

# Planning of risk-based rockfall mitigation measures using 3D rockfall simulations

## Risiko-basierte Massnahmenplanung gegen Steinschlag mittels 3D Steinschlagsimulationen

Thomas Bickel, Dipl.- Ing.<sup>1</sup>; Markus Hodel, Dipl. Geograph, Akademischer Geoinformatiker<sup>1</sup>

### ABSTRACT

In Switzerland, in the past decades, natural hazard events caused repeatedly substantial damages to society. But limited financial resources necessitate risk-based mitigation strategies in order to fulfil the economic criteria of positive benefit-cost ratio.

Meanwhile, official software tools provided by the federal authority are available for risk assessment (e.g. EconoMe, RoadRisk). Since these online-tools are initially developed for the evaluation of project prioritization and subsidization, they use standardized routines to sustain comparability.

This paper presents a new approach to extend the established methodology of risk management that, however, allows a more realistic risk analysis for cost-effective rockfall mitigation measures on roads. After subdividing the investigated road section into appropriate subsections, the risk analysis is carried out for each subsection individually based on three-dimensional rockfall simulations.

The implementation and results of this approach and its potential for risk analysis is illustrated on a virtual case study and compared with EconoMe 3.0.

Finally, the feasibility, challenges and benefits of the extended approach are discussed with respect to mitigation project planning.

### ZUSAMMENFASSUNG

In den vergangenen Jahrzehnten war die Schweiz wiederholt von Naturgefahrenereignissen betroffen, die erhebliche Schäden verursachten. Um die potentiell gefährdeten Personen- und Sachwerte nachhaltig zu schützen, müssen die knappen finanziellen Ressourcen priorisiert und in nachweislich Nutzen-Kosten-effiziente, risikoreduzierende Schutzmassnahmenkonzepte investiert werden.

Zur Beurteilung der Projektpriorisierung und Subventionierung durch die öffentliche Hand, wurden vom Bund Berechnungsprogramme entwickelt (bspw. EconoMe, RoadRisk), die auf dem Ansatz der Nutzen-Kosten-Analyse basieren und ein wirtschaftliches Optimum

<sup>1</sup> Louis Ingenieurgeologie GmbH, Weggis, SWITZERLAND, thomas.bickel@louis-weggis.ch

anstreben. Um die Vergleichbarkeit von Massnahmenprojekten zu gewährleisten, verwenden die Programme standardisierte und verallgemeinernde Routinen.

Basierend auf der etablierten Risikostrategie präsentiert dieser Artikel eine Methodenerweiterung, die eine realitätsnahe Risikoanalyse für die Nutzen-Kosten-optimierte Massnahmenplanung gegen Steinschlag auf Linienobjekten vorschlägt. Dabei wird das zu untersuchende Linienobjekt in zweckmässige Abschnitte unterteilt und die Risikoanalyse unter Berücksichtigung der Möglichkeiten von 3D-Steinschlagsimulationen separat für jeden Teilabschnitt durchgeführt.

Die Umsetzung und die Resultate dieses Ansatzes sowie das Potential für die Risikoanalyse werden an einem virtuellen Fallbeispiel vorgestellt und mit EconoMe 3.0 verglichen. Schlussendlich werden die Praxistauglichkeit und Vorteile mit Bezug auf die Schutzmassnahmenplanung, sowie zukünftige Herausforderungen diskutiert.

## KEYWORDS

risk assessment; Rockfall; EconoMe; Risk Mitigation; Measures

## AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG

Die schweizerische Kommission «Nationale Plattform Naturgefahren» (PLANAT) definiert Naturgefahren als hydrologische, meteorologische, geologische oder biologische Prozesse, die schädlich auf den Menschen sowie auf Sachwerte einwirken können. Somit rücken die von der Gesellschaft als Siedlungs- oder Industriegebiete genutzten oder mit Infrastrukturanlagen bebauten Räume in den Fokus der Naturgefahrenbearbeitung.

Neben der ausschliesslichen Gefahrenbetrachtung (bspw. in Gefahrenkarten) hat unter dem Eindruck der Unwetterereignisse seit Ende der 1980er Jahre, die Analyse der aus Naturgefahren resultierenden Risiken an Bedeutung gewonnen (vgl. Bründl, 2015; Bründl et al., 2009). So wird das Risiko, definiert durch das Produkt der Faktoren «Schadenwahrscheinlichkeit» und «Schadenausmass», als Mass für die Gefährdung herangezogen und für die Abklärung eines Handlungsbedarfes eingesetzt.

