

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein

**Band:** 161 (2010)

**Heft:** 2

**Artikel:** Zur Sensitivität der Risikoberechnung und Massnahmenbewertung von Naturgefahren

**Autor:** Schaub, Yvonne / Bründl, Michael

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1097752>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 05.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Zur Sensitivität der Risikoberechnung und Massnahmenbewertung von Naturgefahren

Yvonne Schaub WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (CH)  
Michael Bründl WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (CH)\*

## On the sensitivity of risk calculation and evaluation of mitigation measures against natural hazards

The Swiss population has had to cope with natural hazards for a long time and will have to do so in future as well. Since the rearrangement of the financial compensation, the effectiveness and efficiency of mitigation measures against natural hazards have to be assessed. Therefore, tools have been developed to calculate the risk of the area under analysis and to support the evaluation of planned mitigation measures (e.g. EconoMe). The parameters that influence the risk calculation are associated with uncertainties which in turn can have a direct impact on the planning of mitigation measures. Therefore, a sensitivity analysis of the risk calculation and the evaluation of measures was performed on the basis of case studies. The analysis was carried out with regard to the factors intensity, spatial probability of the process, mortality rate and vulnerability of objects. The outcome of this analysis showed that every parameter has an impact. However, the intensity is the factor with the highest influence, followed by vulnerability, spatial probability and mortality rate. Regarding the Swiss praxis, these results connote that a good quality of intensity maps is essential. Furthermore the existing uncertainties should be communicated by operating with the full range of estimated risks instead of absolute single values. Dealing with uncertainties, however, requires that prioritisation of mitigation measures must be revised based on a cost-benefit analysis.

**Keywords:** natural hazards, mitigation measures, integral risk management, sensitivity analysis, risk analysis, cost-benefit analysis

**doi:** 10.3188/szf.2010.0027

\* Flüelastrasse 11, CH-7260 Davos, E-Mail [bruendl@slf.ch](mailto:bruendl@slf.ch)

Die schweizerische Bevölkerung musste sich schon immer mit Naturgefahren auseinandersetzen und wird auch in Zukunft Naturereignisse zu bewältigen haben. Das Hochwasser 2005, bei dem heftige Stauniederschläge am Alpenordhang zu grossflächigen Überschwemmungen und Rutschungen führten, hat viele Menschen betroffen und neben grossem Sachschaden auch sechs Todesopfer (Bezzola & Hegg 2007) gefordert. Aufgrund von Erkenntnissen aus der Klimaforschung wird erwartet, dass sich solche Extremereignisse in Zukunft häufen (Agrawala 2007). Deshalb drängt sich zunehmend die Frage auf, welche Massnahmen für den Schutz der Bevölkerung in Zukunft realisiert werden und wie die Erstellung von Schutzmassnahmen priorisiert werden soll.

Die strategische Ebene zum Schutz vor Naturgefahren obliegt in der Schweiz dem Bund. Die Bundesämter, zum Beispiel das Bundesamt für Umwelt (Bafu), sind zuständig für die Koordination strategischer Entscheide. Die operative Verantwortung für

die Umsetzung der Entscheide tragen die kantonalen Wald- und Wasserbaudienste. Im Zuge der Neugestaltung des Finanzausgleichs (NFA) hat der Bund die Subventionspolitik im Bereich Naturgefahren revidiert. Neu wird für Projekte mit einer Investitionssumme von mehr als einer Million Franken vom Bund eine ganzheitliche Beurteilung bezüglich ihrer Schutzwirkung und Wirtschaftlichkeit verlangt, bevor Subventionsbeiträge ausbezahlt werden (Planat 2002). Aus diesem Grund sind im Auftrag des Bundes seit 2003 Werkzeuge für einen einheitlichen Umgang mit Naturgefahren entwickelt worden, welche auf in der Schweiz erarbeiteten Grundlagen basieren (BFF & SLF 1984, Loat & Petrascheck 1997, Latteltin et al 1997, Wilhelm 1997, 1999, Borter 1999).

Diese Werkzeuge bestehen aus den internetbasierten Berechnungsprogrammen RiskPlan<sup>21</sup> zum integralen Management von Risiken (Greminger et

<sup>1</sup> [www.riskplan.admin.ch](http://www.riskplan.admin.ch) (5.1.2010).

al 2009) und EconoMe<sup>2</sup> zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren (Bründl et al 2009) sowie aus einem Leitfaden für die Analyse und Bewertung von anspruchsvollen Sicherheitsproblemen nach dem Risikokonzept (Bründl 2009).

EconoMe ist speziell dazu entwickelt worden, die Subventionsbehörden in ihren Entscheidungen zur Finanzierung von Projekten zu unterstützen. Als wichtige Entscheidungskriterien dienen das Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) der projektierten Schutzmassnahmen und die erreichte Risikoreduktion. Unterstützt werden vorwiegend Projekte, die ein NKV grösser als eins aufweisen (Baumann et al 2008). Ein weiteres Entscheidungskriterium ist die Höhe des individuellen Risikos, das einen festgelegten Grenzwert nicht überschreiten darf (Bründl 2009).

Das NKV ergibt sich aus dem Verhältnis der Risikoreduktion durch Massnahmen und den damit verbundenen Kosten. Die Faktoren, die in die Risikoberechnungen eingehen, sind mit teilweise grossen Unsicherheiten behaftet (Wilhelm 1997, Borter 1999, Romang 2004, Fuchs et al 2007, Straub & Grêt-Regamey 2006). Einer dieser Faktoren ist die Verletzlichkeit von Objekten, weshalb in den letzten Jahren einige Forschungsarbeiten zu diesem Thema durchgeführt wurden (z.B. Barbolini et al 2004, Apel et al 2004, Merz et al 2004). Da sich die Unsicherheiten dieser Faktoren direkt auf die Massnahmenbewertung auswirken können, wurde ihr Einfluss mithilfe einer Sensitivitätsanalyse untersucht (Schaub 2008). Die wichtigsten Ergebnisse dieser Studie werden im vorliegenden Artikel präsentiert und im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Naturgefahrenpraxis in der Schweiz diskutiert.

### Das Risikokonzept als theoretische Grundlage der Werkzeuge

Mit EconoMe werden die Wirkung und die Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gemäss dem Risikokonzept (Kaplan & Garrick 1981) beurteilt, welches Sicherheitsbeurteilungen von Objekten oder Situationen anhand dreier Leitfragen vornimmt (Planat 2004): Was kann passieren? Was darf passieren? Was ist zu tun? Den Rahmen für den Umgang mit Naturgefahren bildet der Ansatz eines integralen Risikomanagements (IRM; Ammann 2006), das eine der jeweiligen Situation angepasste Kombination von verschiedenen Massnahmen anstrebt und das sich zum Leitgedanken für den Umgang mit Naturgefahren auch auf internationaler Ebene entwickelt hat (Büchele et al 2006, Merz 2006, Australian Geomechanics Society Landslide Taskforce 2007).

