



Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

ANALYSE DES SYSTEMVERHALTENS VON NASSSCHNEELAWINEN ALS BASIS FÜR DIE GENERIERUNG VON DYNAMISCHEN GEFAHRENHINWEISSYSTEMEN

INVESTIGATIONS ON THE SYSTEM BEHAVIOR OF WET SNOW AVALANCHES AS A BASIS FOR THE GENERATION OF DYNAMICAL AVALANCHE HAZARD INFORMATION SYSTEMS

Andreas Zischg¹

ZUSAMMENFASSUNG

Vorliegender Artikel stellt den Prototyp eines regelbasierten Expertensystems für die Abschätzung der zeitlich variablen Disposition für erwärmungsbedingte Nassschneelawinen auf Basis von numerischen und linguistischen Variablen zu Wetter- und Schneedeckenbeobachtungen dar. Die Wissensbasis des Expertensystems wird auf Grundlage von Analysen des Systemverhaltens von Nassschneelawinen ohne bedeutenden Neuschneezuwachs im Südtiroler Teil des Ortlergebiets formuliert. Output des Inferenzverfahrens ist die Zugehörigkeit des betrachteten Zeitabschnitts zu den unscharfen Mengen „Disposition große Nassschneelawinen“ und „Disposition keine Lawinen“. Die räumliche Interpolation der Zugehörigkeitsfunktion erlaubt die Generierung einer dynamischen Gefahrenhinweiskarte, die die zu erwarteten Prozessräume aufgrund der herrschenden Umwelteinflüsse und der Disposition darstellt.

Key words: Nassschneelawine, GIS, Expertensystem, Fuzzy Logic

ABSTRACT

This paper describes a preliminary model of a rule-based expert system which calculates the time-variable release disposition for wet snow avalanches triggered without the loading of new snow. Investigations in the Italian Ortles Alps on the system behaviour of wet snow avalanches were the basis to formalize the knowledge base of the model. Output of the inference method is the membership of the considered time interval to the fuzzy set of “disposition for wet snow avalanches” or “no avalanches”. The spatial interpolation of the calculated disposition and the combination with topological parameters leads to a hazard map generated dynamically.

Key words: Wet Snow Avalanche, GIS, Expert System, Fuzzy Logic

¹ Institut für Geographie Universität Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck, email: andreas.zischg@uibk.ac.at, Tel.: 0043-(0)512-5075417, Fax: 0043-(0)512-5072895

EINFÜHRUNG

Das Risiko von Nassschneelawinen wird nach den im Alpenraum angewandten Richtlinien nur für jene Lawinen ermittelt, deren Auslösungsursache ein Neuschneezuwachs mit bestimmter Wiederkehrdauer ist. Analysen des Systemverhaltens von 170 Lawinestrichen in den Südtiroler Gemeinden des Ortlergebiets zeigen jedoch eine nicht zu unterschätzende Gefährdung von Verkehrsachsen durch Lawinen, die aufgrund der Durchfeuchtung der Schneedecke und der damit einhergehenden Festigkeitsabnahme ausgelöst werden. Von den 141 innerhalb der Grenzen des Nationalparks Stilfser Joch liegenden Lawinestrichen betreffen 65 öffentliche Straßen, 18 reichen als Nassschneelawinen ausgelöst ohne Neuschneezuwachs bis zur Straße. Eine Analyse des kollektiven Todesfallrisikos durch Lawinen auf der Suldenstraße, die im Winter als Zufahrt vom Vinschgau in das Schigebiet Sulden benützt wird, ergab, dass diese Lawinen für 50,3 % des Gesamtrisikos verantwortlich sind.

Um den Gefährdungsgrad dieser Prozesse besser anzeigen zu können, wird versucht, das Systemverhalten von Nassschneelawinen auf Basis der zur Verfügung stehenden Grundlagendaten in einem Prototyp eines wissensbasierten Expertensystems abzubilden. Das dafür entwickelte Verfahren wird am Beispiel von Datensätzen im Ortlergebiet, im speziellen auf der Verbindungsstrecke von Prad nach Sulden getestet. Nach McClung (2000) fällt die Größenordnung des betrachteten Raumes in die meso-skalige Ebene der Lawinenprognose. Um einerseits die Unschärfen in den beobachteten und gemessenen nivologischen und klimatologischen Daten zu bearbeiten und andererseits die Verarbeitung von linguistischen Variablen zu ermöglichen, werden Ansätze aus der Theorie der Unschärfer Mengen (Fuzzy Logic) in das System übernommen. Hierdurch soll ein wichtiger Teilaspekt eines umfassenden Werkzeugs zur Unterstützung des Risikomanagements an alpinen Verkehrsachsen geliefert werden.