Für die Planung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren wurden nach 2005 unter Federführung des Bundes Berechnungsprogramme zur Bewertung der Massnahmeneffektivität und Wirtschaftlichkeit auf der Basis der Risikooptimierung entwickelt. Die heute gebräuchlichen Programme «EconoMe» und «RoadRisk» weisen aber zugunsten der Projektvergleichbarkeit einen hohen Standardisierungsgrad auf, da sie als Entscheidungsgrundlage für die Projektpriorisierung und Mittelzuteilung durch den Bund gedacht sind (BAFU, 2015; ASTRA, 2015). Dem gestiegenen Anspruch in der Massnahmenplanung an eine realitätsnahe und robuste Ermittlung sowie Abbildung der Risikoverteilung im Schadenperimeter kann die einfache Standardanwendung der genannten Programme nicht genügen.

Der hier vorgestellte Ansatz basiert auf dem Risikokzept gemäss Strategie Naturgefahren Schweiz der PLANAT (Bründl, 2009) und zielt auf die detailliertere Analyse der Sturzrisiken auf beliebigen Teilabschnitten (TA) entlang linienförmiger Schadenobjekte (z.B. Verkehrsachsen). Die Auswirkungen dieser Methodenerweiterung auf die modellierte Risikoverteilung werden anhand eines fiktiven Beispiels vorgestellt und mit „EconoMe 3.0“ verglichen. Auf den Vergleich mit „RoadRisk“ wird dagegen verzichtet, da dieses Programm auch betriebswirtschaftliche Aspekte einbezieht.

### **METHODENERWEITERUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON 3D-STURZMODELLIERUNGEN**

Die Umsetzung des Risikokzeptes Naturgefahren in „EconoMe“ (Bründl et al., 2015) bildet die Ausgangslage für die hier vorgestellte punktuelle Methodenerweiterung. Das grundsätzliche methodische Vorgehen bleibt dabei unbeeinflusst.

Grundgedanke und Motivation für die Erweiterung der bestehenden Methodik ist die stärkere Gewichtung der 3D-Sturzmodellierungen zur detaillierten Beschreibung potentieller Sturzprozesse in der Wirkungsanalyse (Analyse von Art, Ausdehnung und Intensität einer Gefährdung durch die zugrundeliegenden Szenarien). Gleichzeitig wird die Risikoanalyse um einen Faktor  $N(\text{Fr})$  zur Berücksichtigung einer möglichen Fragmentierung des Ausbruchvolumens erweitert (in Anlehnung an den in „RoadRisk“ verwendeten „Ereignistyp ET“). Die Anzahl fragmentierter Sturzkörper  $N(\text{Fr})$  ist abhängig vom Verhältnis der Volumina der Ausbruchs- und Wirkungsszenarien und ist im Rahmen der Feldaufnahmen gutachterlich zu bestimmen.

Nach der Wirkungsanalyse ist in der Expositionsanalyse (Analyse von Lage, Anzahl, Art, Präsenz und Wert potentiell gefährdeter Objekte im Beurteilungsperimeter) eine Unterteilung des zu beurteilenden Strassenperimeters in eine Anzahl gleich langer Teilabschnitte  $N(\text{TA})$  notwendig, wobei deren Länge zweckmässig zu wählen ist. Die Sturzintensitäten auf Höhe der Verkehrsachse werden nicht über den ganzen Projektperimeter gemittelt, sondern über die einzelnen Teilabschnitte. Folglich müssen auch die mit der Sturzintensität verknüpften Parameter der Konsequenzenanalyse (Analyse des Schadenausmasses durch Verschnitt der Erkenntnisse aus Wirkungs- und Expositionsanalyse) pro Teilabschnitt abgeleitet werden. Gemäss dem Leitfaden zum Risikokzept kann die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit  $p(\text{rA})$  verschieden abgeschätzt werden (vgl. Bründl, 2009, Kap. 3.4.1.3):

- 1) Es kann für jede Prozessart und jedes Szenario ein Faktor bestimmt werden, der festlegt, welcher Flächenanteil im Mittel bestrichen wird. Diese Vorgehensweise ist in den bestehenden Berechnungsprogrammen umgesetzt, wobei dem Anwender Richtwerte zur standardisierten Verwendung vorgeschlagen werden.
- 2) Die  $p(\text{rA})$  kann mit Hilfe eines Ereignisbaumes abgeschätzt werden. Diese Variante wird im vorgestellten Ansatz verfolgt, wobei die drei verwendeten Kriterien A bis C in Abbildung 1 dargestellt sind.