Zur Beantwortung der Frage «Was kann passieren?» erfolgt die Durchführung einer Risikoana-

lyse, in deren Rahmen das Risiko berechnet wird (Ammann 2006). Die Grundlage für die Risikoberechnung ist die Gefahrenbeurteilung, in der für verschiedene Szenarien (z.B. 30-, 100- und 300-jährliches Ereignis) die zu erwartenden Intensitäten bestimmt und in Intensitätskarten dargestellt werden. Die Intensität eines Prozesses beschreibt das Ausmass eines potenziellen Schadenereignisses (z.B. Überflutungshöhe beim Prozess Hochwasser oder Druck beim Prozess Lawine); sie lässt sich in die Intensitätsstufen schwach, mittel und stark einteilen (BFF und SLF 1984, Loat und Petrascheck 1997, Lateltin et al 1997). Das durch einen Prozess hervorgerufene gesellschaftliche Risiko R wird durch die Multiplikation der Häufigkeit w dieses Prozesses mit dem im Ereignisfall zu erwartenden Schadenausmass A bestimmt:

$$R = w \times A \quad (1)$$

Wenn mehrere Objekte durch verschiedene Szenarien und Intensitäten betroffen werden, wird das Risiko aus der Summe der zu erwartenden Objektrisiken  $R_{ij}$  in den Szenarien m und der Anzahl der betroffenen Objekte n berechnet (Bründl 2009):

$$R = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n R_{ij} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_j \times A_{ij} \quad (2)$$

Die Ermittlung des Schadenausmasses  $A_{ij}$  für ein vom Szenario j betroffenes Objekt i erfolgt durch eine Multiplikation bedingter Wahrscheinlichkeiten.

Für Sachschäden gilt:

$$R = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n R_{ij} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_j \times p_j \times S_i \times V_{ij} \quad (CHF) \quad (3)$$

Für Personen gilt:

$$R = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n R_{ij} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_j \times p_j \times N_i \times \lambda \quad (Todesopfer) \quad (4)$$

Dabei steht  $N_i$  für die Anzahl Personen, die sich im Objekt i aufhalten und  $S_i$  für den Gesamtwert des Objekts i. Die weiteren Faktoren ( $p_j$ ,  $V_{ij}$ ,  $\lambda$ ) werden wie folgt definiert:

Die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit  $p_j$  berücksichtigt, dass ein spezifisches Ereignis oft nicht die gesamte gefährdete Fläche erreicht. Sie bezeichnet somit die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Punkt von einem Ereignis betroffen ist und wird mit einem Wert zwischen 0 und 1 quantifiziert (vgl. EconoMe).

Die Schadensempfindlichkeit  $V_{ij}$  ist die Charakterisierung des Ausmasses der Beeinträchtigung, welche ein Objekt unter einer bestimmten Prozesseinwirkung erfährt. Sie wird gemäss EconoMe für jede Prozessart und Intensitätsstufe (schwach, mit-

<sup>2</sup> www.econome.admin.ch (5.1.2010).

tel, stark) mit einem Wert zwischen 0 (keine Beeinträchtigung) und 1 (totale Beeinträchtigung) quantifiziert.

Die Letalität  $\lambda$  ist die Wahrscheinlichkeit für eine Person, zu sterben, wenn sie von einem eintretenden Ereignis getroffen wird. Sie wird mit einem Wert zwischen 0 und 1 quantifiziert (Borter 1999).

Die Frage «Was darf passieren?» wird durch eine Risikobewertung geklärt, während im Rahmen der Frage «Was ist zu tun?» eine geplante Massnahme unter anderem anhand des NKV beurteilt werden kann. Das NKV berechnet sich aus dem Verhältnis der jährlichen Risikoreduktion  $R_v$  (CHF/J) zu den jährlichen Kosten der Massnahme  $K$  (CHF/J; Bründl 2009):

$$NKV = \frac{R_v}{K} \quad (5)$$

### Methodisches Konzept der Arbeit

Die Analyse des Einflusses der Unsicherheiten wurde anhand von Fallbeispielen für die Faktoren Letalität  $\lambda$ , räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit  $p_i$ , Schadensempfindlichkeit  $V_{ij}$  und Intensität durchgeführt.

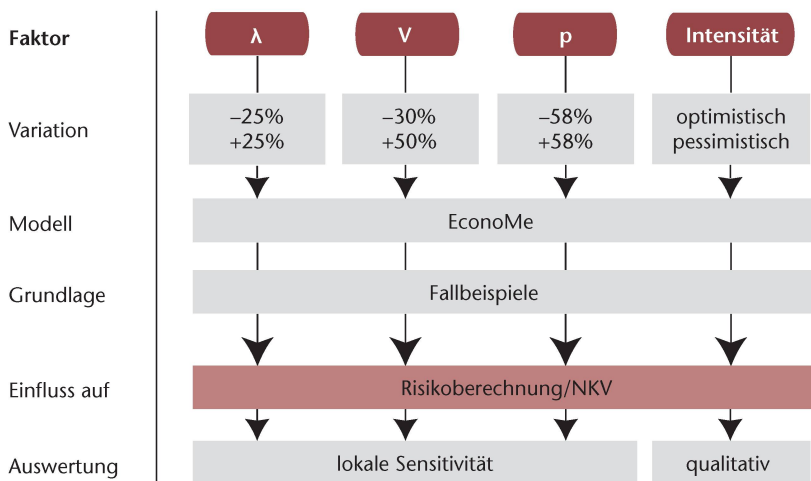


Abb 1 Ablauf der Sensitivitätsanalyse.

### Sensitivitätsanalyse

Die in der Studie (Schaub 2008) verwendete Art der Sensitivitätsanalyse untersucht die Änderung des Ergebnisses bei Variation eines Eingabefaktors. Die Variationswerte wurden dabei faktorspezifisch festgelegt (Abbildung 1), indem die jeweiligen Unsicherheiten pro Faktor als möglicher Schwankungsbereich desselben angenommen wurden. Ausgehend von den momentan in der Schweiz verwendeten Durchschnittswerten (Bründl 2009) wurde somit für die Letalität mit +/-25% (Wilhelm 1997), für die Schadensempfindlichkeit mit +50%/-30% (Romang

2004) und für die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit mit +/-58% (Bell & Glade 2004) gerechnet.

Um den Einfluss der Unsicherheiten in den Intensitätskarten abzuschätzen, wurden in Zusammenarbeit mit Experten realistische optimistische und pessimistische Varianten erarbeitet. Dies geschah ausgehend von der bestmöglichen Abschätzung, dem Grundszenario. Die alternativen Intensitätskarten berücksichtigten die Unsicherheiten in der Abschätzung der Ausdehnung und Intensität von Ereignissen.