Experten- und Entscheidungsunterstützungssystem

Expertensysteme (expert systems, XPS) sind Informationssysteme, die fachspezifisches Wissen von Experten repräsentieren und aus diesem Schlussfolgerungen für Problemlösungen ziehen (Jackson 1999). Kern von Expertensystemen sind nach Peschel & Mokosch (1991) eine in Regeln formulierte fachspezifische Wissensbasis sowie ein vom spezifischen Anwendungsbereich unabhängiges Steuersystem (shell). Das Steuersystem besteht aus Modulen zum Wissenserwerb, zur Problemlösung (Inferenz) und zur Erklärung der gefundenen Lösungen, wobei eine Oberfläche die Steuerung der Module durch den Benutzer ermöglicht. Nach Bill (1999) wird die Interaktion zwischen Benutzer, System und automatisch erfassten Eingabedaten im Idealfall durch eine Dialogkomponente mit einer natürlich sprachlichen Benutzeroberfläche gesteuert. Die Wissensbasis wird zumeist als Regelsystem durch „Wenn-Dann-Aussagen“ abgebildet. Sie bildet die Grundlage für die Ableitung von Folgerungen aus den gegebenen Inputdaten in der Problemlösungskomponente des Expertensystems. Im Allgemeinen enthält die Wissensbasis das fachspezifische Expertenwissen, das fallspezifische durch Inputdaten gegebene Faktenwissen und Zwischen- bzw. Endergebnisse, die das System aus der Regelbasis und den eingegebenen Fakten ableitet. Der Output des Inferenzverfahrens in Expertensystemen wird durch eine Erklärungskomponente begründet und ermöglicht damit dem Benutzer die Bewertung der Aussagequalität. Ein Merkmal von Expertensystemen ist es, dass die abgebildete Wissensbasis durch interaktive Eingabemöglichkeiten (Wissensveränderungskomponente) angepasst wird, die Wissensbasis erweitert und somit die Lernfähigkeit des Systems gewährleistet werden kann (Peschel & Mokosch 1991).

Expertensysteme kommen in der Naturgefahrenbeurteilung bereits seit den 1980er Jahren zum Einsatz, vor allem im Bereich der Lawinenprognose. Bolognesi (1993) stellt beispielsweise ein

Expertensystem für die lokale Lawinenprognose (AVALOG) vor, Schweizer et al. (1994) und Schweizer & Föhn (1996) beschreiben ein Verfahren für die regionale Lawinenprognose (DAVOS, MODUL). Weiters werden sie für die Analyse und Modellierung von Lawinenanrisksgebieten (Buisson & Charlier, 1989) und für die Beschreibung und Ermittlung der Charakteristika von Lawinenzügen (ELSA) eingesetzt (Buisson & Charlier, 1993). Ansätze für die Prognose des Lawinenrisikos (SAFRAN-CROCUS-MEPPRA) zeigen beispielsweise Buisson & Giraud (1995) und Durand et al. (1998) auf; ein System für die Interpretation von Schneeprofilen wird von McClung (1995a, 1995b) vorgestellt. Brauner et al. (2000b) stellen den Einsatz eines Expertensystems für die Ermittlung des Geschiebepotenzials eines Wildbachs dar. Ein Fuzzy-Logic-basiertes Expertensystem wird z.B. von Brauner & Ganahl (1999) und Brauner et al. (2000a) für die Dispositionsmodellierung von flachgründigen Rutschungen in Wildbacheinzugsgebieten aufgezeigt.

VORGEHEN

Das Verfahren besteht aus drei Modulen: Ein regelbasiertes Modul bestimmt auf Basis der täglichen Schneebeobachtungsdaten und durch Interpretation des Lawinenlageberichtes den aktuellen Gefährdungsgrad von Lawinen, die nicht auf die Schneedeckenbelastung durch Neuschnee zurückgehen. Auf Basis der Ergebnisse der Datenverarbeitung des ersten Moduls und der topographischen Faktoren werden im zweiten GIS-basierten Modul die potenziellen Gefährdungsbereiche kartographisch dargestellt. Im dritten Modul werden die ermittelten Gefährdungsbereiche mit dem Schadenpotenzial überlagert und die Konsequenzen abgeschätzt (vgl. Abb. 1).

Basis für die Entwicklung des Expertensystems ist die Wissensakquisition. Sie basiert auf zwei Ebenen: Das überregionale Expertenwissen wird durch Literaturrecherche erhoben und in einer ersten Regelbasis formuliert. Für die Erweiterung und Anpassung der lokalen Wissensbasis folgen statistische Auswertungen der die Lawinenaktivität beeinflussenden Faktoren im Untersuchungsgebiet. Die topographischen Faktoren werden für jeden Lawenstrich im GIS ausgewertet. Die aufgestellte Regelbasis wird an einem Teil der Beobachtungsdaten evaluiert. Die Benutzeroberfläche des Expertensystems steuert einerseits die Dateneingabe, die Anpassung der Wissensbasis, die Inferenz der Regelbasis und die Ausgabe in Kartenform. Die Eingabedaten werden mit den topographischen Faktoren verknüpft. Ergebnis dieses Arbeitsschritts ist eine dynamische Gefahrenhinweiskarte, die den aktuellen potenziellen Gefährdungsgrad für Infrastruktureinrichtungen darstellt und damit eine Entscheidungsgrundlage für das Setzen von Maßnahmen bildet.

