

## VERGLEICH VON VULNERABILITÄTSKURVEN FÜR WILDBACHPROZESSE

### A COMPARISON OF VULNERABILITY FUNCTIONS FOR TORRENT PROCESSES

Reinhold Totschnig<sup>1</sup> und Sven Fuchs<sup>2</sup>

#### ZUSAMMENFASSUNG

Die Bestimmung der Vulnerabilität von Risikoelementen (z.B. Personen, Gebäude, Infrastruktur) spielt bei der Ermittlung des Risikos eine zentrale Rolle. Vulnerabilitätsfunktionen, die eine Beziehung zwischen der Schadenlast des Gebäudes und der schadenverursachenden Prozessintensität herstellen, sind eine Möglichkeit, Verletzlichkeit zu quantifizieren. Für verschiedene Wildbachprozesse (fluviatiler Feststofftransport bis Murgang) wurden in den letzten Jahren derartige Funktionen abgeleitet. In der vorliegenden Arbeit wurde eine Vulnerabilitätsfunktion für fluviatilen Feststofftransport in Wildbächen mit Funktionen für Murgänge verglichen. Basierend auf der Auswertung österreichischer Daten ergaben sich auf Grund des Fehlens von hohen Schadenlastwerten für beide Prozesse unterschiedliche Kurvenverläufe. Nach Erweiterung des Datensatzes mit Daten einer italienischen Studie konnten für die unterschiedlichen Prozesse ähnliche Kurvenverläufe erzielt werden. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass für die Bestimmung der Vulnerabilität keine Unterscheidung zwischen feststoff-belasteten Wildbachprozessen notwendig ist. Die präsentierten Vulnerabilitätsfunktionen sind operativ einsetzbar und können im Rahmen des Risikomanagements verwendet werden.

**Keywords:** Risikobewertung, Verletzlichkeit, Wildbachprozesse, Alpen, Österreich

#### ABSTRACT

Vulnerability assessment for elements at risk (e.g. persons, buildings and infrastructure) is an essential component in the framework of risk assessment. Vulnerability functions, also known as vulnerability curves, establish a relationship between the degree of loss of individual elements at risk such as buildings and the intensity of the impacting process. Such functions were only recently developed for torrent processes (fluvial sediment transport and debris flows). In our study a vulnerability curve for residential buildings affected by fluvial sediment transport in torrents was compared with vulnerability curves for debris flows. Based on Austrian data the curves did show a mismatch if compared to each other due to missing high values for the degree of loss in case of debris flows. However, after complementing the data set with vulnerability data provided by an Italian study the shape of the two curves was similar. Hence, we conclude that there is no need to differentiate between fluvial sediment transport processes, debris floods or debris flows when assessing vulnerability. The presented vulnerability functions may be operationally applied in the framework of risk management.

**Keywords:** Risk assessment, vulnerability, torrent processes, Alps, Austria

---

<sup>1</sup> DI Reinhold Totschnig, MSc. Institute of Mountain Risk Engineering, University of Natural Resources and Life Sciences, Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Vienna, Austria (e-mail: reinhold.totschnig@boku.ac.at)

<sup>2</sup> Priv.-Doz. Dr. Sven Fuchs. Institute of Mountain Risk Engineering, University of Natural Resources and Life Sciences, Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Vienna, Austria (e-mail: sven.fuchs@boku.ac.at)

## **EINLEITUNG**

Alpine Naturgefahren stellen in einem Land wie Österreich eine ständige Bedrohung für den besiedelten Raum dar. Wildbachprozesse, als Teil der alpinen Naturgefahren, werden dabei in die Prozesse Hochwasser, fluviatiler Feststofftransport, murartiger Feststofftransport und Murgang unterteilt (ONR, 2009). Auch wenn sich, basierend auf Auswertungen unterschiedlicher Datenbanken (Oberndorfer et al., 2007; Hübl et al., 2011), für Wildbachprozesse keine eindeutige Zunahme der Anzahl von Ereignissen innerhalb der letzten 50 Jahre erkennen lässt, hat sich das Schadenspotential in diesem Zeitraum deutlich erhöht (Keiler und Fuchs, 2010). Damit einhergehend ist ein Bevölkerungswachstum von 7,1 Mio. im Jahre 1961 auf 8,4 Mio. im Jahre 2010 (Statistik Austria, 2011). Bedingt durch den Gebirgscharakter ist einerseits für Bauzwecke nutzbares Land in Österreich nur begrenzt verfügbar (Holub und Fuchs, 2009), andererseits hat sich der durchschnittliche Bedarf an Wohnfläche von 22 m<sup>2</sup> pro Person im Jahre 1972 auf 38 m<sup>2</sup> im Jahre 2001 erhöht (Statistik Austria, 2004). Dieser Erhöhung des Schadenpotentials und der damit möglichen Schäden wird durch die Berücksichtigung des Risikokonzpts im Umgang mit Naturgefahren Rechnung getragen. Dies zeigt sich auf einer politischen Ebene zum Beispiel in einzelnen Alpenländern wie der Schweiz (PLANAT, 2005), aber auch auf einer gesamteuropäischen Ebene durch das Inkrafttreten der *Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken* (Commission of the European Communities, 2007). Auch auf einer wissenschaftlichen Ebene findet eine intensive Auseinandersetzung mit der Thematik statt, und es werden Methoden und Konzepte für den Umgang mit Naturgefahren bzw. für das Risikomanagement von Naturgefahren entwickelt (z.B. Mazzorana und Fuchs, 2010). Die Vulnerabilität bzw. Verletzlichkeit der Risikoelemente (z.B. Personen, Gebäude, Infrastruktur) ist bei der Ermittlung des Risikos ein zentrales Element.

Für alpine Naturgefahren geben Paphoma-Köhle et al. (2011) einen Überblick über die Bewertung der physischen Vulnerabilität, während bei Fuchs et al. (2007) detaillierter auf bereits publizierte Verfahren für Murgänge eingegangen wird. Ein Großteil der dabei von diesen Autoren zusammengefassten Methoden hat einen qualitativen bis semi-quantitativen Charakter, nur vereinzelt finden sich quantifizierende Ansätze (z.B. Fuchs et al., 2007; Totschnig et al., 2011). Für eine Berechnung des Risikos ist die Quantifizierung der Vulnerabilität unabdingbar. Die Vulnerabilität ist dabei abhängig von der Magnitude oder Intensität des Prozesses. In Bezug auf Wildbachprozesse wird gemeinhin angenommen, dass Murgänge eine größere Belastung auf Gebäude ausüben als ein Prozess mit dominierendem fluviatilen Feststofftransport (Hungr et al., 2001). In Österreich ist man im Zusammenhang mit der *Richtlinie für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und Priorisierung von Maßnahmen der Wildbach- und Lawinerverbauung* von dieser Annahme abgegangen und hat einheitliche Vulnerabilitätswerte für die Prozesse Hochwasser mit starker Geschiebeführung und Murgang ausgewiesen (BMLFUW, 2005). In dieser Richtlinie wurden jedoch in vereinfachender Weise für nur zwei Intensitätsklassen entsprechend der roten und gelben Gefahrenzone Angaben gemacht.