Als Werkzeug für die Sensitivitätsanalyse wurde die Testumgebung EcoTest der internetbasierten Plattform EconoMe benützt. Diese beinhaltet die Möglichkeit, sämtliche in EconoMe vorgegebenen Werte für die Faktoren frei abzuändern.

### Auswertung

Da Datengrundlage und Analyseverfahren unterschiedlich waren, wurden die Ergebnisse nach verschiedenen, der Datenart angepassten Vorgehensweisen ausgewertet.

Für die Faktoren Letalität, Schadensempfindlichkeit und räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit wurde die lokale Sensitivität  $\eta_x$  (Gleichung 6) berechnet (nach Rheinberger et al 2009). Diese drückt das Verhältnis der relativen Änderung des Ergebnisses zur relativen Änderung des Eingabefaktors aus.

$$\eta_x = \frac{\Delta A/A_0}{\Delta x/x_0} = \frac{(A_1 - A_0)/A_0}{(x_1 - x_0)/x_0} \quad (6)$$

- $A_0$  Schadenausmass mit Durchschnittswert des Faktors
- $A_1$  Schadenausmass mit variiertem Eingabefaktor
- $x_0$  Durchschnittswert des Eingabefaktors
- $x_1$  variiertes Eingabefaktor

Als Ergebnis wurde mit dem Schadenausmass gerechnet. Aufgrund des linearen Zusammenhangs des Schadenausmasses mit dem berechneten Risiko (Gleichung 1) liessen sich die Ergebnisse direkt darauf übertragen. Dabei bedeutet  $\eta_x > 1$  eine sensitive Änderung des Schadenausmasses auf eine Änderung des Eingabefaktors,  $\eta_x = 1$  eine linear sensitive und  $\eta_x < 1$  eine nicht sensitive Reaktion.

Für die Auswertung des Einflusses des Faktors Intensität wurde eine qualitative Betrachtung vorgenommen.

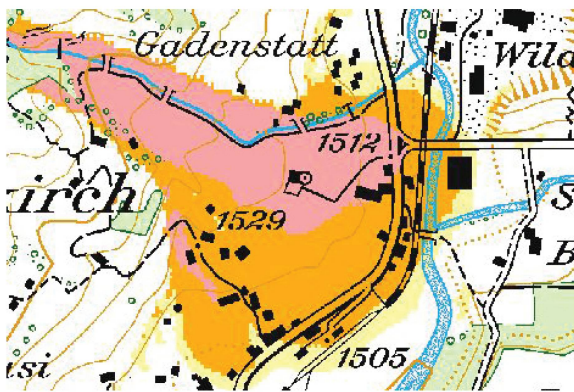
### Datengrundlage

Als Grundlage der Analyse wurden pro Naturgefahrenprozess (Lawine, Murgang, Sturz, Rutschung, Hochwasser) zwei Fallbeispiele untersucht. Für den Faktor Intensität wurde jeweils nur ein Fallbeispiel betrachtet. Auswahlkriterium war, dass die Beispiele möglichst viele verschiedene Objektkategorien und Schadensobjekte beinhalteten, damit die Aussagen sich auf den betrachteten Faktor oder Prozess selbst und nicht implizit auf spezifische Eigenschaften des

Schadenpotenzial						
Gesamt	978 917 128 CHF					
Personen	928 252 400 CHF					
Objekte	50 664 728 CHF					
Schadenausmass	Vor Massnahmen			Nach Massnahmen		
	Anzahl Objekte	Schadenausmass (CHF)	Todesfälle/ Ereignis	Anzahl Objekte	Schadenausmass (CHF)	Todesfälle/ Ereignis
Szenario 30	26	14 647 300	2.4	7	914 675	0.1
Szenario 100	53	51 264 200	8.3	22	5 763 570	0.9
Szenario 300	54	74 780 100	12.3	33	15 936 900	2.6
Risiko	932 799 CHF			112 889 CHF		
Risikoreduktion	819 909 CHF					
Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV)	3.3					

Tab 1 Kennzahlen des Fallbeispiels Lawine 2.

#### Intensität vor Massnahmen



#### Intensität nach Massnahmen

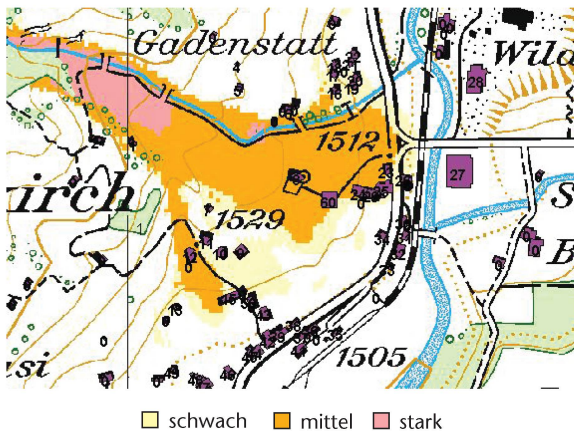


Abb 2 Intensitätskarten des 100-jährlichen Szenarios vor (oben) und nach (unten) Massnahmen für das Fallbeispiel Lawine 2. © Swisstopo (JD082774).

Fallbeispiels und die darin enthaltenen Objekte bezogen. Die zur Verfügung stehenden Daten beinhalten die Intensitätskarten für jedes Szenario (Abbildung 2) sowie Angaben zum Schadenpotenzial und -ausmass des jeweiligen Fallbeispiels (Tabelle 1).

### Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Die Resultate der Sensitivitätsanalyse werden getrennt nach dem Einfluss der Faktoren auf die Risikoberechnung und das NKV betrachtet.