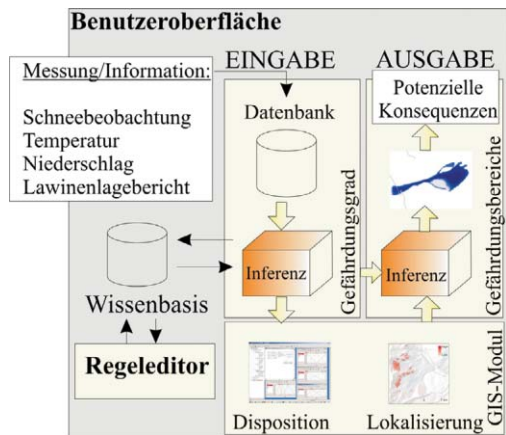


Abb. 1: Struktur des Expertensystems
Fig. 1: Composition of the expert system

WISSENSAKQUISITION ÜBERREGIONALES EXPERTENWISSEN

Nassschneelawinen entstehen nach McClung & Schaerer (1993) nach drei Prinzipien: Entweder aufgrund einer Zunahme der Belastung der Schneedecke durch Niederschlag (Neuschnee oder Regen), durch Abnahme der Festigkeit in einer vorhandenen Schwachschicht oder aufgrund der Abnahme der Reibung durch Erhöhung des Wassergehalts an einer Gleitschicht. Bei erwärmungsbedingten Nassschneelawinen verursachen nach LaChapelle (1977) die Erhöhung des Wassergehalts und der damit verbundene Verlust der Kohäsion zwischen den Schneekristallen die Abnahme der Festigkeit. Ursache für die Durchfeuchtung der Schneedecke ist die Intrusion von flüssigem Wasser in die Schneedecke aufgrund Schmelzprozesse durch direkte Sonneneinstrahlung bzw. latenter Wärme oder durch flüssigen Niederschlag. Die meisten Nassschneelawinen ereignen sich aufgrund von Regenfällen im Hochwinter bzw. in der ersten lang anhaltenden Schmelzperiode im Frühling (LaChapelle 1977). Ein Indikator für potenzielle Nassschneelawinengefahr ist nach Armstrong & Yves (1976) die Isothermie der Schneedecke an südexponierten Hängen, die sich nach Beobachtungen ca. 10-15 Tage vor einer signifikanten Frühjahrslawinenperiode einstellt. Bei Erreichen des isothermen Status der Schneedecke vermindert sich die Festigkeit mit zunehmendem Wassergehalt in den Poren. Mit dem Einsetzen des Schmelzens der intergranularen Bindungen vermindert sich der Rammsondenwiderstand. Sind die oben genannten Bedingungen erfüllt, verursachen mittlere Tagestemperaturen von über 0° C das Auslösen von Lawinen. Der Zeitpunkt, sowohl im Tagesverlauf als auch zwischen Tagen, und die Dimension eines Ereignisses ist eine Funktion der Exposition und Höhenlage. Wärmezufuhr durch advektive Prozesse (Wind) und langwellige Strahlung verfrühen den Anrisszeitpunkt. Verstärkt wird die Gefährdung durch plötzliche und massive Erwärmung, wie z.B. durch Föhn, Warmlufteinbruch und Regenwetter. An Osthängen lässt sich eine größere Zeitverzögerung beobachten als an Westhängen, die vor dem Zeitpunkt der direkten Einstrahlung bereits durch die Luft erwärmt werden. Bei isothermer Schneedecke kann die Auslösung durch oberflächliches Gefrieren in der Nacht für längere Zeit hinausgeschoben werden. Sobald hochgelegene nordexponierte Hangbereiche entladen sind, kann man die generelle Gefahr als beendet erklären (McClung & Schaerer 1993). Bei späterem Eintreten von Nassschneelawinenperioden und höherer Schneemächtigkeit sind größere Ereignisse zu erwarten (Armstrong & Yves 1976).

WISSENSAKQUISITION DURCH STATISTISCHE AUSWERTUNG DER GRUNDLAGENDATEN

Im Folgenden wird versucht, die oben aufgezeigten Beobachtungen im Untersuchungsgebiet zu überprüfen, bzw. Grenzwerte und Parameter an die lokalen klimatischen Bedingungen anzupassen. Für diesen Arbeitsschritt standen folgende Grundlagendaten zur Verfügung: Lawinenkataster, Gefahrenhinweiskarte, Schneebeobachtungsdaten, Niederschlags- und Temperaturmessungen und ein digitales Geländemodell mit einer Rasterweite von 20 m.

Im Auftrag des Hydrographischen Amtes der Autonomen Provinz Bozen Südtirol führt das Personal des Elektrizitätswerkes am Weissbrunn-Stausee im Ultental seit 1984 tägliche Wetter- und Schneebeobachtungen durch. Die Messstation liegt in der Nähe des Gebäudes der Gesellschaft des Elektrizitätswerkes auf einer Meereshöhe von 1900 m. Die Aufnahme der Daten erfolgt nach dem in Autonome Provinz Bozen-Südtirol - Lawinenwarndienst (1983, 1997) beschriebenen standardisierten Verfahren. Im Winterhalbjahr werden jeden Morgen meteorologische Daten wie Wetterlage, Bewölkung, Sichtweite, Wind, Lufttemperatur und Schneedaten wie Gesamtschneehöhe, Neuschneehöhe, Schneedichte, Schneetemperatur, Einsinktiefe der