Kriterium A im Ereignisbaum ist die gutachterlich festzulegende Anzahl an Sturzkörpern je Ereignis  $N(\text{Fr})$ . Das Kriterium B stellt die Erreichenswahrscheinlichkeit der Teilabschnitte  $p(\text{E})_{\text{TA}}$  (Wahrscheinlichkeit, dass ein betrachteter Teilabschnitt von einem Sturzereignis erreicht wird) dar. Deren Höhe wird aus 3D-Sturzmodellierungen abgeleitet und errechnet sich zu  $p(\text{E})_{\text{TA}} = n(\text{Sk})_{\text{TA}}/N(\text{Sk})$ , wobei  $n(\text{Sk})_{\text{TA}}$  die Anzahl Sturzkörper, welche den jeweiligen Teilabschnitt erreichen, und  $N(\text{Sk})$  die Summe aller modellierten Sturzkörper der betrachteten Prozessquelle ist. Das Kriterium C des Ereignisbaumes berücksichtigt den effektiv vom Ereignis bestrichenen Anteil des Teilabschnittes und wird durch die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit innerhalb eines einzelnen Teilabschnittes  $p(\text{rA})_{\text{TA}} = d_1/l_{\text{TA}}$  beschrieben, wobei  $d_1$  die grösste Kantenlänge des fragmentierten Sturzkörpers und  $l_{\text{TA}}$  die Länge eines Teilabschnittes ist.

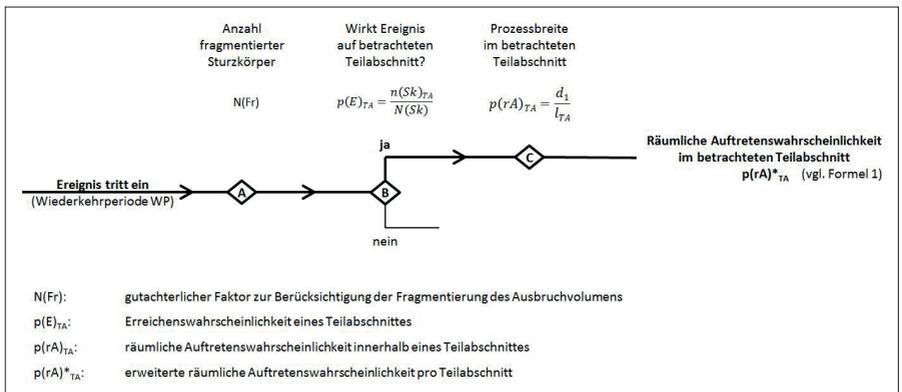


Abbildung 1: Ereignisbaum zur Herleitung der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit  $p(\text{rA})^*_{\text{TA}}$  für Sturzprozesse im Teilabschnitt TA

Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Kriterien errechnet sich die erweiterte räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit für Sturzprozesse pro Teilabschnitt  $p(\text{rA})^*_{\text{TA}}$  folglich zu:

$$p(\text{rA})^*_{\text{TA}} = N(\text{Fr}) \times p(\text{E})_{\text{TA}} \times p(\text{rA})_{\text{TA}}$$

Formel 1: Formel zur Abschätzung der erweiterten räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit  $p(\text{rA})^*_{\text{TA}}$  für Sturzprozesse im Teilabschnitt TA.

$$p(\text{rA})^*_{\text{TA}} = N(\text{Fr}) \times n(\text{Sk})_{\text{TA}}/N(\text{Sk}) \times d_1/l_{\text{TA}}$$

Formel 2: Formel zur Abschätzung der erweiterten räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit  $p(\text{rA})^*_{\text{TA}}$  für Sturzprozesse im Teilabschnitt TA unter Berücksichtigung der Teilfaktoren.