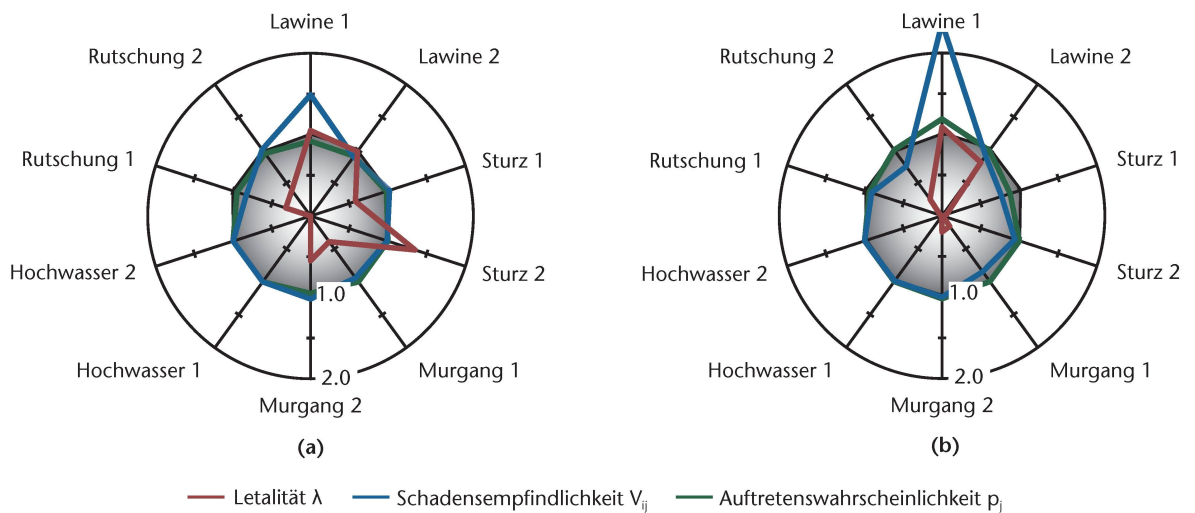
### Einfluss der Faktoren auf die Risikoberechnung

Auf den Eingabefaktor Letalität reagierte das Schadenausmass nicht sehr stark. Bezüglich der Situation vor Massnahmen (Abbildung 3a) zeigte sich, dass sich nur ein Sturz-Beispiel sensitiv verhielt. Während die Lawinen-Beispiele linear sensitiv reagierten, zeigten bis auf die Hochwasser-Beispiele, welche überhaupt nicht reagierten, alle Beispiele eine nicht sensitive Reaktion auf eine Veränderung der Letalität. Das Schadenausmass nach Massnahmen (Abbildung 3b) verhielt sich noch weniger aktiv als das Schadenausmass vor Massnahmen. Bis auf ein Lawinen-Beispiel, welches linear sensitiv reagierte, zeigten nach Massnahmen alle Beispiele eine nicht sensitive oder gar keine Reaktion.

Zu einer Änderung der Schadensempfindlichkeit verhielt sich das Schadenausmass vor Massnahmen (Abbildung 3a) der meisten Beispiele linear sensitiv. Ausnahmen stellten nur die Lawinen-Beispiele dar, von denen das eine sensitiv und das andere nicht sensitiv reagierte, sowie ein Rutschungs-Beispiel, das sich ebenfalls nicht sensitiv verhielt. Für das Schadenausmass nach Massnahmen (Abbildung 3b) bewegten sich alle lokalen Sensitivitäten (Ausnahme: Lawinen-Beispiel 1, welches sensitiv reagierte) in der Nähe von 1. Dabei zeigten bis auf die beiden Lawinen- sowie ein Murgang-Beispiel alle eine knapp nicht sensitive Reaktion.

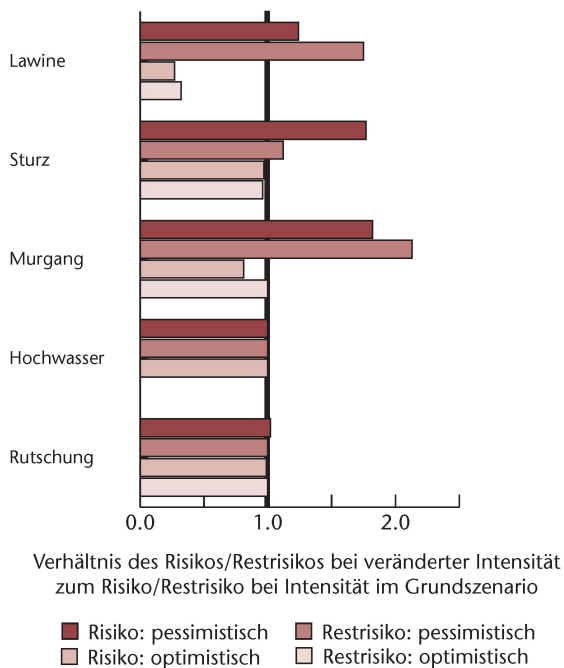
Sämtliche Fallbeispiele reagierten vor Massnahmen (Abbildung 3a) auf eine Änderung der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit linear sensitiv. Ebenso verhielten sich die Schadenausmassen nach Massnahmen (Abbildung 3b) linear sensitiv. Ausnahmen bildeten hier ein Lawinen- (knapp sensitive Reaktion) sowie ein Sturz-Beispiel (knapp nicht sensitive Reaktion).

Bei Variation des Faktors Intensität hatten in drei von fünf Fällen (Sturz, Murgang, Rutschung) die pessimistischen Variationen der Intensitätskarten den stärkeren Einfluss als die optimistischen (Abbildung 4). Das Fallbeispiel für Lawinen reagierte



**Abb 3** Einfluss der Faktoren Letalität  $\lambda$ , Schadensempfindlichkeit  $V_{ij}$  und räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit  $p_i$  auf das Schadenausmass a) vor und b) nach Massnahmen. Dargestellt ist der Durchschnitt der lokalen Sensitivität  $\eta_x$  aus der positiven und negativen Variation.

stärker auf die optimistische Variante, während beim Hochwasser-Beispiel keine Unterschiede ausgemacht werden konnten. Die Intensität verursachte eine Veränderung der berechneten Risiken vor Massnahmen um bis zu  $\pm 80\%$ . Für die Situation nach Massnahmen konnten in drei der fünf Fälle (Lawine, Sturz, Murgang) ebenfalls stärkere Veränderungen durch die pessimistische als durch die optimistische Variante hervorgerufen werden. Während das Hochwasser-Beispiel stärker auf die optimistische Variante reagierte, veränderte sich das Restrisiko des Rutschungs-Beispiels nicht. Die berechneten Restrisiken variierten zwischen  $+112\%$  und  $-100\%$ .



**Abb 4** Einfluss der Intensität auf das jährliche Risiko vor und das jährliche Restrisiko nach Massnahmen. Dargestellt ist das Verhältnis der optimistischen und pessimistischen Varianten zum Grundscenario.

### Einfluss der Faktoren auf die Massnahmenbewertung

Das NKV veränderte sich unter Einfluss der Letalität maximal um  $\pm 25\%$ , also linear zur Änderung des Eingabefaktors (Tabelle 2). Die grössten absoluten und relativen Veränderungen waren dabei bei den Lawinen-Beispielen auszumachen, keine Änderungen zeigten die Hochwasser-Beispiele.

Auf eine Veränderung des Faktors Schadensempfindlichkeit reagierten sämtliche Fallbeispiele. Die Beispiele mit dem grössten oder kleinsten NKV wiesen auch die grösste resp. kleinste absolute Veränderung auf. Relativ gesehen änderten sich alle Beispiele maximal um  $+50\%$ / $-30\%$  und somit linear zur Änderung der Schadensempfindlichkeit.