Ein direkter und kontinuierlicher Zusammenhang zwischen Vulnerabilität und Intensität kann in Form von Vulnerabilitätskurven hergestellt und quantifiziert werden. Für Wildbachprozesse wurden dabei verschiedene Vulnerabilitätsfunktionen entwickelt (Fuchs et al., 2007; Akbas et al., 2009; Tsao et al., 2010; Totschnig et al., 2011), die entweder auf Murgänge oder auf fluviatilen Feststofftransport Bezug nehmen. Im Zuge der hier präsentierten Studie wurden beide Prozesse integrativ betrachtet, und eine Kurve für fluviatilen Feststofftransport in Wildbächen (Totschnig et al., 2011) mit einer Kurve für Murgänge verglichen, um Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten bewerten zu können.

## **METHODIK**

Die hier angewandte Methodik verwendet einen ökonomischen Ansatz und basiert auf einer GIS-gestützten Verarbeitung der Daten, wie sie in Totschnig et al. (2011) vorgestellt wurde. Vulnerabilität wird hierbei als dimensionsloser Verhältniswert zwischen 0 (kein Schaden) und 1 (totale Zerstörung) verstanden (Fell et al., 2008). Das Ziel dieser Methodik ist die Herstellung eines mathematischen Zusammenhanges zwischen der Schadenlast eines Gebäudes und der Prozessintensität in Form einer

Vulnerabilitätsfunktion. Um dies erreichen zu können, müssen Daten bezüglich des Schadens für dokumentierte Ereignisse, die den Schaden verursachende Prozessintensität sowie der Wiederherstellungswert pro Gebäude ermittelt werden.

### Risikoelemente

Untersuchungsgegenstand dieser Studie sind Wohngebäude, die auf Schwemmkegeln ausgewählter Testgebiete lokalisiert sind und während der Ereignisse beschädigt wurden. Die untersuchten Gebäude wiesen eine ab den 1950er Jahren für alpine Regionen Europas typische gemischte Ziegelmauerwerk- und Betonbauweise auf. Für jedes einzelne Gebäude wurde mittels eines ökonomischen Ansatzes die Schadenlast (SL) ermittelt, welche als Verhältniswert zwischen dem entstandenen monetären Schaden (S) und dem Wiederherstellungskosten des Gebäudes (WK) definiert ist:  $SL = S/WK$ . Die Schäden wurden, gestützt durch Informationen der Länder, der Gemeinden und der örtlichen Gebietsbauleitungen des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) für jedes einzelne Gebäude erhoben und zur Verwendung in den folgenden Analyseschritten inflationsbereinigt.

Die Berechnung der Wiederherstellungskosten folgt einem räumlichen Ansatz, wie er von Kranewitter (2002) sowie Keiler et al. (2006) vorgestellt wurde. Ausgangspunkt ist hierbei die Gebäudefläche jener Gebäude, die im Einflussbereich der untersuchten Prozesse stehen. Für die Gebäude werden Einheitspreise pro Quadratmeter für unterschiedliche Nutzungsarten (Wohnbereich, Keller, unausgebautes Dach) mit den entsprechenden Flächenanteilen multipliziert. Die verwendeten Einheitspreise sind Fixpreise und vernachlässigen so jede Form der Beeinflussung durch den Immobilienmarkt (Fuchs et al., 2007), daher handelt es sich bei den errechneten Gebäudewerten um die reinen Wiederherstellungskosten. Die Einheitspreise basieren auf den von der österreichischen Versicherungswirtschaft verwendeten Preisen (Sitter, 2008, frdl. mdl. Mtt.):

- Wohnbereich und ausgebauter Dachboden: 1.670 €/m<sup>2</sup>
- Keller und Garage: 395 €/m<sup>2</sup>
- Dach (mit Dachkonstruktion): 270 €/m<sup>2</sup>

Die Grundfläche der Gebäude wurde dem Grundstückskataster entnommen und um 10 % reduziert, um die Flächenverluste durch die inneren Wände zu berücksichtigen. Zur Überprüfung der Aktualität des Katasters, und zur Beschaffung zusätzlicher Informationen, wie Anzahl der Stockwerke und deren Nutzung, Gebäudehöhe und Erhaltungszustand, wurden ergänzende Feldarbeiten durchgeführt. Die Wiederherstellungskosten wurden mittels Glg. 1 berechnet (nach Totschnig et al., 2011):

$$WK = 0,9 \cdot F \{ E_D + E_K + a_S [ E_W (1 - r) ] \} \quad (1)$$

$WK$  bezeichnet den Gebäudewert (Wiederherstellungskosten),  $F$  die Grundfläche,  $E$  die Einheitspreise,  $a_S$  die Anzahl der Stockwerke,  $r$  einen Reduktionsfaktor für den Gebäudezustand und die Indizes  $D$ ,  $K$  und  $W$  stehen für Dachboden, Keller und Wohnbereich.

### Prozessintensitäten

Da die Vulnerabilität eines Gebäudes von der Prozessintensität abhängt, muss neben der Schadenlast auch die den Schaden hervorrufende Intensität pro Gebäude bestimmt werden. Der gewählte Intensitätsparameter ist dabei vom zu untersuchenden Prozess abhängig.