Rammsonde, Zustand der Oberflächenschicht sowie Angaben zur Lawinenaktivität wie Art, Anzahl, Größe, Exposition, Meereshöhe und Abgangszeitraum der beobachteten Lawinen aufgenommen und standardisiert in ein Formblatt (Modell 1 AINEVA) eingetragen. Die Kodierung der Beobachtungsdaten im Erhebungsformular unterscheidet sich in der ersten Version (1983 – 1993) von der zweiten Version des Formblattes (1994 – 2003) bei den Daten zur Wetterlage, Wind, Schneedecke und zu den beobachteten Lawineabgängen. Die Formblätter der Winterhalbjahre 1983/84 bis 2000/2001 wurden digitalisiert, wo notwendig und möglich wurden Konvertierungen der Codizes vom alten System ins neue Kodierungssystem durchgeführt. Diese Beobachtungsdaten und die vom Forstpersonal erhobenen und im Lawinenkataster aufgezeichneten Ereignissen wurden in eine Datenbank überführt, dass sie relational mit den Temperatur- und Niederschlagsmessungen der Messstationen des Hydrographischen Dienstes verknüpft und abgerufen werden können. Von den 3202 Einträgen der Datenbank wurden jene Tage mit beobachteten Lawinen ausgewählt, die eine Summe des Neuschneezuwachses in drei Tagen von kleiner als 10 cm aufweisen. Diese Auswahl gründet in der Annahme, dass eine Belastungszunahme durch Neuschnee in dieser Größenordnung einen geringen Einfluss auf die Auslösung von Lawinen hat (McClung & Schaerer 1993). Der Beobachtungsschlüssel weist zwei Kodices auf, die Rückschlüsse auf die Lawinenaktivität zulassen: Die Anzahl und Größe („L1“) und die Art der beobachteten Lawinen („L2“). Kodex „L1“ wird in fünf Klassen unterteilt (Lawinenwarndienst der Autonomen Provinz Bozen Südtirol, 1997): Kleine Lawinen und sog. Rutsche (1), spontane Lawinen mittleren Ausmaßes (2), viele spontane Lawinen mittleren Ausmaßes (3), vereinzelt große spontane Lawinen (4), zahlreiche große Lawinen (5). Kodex „L2“ unterscheidet zwischen oberflächlicher Schneebrettlawine (1), Schneebrettlawine bis zum Grund (2), oberflächlicher Lockerschneelawine (3), Lockerschneegrundlawine (4), oberflächliche Lawinen beider Arten (5) und Bodenlawinen beider Arten (6). Bei den Auswertungen der Lufttemperatur können die Beobachtungen von Armstrong & Yves (1976) im Wesentlichen auf das Ortlergebiet übertragen werden. Tage mit aufgetretenen großen Lawinen (L1 = [4, 5]) haben charakteristische mittlere Tagestemperaturen von 2 – 4 °C und Mindesttemperaturen von -4 – 0 °C. Tage mit Grundlawinenereignissen (L2 = [2, 4, 6]) weisen am häufigsten mittlere Temperaturen von 2 – 3 °C und Mindesttemperaturen -3 – -1 °C auf. Bei großen Bodenlawinen ohne Neuschneezuwachs sind Tageshöchsttemperaturen von größer als 4 °C die Regel. Die Schneetemperatur in 30 cm Tiefe weist an Lawinentagen ohne Neuschneezuwachs die höchsten relativen Häufigkeiten bei 0 °C. Hierbei ist anzumerken, dass die Schneetemperatur wie die Lufttemperatur zwar in Zehntel Grad abgelesen wird, aber ganzzahlig gerundet in das Beobachtungsformular eingetragen wird. Ein weiteres Charakteristikum für Tage mit großen Nassschneelawinenereignissen ist der rasche Abbau der Schneedecke. Dies zeigt sich in der Differenz der Schneehöhe des betrachteten Tages zur Schneehöhe vor drei Tagen. Bei allen aufgezeichneten Lawinenereignissen verringerte sich die Mächtigkeit der Schneedecke in den letzten drei Tagen um bis zu 19 cm. Tage mit beobachteten großen spontanen Lawinen weisen Schneehöhen mit einem Median von 90 – 120 cm auf. Die kleinste beobachtete Schneehöhe an diesen Tagen beträgt 60 cm. Die Beobachtungen gelten für den Standort der Messstelle und beschreiben die lokalen Verhältnisse.

MODUL ZUR ABSCHÄTZUNG DER VARIABLEN DISPOSITION

Aus dem oben angeführten Beobachtungen und Erfahrungen wird die Wissensbasis für die Ermittlung der variablen Disposition zur Auslösung von erwärmungsbedingten Nassschneelawinen ohne erheblichen Neuschneezuwachs im Sinne von Kienholz (2003) gebildet. Teil der Wissensbasis sind neben der Regelbasis die definierten Variablen und deren Zugehörigkeitsfunktio-

nen. Letztere bilden die Grundlage für die Fuzzyfikation der Variablen Schneetemperatur in 10 und 30 cm Tiefe, Mittel, Minimum und Maximum der Lufttemperatur und Abbau der Schneedecke. Abbildung 2 zeigt beispielsweise die Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen der Variablen mittlere Lufttemperatur und Schneetemperatur.

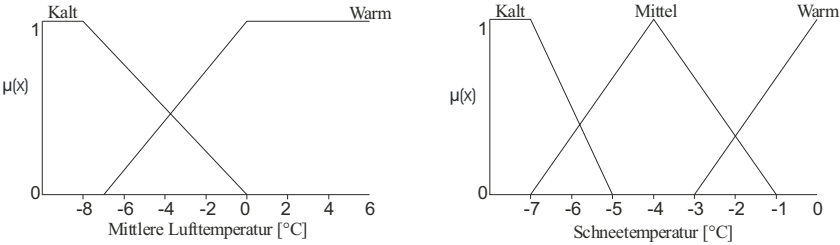


Abb. 2: Beispiele zu den implementierten Fuzzy Membership Funktionen
 Fig. 2: Examples of the implemented fuzzy membership functions