Unter Einbezug der Teilfaktoren ergibt sich:

Mit der Verwendung von  $p(\text{rA})^*_{\text{TA}}$  können Risiken in Anlehnung an die bestehende Methodik differenziert nach Teilabschnitten errechnet werden. Das wahrscheinliche

Schadenausmass für Personen auf Strassen  $A_w(PS)_{TA}$  (vgl. Bründl, 2009, Formel 3.14) errechnet sich neu pro Teilabschnitt und Szenario j zu:

$$A_w(PS)_{TA} = p(rA)^*_{TA} \times \lambda(S)_{TA} \times \beta \times (DTV \times g_j)/v$$

Formel 3: Formel zur Abschätzung des wahrscheinlichen Schadenausmasses für Personen auf Strassen und mechanischen Aufstiegshilfen im Teilabschnitt TA.

wobei  $\lambda(S)_{TA}$  die gemittelte Letalität von Personen im Teilabschnitt in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität,  $\beta$  der durchschnittliche Besetzungsgrad der Strassenfahrzeuge und DTV der durchschnittliche tägliche Verkehr sind. Der Faktor  $g_j$  entspricht der Länge des Teilabschnittes ITA und  $v$  der durchschnittlichen Geschwindigkeit von Fahrzeugen. Der beschriebene Ansatz kann sinngemäss in allen Arbeitsschritten der Risikoberechnung (inkl. Berechnung der Sachrisiken) entsprechend umgesetzt werden.

### RANDBEDINGUNGEN DES FALLBEISPIELS

Als Fallbeispiel wurde ein 750 m langer Strassenabschnitt gewählt, und in 30 Teilabschnitte von 25 Metern Länge unterteilt (vgl. Abbildung 2). Die Sturzgefährdung der Strasse sowie der Verkehrsteilnehmer resultiert aus drei Prozessquellen. PQ1 grenzt unmittelbar bergseits an die Strasse an, wohingegen PQ2 und PQ3 durch einen weitläufigen Transitbereich von der Strasse getrennt sind. Im Fallbeispiel wurden die Blockgrössen gutachterlich und zur Vereinfachung ohne Berücksichtigung einer Fragmentierung (d.h.  $N(Fr) = 1$ ) im Ausbruchsbereich bestimmt (Tabelle 1) und bilden die Grundlage für die 3D-Sturzmodellierungen mit Rockyfor3D (V5.1). Betrachtet werden lediglich die Risiken infolge seltener Ereignisse (WP 30–100 Jahre).

Tabelle 1: Prozessquellen PQ1–3. Die aufgelisteten Werte beziehen sich auf das seltene Ereignis (WP 30–100 Jahre).  $d_1$  = grösste Kantenlänge des fragmentierten Sturzkörpers;  $L$  = Länge des potentiell gefährdeten Strassenabschnittes;  $p(rA)$  = räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit.

Prozessquelle	PQ1	PQ2	PQ3	
$d_1$	2 m	2.4 m	2 m	
$L$	560 m	89 m	69 m	
$p(rA) = c$	0.03	0.03	0.03	(Var. 1: Richtwert gem. EconoMe 3.0)
$p(rA) = d_1/L$	0.004	0.027	0.029	(Var. 2: angepasst gem. EconoMe 3.0)
$\Sigma p(rA)^*_{TA}$	0.052	0.035	0.009	(erweiterte Methodik gemäss Formel 2)

### RESULTATE UND DISKUSSION

In Abbildung 2a sind die drei Prozessquellen, die modellierten Sturzbahnen, der betrachtete Strassenabschnitt sowie dessen potentiell gefährdete Bereiche inklusive der einwirkenden Sturzintensitäten abgebildet. Es zeigt sich die Abhängigkeit der errechneten Sturzverläufe von