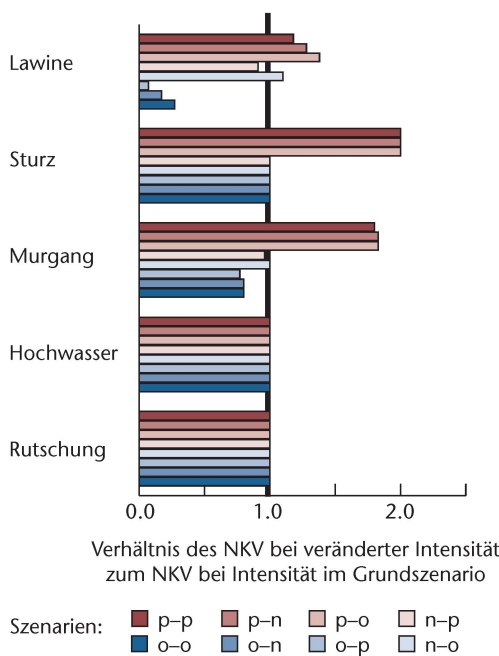
Bei Variation der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit veränderte sich das NKV bei negativer Variation öfter und stärker als bei positiver Variation. In negativer Richtung betrug die Änderung immer ungefähr  $-60\%$ . In positiver Richtung gab es grössere Unterschiede zwischen den Fallbeispielen, so veränderten sich die Hochwasser-Beispiele gar nicht, während das NKV der Sturz-Beispiele um  $+60\%$  anstieg.

Für sämtliche Kombinationen der variierten Intensitäten zeigten die Fallbeispiele der Prozesse Hochwasser und Rutschung keine Veränderung des NKV (Abbildung 5). Für das Lawinen-Beispiel trat die stärkste Änderung in denjenigen Fällen auf, für die vor Massnahmen eine optimistisch abgeschätzte Situation angenommen wurde. Die grösste Veränderung konnte dabei für die Kombination optimistisch vor Massnahmen – pessimistisch nach Massnahmen ausgemacht werden. Die Sturz- und Murgang-Beispiele hingegen reagierten nur bei Kombinationen, die von einer pessimistischen Situation vor Massnahmen ausgingen. Während beim Sturz-Beispiel alle diese Kombinationen dieselbe Veränderung des

Faktor	Lawine		Sturz		Murgang		Hochwasser		Rutschung	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>Letalität <math>\lambda</math></b>										
Relatives Minimum (-25%)	0.78	0.79	1.00	0.80	0.93	0.86	1.00	1.00	0.92	0.86
Relatives Maximum (+25%)	1.21	1.18	1.00	1.27	1.07	1.14	1.00	1.00	1.08	1.00
<b>Schadensempfindlichkeit <math>V_{ij}</math></b>										
Relatives Minimum (-30%)	0.76	0.76	0.80	0.73	0.73	0.73	0.70	0.70	0.77	0.71
Relatives Maximum (+50%)	1.27	1.33	1.50	1.27	1.27	1.45	1.48	1.50	1.23	1.29
<b>Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit <math>p_i</math></b>										
Relatives Minimum (-58%)	0.42	0.42	0.50	0.40	0.80	0.41	0.43	0.42	0.46	0.43
Relatives Maximum (+58%)	1.37	1.45	1.50	1.60	1.20	1.32	1.00	1.00	1.38	1.29

**Tab 2** Maximale Änderung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses (NKV) pro Fallbeispiel und Faktor. Aufgelistet ist das Verhältnis des NKV mit variiertem Eingabefaktor zum NKV im Grundszenario.

NKV ergaben, reagierten beim Murgang-Beispiel die Kombinationen pessimistisch – Grundszenario und pessimistisch – optimistisch am stärksten. Absolut gesehen variierten die NKV zwischen -93% (Lawine) und +100% (Sturz).



**Abb 5** Einfluss der Intensität auf das Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV). Dargestellt ist das Verhältnis des NKV verschiedener Varianten von Intensitätskarten. *p* steht für eine pessimistische und *o* für eine optimistische Intensitätskarte. Das Grundszenario *n* stellt die ursprüngliche Intensitätskarte dar. *p-p* bedeutet beispielsweise, dass das NKV einer pessimistischen Intensitätskarte vor Massnahmen mit dem NKV einer pessimistischen Intensitätskarte nach Massnahmen verglichen wird.

## Diskussion

### Beurteilung der Risikoberechnung

Es bestand ein Zusammenhang zwischen der Sensitivität der Risikoberechnung gegenüber der Letalität sowie der Anzahl Todesfälle pro Ereignis. Allerdings traf dies nur für Beispiele mit mehr als einem Todesfall pro Ereignis zu. Die entsprechenden

Beispiele deckten vor allem die Prozesse Lawine und Murgang sowie teilweise den Prozess Rutschung ab. Diese Beziehung besagte zwar, ob ein Schadenausmass auf eine Änderung der Letalität reagierte, gab aber keine Auskunft über die Stärke der Sensitivität.

Für die Schadensempfindlichkeit konnte gefolgert werden, dass alle Prozesse und Beispiele sowohl vor als auch nach Massnahmen etwa gleich stark durch den Faktor beeinflusst wurden, nämlich ungefähr linear sensitiv. Die einzige Ausnahme (Lawinen-Beispiel 1) konnte dadurch erklärt werden, dass dieses Beispiel viele Objekte enthielt, die mit starker Intensität betroffen waren und bereits mit einem Wert 1 in EconoMe implementiert waren. Somit konnten die Werte nicht mehr um +50% erhöht werden, was zu einer sensitiven Reaktion führte, da die Auswertung auf dem Durchschnitt der negativen und der positiven Variation beruhte.

Bei einer Änderung der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit verhielten sich sämtliche Beispiele linear sensitiv. Dies lässt sich damit erklären, dass der Faktor multiplikativ in die Risikoberechnung eingeht und nicht weiter von Eigenheiten der Prozesse oder Fallbeispiele abhängt.

Die Stärke der Reaktion der berechneten Risiken und Restrisiken auf die alternativen Intensitäten konnte mit den Merkmalen der Fallbeispiele in Zusammenhang gebracht werden. So kann für die betrachteten Fallbeispiele gesagt werden, dass die Grösse des Gesamtschadenpotenzials, das berechnete Risiko oder Restrisiko oder die Anzahl betroffener Objekte sehr gut über den möglichen Schwankungsbereich der Risikoberechnung Auskunft geben konnten. Dazu ist festzuhalten, dass vor allem schnell ablaufende Prozesse Unsicherheiten aufwiesen, die in den Situationen vor und nach Massnahmen ungefähr gleich gross waren.