Den Kern der Wissensbasis bildet das Regelsystem (Zimmermann 1993). Der implementierte Regeleditor ermöglicht die Eingabe und Anpassung der Regeln (vgl. Abb. 3). Nach Cox (1999) können die Regeln entsprechend der Wichtigkeit ihrer Eingabeparameter mittels eines Sicherheitsgrades im Bereich [0..1] gewichtet werden. Der Sicherheitsgrad bildet den maximal möglichen Erfülltheitsgrad der Konklusion einer Regel oder stellt das Vertrauen in die Regel dar. Der Schlussfolgerungsprozess aus den bestehenden Fakten und dem vorhandenen Wissen wird das Inferenzverfahren genannt. Die Grundlagen hierzu beschreiben z.B. Zimmermann (1993), Bothe (1995), Jackson (1999) und Bandemer (1997). 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 von unscharfen 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. Einen Überblick möglicher Operatoren ist in Zimmermann (1993) dargestellt. Hier wird der am häufigsten verwendete Verknüpfungsoperator Minimum verwendet. Aufbauend auf den berechneten Erfülltheitsgrad der Prämisse wird im Implikationsverfahren der Erfülltheitsgrad der Konklusion unter

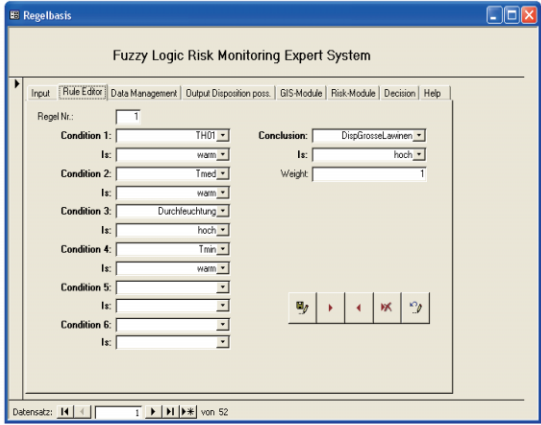


Abb. 3: Editor zur Eingabe und Bearbeitung der Regeln
 Fig. 3: Form for input and edit the knowledge base

... wird der am häufigsten verwendete Verknüpfungsoperator Minimum verwendet. Aufbauend auf den berechneten Erfülltheitsgrad der Prämisse wird im Implikationsverfahren der Erfülltheitsgrad der Konklusion unter

onsverfahren der Erfülltheitsgrad der Konklusion unter Beachtung des Sicherheitsgrades ermittelt. Die häufigsten Operatoren für diesen Arbeitsschritt sind nach Bothe (1993) das hier verwendete Minimum oder das algebraische Produkt von unscharfen Mengen. Existieren mehrere Regeln mit demselben Term einer unscharfen Variablen im Konklusionsteil, so müssen die verschiedenen Erfülltheitsgrade zu einem Erfülltheitsgrad zusammengefasst werden. Die am meisten verwendeten Operatoren für diesen Akkumulationsschritt sind nach Zimmermann (1993) das im vorgestellten Beispiel implementierte Maximum oder die algebraische Summe. Das Ergebnis der Inferenz eines Fuzzy-Logic-basierten Systems ist eine unscharfe Menge für jede der Ausgangsgrößen. Im Falle des dargestellten Beispiels ist das Ergebnis des ersten Moduls zur Abschätzung der Disposition die Zugehörigkeit des betrachteten Zeitraums und dessen Inputdaten beispielsweise zur unscharfen Menge „Lawinentag ohne Belastungszunahme durch Neuschnee – Grosse Lawinen zu erwarten“ und „Keine Nassschneelawinen zu erwarten“ auf Grundlage der formulierten Regelbasis (vgl. Tab. 1). Wird diese Regelbasis als Fuzzy-Restriktion für die oben genannten Mengen betrachtet, so kann der Zugehörigkeitsgrad zur Ausgangsmenge, in diesem Fall der Erfülltheitsgrad der Fuzzy-Regelbasis, nach einer Interpretation der von Zadeh (1978, 9) definierten „theory of possibility“ als Möglichkeitsmaß („possibility measure“) für das Eintreten der Bedingungen interpretiert werden. Die Zugehörigkeitsfunktion der unscharfen Menge der Restriktion kann der Möglichkeitsverteilung („possibility distribution“) dieser unscharfen Variablen gleichgesetzt werden.

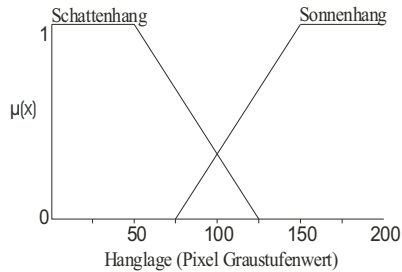


Abb. 4: Fuzzy Membership Funktion Hanglage
 Fig. 4: Fuzzy Membership Function hillside situation

Tab. 1: Regelbasis zur Bestimmung der Disposition für erwärmungsbedingte Nassschneelawinen
 Table 1: Rule base for the calculation of the disposition for wet snow avalanches