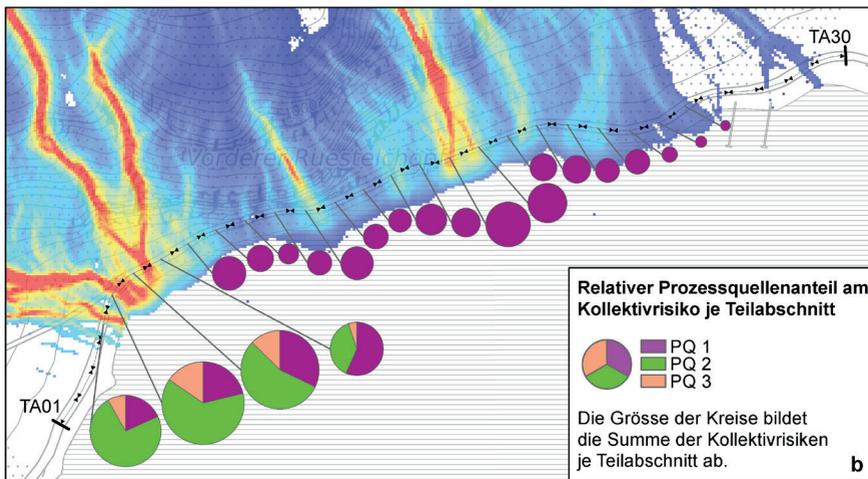
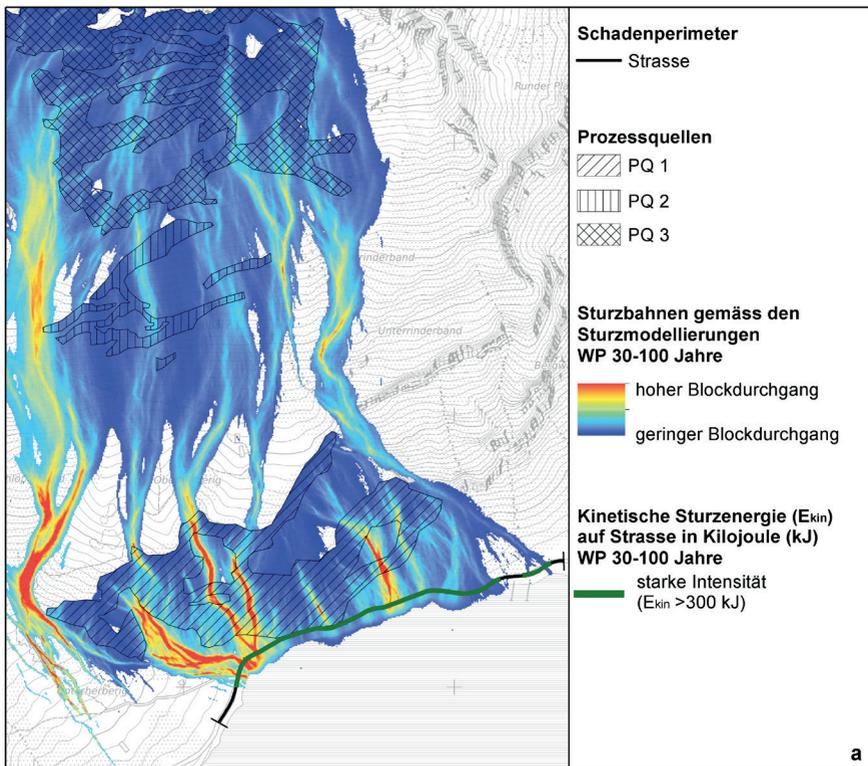


Abbildung 2: Situation im Beispielperimeter für die seltenen Sturzereignisse (WP 30–100 Jahre) inkl. Lage der Prozessquellen, der Sturzbahnen, qualitativer Darstellung der errechneten Risiken je Teilabschnitt und der relativen Prozessquellenanteile je Teilabschnitt.

der jeweiligen Hangmorphologie im Transitbereich (besonders von Mulden, Runsen, Kuppen, etc.). Erwartungsgemäss werden potentielle Sturzkörper in Runsen kanalisiert und es ergeben sich dort die Blockdurchgangsmaxima, wo Kanalisierungs- und Überlagerungseffekte verschiedener Prozessquellen zusammen kommen. Des Weiteren ist ersichtlich, dass in allen potentiell gefährdeten Teilabschnitten mit starken Sturzintensitäten ( $E_{kin} > 300$  Kilojoule) infolge seltener Sturzereignisse gerechnet werden muss.

Nicht dargestellt sind die prozentualen Anteile aller Sturzkörper, welche die Strasse gemäss Modellierung erreichen. Diese wurden für die Prozessquellen PQ1, PQ2 bzw. PQ3 zu 66%, 44% bzw. 20% errechnet, wobei gesamthaft 37% aller Sturzkörper bis auf die Strasse stürzen.