Im Falle von geschiefeführenden Wildbachprozessen (fluvialer Feststofftransport bis Murgang) ist die Ablagerungshöhe ein häufig gewählter Intensitätsparameter (Fuchs et al., 2007; Akbas et al., 2009; Tsao et al., 2010; Totschnig et al., 2011), obwohl dieser Parameter den Einfluss von Fließgeschwindigkeit und Druckphänomenen auf die Gebäudestruktur vernachlässigt. Ein Grund hierfür ist, dass Ablagerungshöhen üblicherweise ex-post nach dem Ereignis bestimmt werden, wohingegen Fließgeschwindigkeiten und Drücke selbst während des Ereignisses für geschiefeführende Wildbachprozesse kaum bestimmbar sind. Für die Untersuchungsgebiete im Rahmen dieser Studie wurden Ablagerungshöhen durch die WLV bzw. ihre Auftragnehmer im Zuge der Ereignisdokumentation ermittelt. Durch eine räumliche Interpolation dieser Intensitätswerte

konnten nachträglich Prozessintensitäten für jene Gebäude bestimmt werden, die während der Feldarbeiten im Zuge der Ereignisdokumentationen nicht berücksichtigt wurden. In dieser Studie wird die Ablagerungshöhe als absoluter Intensitätsparameter bezeichnet. Parallel dazu wurde ein relativer Intensitätsparameter ( $I_R$ ) entwickelt, der die Ablagerungshöhe ( $I$ ) in ein Verhältnis mit der Gebäudehöhe ( $H$ ) setzt (Glg. 2)

$$I_R = \frac{I}{H} \quad (2)$$

Dieser relative Intensitätsparameter berücksichtigt den Umstand, dass bei den meisten Ereignissen auf Grund kleiner Prozessintensitäten nur das Erdgeschoß und der Keller von einem Wildbachprozess betroffen sind. Bei Verwendung von absoluten Intensitätswerten würde die Vulnerabilität von mehrstöckigen Gebäuden durch die vorgeschlagenen Vulnerabilitätskurven überschätzt werden, da die nicht betroffenen Stockwerke den Wiederherstellungswert erhöhen und damit die Vulnerabilität verringern würden. Totschnig et al. (2011) zeigten in diesem Zusammenhang, dass durch eine Relativierung der Ablagerungshöhe verbesserte Ergebnisse in Form eines höheren Bestimmtheitsmaßes der Vulnerabilitätsfunktion erzielt werden können.

### Vulnerabilitätsfunktionen

Die Bestimmung der Schadenlast und der Prozessintensität pro Gebäude ergibt eine Punktwolke von Vulnerabilitätswerten in Form einer zwei-dimensionalen Darstellung. Die x-Achse repräsentiert dabei die Intensität und die y-Achse die Schadenlast. Vulnerabilitätsfunktionen stellen eine mathematische Beziehung zwischen diesen beiden Parametern her. Im Zuge dieser Arbeit wurde hierfür eine nichtlineare Regression verwendet, um jene Funktion zu finden, die die Daten am besten widerspiegelt (größtes Bestimmtheitsmaß  $R^2$ ). Dazu wurden verschiedene Verteilungen getestet (Tab. 1).

**Tab. 1** Cumulative distribution functions for regression analysis of vulnerability. As Frechet distributions with different numbers of parameters are tested, a numeral suffix is used to distinguish between them (after Totschnig et al., 2011)

**Tab. 1** Kumulative Verteilungsfunktionen für die Regressionsanalyse der Vulnerabilitätswerte. Da Frechet-Verteilungen mit einer unterschiedlichen Anzahl Parametern getestet wurden, wurde ein numerischer Index eingeführt, um sie zu unterscheiden (nach Totschnig et al., 2011)

Verteilung	Mathematische Formulierung	Modifizierte mathematische Formulierung	Intervall der erklärenden Variable
Weibull	$1 - e^{-ax^c}$	$1 - e^{-a\left(\frac{x+b}{b}-1\right)^c}$	$[0, +\infty]$
Exponential	$1 - e^{-ax}$	$1 - e^{-a\left(\frac{x+b}{b}-1\right)}$	$(-\infty, +\infty)$
Frechet Nr. 1	$e^{-x^{-a}}$	$e^{-\left(\frac{x+b}{b}-1\right)^{-a}}$	$(0, +\infty)$
Frechet Nr. 2	$e^{-x^{-a}}$	$e^{-c\left(\frac{x+b}{b}-1\right)^{-a}}$	$(0, +\infty)$
Logistisch	$\frac{1}{1 + ae^{-bx}}$	$\frac{1}{1 + \left(\frac{x+b}{b}-1\right)^{-a}}$	$(0, +\infty)$

Es handelt sich dabei um (kumulative) Verteilungsfunktionen, die folgende mathematischen Bedingungen erfüllen (Totschnig et al., 2011):

- sie definieren Vulnerabilität als die abhängige Variable in Form eines abgeschlossenen Intervalls von 0 bis 1  $[0,1]$ ;

- sie definieren Intensität als die erklärende Variable entweder in Form eines beidseitig unendlich offenen Intervalls  $(-\infty, +\infty)$  oder in Form eines rechtsseitig unendlich offenen Intervalls von 0 bis unendlich  $(0, +\infty)$ ; und
- die Funktion ist stetig und monoton wachsend innerhalb des Intervalls der erklärenden Variable.

Wie in Tab. 1 ersichtlich, wurden die grundlegenden mathematischen Formulierungen durch Einbezug eines weiteren Parameters modifiziert, um eine bessere Anpassung der Verteilung an die Punktwolke der Vulnerabilitätswerte zu erreichen. Theoretisch würde eine Verteilung mit unendlich vielen Parametern die beste Anpassung gewähren, um jedoch die Anwendbarkeit der Funktionen zu gewährleisten, wurde im Zuge dieser Arbeit die maximale Anzahl anpassbarer Parameter auf drei beschränkt. Um eine Verschiebung der Funktion zu vermeiden (sie soll bei der Intensität „0“ durch den Koordinatenursprung gehen), wurde dieser zusätzliche Parameter mittels des Ausdrucks  $((x+b)b)-1$  eingefügt. Die logistische Funktion wurde dabei so modifiziert, dass sie einer log-logistischen Funktion entspricht. Die Parameter der einzelnen Funktionen wurden dann mittels sequentieller quadratischer Optimierung basierend auf einer nichtlinearen Kleinsten-Quadrate-Schätzung bestimmt.

## UNTERSUCHUNGSGEBIETE

Für diese Studie wurden Daten von fünf Ereignissen aus vier österreichischen Wildbacheinzugsgebieten verwendet. Darüber hinaus wurden Daten eines italienischen Einzugsgebiets aus der Literatur entnommen (Akbas et al., 2009). Die Testgebiete mussten folgende Bedingungen erfüllen, um in der vorliegenden Studie verwendet werden zu können:

- gut dokumentierte Ereignisse;
- Schäden an Wohngebäuden hervorgerufen durch feststoff-belastete Wildbachprozesse; und
- Schäden monetär bewertet.