### Beurteilung der Massnahmenbewertung nach Faktoren

Eine Rangfolge der Prozesse liess sich aufstellen bezüglich der Beeinflussbarkeit des NKV durch den Faktor Letalität: 1. Lawine, 2. Sturz, 3. Murgang,

4. Rutschung, 5. Hochwasser. Es liessen sich deshalb nicht alle Prozesse gleich stark beeinflussen, weil sich das NKV bei denjenigen Fallbeispielen am stärksten veränderte, die auch in der Risikoberechnung grosse Änderungen aufwiesen. Dies war vor allem bei den Lawinen- und Sturz-Beispielen der Fall. Die Letalität konnte dadurch eine Veränderung der Reihenfolge der Projekte und somit der Priorisierung bewirken. Nicht zu verändern vermochte der Faktor jedoch den Entscheid über die Kostenwirksamkeit eines einzelnen Projektes (NKV grösser oder kleiner eins).

Die Schadensempfindlichkeit konnte das NKV der Fallbeispiele aller Prozesse verändern, aber immer linear zu ihrer Änderung. Die Konsequenzen waren somit für alle Beispiele dieselben, die Priorisierung wurde also nicht verändert.

Das NKV verhielt sich linear zur Änderung der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit, wodurch

sich am Kostenwirksamkeitsentscheid, ausser in Ausnahmefällen, nichts änderte und auch die Priorisierung nicht umgestellt wurde. Die Ausnahmefälle liessen sich damit erklären, dass die Durchschnittswerte (Bründl 2009) schon nahe oder gleich eins waren.

Bezüglich der Intensität galt für die vorliegenden Fallbeispiele, dass nur eine Änderung sowohl des Risikos als auch des Restrisikos zu einer Änderung des NKV führte. Hatte sich nur eines der beiden berechneten Risiken verändert, so hatte dies keinen Einfluss auf das NKV. Die Veränderungen waren meist am stärksten für die Kombinationen von pessimistischen und optimistischen Karten. Da nur fünf Fallbeispiele betrachtet wurden, sind die Ergebnisse aber nicht repräsentativ, weil Einflüsse von Eigenheiten der Projekte oder Massnahmen nicht ausgeschlossen werden konnten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ausser der Intensität kein Faktor eine Änderung des Kostenwirksamkeitsentscheid bewirken kann, sofern das NKV nicht ohnehin nahe eins ist. Grundsätzlich haben aber alle Faktoren das Potenzial, das NKV zu beeinflussen und somit die Priorität des Projektes (Baumann et al 2008) zu verändern.

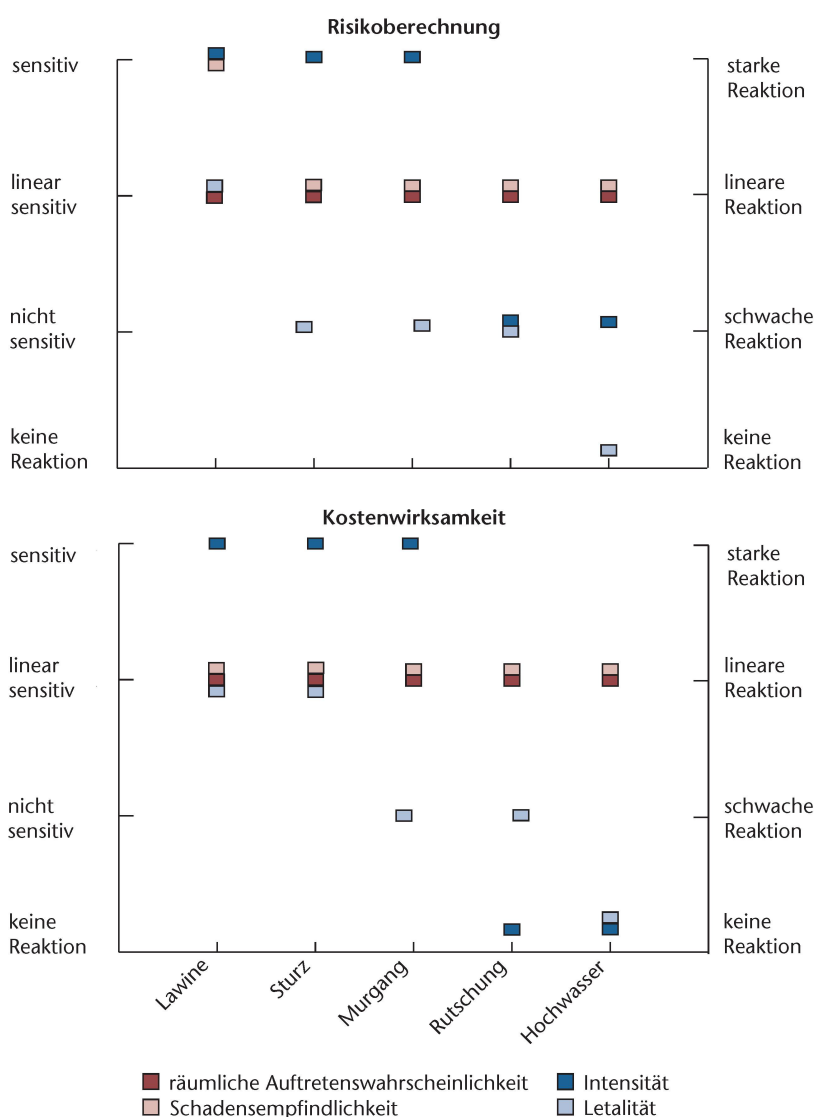
### Gesamthafte Beurteilung aller Faktoren

Aus den Ergebnissen lassen sich Rangfolgen sowohl der Faktoren als auch der Prozesse erstellen (Abbildung 6).

Die Faktoren lassen sich dabei bezüglich ihres Einflusses auf die Risikoberechnung und das NKV folgendermassen einordnen: 1. Intensität, 2. Schadensempfindlichkeit, 3. räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit, 4. Letalität. Die Prozesse lassen sich entsprechend ihrer Beeinflussbarkeit durch die Eingabefaktoren auflisten: 1. Lawine, 2. Sturz, 3. Murgang, 4. Rutschung, 5. Hochwasser.