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

MODUL ZUR RÄUMLICHEN ABGRENZUNG DER GEFÄHRDUNGSBEREICHE

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 von Gefahrenstellen geben, werden im GIS-Modul die potenziellen Prozessbereiche ermittelt. Folgende Ausdrücke werden im Lawinenlagebericht in Bezug zu erwärmungsbedingten Nassschneelawinen häufig verwendet und hier fuzzyfiziert in das System eingearbeitet: „Durchfeuchtung der Schneedecke“ nach Höhenlage und Exposition, Hangbereiche (Sonnenhänge, Schattenhänge, vgl. Abb. 4), Lage der geschlossenen Schneedecke (Höhenlage, Exposition), Neigung, Größe der erwarteten Lawinen (Hanglawinen, Tallawinen), Exposition und die Höhenlage der 0 °C-Grenze der Lufttemperatur und der Schneefallgrenze. Die Verknüpfung der räumlichen Faktoren erlaubt eine Auswahl der potenziell in Frage kommenden Anrissgebiete aus der Gesamtmenge der Anrissgebiete im Untersuchungsgebiet. Ergebnis dieser Fuzzy-Abfrage ist eine unscharfe Menge der Pixel mit potenzieller Disposition für den Anbruch einer Nassschneelawine nach den jeweils im betrachteten Zeitraum geltenden naturräumlichen Bedingungen (vgl. Abb. 5). Restriktion für diesen Vorgang bilden bereits entladene Anrissflächen. Diese Information wird automatisch durch eine Abfrage aus der Datenbank des Lawinenkatasters bezogen oder händisch durch Eingabe. Ein Menu in der Dialogkomponente des Expertensystems führt den Benutzer durch die einzelnen Bearbeitungsstufen.

MODUL ZUR ABSCHÄTZUNG DER MÖGLICHEN KONSEQUENZEN

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 Lawenstrich werden die Umweltbedingungen, die eine Reichweite bis zur Strasse ermöglichen (Anrissmächtig-

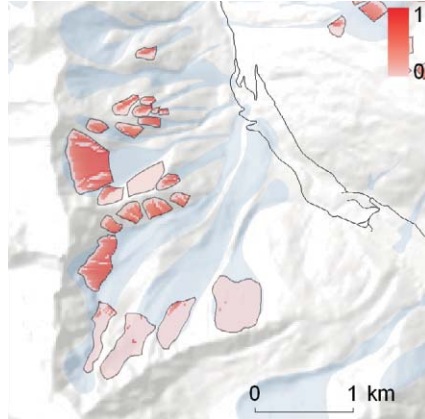


Abb. 5: Fuzzy Zugehörigkeit zu Disposition „Grosse Lawinen“ an Sonnenhängen unterhalb 2800 m. Situation 02.05.2001

Fig. 5: Fuzzy Membership Function for Disposition Great Avalanches on sunny hillsides below 2800 m. Situation May 2nd 2001

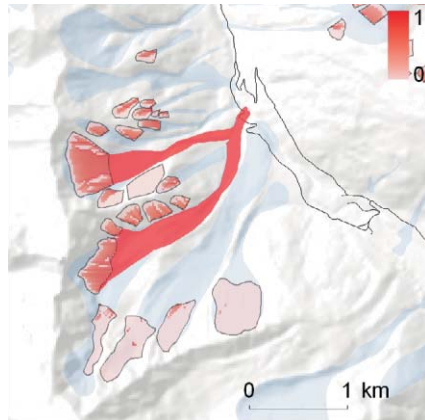


Abb. 6: Potenzielle Gefährdungsbereiche (rot dargestellt). Situation 02.05.2001

Fig. 6: Potential hazard zones (red). Situation May 2nd 2001

keit, Anrissfläche, Anbruchvolumen), ermittelt. Unter der Annahme, dass die ganze Schneedecke als Grundlawine anreißen kann, wird die Schneemächtigkeit als Anrissmächtigkeit verwendet. Multipliziert mit der Anzahl der für einen Anbruch als geeignet ermittelten Pixel je Anrissgebiet ergibt sich das Anrissvolumen der Lawine. Diese Umweltparameter werden mit den in der Wissensbasis definierten Umweltbedingungen, die eine Reichweite bis zur Strasse ermöglichen, verglichen. Ergebnis dieses Vergleichs ist die Auswahl der Lawinen, welche mit den gegebenen Umweltbedingungen im betrachteten Zeitraum die Strasse erreichen können. Diese potenziellen Prozessbereiche werden als Vektorumriss aus dem Datensatz des Lawinenkatasters ausgewählt und dargestellt. Mit den so ermittelten potenziellen Prozessbereichen lassen sich durch Überlagerung mit dem betrachteten Schadenobjekt, der Suldenstrasse, die Konsequenzen ermitteln. Am Beispiel der Situation am 02.05.2001, dargestellt in Abbildung 6, zeigt sich, dass mit den gegebenen Umweltbedingungen (Schneemächtigkeit 180 cm, Disposition für Grundlawinen an Sonnenhängen unterhalb von 2800 m) die zwei in rot dargestellten Lawinen nach dem Lawinenkataster mit ähnlichen Bedingungen die Strasse erreichen können. Die in Blau dargestellten Lawinenstriche sind jene Lawinen, die unter den gegebenen Bedingungen nicht die Strasse erreichen können. Mögliche Konsequenz ist hierbei die Verschüttung von Strasse und Fahrzeugen im Bereich der „Marlt-Mure“.