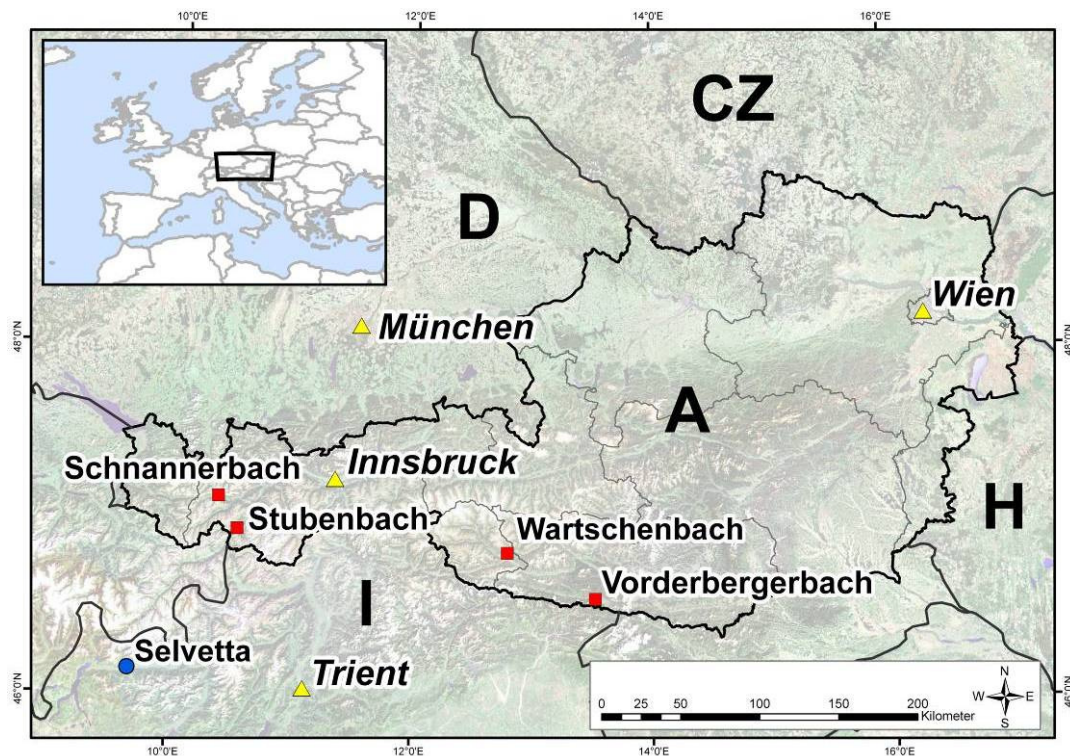
Die österreichischen Untersuchungsgebiete befinden sich in den Bundesländern Tirol (Schnannerbach, Stubenbach und Wartschenbach) und Kärnten (Vorderbergerbach) (siehe Fig. 1).

Der Schnannerbach befindet sich im Stanzertal und mündet im Ortsteil Schnann der Gemeinde Pettneu am Arlberg in die Rosanna. Das Einzugsgebiet umfasst  $6,6 \text{ km}^2$ , erstreckt sich zwischen 1.240 m und 2.889 m ü.d.M. und ist Teil der Lechtaler Alpen. Geologisch liegen vor allem Kalkstein, Dolomit, Mergel, Schiefer und Sandstein vor. Der Oberlauf wird von zahlreichen Quellbächen gebildet und mächtige Schuttkegel dienen als Geschiebelieferant. Im Mittellauf fließt der Schnannerbach großteils auf dem Grundgestein ab, zum Teil in Form einer langen Schluchtstrecke (BMLFUW, 2006; Hübl et al., 2006). Fluviatiler bis murartiger Feststofftransport sind die dominierenden Prozesse am Schwemmkegel (Totschnig et al., 2011). Für die vorliegende Studie wurden Daten des Ereignisses vom 22.08.2005 verwendet.

Der Stubenbach befindet sich im oberen Inntal und mündet im Ortsteil Stuben der Gemeinde Pfunds in den Inn. Das Einzugsgebiet umfasst  $29,5 \text{ km}^2$ , erstreckt sich zwischen 1.011 m und 3.035 m ü.d.M. und ist Teil der Samnaungruppe. Geologisch befindet sich das Einzugsgebiet im Bereich des „Engadiner Fensters“, einem ehemaligen Meeresbecken aus dem Erdmittelalter, das angehoben und von der wesentlich älteren Silvretta- und Ötztaldecke überschoben wurde. Es liegen vor allem Gesteine der Grauen Bündner Schiefer und Wechsellagerungen mit Quarziten und Bunten Bündner Schiefern vor (BMLFUW, 2006). Fluviatiler Feststofftransport ist der dominierende Prozess am Schwemmkegel (Totschnig et al., 2011). Für die vorliegende Studie wurden Daten des Ereignisses vom 22.08.2005 verwendet.

Der Vorderbergerbach befindet sich im Gailtal und mündet im Ortsteil Vorderberg der Gemeinde Sankt Stefan in die Gail. Das Einzugsgebiet umfasst  $25,3 \text{ km}^2$ , erstreckt sich zwischen 588 m und 2.052 m ü.d.M. und ist Teil der nördlichen karnischen Alpen an der Grenze zu Italien. Geologisch liegen vor allem Ederkalke und ordovizische, leicht verwitterbare und erodierbare Schiefer vor. Im Oberlauf finden sich zudem glaziale Ablagerungen der Würm-Eiszeit, während der Unterlauf durch quartäre, unkonsolidierte Ablagerungen geprägt ist (Hübl et al., 2004). Fluviatiler Feststofftransport ist der dominierende Prozess am Schwemmkegel (Totschnig et al., 2011). Für die vorliegende Studie wurden Daten des Ereignisses vom 29.08.2003 verwendet.

Der Wartschenbach befindet sich im Drautal (in der Nähe des Lienzer Talbodens) und entwässert in der Marktgemeinde Nußdorf-Debant in die Drau. Das Einzugsgebiet umfasst 2,3 km<sup>2</sup>, erstreckt sich zwischen 678 m und 2.217 m ü.d.M. und ist Teil der Schobergruppe. Geologisch liegen vor allem Paragneise und Glimmerschiefer vor, in die Amphibolite eingeschaltet sind. Das oberste Einzugsgebiet, das als Skigebiet genutzt wird, ist relativ flach, teilweise vernässt und deutlich glazial geprägt. So finden sich quartäre Lockersedimente in Form von sandigen Grundmoränen und Eisrandsedimenten, die bedeutende Geschiebeherde darstellen (Hübl et al., 2002). Diese große Menge an mobilisierbaren Lockergesteinen, in Kombination mit einem verhältnismäßig großen Gefälle im Mittellauf von 30-40 %, hat in der Vergangenheit bei Niederschlagsereignissen hoher Intensität zu Murgängen und murartigen Abflüssen geführt (Fuchs und Heiss, 2008). Daten der gut dokumentierten Murgangereignisse vom 06.08.1995 und 16.08.1997 wurden für die vorliegende Studie verwendet.