### Bedeutung für das angewandte Risikomanagement

Wie gezeigt wurde, ergeben sich durch die Variabilität der Faktoren in der Risikoberechnung unterschiedliche Ergebnisse für das berechnete Risiko, was in diesem Artikel mit dem Begriff Unsicherheit umschrieben wird. Die grössten Unsicherheiten bei der Berechnung des Risikos bestehen bezüglich des Faktors Intensität. Daher ist es wichtig, dass der Erstellung der Intensitätskarten ein grosses Gewicht gegeben wird und diese eine gute Qualität aufweisen, da sie eine zentrale Grundlage der Risikoberechnung darstellen. Da jedoch die Variabilität aller Faktoren einen Einfluss auf die Risikoberechnung haben kann, ist es nötig, diese zu kommunizieren. Eine Möglichkeit wäre, mit Bandbreiten der möglichen Ergebnisse zu arbeiten. Dieses Vorgehen verlangt als Vorarbeit die Präzisierung der aktuell verwendeten Durchschnittswerte (Bründl 2009) in einem sinnvollen Rahmen. Nötig wäre dies in Bezug auf die am



**Abb 6** Sensitivität der Risikoberechnung (oben) und der Kostenwirksamkeit (unten) in Bezug zu den Eingabefaktoren. Die Grafik zeigt, dass die Faktoren räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit  $p_i$ , Schadensempfindlichkeit  $V_i$  und Intensität meist einen linear sensitiven oder sensitiven Einfluss haben. Die Letalität  $\lambda$  zeigt meist einen nicht sensitiven oder keinen Einfluss.

stärksten beeinflussbaren Prozesse (Lawine, Sturz, Murgang) sowie für den Faktor Schadensempfindlichkeit, welcher nach der Intensität den zweitgrössten Einfluss hat, und den Faktor räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit, welcher die grösste Variabilität beinhaltet. Fließen die verbleibenden, quantifizierten Unsicherheiten als Schwankungsbereich in die Risikoberechnung ein, so wäre das berechnete Risiko kein absoluter Wert mehr, sondern eine Bandbreite möglicher Werte (beispielhaft in Abbildung 7 dargestellt). Die Anwendung dieser Vorgehensweise verlangt ebenfalls eine weniger strikte Handhabung der Priorisierung als bis anhin. Dabei müsste vor allem die feste Grenze des NKV bei eins überdacht werden. Bedeutender als das NKV und aussagekräftiger für die Priorisierung ist die Reihenfolge der Projekte, die sich durch die verschiedenen NKV ergibt.

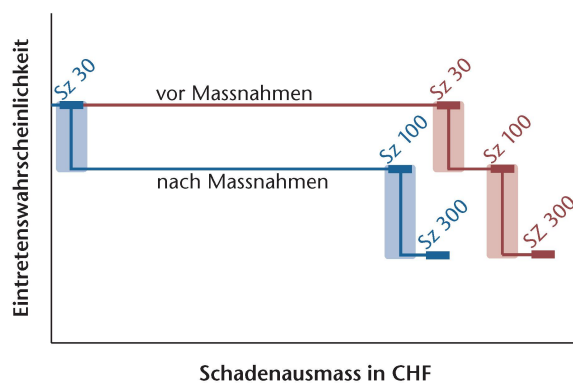


Abb 7 Mögliche Darstellung der Bandbreite des berechneten Risikos für ein fiktives Beispiel. Die Bandbreite ergibt sich als Folge der Variation der Berechnungsfaktoren.

## Schlussfolgerungen

Diese Studie konnte aufzeigen, welche Faktoren unter den gegebenen Annahmen den stärksten Einfluss auf die Risikoberechnung hatten, welche Prozesse sowie Fallbeispiele am stärksten beeinflussbar waren und welche Bedeutung dies für die Massnahmenbewertung hatte. Es muss jedoch beachtet werden, dass aufgrund der komplexen und individuellen Gestaltung der Beispiele zu einem unbestimmten Teil auch Eigenschaften der Fallbeispiele und nicht der Faktoren oder Prozesse abgebildet wurden. Trotzdem haben die Untersuchungen im Vergleich mit thematisch ähnlichen Studien (Wilhelm 1997, Borter & Bart 1999, Bell & Glade 2004, Sterlacchini et al 2007) übereinstimmende Ergebnisse geliefert. Deshalb konnten auch Vorschläge für den zukünftigen Umgang mit den Unsicherheiten in der Praxis erarbeitet und mit bestehenden Vorschlägen (Romang 2004, Grêt-Regamey & Straub 2006, Bohnenblust et al 2008) verglichen werden. Es haben sich aber auch weitere Fragestellungen aufgetan. So

könnte ein nächster Schritt darin bestehen, die Standardwerte vor allem der Faktoren Schadensempfindlichkeit und räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit zu präzisieren. Ebenso sollte der Einfluss der Eingabefaktoren auf die Höhe des individuellen Risikos überprüft werden, da dies neben dem NKV ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung von Schutzmassnahmen darstellt.

Eingereicht: 9. September 2009, akzeptiert (mit Review): 5. Januar 2010

## Literatur

- AGRAWALA S, EDITOR (2007) Klimawandel in den Alpen. Anpassung des Wintertourismus und des Naturgefahrenmanagements. Paris: OECD. 136 p.
- AMMANN W (2006) Risk concept, integral risk management and risk governance. In: Ammann W, Dannenmann S, Vulliet L, editors. Risk 21 – Coping with risks due to natural hazards in the 21st century, London: Taylor & Francis. pp. 3–23.
- APEL H, THIEKEN A, MERZ B, BLÖSCHL G (2004) Flood risk assessment and associated uncertainty. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 4: 295–308.
- AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY LANDSLIDE TASKFORCE (2007) Practice note guidelines for landslide risk management. *Aust Geomechanics* 42: 63–114.
- BARBOLINI M, CAPPABIANCA F, SAILER R (2004) Empirical estimate of vulnerability relations for use in snow avalanche risk assessment. In: Brebbia C, editor. *Risk Analysis IV*. Southampton: WIT. pp. 533–542.
- BAUMANN R ET AL (2008) Fachspezifische Erläuterungen zur Programmvereinbarung im Bereich Schutzbauten und Gefahregrundlagen. In: Bafu. *Handbuch NFA im Umweltbereich*. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Vollzug 0808. pp. 136–172.
- BELL R, GLADE T (2004) Quantitative risk analysis for landslides – Examples from Bildudalur, NW-Iceland. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 4: 117–131.
- BEZZOLA GR, HEGG C (2007) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Wissen 0707. 215 p.
- BFF, SLF (1984) Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bern: Eidg Drucksachen Materialzentrale. 21 p.
- BOHNENBLUST H, HOLTHAUSEN N, MERZ HA (2008) Risikoaversion. Entwicklung systematischer Instrumente zur Risiko- bzw. Sicherheitsbeurteilung. Zusammenfassender Bericht. Bern: Bundesamt Bevölkerungsschutz. 47 p.
- BORTER P (1999) Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. Band 1: Methode. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Umwelt-Materialien 107-I. 115 p.
- BORTER P, BART R (1999) Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. Band 2: Fallbeispiele und Daten. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Umwelt-Materialien 107-II. 129 p.
- BRÜNDL M, EDITOR (2009) Risikokzept für Naturgefahren – Leitfaden. Bern: Nationale Plattform für Naturgefahren (Planat). 420 p.
- BRÜNDL M, ROMANG HE, BISCHOF N, RHEINBERGER CM (2009) The risk concept and its application in natural hazard risk management in Switzerland. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9: 801–813.