Abbildung 2b stellt die einzelnen 25 m-Abschnitte der Strasse inkl. der mittels erweiterter Methodik errechneten kollektiven Risiken (Personen und Sachrisiken) dar. In den Kreisdiagrammen sind sowohl die Summen je Teilabschnitt als auch die relativen Prozessquellenanteile je Teilabschnitt dargestellt. In den Teilabschnitten mit hohen Blockdurchgängen werden die grössten Risiken errechnet. Sturzkörper aus der Prozessquelle PQ1 wirken flächig auf eine Vielzahl von Teilabschnitten. Demgegenüber wirken die Ereignisse aus den Prozessquellen PQ2 und PQ3 nur auf wenige Teilabschnitte, tragen dort jedoch massgeblich zum hohen Risiko bei und eine Überlagerung der Wirkungsbereiche führt zu deutlichen Risikospitzen. Die Teilabschnitte TA01–TA03, TA26, TA27 und TA30 sind nicht gefährdet. Die einzelnen Prozessquellen tragen 61%, 35% bzw. 4% zum gesamten kollektiven Risiko im Perimeter bei.

Die errechneten Risiken der erweiterten Methodik (Variante 3) werden den Resultate des Standardvorgehens nach EconoMe3.0 gegenübergestellt, wobei für dieses zwei Varianten unter Verwendung der standardisierten  $p(rA)$ -Richtwerte (Variante 1) bzw. mit angepassten  $p(rA)$ -Werten (Variante 2) betrachtet werden (vgl. Tabelle 1).

Die Resultate sind in Abbildung 3 zusammenfassend dargestellt. Die errechneten Risiken der Varianten unterscheiden sich sowohl ihrem Betrag nach als auch bzgl. ihrer Verteilung auf die Teilabschnitte deutlich, wobei die Variante 3 in der Summe die niedrigsten Werte liefert. Hinzu kommt, dass nur die Variante 3 eine realitätsnahe Verteilung auf die Teilabschnitte errechnen kann. In den Varianten 1 und 2 werden die Risiken als Summe über den gesamten Strassenabschnitt errechnet und auf die potentiell gefährdeten Teilabschnitte verteilt. Die Variante 1 errechnet für die PQ1 im Ereignisfall einen bestrichenen Strassenabschnitt von 17 m ( $=560 \text{ m} \cdot 0.03$ ), was der massgebenden Kantenlänge von 2 m widerspricht. Eine standardmässige Verwendung der Richtwerte führt, insbesondere bei langen bestrichenen Strassenabschnitten, zu nicht nachvollziehbar hohen Risikobeiträgen. Dem trägt die Variante 2 Rechnung, indem der  $p(rA)$ -Wert auf Basis der effektiven Kantenlängen hergeleitet wird. In der Folge reduzieren sich die errechneten Risiken um den Faktor 4 (Abbildung 3). Die Variante 3 berücksichtigt mittels der Modellierungen als einzige die morphologischen Charakteristika des Transitbereiches umfassend. Dies führt zu einer differenzierten Risikover-

teilung innerhalb des gesamten betrachteten Strassenabschnittes. Ausserdem wird der Anteil der oberhalb der Strasse abgelagerten Blöcke quantitativ abgeschätzt. Es fällt auf, dass die Risikodifferenz zwischen Varianten 2 und 3 (57%) in etwa dem in den Modellierungen errechneten Anteil an abgelagerten Sturzkörpern (63%) entspricht.