**Fig. 1** Location of the test sites in the Austrian Alps, indicated by red squares, and the Italian test site, indicated by a blue dot. Layers comprising administrative bodies and shaded relief provided by Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI)

**Fig. 1** Die Untersuchungsgebiete in den österreichischen Alpen (rote Quadrate) und das italienische Untersuchungsgebiet in der Lombardei (blauer Punkt). Der Hintergrundlayer sowie der Layer der administrativen Einheiten stammen von Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI)

Die Vulnerabilitätswerte des italienischen Testgebietes wurden direkt der Literatur entnommen (Akbas et al., 2009). Das italienische Untersuchungsgebiet befindet sich in Veltlin in der Provinz Sondrio, einem durch quartäre Gletscheraktivität geformten alpinen Trogtal in der Lombardei (Fig. 1). Geologisch überwiegen metamorphe Gesteine wie Gneis, Glimmerschiefer, Phyllite und Quarzite. Die niederen Talflanken sind durch glaziale, fluvioglaziale und kolluviale Ablagerungen bedeckt. Aus diesem Material entwickelte sich in einem Seitenbach am 13.07.2008 ein Murgang, der Teile der Ortschaft Selvetta in der Gemeinde Colorina verschüttete (Akbas et al., 2009).

## ERGEBNISSE

Die als fluviatiler Feststofftransport charakterisierten Ereignisse (Schnannerbach, Stubenbach, Vorderbergerbach) haben zu einer Beschädigung von insgesamt 116 Gebäuden geführt. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf Wohngebäuden liegt, wurden nur 67 Gebäude für die weitere Analyse verwendet. Durch die beiden Ereignisse am Wartschenbach wurden 30 Gebäude beschädigt, wobei 26

Gebäude Eingang in diese Arbeit fanden. Die Vulnerabilitätswerte von Akbas et al. (2009) basieren auf 13 beschädigten Wohngebäuden. Die individuellen monetären Schäden pro Gebäude variieren für die österreichischen Testgebiete zwischen € 438 und € 828.240 mit einem Gesamtschaden von € 7,55 Mio. und einem mittleren Schaden pro Gebäude von € 81.140. Die Schäden für das Ereignis im italienische Ort Selvetta liegen zwischen € 2.000 und € 290.000 (Akbas et al., 2009). Der nach dem oben beschriebenen Verfahren berechnete Wiederherstellungswert der österreichischen Gebäude summierte sich auf € 47,68 Mio. mit einem Mittel von rund € 512.720 pro Gebäude und einer Streuung zwischen € 220.810 und € 1,34 Mio. Die Wiederherstellungswerte der italienischen Gebäude variieren zwischen € 66.000 und € 455.000 (Akbas et al., 2009).

Die auf den Schäden und den Wiederherstellungswerten basierenden Vulnerabilitätswerte der österreichischen Testgebiete liegen zwischen 0,001 und 1 mit einer mittleren Vulnerabilität von 0,17. Die Vulnerabilitätswerte aus Italien variieren von 0,015 bis 1 mit einer mittleren Vulnerabilität von 0,36 (Akbas et al., 2009). Tab. 2 fasst diese Ergebnisse für die individuellen Testgebiete nochmals zusammen.

**Tab. 2** Type of process, date of event, number of considered buildings, range of vulnerability and mean vulnerability for each test site. The data of the Italian test site (Selvetta) are based on Akbas et al. (2009). The following abbreviations were used: MG = debris flow and FST = fluvial sediment transport

**Tab. 2** Prozesstyp, Ereignisdatum, Anzahl der berücksichtigten Gebäude, Vulnerabilitätsbereich und mittlere Vulnerabilität für die individuellen Testgebiete. Die Daten des italienischen Testgebietes (Selvetta) beruhen auf Akbas et al. (2009). Folgende Abkürzungen wurden verwendet: MG = Murgang, FST = fluviatiler Feststofftransport

Testgebiet	Prozess	Ereignisdatum	Anzahl berücksichtigter Gebäude	Vulnerabilitätsbereich	Mittlere Vulnerabilität
Schnannerbach	FST	22.08.2005	10	0,005-0,13	0,05
Stubenbach	FST	22.08.2005	28	0,013-1,0	0,37
Vorderbergerbach	FST	29.08.2003	29	0,001-0,05	0,02
Wartschenbach (1995)	MG	06.08.1995	10	0,010-0,34	0,12
Wartschenbach (1997)	MG	16.08.1997	16	0,006-0,57	0,21
Selvetta	MG	13.07.2008	13	0,015-1,0	0,36

Ein erster Vergleich der Vulnerabilitätskurve für fluviatilen Feststofftransport (nach Totschnig et al., 2011) mit einer Kurve für Murgänge basierend auf neu berechneten Werten (nach Fuchs et al., 2007) zeigt einen unterschiedlichen Kurvenverlauf (Fig. 2). Dieser ist sowohl bei absoluten (Fig. 2a) als auch bei relativen Intensitäten (Fig. 2b) ersichtlich. Dieser Unterschied beruht vor allem auf dem Fehlen von hohen Schadenlastwerten im Falle von Murgängen. Für Murgänge erzielte im Falle absoluter Intensitäten die Frechet-Verteilung Nr. 2 das höchste Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ), während im Falle relativer Intensitäten eine Weibull-Verteilung die beste Anpassung zeigte.

Aufgrund fehlender Daten für hohe Murgangintensitäten wurden im Zuge dieser Studie die Daten für Murgänge um ein weiteres Ereignis am Wartschenbach aus dem Jahr 1995, sowie um Vulnerabilitätswerte aus Italien (Akbas et al., 2009) erweitert. Da im Falle der italienischen Daten keine Informationen zur Gebäudehöhe vorlagen, konnte der folgende Vergleich nur für absolute Intensitäten durchgeführt werden. Die aufgrund dieser Daten errechnete Vulnerabilitätskurve für Murgänge deckt sich gut mit der Vulnerabilitätskurve für fluviatilen Feststofftransport (Fig. 3). Die Intensität ist hierbei auf der x-Achse und die Schadenlast auf der y-Achse dargestellt. Beide Kurven zeigen einen s-förmigen Verlauf. Dadurch ergibt sich ein flacher Anstieg der Schadenlast für niedrige ( $I < 1$  m) und hohe Intensitäten ( $I > 2,5$  m). Für mittlere Prozessintensitäten ( $1 \text{ m} \leq I \leq 2,5 \text{ m}$ ) zeigt sich ein steiler Anstieg der Schadenlast. Von den getesteten Verteilungen erzielten jeweils die Weibull-Verteilungen das höchste Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ).