ERGEBNIS UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Ergebnis des Verfahrens ist ein unscharfer Wert für die Darstellung der Grunddisposition zur Auslösung von erwärmungsbedingten Nassschneelawinen und eine dynamisch erzeugte Karte mit den potenziellen Gefährdungsbereichen im Sinne einer Gefahrenhinweiskarte (Heinimann et al. 1998). Die Abgrenzung der Prozessbereiche erfolgt nicht durch Modellierung, sondern durch Datenbankabfragen. Es können somit keine Angaben zu Intensitäten gemacht werden. Die auf Basis der Grunddisposition abgeleiteten Prozessbereiche stellen nicht die erwarteten Lawinen, sondern die möglichen Lawinen dar. Das auslösende Ereignis kann durch das vorgestellte Verfahren nicht modelliert oder vorhergesagt werden. Eine Verifikation des Verfahrens anhand der zur Verfügung stehenden Datensätze ist aus diesem Grund nur bedingt möglich. Die Qualität des Modells kann nur im Vergleich mit den in der Vergangenheit eingetretenen Lawinenereignissen bewertet werden. Das Modul zur Abschätzung der zeitlich variablen Disposition für die Auslösebereitschaft von erwärmungsbedingten Nassschneelawinen kann anhand des Datensatzes des Winterhalbjahres 2000/2001 evaluiert werden. Für diesen Zeitraum sind sowohl Lawinenlagebericht als auch Daten über Nassschneelawinenereignisse vorhanden. Eine Mindestanforderung an die Aussagequalität des Verfahrens ist, dass für alle aufgezeichneten Lawinenereignisse im Spätwinter und Frühjahr des Jahres 2001 im Nachhinein eine hohe Disposition für Nassschneelawinen, bei nicht eingetretenen Ereignissen nur eine geringe Disposition berechnet werden sollte. Die Auswertung der vorläufigen Regelbasis für die Ermittlung der Disposition wird mit der Anzahl an beobachteten Lawinen und im Lawinenkataster aufgezeichneten Ereignisse verglichen (vgl. Abb. 7). Abbildung 7 ist das Ergebnis der Schlussfolgerung aus einer Regelbasis mit nur drei Regeln und vier unscharfen Variablen zur Disposition für „Große Nassschneelawinen“ und sieben Regeln zur Disposition „Keine Lawinen“. Sie zeigt, dass bei beobachteten Ereignissen (schwarze Balken) der Erfülltheitsgrad der Regelbasis zur Disposition für „Große Nassschneelawinen“ mit einer Ausnahme Werte über 0.65 und zur Disposition „Keine Lawinen“ unter 0.3 aufweist.

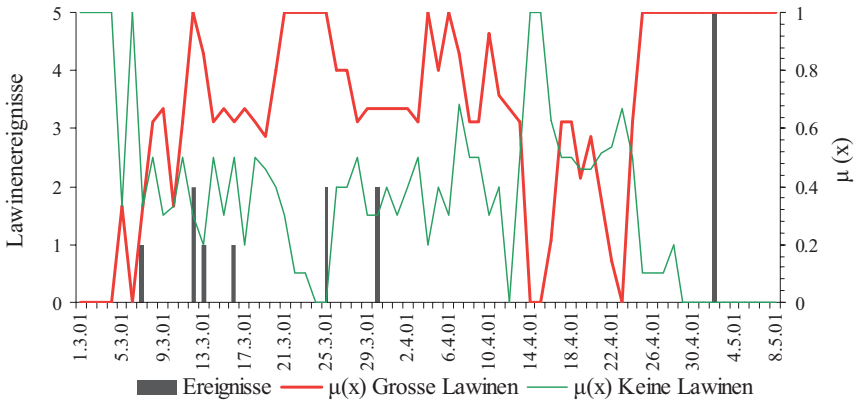


Abb. 7: Erfülltheitsgrad der Regelbasis zur Disposition für „Große Nassschneelawinen und „Keine Nassschneelawinen“. Situation zwischen 01.03. und 02.05.2001

Fig. 7: Values of inference output. Situation between March 1st and May 8th 2001

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“, desto sicherer ist das Resultat. Mit dieser zusätzlichen Information wird trotz der Unschärfen in den Eingabeparametern ein Aussagegewinn erzielt und eine Bewertung des Resultats ermöglicht. Die an Expertensysteme gestellte Forderung an eine Möglichkeit zur Bewertung der Aussagequalität ist hiermit gewährleistet. Die Forderung nach einer Erklärungskomponente wird mit der Darstellung der Erfülltheitsgrade der im Inferenzverfahren ausgewerteten Regeln in der Benutzeroberfläche erfüllt. Die im System implementierte Wissensveränderungskomponente erlaubt eine Anpassung der Wissensbasis. Das System bleibt somit erweiterbar und kann durch den Benutzer an die lokalen Verhältnisse angepasst oder durch andere Indikatoren erweitert werden. In Abbildung 7 zeigt sich, dass mit nur zehn Regeln und vier betrachteten Variablen (Schneetemperatur, Durchfeuchtung, minimale und mittlere Lufttemperatur) das Systemverhalten der erwärmungsbedingten Nassschneelawinen im Ortlergebiet angenähert abgebildet werden kann. Fuzzy Logic – Inferenzverfahren sind ziemlich robust (Zimmermann 1993), sie reagieren hauptsächlich auf die 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. Die Wahl der Verknüpfungsoperatoren erfolgt nach logischen Aspekten der Fragestellung. Das vorgestellte Verfahren weist die höchste Sensitivität gegenüber der Variablen „Durchfeuchtung der Schneedecke“ auf, da sie binär in das Inferenzverfahren Eingang findet. Dieser Parameter muss zukünftig differenzierter betrachtet werden.