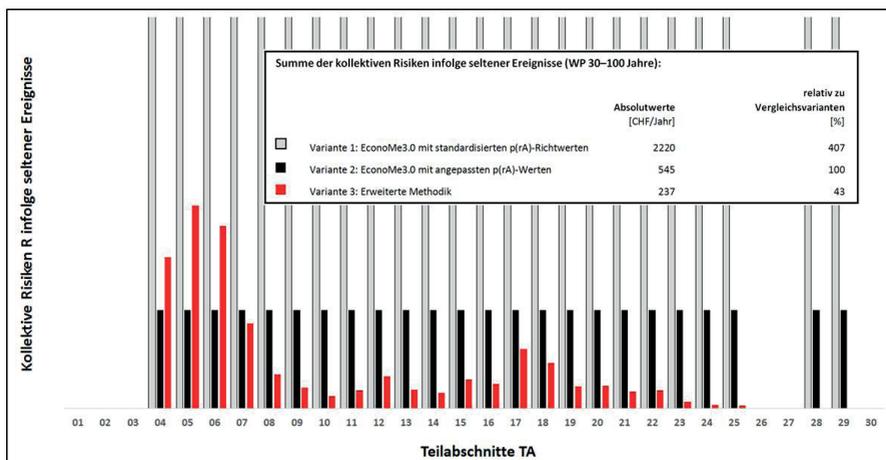


Abbildung 3: Kollektives Risiko in den Teilabschnitten infolge seltener Sturzereignisse (WP 30–100 Jahre) abhängig von der Berechnungsmethodik bzw. den jeweiligen Eingabeparametern.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die hier vorgestellte Methodenerweiterung eignet sich besonders zur Analyse einer Sturzgefährdung auf ein linienförmiges Schadenobjekt. Die bestehende Methodik nach EconoMe zur Abschätzung und Darstellung von Risiken kann im Grundsatz beibehalten werden. Vorsicht ist bei der standardisierten Verwendung von p(rA)-Richtwerten geboten (Variante 1), deren Plausibilität in jedem Fall zu prüfen ist.

Über den gesamten Perimeter liefert die Risikoabschätzung mit angepassten p(rA)-Werten (Variante 2) mit nur geringem Zusatzaufwand plausible Risikowerte. Hinsichtlich der Massnahmenplanung auf dieser Grundlage ist eine gutachterliche Priorisierung der zu schützenden Teilabschnitte notwendig. Die erweiterte Methodik (Variante 3) liefert teilabschnittsscharfe Risikowerte und nutzt unter Umständen bereits vorhandene Daten aus 3D-Modellierungen. Die Resultate liefern eine gute Datengrundlage zur Priorisierung und Optimierung allfälliger Schutzmassnahmen innerhalb eines Projektperimeters nach den Kriterien vorgängig definierter Projektziele. Unter Voraussetzung robuster Grundlagen können mit dem vorgestellten Ansatz Kanalisierungs-, Überlagerungs- und Ablagerungseffekte ortsspezifischer Eigenschaften des Geländes quantitativ erfasst und daraus resultierende Risikospitzen im Hinblick auf eine risikobasierte Massnahmenplanung aufgezeigt werden.

Dies führt idealerweise zu einer verbesserten Nutzen-Kosten-Effizienz, wodurch der entstandene Mehraufwand während der Projektbearbeitung gerechtfertigt werden kann. Unsicherheiten der notwendigen Grundlagendaten (z.B. bei der Beurteilung der relevanten Naturgefahrenszenarien) reduzieren die Qualität der Resultate und können durch eine gewissenhafte Ausführung / Dokumentation sowie durch eine Plausibilisierung der Felddaten minimiert werden. Dies betrifft insbesondere die Festlegung von Anzahl und Grösse der Prozessquellen in Kombination mit den jeweiligen Szenarien, wodurch der Projektperimeter hinsichtlich der Steinschlagaktivität beschrieben wird.

### DANKSAGUNG

Vielen Dank an Klaus Louis, der die Ausarbeitung des vorliegenden Artikels ermöglichte sowie an Conradin Zahno für seine Unterstützung. Ausserdem an Patrizia Köppli und Raphael Zurfluh für ihre fachlichen Beiträge und an Michael Bründl für die aufschlussreiche Diskussion zum bestehenden Risikokzept.

### LITERATUR

- Bundesamt für Umwelt BAFU, 2015. Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren. Online Tool. [www.econome.admin.ch](http://www.econome.admin.ch).
- Bundesamt für Strassen ASTRA (Ed.), 2012. Naturgefahren auf den Nationalstrassen: Risikokzept. Version V2.10 vom 19.12.2013. Dokumentation. 95 S.
- Bundesamt für Strassen ASTRA, 2015. Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren. Online Tool. [www.roadrisk.admin.ch](http://www.roadrisk.admin.ch).
- Bründl, M. (Ed.), 2009. Projekt A1.1 Risikokzept für Naturgefahren: Leitfaden. 420 S.
- Bründl, M., 2015. Umsetzung des Risikokzept in die Praxis. FAN Agenda 2015(2): 15–16.
- Bründl, M., Romang, H.E., Bischof, N., Rheinberger, C.M., 2009. The risk concept and its application in natural hazard risk management in Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9: 801–813.
- Bründl, M., Ettlin, L., Burkard, A., Oggier, N., Dolf, F. und Gutwein, P., 2015. EconoMe – Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren: Formelsammlung. 56 S.