Die mathematische Formel zur Berechnung der Vulnerabilität von Wohngebäuden (V) in Abhängigkeit der Prozessintensität in Form der Ablagerungshöhe (I) lautet für fluviatilen Feststofftransport (Totschnig et al., 2011) (Glg. 3)

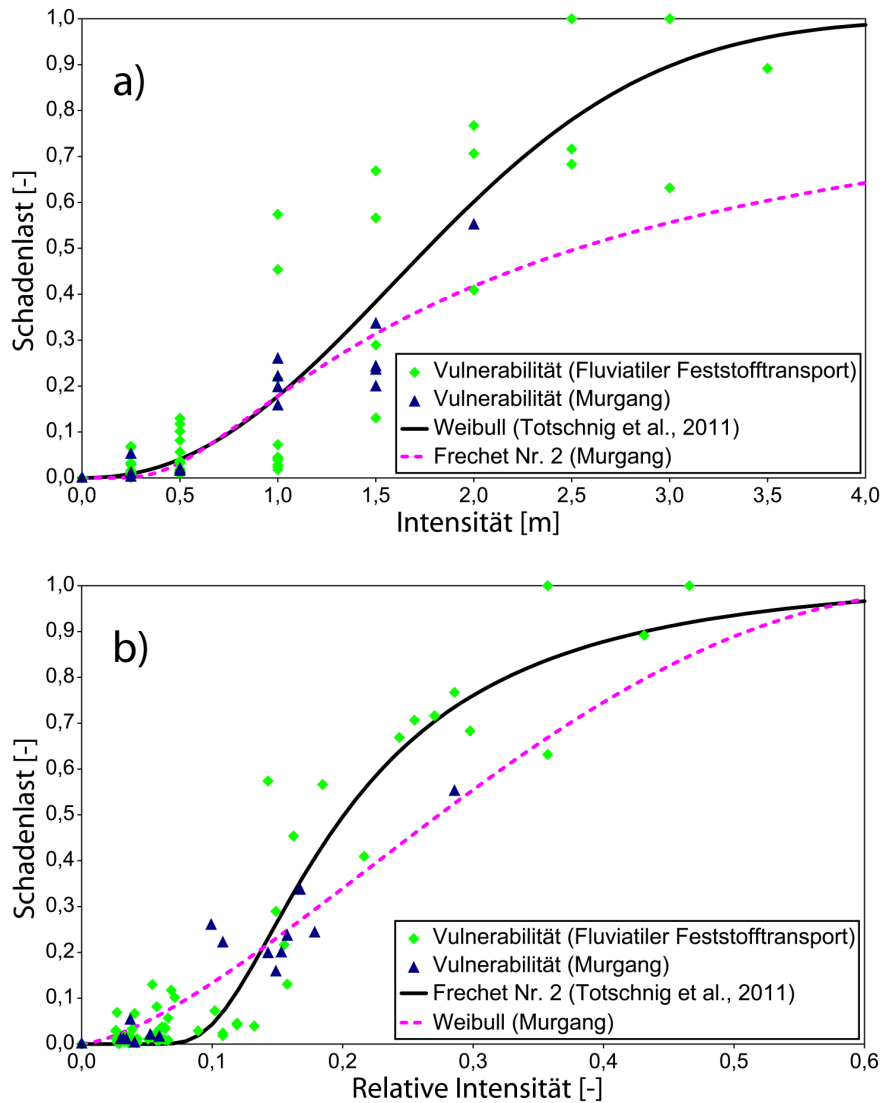


$$V = 1 - e^{-0,443 \left( \frac{I+1,442}{1,442} - 1 \right)^{2,233}} \quad (3)$$

mit einem  $R^2$  von 0,835, und für Murgänge (Glg. 4, Fig. 3)

$$V = 1 - e^{-1,458 \left( \frac{I+2,284}{2,284} - 1 \right)^{2,337}} \quad (4)$$

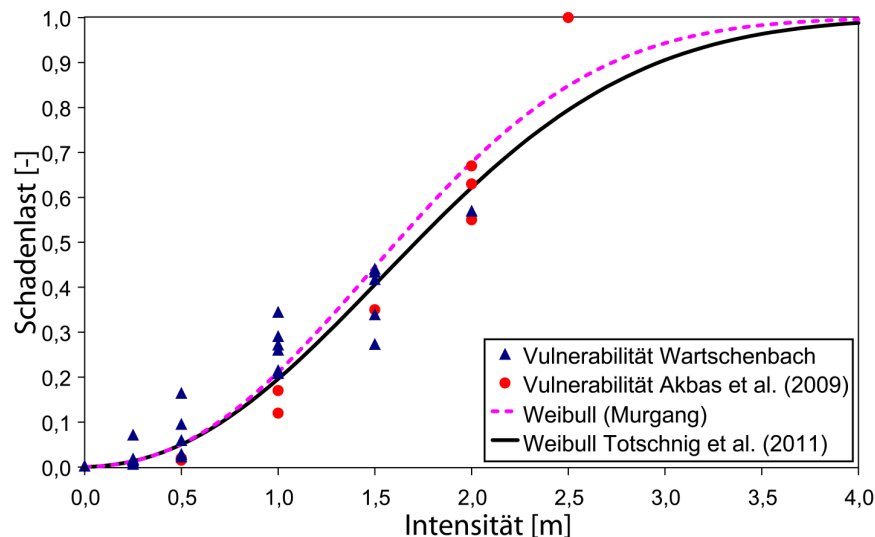
mit einem  $R^2$  von 0,931.