DISKUSSION UND AUSBLICK

Die bis jetzt implementierte Regelbasis stellt nur ein stark vereinfachtes Abbild der Realität dar. Die Eichung und Anwendung dieser Regelbasis auf die Grundlagendaten im Untersuchungsgebiet brachte dennoch gute Ergebnisse. Das Expertensystem bildet eine offene und erweiterbare Basis und eine objektive Entscheidungshilfe für das operative Risikomanagement im Verkehrsachsenschutz. Erweiterbar ist das System nicht nur durch die Verfeinerung und Anpassung der Regelbasis durch lokale Experten, sondern vor allem durch die Implementierung bereits vorhandener Lawinenprognosesysteme oder Schneedeckenmodelle. 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 konnten mit dem gewählten Ansatz der Fuzzy Logic gut verarbeitet werden.

Danksagung

Der Autor möchte 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 Ermöglichung des Forschungsvorhabens.

LITERATUR

- Armstrong, R.L., Yves, J.D. (1976): "Wet Snow Avalanches". In: "Avalanche Release and Snow Characteristics". Occasional Paper no. 19, Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado; 67-81.
- Autonome Provinz Bozen-Südtirol - Lawinenwarndienst (1983): "Schlüssel für Meteorivometrische 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.
- 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.
- Brauner, M., Ganahl, E. (1999): "GIS-basiertes Expertensystem zur Risikobewertung von Hanggleitungen in Wildbacheinzugsgebieten". *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation*. Vol. 87; 93-99.
- Brauner, M., Ganahl, E., Hübl, J. (2000a): "Ein GIS-basiertes Expertensystem zur Risikobewertung von Hanggleitungen in Wildbacheinzugsgebieten". In: J. Strobl, T. Blaschke, Griesebner, G. (eds.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium 2000 Salzburg*; 61-71.
- Brauner, M., Leber, D., Hübl, J. (2000b): "Risikobewertung eines alpinen Einzugsgebiets mittels einer prozessorientierten Datenbank". *Internationales Symposium Interpraevent 2000, Villach, Österreich, 26.-30.06.2000*. Band 2; 201-212.

- Bolognesi, R. (1993): "Artificial Intelligence and Local Avalanche Forecasting: The System AVALOG". *International Emergency and Engineering Conference, Arlington VA, San Diego, California, USA, 1993*. Soc. of Computer Science (S.C.S.); 113-116
- Bolognesi, R., Buser, O., Good, W. (1994): "Local avalanche forecasting in Switzerland: strategy and tools, a new approach". *International Snow Science Workshop, Snowbird, Utah, USA, 30.10. - 03.11. 1994*; 463-472.
- Bothe, H. H. (1995): "Fuzzy Logic. Einführung in Theorie und Anwendungen". Berlin, Heidelberg.
- Buisson, L., Charlier, C. (1989): "Avalanche starting-zone analysis by use of a knowledge-based system". *Annals of Glaciology*. Vol. 13; 27-30.
- Buisson, L., Charlier, C. (1993): "Avalanche modelling and integration of expert knowledge in the ELSA system". *Annals of Glaciology*, Vol. 18; 123-128.
- Buisson, L., Giraud, G. (1995): "Two examples of Expert Knowledge based Systems for Avalanche Forecasting and Protection". *Surveys in Geophysics*, Vol. 16; 603-619.
- Cox, E. (1999): *The Fuzzy Systems Handbook*. New York.
- Drösser, C. (1994): "Fuzzy Logic. Methodische Einführung in krauses Denken". Hamburg.
- Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Merindol, L., Martin, E. (1999): "A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting." *Journal of Glaciology*, Vol. 45(151); 469-484.
- 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.
- Jackson, P. (1999). "Introduction to Expert Systems". New York.
- 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 Heidelberg New York; 555-564.
- LaChapelle, E.R., 1977: "Snow avalanches: a review of current research and applications". *Journal of Glaciology*. Vol. 19(81); 313-323.
- McClung, D.M. (1995a): "Computer assistance in avalanche forecasting". *Proceedings International Snow Science Workshop, Snowbird, Utah, USA, 30.10 - 03.11. 1994*; 310-313.
- McClung, D.M. (1995b): Use of Expert Knowledge in Avalanche Forecasting. *Defence Science Journal*. Vol. 45(2); 117-123.
- McClung, D.M. Schaerer, P. A. (1993): "The Avalanche Handbook". Seattle.
- Mitra, S.S. (1986). "Decision Support Systems. Tools and Techniques". New York.
- Peschel, G.J. , Mokosch, M. (1991): "Künstliche Intelligenz in den Geowissenschaften". *Beiträge zur mathematischen Geologie und Geoinformatik. Band 2*. Köln.
- Schweizer, M., Föhn, P.M.B., Schweizer, J., Ultsch, A. (1994): "A Hybrid Expert System for Avalanche Forecasting". In: Schertler, W., Schmid, B., Tjoa, A.M., Werthner, H. (eds.): "Information and Communication Technologies in Tourism". New York; 148-153.
- Schweizer, J., Föhn, P.M.B. (1996): "Avalanche forecasting - an expert system approach". *Journal of Glaciology*. Vol. 42(141); 318-332.
- Zimmermann, H.J. (1993): "Fuzzy Technologien. Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale". Düsseldorf.