelawinen und gleichzeitig mit einem bestimmten Erfülltheitsgrad zur Menge der Tage ohne Lawinen gehören. Beide Aussagen stehen nicht im Widerspruch, da in der dualen Logik das Axiom des ausgeschlossenen Widerspruchs nicht gilt (DRÖSSER 1994). Aus der Differenz zwischen den Erfülltheitsgraden der betrachteten Ergebniswerte lässt sich die Unsicherheit und Unschärfe im Ergebnis des Inferenzverfahrens und die Unsicherheit in der Regelbasis interpretieren (ZIMMERMANN 1993). Je größer die Differenz zwischen dem Erfülltheitsgrad der Regelbasis zur Bestimmung der Disposition für „Große Lawinen“ und dem Erfülltheitsgrad zur Bestimmung der Disposition für „Keine Lawinen“ ist, desto sicherer kann eine Entscheidung im Risikomanagement gefällt werden. Mit dieser zusätzlichen Information wird trotz der Unschärfen in den Eingabeparametern ein Aussagegewinn erzielt und eine Bewertung der Resultate ermöglicht.

4 Diskussion und Ausblick

Die bis jetzt implementierte Regelbasis stellt nur ein stark vereinfachtes Abbild der Realität dar. Abbildung 4 zeigt, dass das Systemverhalten der erwärmungsbedingten Nassschneelawinen mit zehn Regeln und sechs betrachteten Variablen angenähert abgebildet werden kann. Die Eichung und Anwendung dieser Regelbasis auf die Grundlagendaten im Untersuchungsgebiet erzeugte plausible Ergebnisse. Mit der Erweiterung der Regelbasis durch den Benutzer und der Beachtung weiterer Parameter kann die Qualität des vorgestellten Verfahrens wesentlich erweitert werden. Im Vergleich zur bisherigen Vorgangsweise bei der Ermittlung des Risikos auf Verkehrsachsen (WILHELM 1997, WILHELM 1999, BORTER 1999) wird in vorliegender Arbeit das Lawinenrisiko nicht als die Wahrscheinlichkeit, sondern als die Möglichkeit eines zu erwartenden Schadens definiert. Die Möglichkeit eines Ereignisses entspricht dabei der zeitlich variablen Disposition. Das eine Lawine auslösende Ereignis kann mit dem vorgestellten Verfahren nicht modelliert werden, dies muss weiterhin den Sicherheitsverantwortlichen überlassen werden. Die Verwendung einer Regelbasis zur Abschätzung der zeitlich variablen Disposition im Gegensatz zur Ableitung derselben aus empirisch ermittelten Beziehungen zwischen Umweltparametern und Lawinen eröffnet neue Möglichkeiten für das Modellieren des Systemverhaltens von komplexen nichtlinearen Prozessen. Die Abbildung des Risikos auf Grundlage des Möglichkeitsgrads der Konklusion der Regelbasis bietet einen Informationsgewinn für das Risikomanagement und kann somit Entscheidungsprozesse qualitativ erweitern.

In der Verknüpfung von numerischen und nicht-numerischen (linguistisch formulierten) Daten und Beobachtungen zeigen sich die Vorteile der Theorie der unscharfen Mengen. Die Unschärfen in den Beobachtungsdaten können mit dem gewählten Ansatz der Fuzzy Logik effizient verarbeitet werden. Fuzzy-Logik-Inferenzverfahren sind robust (ZIMMERMANN 1993), sie reagieren zum überwiegenden Teil auf Änderungen der Wissensbasis. Je höher die Anzahl der Regeln und der betrachteten Variablen, desto aussagekräftiger ist das Schlussfolgerungsverfahren. Relativ geringe Sensitivität weisen sie gegenüber der Form der

Zugehörigkeitsfunktionen der unscharfen Variablen, hohe Sensitivität gegenüber den verwendeten Implikations- und Aggregationsoperatoren auf. Das vorgestellte Verfahren wurde auf der Basis von Microsoft Excel und Access in VBA entwickelt und anschließend in ArcGIS von ESRI implementiert und damit um GIS-Funktionalitäten erweitert. Die Verwendung von VBA erweist sich hier als Vorteil, da bestehende Module und Benutzeroberflächen problemlos in ArcGIS übertragen und angepasst werden können. Ein Export der Daten in externe Systeme ist damit nicht notwendig.

Literatur

- BANDEMER, H. (1997): *Ratschläge zum mathematischen Umgang mit Ungewißheit – Reasonable Computing*. Stuttgart
- BILL, R. (1999): *Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen*. Band 2. Heidelberg.
- BORTER, 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
- COX, E. (1999): *The Fuzzy Systems Handbook*. New York
- DRÖSSER, C. (1994): *Fuzzy Logic. Methodische Einführung in krauses Denken*. Hamburg
- JACKSON, P. (1999). *Introduction to Expert Systems*. New York
- KIENHOLZ, H. (2003): *Early warning systems related to mountain hazards*. In: ZSCHAU, J. & A. N. KÜPPERS (Hrsg.): *Early warning systems for natural disaster reduction*, 555-564. Berlin
- MCCLUNG, D. M. & P. A. SCHAEERER (1993): *The Avalanche Handbook*. Seattle.
- PESCHEL, G. J. & M. MOKOSCH (1991): *Künstliche Intelligenz in den Geowissenschaften. Beiträge zur mathematischen Geologie und Geoinformatik*. Band 2. Köln
- RENN, O. (1992): *Concepts of Risk: A Classification*. In: KRIMSKY, S. & D. GOLDING (Hrsg.): *Social Theories of Risk*. London, 53-79
- WILHELM, C. (1997): *Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz*. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Mitteilungen, 54. Davos.
- WILHELM, C. (1999): *Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutzmassnahmen an Verkehrsachsen*. BUWAL Praxishilfe. Bern
- ZADEH, L. A. (1978): *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility*. *Fuzzy Sets and Systems*, 1(1), 3-28
- ZIMMERMANN, H. J. (1993): *Fuzzy Technologien. Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale*. Düsseldorf
- ZISCHG, A. (2004): *Analyse des Systemverhaltens von Nassschneelawinen als Basis für die Generierung von dynamischen Gefahrenhinweisystemen am Beispiel der Ortlergruppe (Südtirol)*. Tagungsband Internationales Symposium Interpraevent – Riva del Garda (24.-28. Mai 2004). Buch und CD-ROM
- ZISCHG, A. & J. STÖTTER (2004): *Objektorientierte Betrachtung des Lawinenrisikos*. Tagungsband Internationales Symposium Interpraevent – Riva del Garda (24.-28. Mai 2004). Buch und CD-ROM.