**Fig. 2** Comparison of vulnerability functions for fluvial sediment transport (Totschnig et al., 2011) and for debris flows (based on the event of 16 August 1997 in the Wartschenbach torrent, compare also Fuchs et al., 2007). Absolute (a) and relative process intensities (b) are used

**Fig. 2** Vergleich von Vulnerabilitätskurven für fluvialen Feststofftransport (Totschnig et al., 2011) und Murgänge (basierend auf dem Ereignis vom 16.08.1997 im Wartschenbach, vergleiche auch Fuchs et al., 2007). Der Vergleich wurde für absolute (a) sowie relative Intensitätswerte (b) durchgeführt





**Fig. 3** Comparison of vulnerability functions for fluvial sediment transport (Totschnig et al., 2011) and for debris flows based on absolute intensity. Vulnerability values for debris flow based on the Austrian test site (Wartschenbach) are indicated by blue triangles and values based on the Italian test site (Akbas et al., 2009) are indicated by red dots

**Fig. 3** Vergleich von Vulnerabilitätskurven für fluviatilen Feststofftransport (Totschnig et al., 2011) und Murgänge basierend auf absoluten Intensitätswerten. Vulnerabilitätswerte für Murgänge basierend auf dem österreichischen Testgebiet (Wartschenbach) werden als blaue Dreiecke und Werte basierend auf dem italienischen Testgebiet (Akbas et al., 2009) als rote Punkte dargestellt

## DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die Bebauung ist ein wichtiges Risikoelement jeder Risikoanalyse. In der naturwissenschaftlich-technischen Begriffsbestimmung im Zusammenhang mit Naturgefahren ist Risiko definiert als eine Funktion der Eintretenswahrscheinlichkeit eines Prozesses, des Schadenpotentials und der Verletzlichkeit bzw. Vulnerabilität. Die Vulnerabilität von Gebäuden lässt sich durch Vulnerabilitätsfunktionen darstellen und bewerten. Im Zuge der vorliegenden Studie wurde eine Vulnerabilitätsfunktion für Murgänge auf Basis eines ökonomischen Ansatzes und mittels einer GIS-gestützten Verarbeitung der Daten weiterentwickelt und mit einer Kurve für fluviatilen Feststofftransport (Totschnig et al., 2011) verglichen. Die weiterentwickelte Murgangskurve beruht auf Daten von zwei Ereignissen in einem österreichischen Einzugsgebiet (Wartschenbach), die um Daten aus der Literatur in Form von Vulnerabilitätswerten einer italienischen Studie ergänzt wurden (Akbas et al., 2009).

Die hier gezeigten ähnlichen Kurvenverläufe der verschiedenen Wildbachprozesse lassen den Schluss zu, dass unterschiedliche Wildbachprozesse nicht zwingend unterschiedliche Vulnerabilitätsfunktionen zur Folge haben. Dies bedeutet, dass die Annahme, Murgänge würden gegenüber fluviatilem Feststofftransport höhere Schäden verursachen (Hungri et al., 2001) nicht bestätigt wird. Insbesondere aus Sicht der Praxis lässt dies die Schlussfolgerung zu, dass rein für die Bestimmung der Vulnerabilität von Wohngebäuden keine Unterscheidung zwischen den Prozessen fluviatiler Feststofftransport, murartiger Feststofftransport und Murgang notwendig ist. Einerseits wird auf diese Unterscheidung in Österreich bereits im Rahmen der *Richtlinie für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und Priorisierung von Maßnahmen der Wildbach- und Lawenverbauung* verzichtet (BMLFUW, 2005), andererseits jedoch ist diese Unterscheidung und damit die Ermittlung des dominierenden Prozesses weiterhin für die Ausarbeitung des Schutzkonzeptes (Mazzorana und Fuchs, 2010; Hübl et al., 2011) und möglicherweise auch für die Bestimmung der Vulnerabilität anderer Risikoelemente (z.B. Personen, Infrastruktur) notwendig.

Es zeigte sich in dieser Studie, dass die Vulnerabilitätswerte des italienischen Testgebiets (Akbas et al., 2009) und die Vulnerabilitätswerte der österreichischen Testgebiete in der gleichen Größenordnung liegen, und sich die italienischen Daten daher eignen, um die österreichischen zu vervollständigen (Fig. 3). Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die hier vorgestellten

Vulnerabilitätsfunktionen auch auf andere europäische Länder im Alpenraum für Gebäude des gleichen Bautyps übertragbar sind, wobei eine detaillierte Quantifizierung bislang aussteht. Da die hier präsentierten Vulnerabilitätsfunktionen nur für Wohngebäude abgeleitet wurden, ist die Entwicklung von Vulnerabilitätsfunktionen für andere Gebäudetypen geplant. Für Wohngebäude sind die präsentierten Vulnerabilitätsfunktionen für feststoff-belastete Wildbachprozesse im Alpenraum operativ einsetzbar.

Das hohe Bestimmtheitsmaß das für beide Kurven erzielt wurde darf nicht darüber hinweg täuschen, dass die Kurven nur auf einer beschränkten Anzahl Datenpunkte beruhen. So umfasst der Datensatz für Murgänge auch nach Erweiterung mit Daten aus der italienischen Studie lediglich 39 Werte. Darüber hinaus zeigen die Vulnerabilitätswerte für fluviatilen Feststofftransport eine starke Streuung vor allem im Bereich zwischen 1 m und 1,5 m Ablagerungshöhe (Fig. 2a). Die Streuung in diesem Intensitätsbereich wird vor allem durch das Vorhandensein von Fensteröffnungen bestimmt. Da sich die Fensteröffnungen in der Regel in einer Höhe von rund 1 m befinden, entscheidet sich im Ereignisfall in der Regel erst in diesem Intensitätsbereich (1 m bis 1,5 m), ob das angelieferte Material in das Gebäude eindringt (Fuchs et al., 2007). Abgesehen von der Bauweise beeinflussen weitere Faktoren, wie beispielsweise das Vorhandensein von Objektschutzmaßnahmen (Holub und Fuchs, 2009) oder schützender Vegetation die physische Vulnerabilität eines Gebäudes (Papathoma-Köhle et al., 2011), die im Zuge dieser Studie jedoch nicht berücksichtigt wurden. Die Unsicherheit in der Berechnung der Funktion bzw. ihrer Parameter selbst kann mittels Ausweisung von Konfidenzbändern bestimmt und visualisiert werden (Totschnig et al., 2011).

Die hier gezeigten Kurven dienen zur Bestimmung der physischen Vulnerabilität von Gebäuden. Abgesehen davon, dass neben Gebäuden weitere Risikoelemente wie Personen oder Infrastruktur gefährdet sein können, ist die physische Dimension nur eine von mehreren Dimensionen, die bei einer integralen Betrachtung von Vulnerabilität eine Rolle spielen. Im Hinblick auf die Situation im europäischen Alpenraum sind hier vor allem die ökonomische, soziale und institutionelle Vulnerabilität von Bedeutung (Fuchs, 2009). Diese sind, obwohl teilweise auf anderen Definitionen und Gedankengebäuden beruhend, miteinander gekoppelt (Fuchs et al., 2011). In Abhängigkeit von den Zielen der Bestimmung und Quantifizierung von Vulnerabilität stellen die in diesem Beitrag vorgestellten Vulnerabilitätskurven den Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen in einem interdisziplinären Kontext dar, insbesondere für die (vor allem akademische) Frage der sozialen Vulnerabilität und die (vor allem praktische) Frage des Risikotransfers (Holub et al., 2011). Ob und wie derartige Ansätze in Zukunft in der Praxis umgesetzt werden, ist aufgrund teilweise fehlender Verankerung des Risikoansatzes in der nationalen Gesetzgebung Gegenstand von Diskussionen (vgl. hierzu beispielsweise Patek, 2011).