- BÜCHELE B ET AL (2006)** Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6: 485–503.
- FUCHS S, HEISS K, HÜBL J (2007)** Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 7: 495–506.
- GREMINGER P, BALMER J, WILLI C, MERZ HA, GUTWEIN P (2009)** Pragmatisches Risikomanagement mit RiskPlan. *Tec21* 135 (31–32): 16–18.
- GRÊT-REGAMEY A, STRAUB D (2006)** Spatially explicit avalanche risk assessment linking Bayesian networks to a GIS. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6: 911–926.
- KAPLAN S, GARRICK B (1981)** On the quantitative definition of risk. *Risk Anal* 1: 11–27.
- LATELTIN O, TRIPET JP, BOLLINGER D (1997)** Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. *Empfehlungen 1997*. Bern: Bundesamt Raumplanung. 42 p.
- LOAT R, PETRASCHECK A (1997)** Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. *Empfehlungen 1997*. Bern: Bundesamt Wasserwirtschaft. 32 p.
- MERZ B (2006)** Hochwasserrisiken – Möglichkeiten und Grenzen der Risikoabschätzung. Stuttgart: Schweizerbart. 334 p.
- MERZ B, KREIBICH H, THIEKEN A, SCHMIDTKE R (2004)** Estimated uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 4: 153–163.
- PLANAT (2002)** Sicherheit vor Naturgefahren. Vision und Strategie. Biel: Nationale Plattform Naturgefahren. 40 p.
- PLANAT (2004)** Strategie Naturgefahren Schweiz. Teilprojekt B: Methoden-Evaluation. Biel: Nationale Plattform Naturgefahren. 91 p.
- RHEINBERGER C, BRÜNDL M, RHYNER J (2009)** Dealing with the white death: Avalanche risk management for traffic routes. *Risk Anal* 29: 76–94.
- ROMANG H (2004)** Wirksamkeit und Kosten von Wildbach-Schutzmassnahmen. Bern: Univ Bern, *Geographica Bernensia* G73. 211 p.
- SCHAUB Y (2008)** Risikomanagement von Naturgefahren. Sensitivität der Risikoberechnung in Bezug auf die Eingabefaktoren und deren Bedeutung für die Massnahmenbewertung. Zürich: Univ Zürich, Geograf Inst, MSc thesis. 71 p.
- STERLACCHINI S, FRIGERIO S, GIACOMELLI P, BRAMBILLA M (2007)** Landslide risk analysis: a multi-disciplinary methodological approach. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 7: 657–675.
- STRAUB D, GRÊT-REGAMEY A (2006)** A Bayesian probabilistic framework for avalanche modelling based on observations. *Cold Reg Sci Technol* 46: 192–203.
- WILHELM C (1997)** Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz. Methodik und Erhebung zur Beurteilung von Schutzmassnahmen mittels quantitativer Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung. Davos: Eidg Inst Schnee- Lawinenforsch, *Mitt* 54. 309 p.
- WILHELM C (1999)** Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutz-Massnahmen an Verkehrsachsen. Vorgehen, Beispiele und Grundlagen für Projektevaluation. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, *Vollzug Umwelt*. 110 p.

## Zur Sensitivität der Risikoberechnung und Massnahmenbewertung von Naturgefahren

Die schweizerische Bevölkerung hat sich schon immer mit Naturgefahren auseinandersetzen müssen und wird auch in Zukunft solche Ereignisse zu bewältigen haben. Projekte zum Schutz vor Naturgefahren müssen seit der Neugestaltung des Finanzausgleichs ganzheitlich bezüglich ihrer Schutzwirkung und Wirtschaftlichkeit beurteilt werden. Aus diesem Grund wurden Werkzeuge entwickelt, die das Risiko von Gefahrensituationen einheitlich berechnen und Massnahmen beurteilen helfen (z.B. EconoMe). Die Faktoren, die in diese Berechnungen eingehen, sind mit Unsicherheiten behaftet, die sich direkt auf die Massnahmenplanung auswirken können. Aus diesem Grund wurde anhand von Fallbeispielen eine Sensitivitätsanalyse der Risikoberechnung und Massnahmenbewertung bezüglich der Faktoren Intensität, räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit, Letalität und Schadensempfindlichkeit durchgeführt. Daraus hat sich ergeben, dass sämtliche Faktoren einen Einfluss ausüben können. Dabei ist derjenige der Intensität am stärksten, gefolgt von der Schadensempfindlichkeit, der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit und der Letalität. Für die schweizerische Praxis bedeutet dies, dass eine gute Qualität der Intensitätskarten unerlässlich ist. Zudem sollten die Unsicherheiten kommuniziert werden, indem mit Bandbreiten von berechneten Risiken gearbeitet wird. Dies bedingt jedoch auch, dass die Priorisierung der Projekte anhand des Nutzen-Kosten-Verhältnisses überarbeitet werden müsste.

## Sur la sensibilité quant à la détermination des risques et l'appréciation des mesures contre les dangers naturels

La population suisse vit depuis la nuit des temps avec les dangers naturels et devra les gérer également à l'avenir. Dans le cadre de la nouvelle péréquation financière, l'efficacité et la rentabilité des projets de protection contre les dangers naturels doivent être jugés. Des méthodes ont été développées pour déterminer de manière unifiée le niveau de risque et pour évaluer les différentes mesures de protection envisagées (p. ex. EconoMe). Les paramètres de calcul de ces méthodes comprennent toutefois des incertitudes qui ont des répercussions directes sur la planification des mesures de protection. Pour mieux en cerner les conséquences, une analyse de sensibilité quant au calcul des risques et de l'appréciation des mesures de protection a été effectuée sur la base d'exemples concrets selon les paramètres suivants: intensité, probabilité d'occurrence spatiale du processus, létalité pour les personnes et vulnérabilité de l'objet. L'analyse démontre que tous les paramètres influencent les résultats, mais que l'influence est plus forte pour le paramètre «intensité», suivi par celui de la «vulnérabilité», «l'occurrence spatiale» et la «létalité». De ce fait, en Suisse, des cartes d'intensité d'excellente qualité seront indispensables pour la pratique. Afin de clairement communiquer les incertitudes, il faudra travailler avec la gamme entière de risques calculés plutôt qu'avec des valeurs absolues. Finalement, l'ordre de priorité des projets devra être revu à la lumière du rapport coûts/efficacité.