## **DANKSAGUNG**

Die dieser Studie zugrundeliegenden Arbeiten wurden durch den Österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung gefördert (Projektnummer L535-N10). Die Autoren danken W. Sitter für anregende Diskussionen im Zuge der Gebäudebewertung.

## **LITERATUR**

Akbas S.O., Blahut J., Sterlacchini S. (2009). Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows. In: Malet J., Remaître A., Bogaard T. (eds). Landslide processes: from geomorphological mapping to dynamic modelling. CERG Editions, Strasbourg, 229-233.

BMLFUW (2005). Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und Priorisierung von Maßnahmen der Wildbach- und Lawinverbauung gemäß § 3 Abs. 2 Z 3 Wasserbautenförderungsgesetz. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMLFUW (2006). Hochwasser 2005 - Ereignisdokumentation (Teilbericht der Wildbach- und Lawinverbauung). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

- Commission of the European Communities (2007). Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:288:0027:0034:en:pdf> (Abruf 18.02.2011).
- Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology* 102: 85-98.
- Fuchs S., Heiss K., Hübl J. (2007). Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7: 495-506.
- Fuchs S., Heiss K. (2008). Vulnerabilität gegenüber Wildbachprozessen. Vorgangsweise und Diskussion anhand einer Studie in Österreich. In: Mikoš M., Hübl J., Koboltschnig G. (eds). Internationales Symposium Interpraevent – Dornbirn (26.-30. Mai). Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt, Vol. 2, 311-322.
- Fuchs S. (2009). Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria - paradigms of vulnerability revisited. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9: 337-352.
- Fuchs S., Kuhlicke C., Meyer V. (2011). Vulnerability to natural hazards – the challenge of integration. *Natural Hazards* 58: 609-619.
- Holub M., Fuchs S. (2009). Mitigating mountain hazards in Austria - Legislation, risk transfer, and awareness building. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9: 523-537.
- Holub M., Gruber H., Fuchs S. (2011). Naturgefahren-Risiko aus Sicht des Versicherers. *Wildbach- und Lawinenverbau* 167: 74-86.
- Hübl J., Ganahl E., Moser M., Schnetzer I. (2002). Dokumentation Wartschenbach. WLS Report 52, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl J., Leber D., Brauner M., Janu S., Volk G., Holzinger H., Gruber H. (2004). Dokumentation der Unwetterereignisse in den Gemeinden St. Stefan/Vorderberg und Feistritz an der Gail vom 29. August 2003. WLS Report 99, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl J., Ganahl E., Bacher M., Chiari M., Holub M., Kaitna R., Prokop A., Dunwoody G., Forster A., Schneiderbauer S. (2006). Dokumentation der Wildbachereignisse vom 22./23. August 2005 in Tirol – Detaillierte Aufnahme. IAN Report 109, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl J., Fuchs S., Sitter F., Totschnig R. (2011). Towards a frequency-magnitude relationship for torrent events in Austria. In: Genevois R., Hamilton D.L., Prestininzi A. (eds). 5<sup>th</sup> International conference on debris-flow hazards mitigation: Mechanics, prediction and assessment – Padua (14-17 June). Casa Editrice Università La Sapienza, Rome, 895-902.
- Hung O., Evans S.G., Bovis M.J., Hutchinson J.N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience* 7: 221-238.
- Keiler M., Zischg A., Fuchs S. (2006). Methoden zur GIS-basierten Erhebung des Schadenpotenzials für naturgefahreninduzierte Risiken. In: Strobl J., Roth C. (eds). GIS und Sicherheitsmanagement. Wichmann, Heidelberg, 118-128.
- Keiler M., Fuchs S. (2010). Berechnetes Risiko. Mit Sicherheit am Rande der Gefahrenzone. In: Egner H., Pott A. (eds). Geographische Risikoforschung. Zur Konstruktion verräumlichter Risiken und Sicherheiten. Franz Steiner, Stuttgart, 51-68.
- Kranewitter H. (2002). Liegenschaftsbewertung. Gescow, Wien.
- Mazzorana B., Fuchs S. (2010). A conceptual planning tool for hazard and risk management. In: Chen S.-C. (ed). International Symposium Interpraevent in the Pacific Rim – Taipei (26-30 April). Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt, 828-838.
- Oberndorfer S., Fuchs S., Rickenmann D., Andrecs P. (2007). Vulnerabilitätsanalyse und monetäre Schadensbewertung von Wildbachereignissen in Österreich. BFW-Bericht 139, Bundesausbildungs- und Forschungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien.
- ONR (2009). Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung. ONR 24800, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- Papathoma-Köhle M., Kappes M., Keiler M., Glade T. (2011). Physical vulnerability assessment for alpine hazards: state of the art and future needs. *Natural Hazards* 58: 645-680.

- Patek M. (2011). „Risiko“ in der Strategie 2015 der Wildbach- und Lawinenverbauung: Fragen an die Abteilungsleiterin. Wildbach- und Lawinenverbau 167: 68-72.
- PLANAT (2005). Strategie Naturgefahren Schweiz. Synthesebericht in Erfüllung des Auftrages des Bundesrates vom 20. August 2003. Nationale Plattform Naturgefahren, Biel.
- Statistik Austria (2004). Gebäude- und Wohnungszählung 2001 - Hauptergebnisse Österreich. Bundesanstalt Statistik Österreich, Wien.
- Statistik Austria (2011). Bevölkerung im Jahresdurchschnitt. Bundesanstalt Statistik Österreich, Wien. [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/bevoelkerung/bevoelkerungsstand\\_und\\_veraenderung/bevoelkerung\\_im\\_jahresdurchschnitt/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/bevoelkerung/bevoelkerungsstand_und_veraenderung/bevoelkerung_im_jahresdurchschnitt/index.html) (Abruf 12.09.2011).
- Totschnig R., Sedlacek W., Fuchs S. (2011). A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. Natural Hazards 58: 681-703.
- Tsao T.-C., Hsu W.-K., Cheng C.-T., Lo W.-C., Chen C.-Y., Chang Y.-L., Ju J.-P. (2010). A preliminary study of debris flow risk estimation and management in Taiwan. In: Chen S.-C. (ed). International Symposium Interpraevent in the Pacific Rim – Taipei (26-30 April). Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt, 930-939.